

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE
SPECIALITE : INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANQUES

THEME

Etude et contrôle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme Aérogénérateur

Proposé et dirigé par :

M^{me}. BELOUNIS Ouassila

Dr . MESSALTI Sabir

Présenté par :

Mr. DJAFER Mohamed

Année Universitaire : 2013 / 2014

N⁰ d'ordre :ISE-109

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui ont passés leur vie rêvant de voir ce jour-ci, à ceux qui m'ont entourés d'amour et tendresse
.,*

À la fleur de ma vie ma très chère mère en témoignage de ma profonde et ma grande reconnaissance pour sa tendresse, sa patience, son sacrifice tout au long de mes études.

Mon honorable et très cher père, ma sœur et mon frère qui a sacrifié sa vie qu'on puisse se trouver à ce niveau et qui m'a été source de réussite.

Je remercie également tous mes très chers amis.

Aux étudiants du Génie Electrique et toute la promotion 2014



REMERCIEMENT

A l'issue de cette fin de travail j'adresse mes remerciements premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années d'études.

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mes encadreurs **M^{me}.BELOUNIS Ouassila** et **Dr. MESSALTI Sabir** pour avoir proposer et diriger ce modeste travail et pour leurs continuel suivi et continu tout au long de la réalisation et la correction de ce mémoire avec un excellent exemple de la compétence scientifique, discipline et générosité.

Je remercie également tous les membres de jury d'avoir accepter de juger mon travail.

Je tiens à remercier vivement toutes personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à accomplir ce travail.



TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOTATION

INTRODUCTION GENERALE	1
I .LES SYSTEMES EOLIENS.....	4
I.1.Introduction	4
I.2.La production éolienne	4
I.3.Principe de fonctionnement d'une éolienne	4
I.4.La chaîne de transformation énergétique	5
I.4.1.La transformation de l'énergie par les pales.....	5
I.4.2.L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur	5
I.4.3.La production d'électricité par le générateur	5
I.4.4.Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur	5
I.5.Choix de type d'éoliennes.....	5
I.6.avantages et inconvénient de l'énergie éolienne	6
I.6.1.Avantages	6
I.6.2.Inconvénients.....	7
I.7.Classification des éoliennes.....	7
I.7.1.Différents types d'éolienne	7
I.7.1.1. Les éoliennes à axe vertical	7
I.7.1.1.1. Les types d'éoliennes à axe vertical	8
I.7.1.1.1. a. Rotor de Darrieus.....	8
I.7.1.1.1. b. Rotor de Savonius	9
I.7.1.1.2. Les avantages et Les inconvénients d'éolienne à axe vertical	9
I.7.1.2. Eoliennes à axe horizontal.....	9
I.7.1.2.1. Les types d'éoliennes à axe horizontal.....	10
I.7.1.2.1.a. Eoliennes lentes	10
I.7.1.2.1.b. Eoliennes rapides (Aérogénérateurs).....	10
I.7.2.Le mode de fonctionnement	11
I.7.2.1. Fonctionnement à vitesse fixe	11
I.7.2.2.Fonctionnement à vitesse variable.....	12
I.7.3. Les types des Machines électriques utilisé en vitesse variable	13
I.7.3.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone	13
I.7.3.1.1. Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (GACE)	13
I.7.3.1.2. Générateur asynchrone à double stator	13
I.7.3.1.3. MACE connectée au réseau avec une interface d'électronique de puissance	14
I.7.3.1.4. Systèmes utilisant MADA type "rotor bobiné"	14

I.7.3.2. Systèmes utilisant la machine synchrone	15
I.7.3.3. Autres Architectures	15
I.8. Principaux composants d'une éolienne	16
I.8.1. Le mât	16
I.8.2. La nacelle	16
I.8.3. Une armoire de commande	17
I.8.4. Le rotor	17
I.9. Modèle de la turbine	17
I.9.1. Coefficient de puissance	18
I.9.1.1. Lois de betz	18
I.9.1.2. Modèle du multiplicateur	21
I.9.1.3. Modèle de l'arbre	21
I.9.1.4. Modèle de l'actionneur des pales	22
I.9.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :	22
I.10. Résultats de simulation	23
I.11. Interprétations des résultats	24
I.12. CONCLUSION	24
II. MODELISATION DE LA GADA	26
II.1. Introduction	27
II.2. Structure de la machine	27
II.3. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	28
II.4. Modes de fonctionnement de la machine à double alimentation	28
II.5. Les différentes structures d'alimentation de la MADA	29
II.5.1. MADA à énergie rotorique dissipée	29
II.5.2. MADA : structure de Kramer	30
II.5.3. MADA avec cycloconvertisseur	30
II.5.4. MADA « structure de Scherbius avec convertisseurs MLI »	31
II.6. Les avantages et les inconvénients de la MADA	32
II.6.1. Les avantages	32
II.6.2. Les inconvénients	32
II.7. Modélisation de la GADA	32
II.7.1. Hypothèses simplificatrices	32
II.7.2. Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel généralisé Description	33
II.7.2.1. Equation électrique	33
II.7.2.2. Équations magnétiques	34
II.7.2.3. La transformée de Park	34
II.7.3. Modèle de GADA dans le référentiel (d,q)	36
II.7.3.1. Equations électriques	36
II.7.3.2. Les équations magnétiques	36
II.7.3.3. L'équation mécanique	37
II.7.3.4. Les puissances actives et réactives	37

II.7.3.5.Equation d'état	37
II.8.Résultats de simulation numérique du système	38
II.8.1. Résultats de simulation fonctionnement moteur (MADA)	38
II.8.1.1. Interprétation des résultats	41
II.8.2. Résultats de simulation fonctionnement générateur (GADA)	41
II.8.2.1. Interprétations des résultats	45
II.9.Conclusion	45
III .LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA	46
III.1.Introduction.....	47
III.2.Le principe de la commande vectorielle de la GADA.....	47
III.3.Etablissement du modèle de la GADA	48
III.4.Choix du référentiel pour le modèle diphasé	48
III.4.1.Suivant l'orientation du repère	48
III.4.2.Commande vectorielle directe	52
III.4.3.Commande vectorielle indirecte	53
III.4.3.1. Commande en boucle ouverte	53
III.4.3.2. Commande en boucle fermée	54
III.5 Résultats de simulation	55
III.5.1 Résultats de Simulation du système avec turbine	56
III.5.2 Interprétation des résultats	58
III.6 Modélisation des Convertisseurs statiques	58
III.6.1.Modélisation Onduleur de tension.....	58
III.6.2.Modélisation du redresseur	60
III.6.3. Résultats de simulation	62
III.6.4 Interprétation des résultats	64
III.7. Conclusion	64
IV.L'INTEGRATION ENERGIE EOLIENNE DANS LE RESEAU ELECTRIQUE.....	66
IV.1. Introduction.....	67
IV.2.Le réseau électrique	67
IV.3.Le rôle des réseau électrique	68
IV.4.Notion de qualité d'énergie.....	68
IV.5.Fermes éoliennes.....	69
IV.6.L'intégration d'un système éolien au réseau électrique.....	69
IV .7.Stabilité des réseaux.....	70
IV.7.1.l'écroulement de tension	70
IV.7.2. l'écroulement de fréquence	71
IV .8.Choix de réglage de tension	72
IV .8.1. Le type de source de production	72
IV .8.2. Le type de machine utilisé	72
IV .8.3.Le point de connexion	73
IV .9.Contrôle de la fréquence	73

IV .10. Contrôle de la tension à travers le contrôle de la puissance réactive	74
IV.11. Résultats de simulation	75
IV.12.Conclusion	76
CONCLUSION GENERALE	78
Annexe A : Paramètres du système éolien.....	80
Annexe B : Synthèse du régulateur Proportionnel – intégral	81
Références bibliographiques.....	83

TABLE DES FIGURE

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	4
Figure I.2 : Correspondance taille-puissance des éoliennes	6
Figure I.3 : Les éoliennes à axe vertical	8
Figure I.4 : Eoliennes à axe vertical à Rotor de Darrieus	8
Figure I.5 : Eoliennes à axe vertical à Rotor de Savonius	9
Figure I.6 : Eoliennes à axe horizontal	10
Figure I.7 : Configuration à axe horizontal	11
Figure I.8: Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil	13
Figure I.9: Générateur asynchrone à double stator	13
Figure I.10: Connexion indirecte d'une machine asynchrone réseau	14
Figure I.11: Générateur asynchrone connectée au réseau par deux onduleurs	14
Figure I.12: schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor	15
Figure I.13: système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable	15
Figure I.14 : principaux composants d'une éolienne	16
Figure I.15: schéma de la turbine éolienne	18
Figure I.16 :Lois de betz	18
Figure I.17: Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateur	20
Figure I.18:Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple	20
Figure I.19: Caractéristique puissance/vitesse de vent d'une éolienne classique	22
Figure I.20 : Modèle simplifié de la turbine	23
Figure I.21 : Profile du vent appliqué à la turbine.	23
Figure I.22 : la vitesse mécanique et la puissance produit.	23
Figure I.23 : Le coefficient de puissance et La vitesse spécifique	24
Figure II.1 : principe du rotor bobiné	27
Figure II.2 :Modes de fonctionnement de la machine à double alimentation	29
Figure II.3: MADA avec contrôle du glissement par L'énergie dissipée	29
Figure II.4: MADA, structure Kramer	30
Figure II.5 :Structure de Scherbius avec Cycloconvertisseur	31
Figure II.6 : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	31
Figure II.7 : Modèle de PARK de la MADA	35
Figure II.8 :Vitesse mécanique et couple électromagnétique.....	39
Figure II.9 :Courant statorique et rotorique de phase (Isa et Ira)(A)	39
Figure II.10 :Les composantes du courant statoriques	39
Figure II.11 : Les composantes du courant rotoriques	40
Figure II.12 : Les composantes du flux statorique	40
Figure II.13 : Les composantes du flux statorique	40
Figure II.14: Courant statorique et rotorique de GADA (d , q)	41
Figure II.15 : Les courants statoriques et rotoriques triphasées	42
Figure II.16: Flux statorique et rotorique de GADA (d , q)	42
Figure II.17: Puissance statorique (P_s, Q_s) et Puissance rotorique (P_r, Q_r)	43
Figure II.18: Courant statorique et rotorique de GADA (d , q)	43
Figure II.19: Les courants statoriques et rotoriques triphasées	43

TABLE DES FIGURES

Figure II.20: Flux statorique et rotorique de GADA (d, q)	44
Figure II.21: Puissance statorique (P_s, Q_s) et Puissance rotorique (P_r, Q_r)	44
Figure III.1 : Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA.	48
Figure. III.2: Bloc de contrôle à flux orienté.	50
Figure III.3: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.	52
Figure. III.4: schéma bloc de la commande directe.....	53
Figure III.5 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte	54
Figure III.6 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée	54
Figure III.7 : La puissance active et réactive statorique et sont reference avec boucle de puissance.	55
Figure III.8 : Le flux statorique selon l'axe d et q avec boucle de puissance.	55
Figure III.9 : Le courant statorique et rotorique selon l'axe d et q avec boucle de puissance.	56
Figure III.10 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.	56
Figure III.11 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les différents instants.	57
Figure III.12 : La puissance active et réactive et flux statorique.	57
Figure III.13 : Structure de la cascade du redresseur du courant à MLI à deux niveaux-Onduleurs de tension à deux niveaux –MADA.	58
Figure III.14 : Onduleur de tension	58
Figure III.15 : Structure du redresseur à MLI.	60
Figure III.16: Schéma fonctionnel du redresseur à MLI	62
Figure III.17 : La puissance active et réactive statorique	62
Figure III.18 : Les composantes du courant rotoriques.	63
Figure III.19 : Les composantes du courant statoriques	63
Figure III.20 : Le courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.	63
Figure III.21 : Le courant rotoriques avec un zoom entre les différents instants.	64
Figure IV.1 : Schéma d'un réseau électrique incorporant de l'énergie renouvelable	67
Figure IV.2 : Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions Alternatives	69
Figure IV.3: Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions continues	69
Figure IV.4 : Configuration de la GADA couplée sur un réseau électrique	70
Figure IV.5 : L'écroulement de tension	70
Figure IV.6 : L'écroulement de la fréquence	71
Figure IV.7: Evolution de la fréquence en fonction du niveau de production / consommation.	72
Figure IV.8: Réglage primaire de fréquence – exemple de droite de statisme	73
Figure IV. 9 : Réseau mono-machine alimentant une charge par une ligne de transport.	74
Figure. IV.10 : Diagramme de Fresnel correspondant à une ligne de puissance.	74
Figure IV.11 : Ferme éolienne connecte au réseau mono-machine alimentant une charge.	75
Figure IV. 12 : Evolution de la tension du système et la puissance réactive échangée avec le réseau	76
Figure 2.1 Système régulé par un régulateur proportionnel intégral	81
Figure 2.2 Schéma de la régulation des courants rotorique	82
Figure 2.3 Schéma de la régulation des puissances statoriques.....	82

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux I.1 : Classification des turbine éoliennes.....	6
Tableau IV.1: Plages de variation de la tension du réseau de transport et de répartition.....	71

GLOSSAIRE

CCM : Convertisseur Coté MADA

CCR : Convertisseur Coté Réseau

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation

GADA : Générateur Asynchrone à Double Alimentation

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

MPPT : Maximum Power Point Tracking

PI : Proportionnel Intégral

NOTATION

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation

GADA : Générateur Asynchrone à Double Alimentation

MAS : Machine Asynchrone

MLI : Modulation de largeur d'impulsion

J_t : Le moment d'inertie de la turbine ;

J_g : Le moment d'inertie du générateur ;

f_v : Le coefficient dû aux frottements visqueux du générateur ;

C_t : Le couple mécanique sur l'axe de la turbine ;

C_g : Le couple mécanique sur l'Arbre du générateur ;

Ω_{mec} : La vitesse de rotation du générateur ;

Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine ;

λ : La vitesse spécifique donné par $\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{V}$

V : La vitesse du vent .

ρ : La masse volumique de l'air ($\rho \approx 1.225 \text{ Kg/m}^3$)

R : Le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

C_p : Le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine.

G : Le rapport du multiplicateur de vitesse.

Ω_g : La vitesse de rotation du générateur (axe rapide).

g : Le glissement

ω_{gl} : La vitesse angulaire de glissement.

ω_s : Vitesse Angulaire

ω_r : Le rotor tourne avec la vitesse

C_{em} : Le couple électromagnétique ;

C_r : Le couple résistant ;

f : Le coefficient de frottement visqueux de la GADA.

j : L'inertie des parties tournantes ;

Ω : La vitesse de rotation de l'axe de la GADA.

f_r : Fréquence des grandeurs rotorique

f_s : Fréquence des grandeurs statorique

ω_r : Pulsations des grandeurs électriques rotoriques.

ω_s : Pulsations des grandeurs électriques statoriques.

d, q : Indice des composantes orthogonales directs et en quadrature

$[R_s]$: Matrice résistance statorique.

$[l_s]$: Inductance propre d'une phase statorique.

$[l_r]$: Inductance propre d'une phase rotorique ;

$[M_s]$: Inductance mutuelle entre phases statoriques ;

$[M_r]$: Inductance mutuelle entre phase statoriques.

NOTATION

$\Phi_{abc(S)}$: Vecteur flux total statorique.

$V_{abc(S)}$: Vecteur tension statorique applique aux trois phases.

$I_{abc(S)}$: Vecteur courant traversant les enroulements statorique.

φ_{sq} , φ_{sd} : Les flux statoriques direct et en quadrature

φ_{rq} , φ_{rd} : Les flux rotoriques direct et en quadrature

C_T et C_g : Le couple éolien et le couple électromagnétique.

J_T et J_g : L'inertie de la turbine et celle du générateur.

f_T et f_g : Le coefficient des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Avec la crise mondiale marquée par la hausse du prix du pétrole, nous constatons l'émergence des énergies renouvelables qui se caractérisent par leur stock inépuisable et durable. Elles sont propres et ont un faible impact sur l'environnement d'où leur succès grandissant dans l'opinion publique, chez les investisseurs et les pouvoirs publics.

la source principale de ce type d'énergie est le soleil. Cette énergie est captée dans sa forme primaire à travers les cellules photovoltaïques ou thermo solaires. Elle peut être également transformée par la nature en courants marins à l'origine de l'énergie hydrolienne (énergie des vagues) ou en mouvement de masse d'air à l'origine de l'énergie éolienne (énergie du vent). Cette dernière offre des bénéfices certains pour la communauté, son prix peut être maîtrisable sans faire l'objet de spéculation sur le marché. Le développement de son industrie a pour effet d'absorber une main d'œuvre nombreuse et variée.

Ce type d'énergie procure l'avantage de ne pas être centralisé mais d'être disponible là où a lieu la demande. En effet, l'éloignement engendre des pertes considérables à travers les câblages dont l'investissement se caractérise par des coûts très importants. Aujourd'hui, le transport classique de l'électricité est remis en question grâce à la disponibilité et la démocratisation des éoliennes et donc une décentralisation de la production.

Compte tenu de ces arguments, de la grande superficie et du fort potentiel Algérien relatif au gisement éolien, nous avons choisi de traiter le processus de production de ce type d'énergie.

Les premières machines électriques qui furent utilisées dans le domaine éolien étaient les machines asynchrones. En effet, celles-ci présentent plusieurs avantages tels que leur moindre coût, leur robustesse et leur entretien réduit.

Organisation du mémoire:

Ce mémoire est constitué d'une introduction générale, quatre chapitres, une conclusion générale.

Le premier chapitre fait l'objet de généralités sur le système l'éolien qui donne un aperçu sur les différents types d'éoliennes (à l'axe vertical, horizontal), leurs caractéristiques technologiques, leurs systèmes de régulation et de protection, ainsi que les différents types de génératrices utilisées dans l'éolien ont été présentés et modélisation et la stratégie de commande appliquée sur la turbine d'éolienne.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la chaîne de conversion électromécanique du système éolien basé sur une MADA. Ensuite, nous développerons la modélisation d'un système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation.

Le troisième chapitre sera consacré à la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par une vitesse Fixe et

a vitesse variable.

Le quatrième chapitre, présente l'intégration des l'éoliennes dans les réseaux électriques.

Finalement, on terminera ce mémoire par une conclusion générale .

CHAPITRE I :

GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS

I.LES SYSTEMES EOLIENS

I.1. Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

I.2. La production éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps été oublié, cette énergie pour tant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 30 ans un développement sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers [01].

I.3. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Pour convertir l'énergie disponible dans le vent en énergie électrique, les turbines éoliennes doivent être composées d'une partie mécanique et d'une partie électrique. La partie mécanique sert à capter l'énergie cinétique disponible dans le vent et à la transformer en énergie mécanique rotative. Cette dernière est transmise via un système d'entraînement, habituellement composé d'une boîte de vitesse, à une génératrice électrique. La conversion d'énergie mécanique en énergie électrique est effectuée via la génératrice électrique [03].

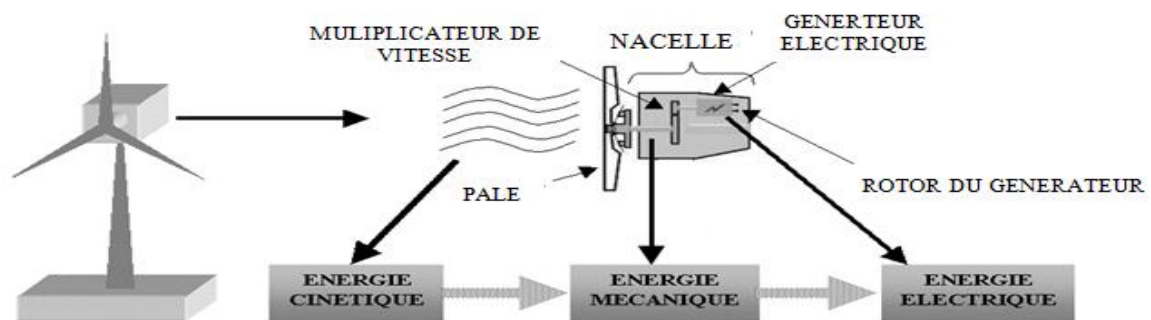


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.4. La chaîne de transformation énergétique :

Une éolienne transforme l'énergie du vent en énergie électrique. Cette transformation se fait en plusieurs étapes :

I.4.1. La transformation de l'énergie par les pales :

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion:

La différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

I.4.2. L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur :

Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. Certains types d'éoliennes n'en sont pas équipés, leur générateur est alors beaucoup plus gros et beaucoup plus lourd.

I.4.3. La production d'électricité par le générateur :

L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité.

I.4.4. Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur :

Cette électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est augmentée à 20 000 Volts par un transformateur. L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique, puis distribuée aux consommateurs les plus proches [18].

I.5. Choix de type d'éoliennes :

Aujourd'hui, la plupart des éoliennes commerciales raccordées au réseau actuelles sont à axe horizontal, car elles présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au sol. Le nombre de pales varie de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu, car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. D'ailleurs dans la suite de ce mémoire ne seront étudiées que les éoliennes à axe horizontal [09].

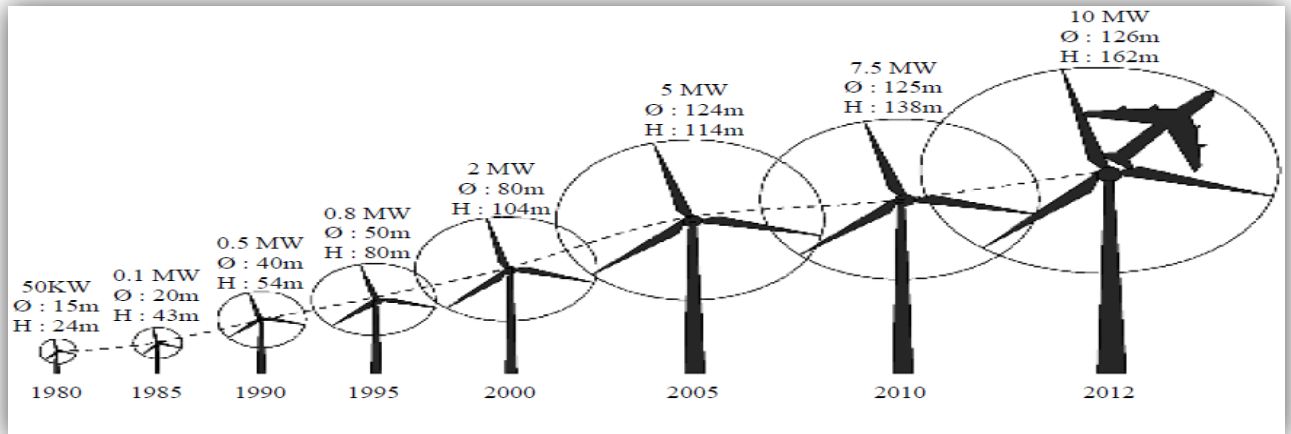


Figure I.2 : Correspondance taille-puissance des éoliennes [09]

ECHELLE	DIMÈTRE DE L'HÉLICE	PUISSANCE DELIVRÉE
PETITE	moins de 12 m	moins de 40 kw
MOYENNE	12 m à 45 m	De 40 kw à 1 Mw
GRANDE	46 m et plus	1 Mw et plus

Tableaux I.1 : Classification des turbines éoliennes [10]

I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :[13],[14],[16],[17],[19].

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

I.6.1. Avantages :

- l'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO₂.
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

I.6.2. Inconvénients :

- la nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- Le bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des multiplicateurs.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines .
- Lorsque la production dépasse la consommation, le stockage est encore onéreux, mais en cas de raccordement de l'éolienne au réseau électrique, le stockage n'est pas nécessaire.

I.7. Classification des éoliennes :

On peut classer les générateurs éoliens selon les différents critères. Ces derniers peuvent alors se classer selon.

- Le type du capteur (à axe horizontal ou vertical).
- Le mode de fonctionnement (vitesse fixe ou variable).
- La nature du convertisseur électromécanique (machine asynchrone, synchrone, à courant continu, etc....).

I.7.1. Différents types d'éolienne :

L'organe capteur transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique afin de réaliser la conversion électromécanique tant que le mouvement est rotatif, les capteurs alors seront classés selon deux catégories, [10] :

- ♦ Capteurs à axe horizontal.
- ♦ Capteurs à axe vertical.

I.7.1.1. Les éoliennes à axe vertical :

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et

génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance.

En revanche , certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [10].



Figure I.3 : Les éoliennes à axe vertical [10]

I.7.1.1.1. Les type d'éoliennes à axe vertical :

I.7.1.1.1. a. Rotor de Darrieus:

Est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée.

Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet [15].

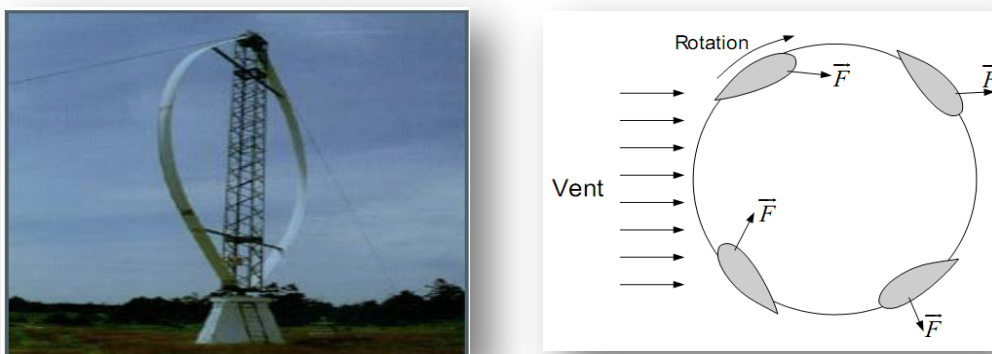


Figure I.4 : Eoliennes à axe vertical à Rotor de Darrieus

I.7.1.1.1.b. Rotor de Savonius:

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure [25].

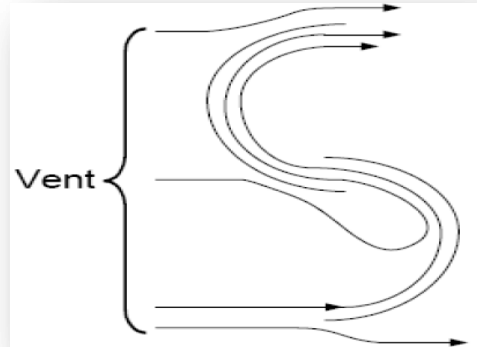


Figure I.5 : Eoliennes à axe vertical à Rotor de Savonius

I.7.1.1.2. Les avantages et les inconvénients d'éolienne à axe vertical : [25],[14],[07],[15].

✚ Les avantages :

- Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction.
- Construction souvent simple .
- Faible bruit .

✚ Les inconvénients :

Les inconvénients principaux d'une éolienne axe vertical sont :

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance .
- Faible vitesse du vent à proximité du sol .
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement (Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s).

I.7.1.2. Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal, plus largement employées, nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3.

Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important [11]. Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent [25].



Figure I.6 : Eoliennes à axe horizontal [10]

I.7.1.2.1. Les types d'éoliennes à axe horizontal :

I.7.1.2.1.a. Eoliennes lentes :

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multi pales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau [24].

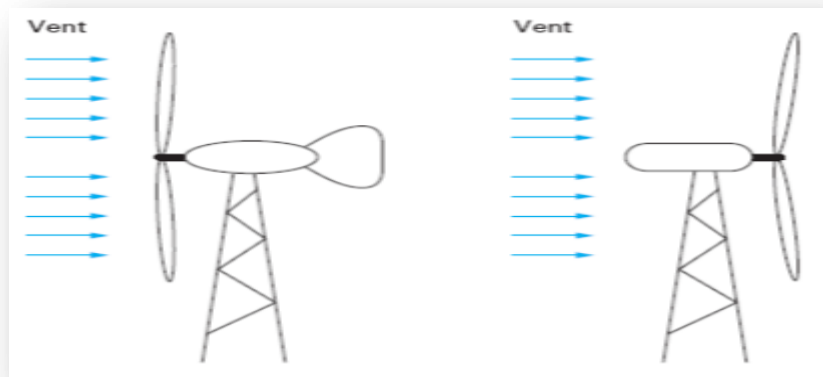
I.7.1.2.1.b. Eoliennes rapides (Aérogénérateurs) :

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible [24].

Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « hélice au vent » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent ».

- ✚ **Amont** : Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- ✚ **Aval** : Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable.

La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction [23].



Eolienne Amont

Eolienne Aval

Figure I.7 : Configuration à axe horizontal

I.7.2.Le mode de fonctionnement :

I.7.2.1.Fonctionnement à vitesse fixe :

Les premières éoliennes commercialisées reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique. Un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse qui est maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales. Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage [25].

✚ **Avantage et Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe** : [14]

❖ **Avantage** :

- Système électrique plus simple.
- Moins cher.
- Pas besoin de système électronique.
- Plus fiable (moins d'entretien).

❖ Inconvénients :

- L'énergie captée n'est pas forcément optimale.
- Difficulté de contrôler la puissance transitée au réseau.
- Présence des efforts et oscillations du couple dans le train de puissance.

I.7.2.2.Fonctionnement à vitesse variable :

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent. À partir de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si la génératrice est entraînée à une vitesse fixe les maximums théoriques des courbes de puissance ne seraient pas exploités. Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en termes de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent [25].

✚ Avantages et inconvénients : [14]

❖ Avantages :

- Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.
- Réduction des contraintes mécaniques subites par le train de puissance. Les turbulences et rafales de vent peuvent être absorbées, l'énergie absorbée du vent est donc emmagasinée dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant ainsi les oscillations de couple.
- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- Ce type de machines offre une constante de temps plus grande du système de contrôle de l'angle de calage, ce qui réduit sa complexité.
- Réduction des bruits acoustiques.

❖ Inconvénients :

- Utilisation de machines spéciales.
- Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande,...).
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.
- Gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne.

I.7.3. La nature du convertisseur électromécanique :

I.7.3.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone :

I.7.3.1.1. Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (GACE) :

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau.[10]

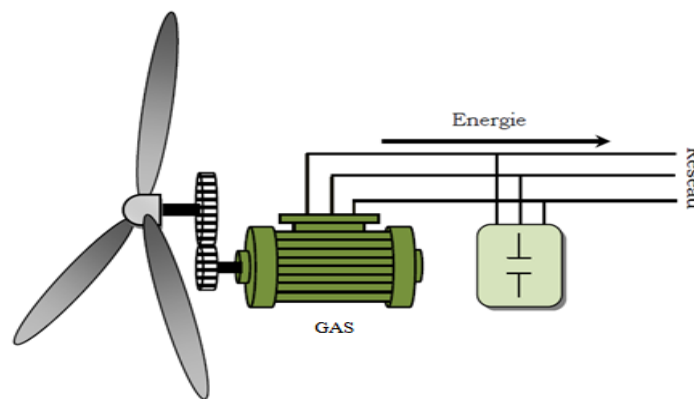


Figure I.8: Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil [28].

I.7.3.1.2. Générateur asynchrone à double stator :

Cas deux enroulements statoriques , l'un conçu pour les faibles vitesses du vent à grand nombre pair de pôles et l'autre pour les fortes vitesses du vent à petit nombre pair de pôles. Donc le système fonctionne à une vitesse de rotation fixe avec deux points de fonctionnement tout en réduisant le bruit causé par l'orientation de l'angle de calage .Mais l'inconvénient majeur de système est la présence d'un second bobinage statorique qui rend la sa conception difficile ainsi que son cout de revient est trop important.[04]

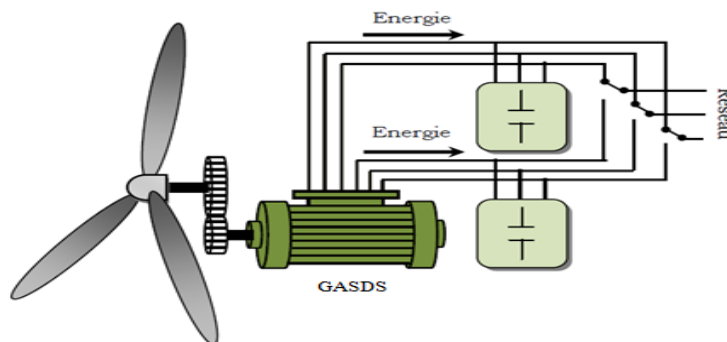


Figure I.9: Générateur asynchrone à double stator [28].

I.7.3.1.3. machine asynchrone connectée au réseau avec une interface d'électronique de puissance :

Le système permet un fonctionnement à vitesse variable , quelle que soit la vitesse du vent on aura une tension à fréquence fixe ,en effet la tension produite sera redressée et transformée en tension continue, Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire.[04]

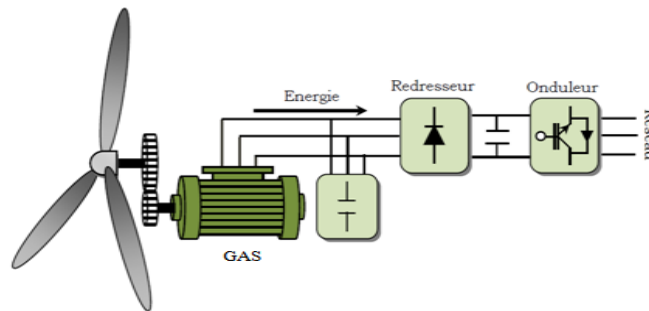


Figure I.10: Connexion indirecte d'une machine asynchrone réseau [28].

Elle est constituée par un rotor à cage et par deux bobinages triphasés indépendants dans le stator .Un des bobinages du stator, appelé Bobinage de Puissance (BP), est directement relié au réseau, tandis que l'autre, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine appelé Bobinage de Commande (BC), est alimenté par un convertisseur bidirectionnel. [04]

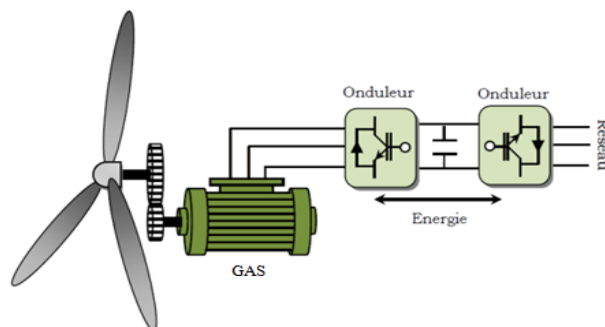


Figure I.11: Générateur asynchrone connectée au réseau par deux onduleurs [28].

I.7.3.1.4. Systèmes utilisant Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné" :

La machine asynchrone à double alimentation est un générateur à induction. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé. Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution [28].

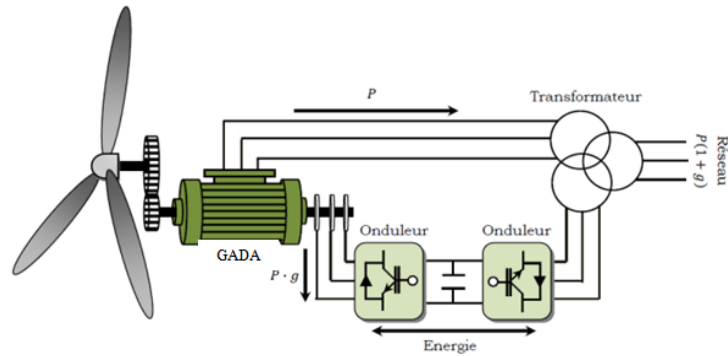


Figure I.12: schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor [28].

I.7.3.2. Systèmes utilisant la machine synchrone :

Les génératrices synchrones utilisées dans le domaine éolien sont plus chères que les génératrices à induction de même taille.

Ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance [28].

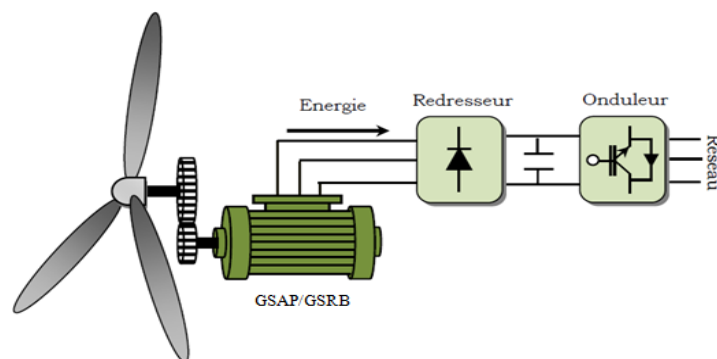


Figure I.13: système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable [28].

I.7.3. 3. Autres Architectures :

On observe actuellement l'émergence d'architectures particulières qui dérivent des génératrices classiques (synchrones ou asynchrones). Parmi ces nouvelles architectures, on pourra citer la génératrice asynchrone à double alimentation en cascade, la génératrice asynchrone à cage à double alimentation statorique , génératrice asynchrone a double alimentation en cascade avec l'un de deux machines à double étoile, la génératrice synchrone à aimants permanents discoïdes et la génératrice à réluctance variable [28].

I.8. principaux composants d'une éolienne :

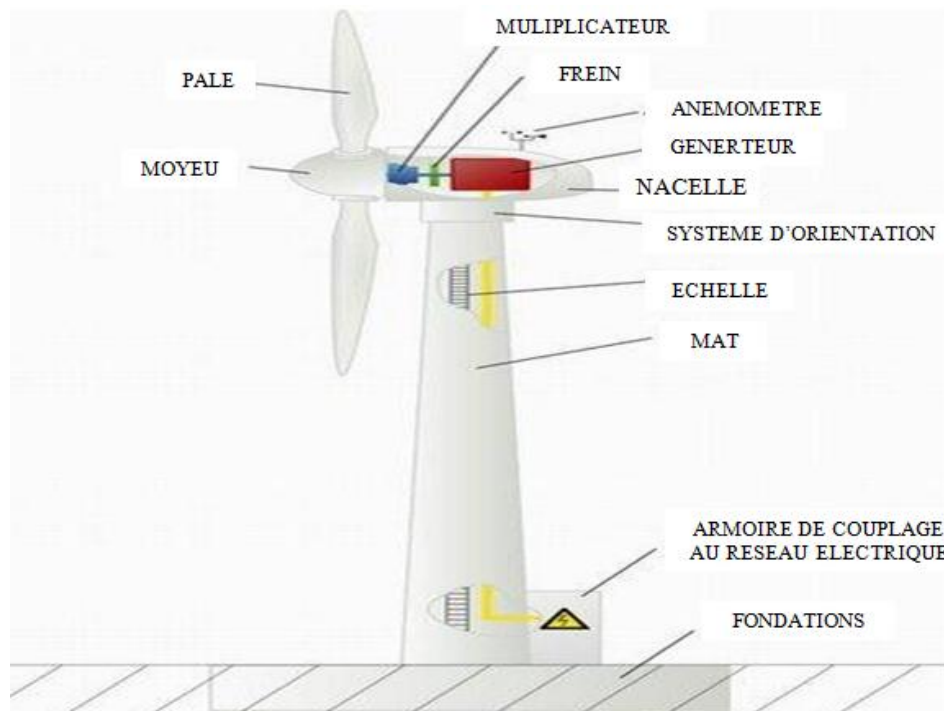


Figure I.14 : principaux composants d'une éolienne

I.8.1. Le mât :

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur)[26].

I.8.2. La nacelle :

Regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande [22].

✚ Un multiplicateur:

Adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique, Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne [25].

✚ Le système de refroidissement:

Comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau [22].

La génératrice (ou l'alternateur):

Pour transformée l'énergie mécanique en énergie électrique.

Anémomètre:

Sont utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne pour démarrer l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5 m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25 m/s afin d'assurer la protection de l'éolienne [22].

Le système de contrôle-commande :

Comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (par exemple une surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique [22].

I.8.3. Une armoire de commande :

Comportant tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle [22].

I.8.4. Le rotor :

formé par les pales assemblées dans leur moyeu [20]. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, le bruit [24].

I.9. Modèle de la turbine :

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent de l'environnement [21].

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. A partir de relevés réalisés sur une éolienne [21] .

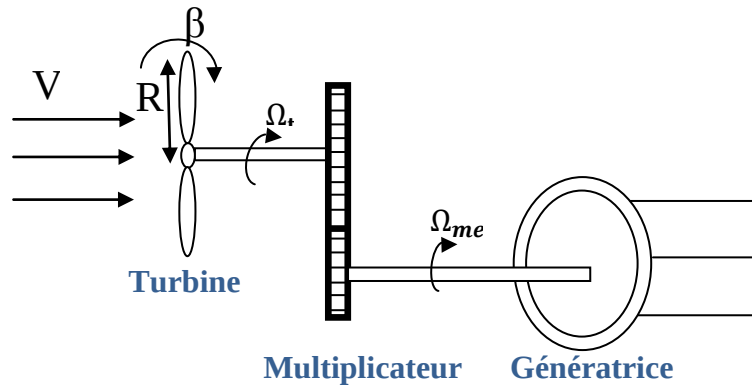


Figure I.15:Schéma de la turbine éolienne

- J_t : Le moment d'inertie de la turbine ;
- J_g : Le moment d'inertie du générateur ;
- f_v : Le coefficient dû aux frottements visqueux du générateur ;
- C_t : Le couple mécanique sur l'axe de la turbine ;
- C_g : Le couple mécanique sur l'Arbre du générateur ;
- Ω_{mec} : La vitesse de rotation du générateur ;
- Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine ;

Hypothèses simplificatrices

- la turbine comprend trois pales de longueur chaque une, supposées identiques, attachées au moyeu. L'ensemble peut être considéré comme une seule masse d'une inertie .
- L'inertie du multiplicateur de vitesse est négligeable devant celle de la turbine et celle du générateur, ce qui nous permet de le considérer comme un gain de vitesse égale à G ou un gain de couple égale à $1/G$.

I.9.1.Coefficient de puissance

I.9.1.1. Lois de betz :

Considérons le cas d'une éolienne à axe horizontal placée dans un tube d'air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et d'une section S_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 et d'une section S_2 . On désigne par S la surface balayée par l'hélice et V la vitesse du vent au niveau des pales. Selon le principe d'incompressibilité de l'air et la continuité d'écoulement, on peut écrire que :

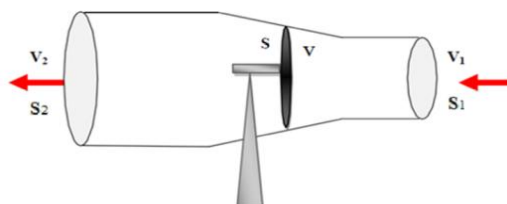


Figure I.16 : Lois de betz [10]

$$S_1 V_1 = SV = S_2 V_2 \quad (I.1)$$

D'après le théorème d'EULER, La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur est donnée par:

$$F = \rho S V (V_1 - V_2) \quad (I.2)$$

En remplace (I.2) dans l'équation de la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{aero} = F \cdot V = \rho S V^2 (V_1 - V_2) \quad (I.3)$$

Pour la variation de l'énergie cinétique par seconde de la masse d'air :

$$\Delta E_s = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V (V_1^2 - V_2^2) \quad (I.4)$$

On considère que la V au milieu du courant d'air :

$$V = \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (I.5)$$

En remplaçant l'expression de V dans les relations (I.2) et (I.3) on obtient :

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \quad (I.6)$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4} \rho S (V_1^2 - V_2^2) (V_1 + V_2) \quad (I.7)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance correspondante (mécanique théorique) ou la puissance de l'air en mouvement, est la suivante :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (I.8)$$

On définit le rapport entre les deux puissances C_p (puissance extraite du vent et celle qui est théoriquement disponible) qui est appelé le coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{(1 + \frac{V_1}{V_2})(1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)}{2} \quad (I.9)$$

Ce coefficient présente un maximum de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ .

$$C_p(\lambda, b) = (0.5 - 0.0167(b - 2)) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{18.5 - 0.3(b - 2)} \cdot \frac{\lambda}{\lambda_{max}}\right) - 0.00184 \cdot (\lambda - 3)(b - 2)$$

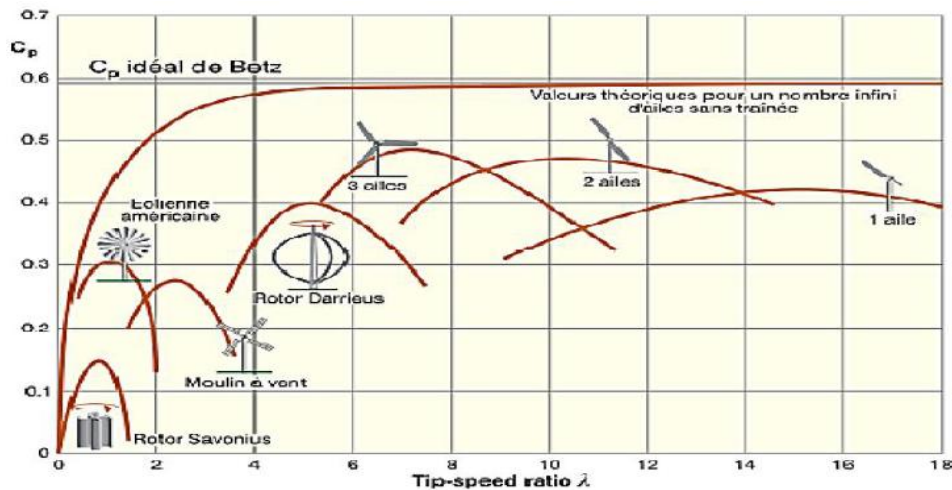


Figure I.17 Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateur [10]

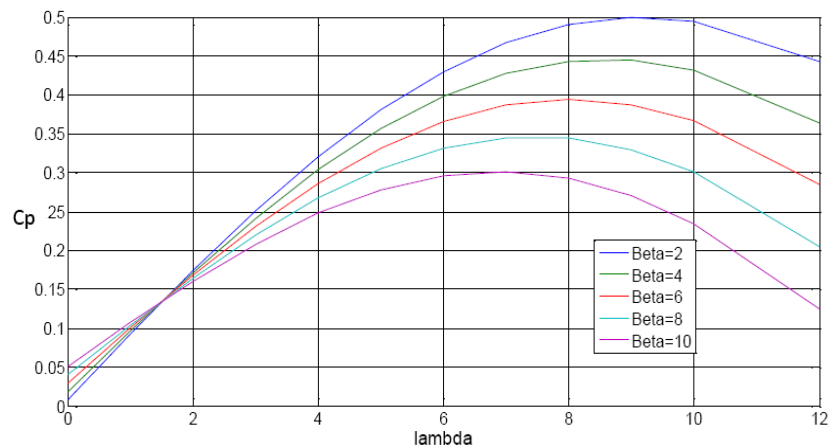


Figure I.18: Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple [10]

L'expression simplifiée de la puissance captée par l'éolienne est :

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (I.10)$$

Une autre expression de cette puissance serait :

$$P_t = C_t \cdot \Omega_t \quad (I.11)$$

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

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 V^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (I.12)$$

λ : La vitesse spécifique donné par $\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{V}$

V : La vitesse du vent .

ρ : La masse volumique de l'air ($\rho \approx 1.225 \text{ Kg/m}^3$)

R : Le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

C_p : Le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine

I.9.1.2. Modèle du multiplicateur :

Le rôle du multiplicateur est de transformer la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice, et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur selon les formules mathématiques suivantes :

$$C_g = \frac{1}{G} C_t \quad (I.13)$$

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \Omega_{mec} \quad (I.14)$$

I.9.1.3. Modèle de l'arbre

$$\frac{C_T}{G} - C_g = \left(\frac{J_T}{G^2} + J_g \right) \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_T}{G^2} + f_g \right) \Omega_g \quad (I.15)$$

C_T et C_g : le couple éolien et le couple électromagnétique.

J_T et J_g : L'inertie de la turbine et celle du générateur.

f_T et f_g : Le coefficient des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur.

G : Le rapport du multiplicateur de vitesse.

Ω_g : La vitesse de rotation du générateur (axe rapide).

On pose :

$$\frac{J_T}{G^2} + J_g = J \quad (I.16)$$

$$\frac{f_T}{G^2} + f_g = f \quad (I.17)$$

D'où, l'équation mécanique devienne :

$$\frac{C_T}{G} - C_G = J \frac{d\Omega_g}{dt} + f \Omega_g \quad (I.18)$$

1.9.1.4. Modèle de l'actionneur des pales

La caractéristique $C_p(\lambda)$ est directement liée à l'aérodynamisme des pales. La Figure ci-dessous nous montre l'évolution de la caractéristique d'une éolienne en fonction de β . Plus l'angle de calage sera important, moins la turbine captera l'énergie cinétique du vent. Les pales sont face au vent pour des vents faibles afin d'en extraire le maximum de puissance puis lorsque le vent nominal v_n est atteint, elles s'inclinent pour atteindre la position « drapeau » à la vitesse de vent maximale [18].

1.9.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Par conséquent, les éoliennes sont en général construites de manière à atteindre leur performance maximale à environ 15 m/s. Il est en fait inutile de concevoir des éoliennes qui maximisent leur rendement à des vitesses de vent encore plus élevées, celles-ci étant peu fréquentes [29].

En cas de vitesses de vent supérieures à 15 m/s, il est nécessaire de perdre une partie de l'énergie supplémentaire contenue dans le vent afin d'éviter tout endommagement de l'éolienne. Toutes les éoliennes sont donc conçues avec un système de régulation de la puissance.

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part de délimiter la puissance.

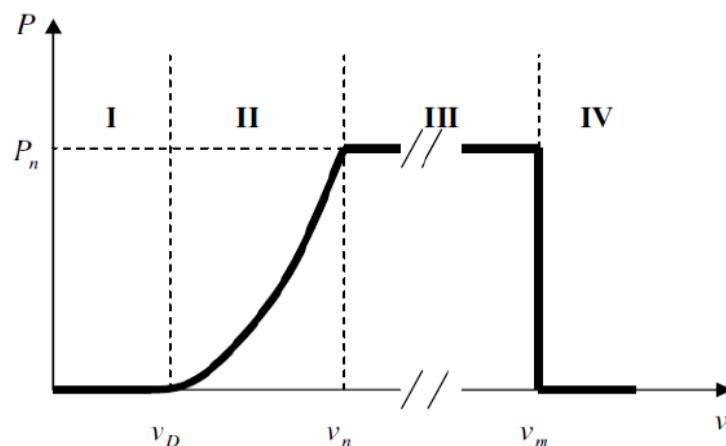


Figure I.19: Caractéristique puissance/vitesse de vent d'une éolienne classique [09]

- **la zone I** : Le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine
- **la zone II** : La puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent
- **La zone III** : La vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et la puissance P fournie reste égale à P_n .
- **La zone IV** : La vitesse de vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, angle des pales 90° [04].



Figure I.20 : Modèle simplifié de la turbine

I.10. Résultats de simulation de la turbine :

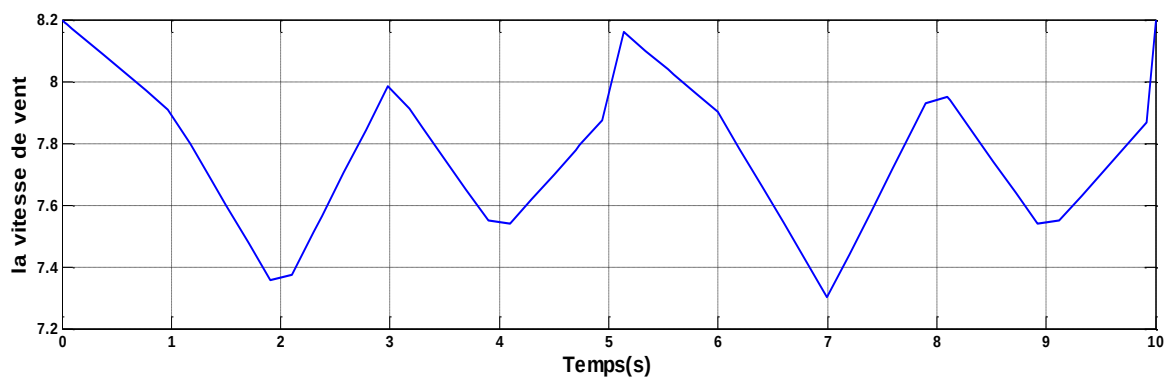


Figure I.21 : Profile du vent appliqué à la turbine.

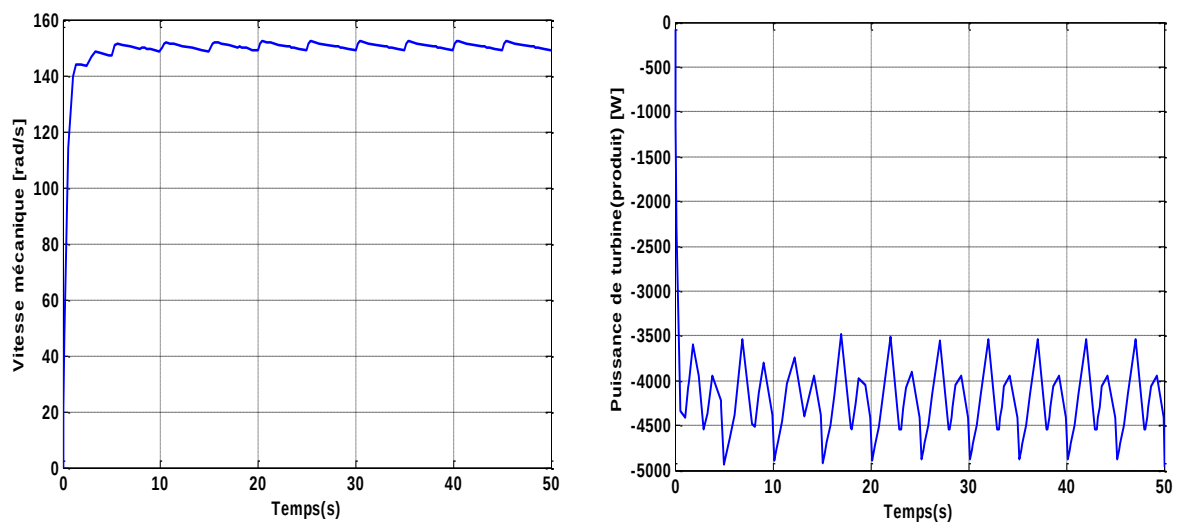


Figure I.22 : la vitesse mécanique et la puissance produit.

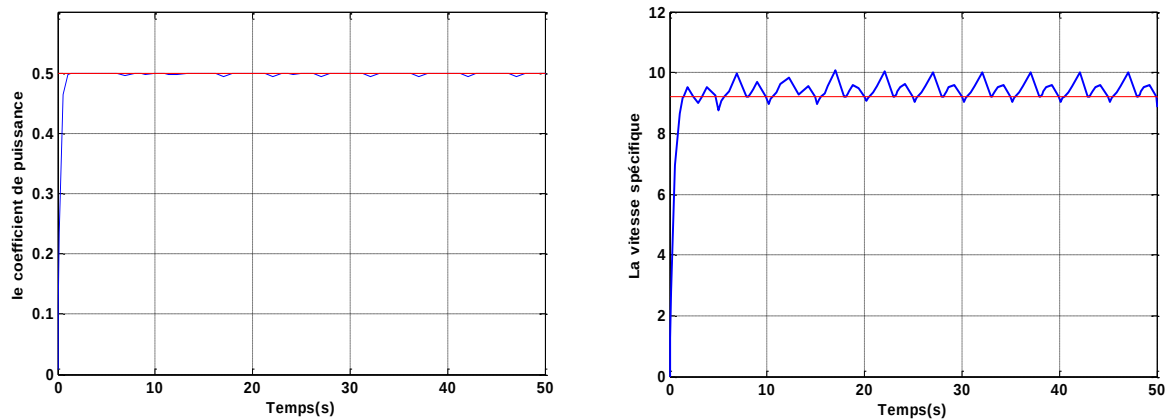


Figure I.23 : Le coefficient de puissance et La vitesse spécifique

I.11. Interprétations des résultats :

La figure (I.21) présente le profile du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne sa valeur faibles est autour de (8m/s). Les résultats de simulation montrent que la variation de la puissance électrique est adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice, et cette dernière, est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonctionne de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite.

A travers l'évolution du coefficient de puissance Figures (I.23), nous pouvons remarquer que celui ci est dans le voisinage de sa valeur maximale. Ce coefficient est obtenu pour un angle de calage β fixe ($\beta=2^0$) qui nous donne un λ optimale. On remarque que l'atteint une valeur maximale de 0.5, Cette résultats de simulation montre que la fiabilité de la commande sans asservissement de la vitesse du vent.

I.12. CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de jeter un coup d'œil sur les solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite des machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien ont été présentés. Plusieurs types de machines ont été présentées : machines asynchrones, machine synchrones et machines à structure spéciale.

La modélisation de la partie mécanique nous a permet d'implanter philosophies de réglage des éoliennes à vitesse variable, après avoir présenté les différentes zones de fonctionnement, nous avons, détaillé la zone particulière, où la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée. Cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique gainerie. Pour ce faire,

nous avons développé une technique de maximisation de la puissance extraite de la turbine ont été explicitées. Cet algorithme ont été valides par des résultats de simulation , Ainsi notre choix se portera sur l'utilisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation, ce sera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE II :

MODELISATION DE LA GADA

II.1. Introduction :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement.

La modélisation de la machine est une phase primordiale dans son analyse. Elle est d'un apport précieux en permettant d'une part de restituer une image de se que l'on peut observer expérimentalement et d'autre part de prévoir des comportements de la machine plus variés que ceux de l'observation expérimentale.

Dans le présent chapitre nous nous intéresserons à la description et à la modélisation dynamique de la machine asynchrone en double alimentation en régime générateur «GADA», et plus précisément la modélisation par la méthode de R.H Park et à la simulation de cette machine asynchrone.

II.2.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 [26].

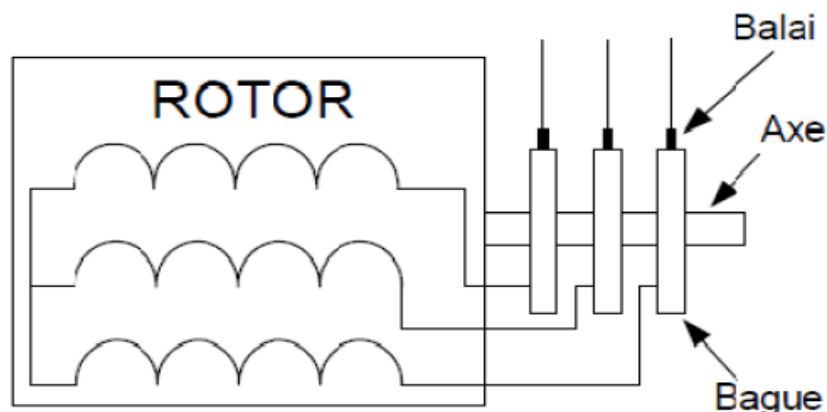


Figure II.1 : principe du rotor bobiné

II.3. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double Alimentation :

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de f_{mms} des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse Angulaire $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s$ et le rotor tourne avec vitesse ω_r , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des f_{mms} des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω_{gl} telle que :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s \cdot g \quad (II.1)$$

Où : g est le glissement et ω_{gl} est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés.

Pour que la rotation du vecteur résultant des f_{mms} par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement rotorique doit avoir une fréquence f_r [20], définie à partir de $\omega_{gl} = 2 \cdot \pi \cdot f_r$; C'est-à-dire :

$$f_r = g \cdot f_s \quad (II.2)$$

II.4.Modes de fonctionnement de la machine à double alimentation :

- Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée sur le réseau : c'est la cascade hypo synchrone.
- En mode moteur hyper synchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et elle est convertie en puissance mécanique.
- En fonctionnement générateur, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique.
- En mode hypo synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- En mode hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau [11].

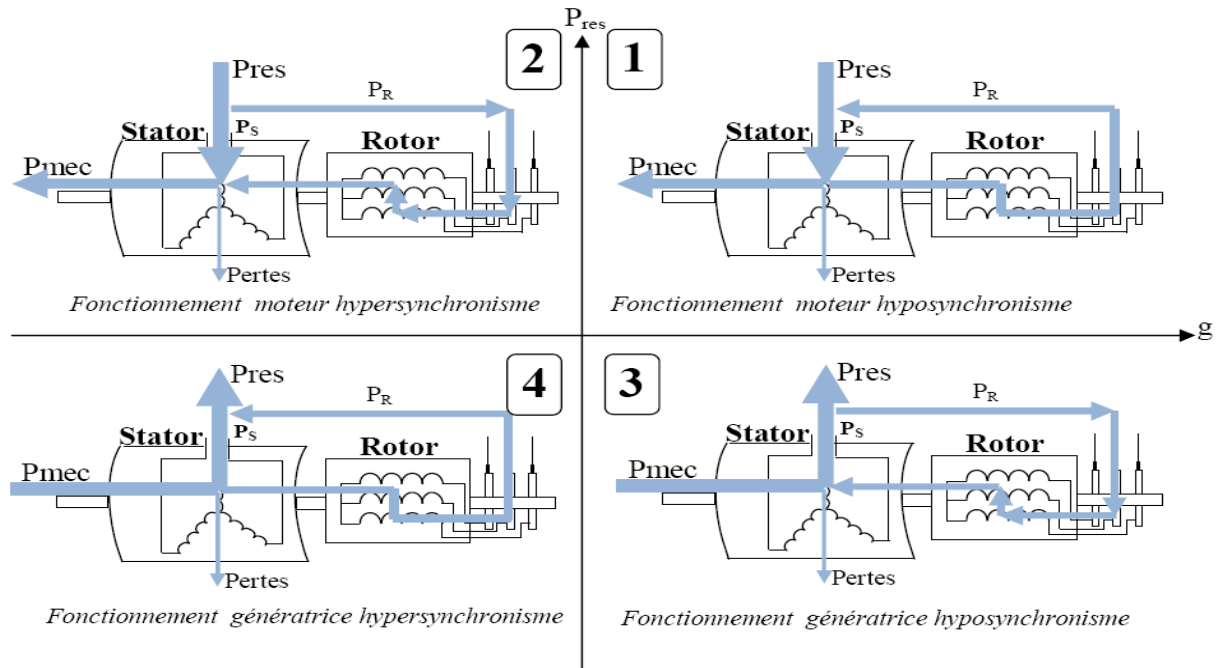


Figure II.2 : Modes de fonctionnement de la machine à double alimentation

II.5. Les différentes structures d'alimentation de la MADA :

II.5.1.MADA à énergie rotorique dissipée :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (figure II.3), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l' IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur [14].

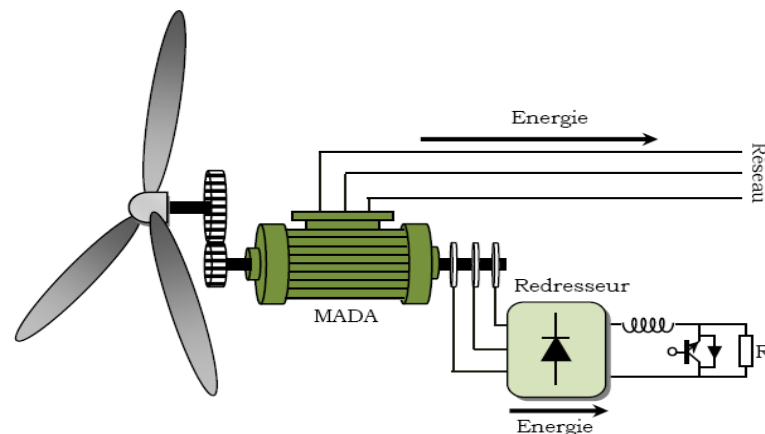


Figure II.3: MADA avec contrôle du glissement par L'énergie dissipée [28].

II.5.2.MADA : structure de Kramer :

Dans le but d'augmenter le rendement de la structure du système précédent, on remplacera le hacheur et la résistance par un onduleur qui va permettre de renvoyer l'énergie de glissement vers le réseau. (Structure de Kramer, Figure (II.4)).

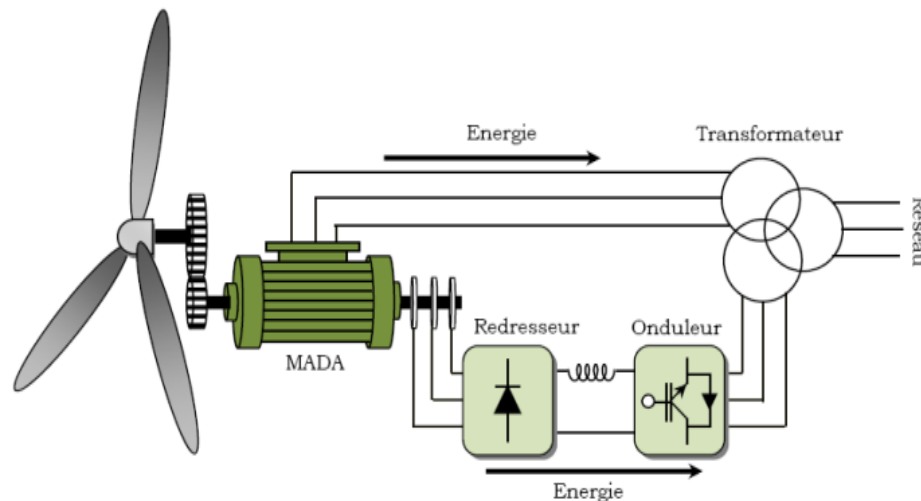


Figure II.4: MADA, structure Kramer [28].

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine, ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. Le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT, [2].

II.5.3.MADA avec cycloconvertisseur :

Dans cette configuration, l'échange d'énergie entre le rotor et le réseau est bidirectionnel. Cela permet de

doubler la plage de variation de vitesse par rapport à la structure de Kramer. En effet, la variation du glissement inférieur à 30% peut être dans ce (fonctionnement hypo synchrone) ou négative (fonctionnement hyper synchrone).

L'inconvénient noté est la génération de perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif [7].

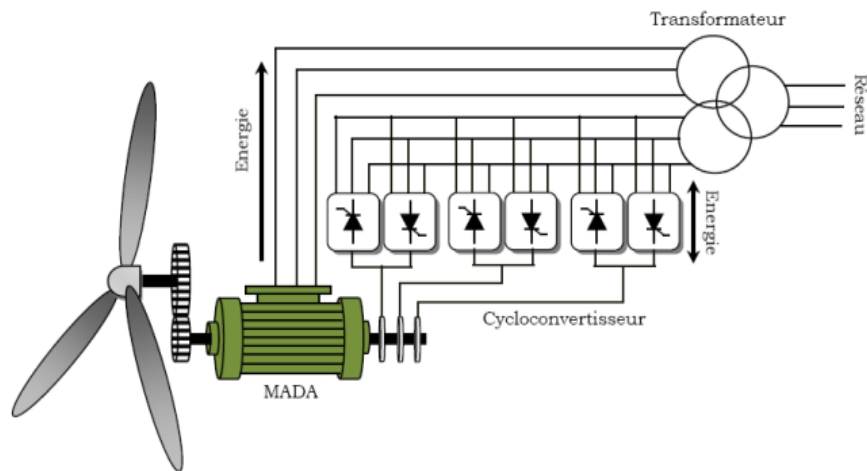


Figure II.5 :Structure de Scherbius avec Cycloconvertisseur[28].

II.5.4.MADA «structure de Scherbius avec convertisseurs MLI » :

Une autre structure intéressante figure (II.6) utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandables à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO [7]. Le gain se répercute sur des perturbations moins importantes (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées par la commande MLI). En plus la bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau [12].

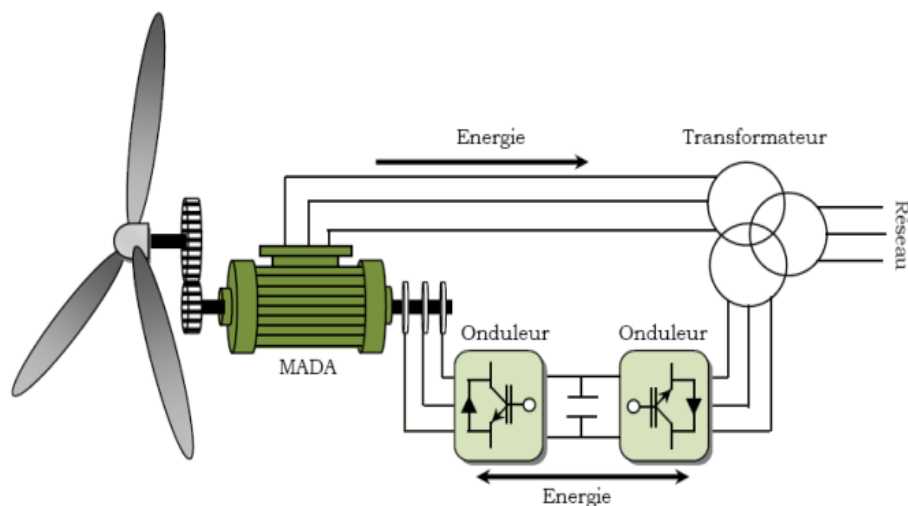


Figure II.6 : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI[28].

II.6. Les avantages et les inconvénients de la MADA :

II.6.1. Les avantages

La possibilité de fonctionner à couple constant au de là de la vitesse de synchronisme [18].

- ✚ A configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne)[10].
- ✚ Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique[10].
- ✚ La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir :
 - Fonctionnement à vitesse de rotation variable.
 - Régulation découplée des puissances active et réactive [18].

II.6.2. Les inconvénients

- ✚ Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique [10].
- ✚ Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques [18].
- ✚ Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais [18].
- ✚ La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance [10].

II.7.Modélisation de la GADA

La modélisation d'un système quelconque est indispensable pour l'étude et maitrise de son fonctionnement et lorsqu'on souhaite lui appliquer une commande particulière. D'autre part, elle est une phase primordiale dans le développement de la conception des systèmes.

Dans cette partie erra l'objectif d'une étude de modélisation de la machine asynchrone génératrice) à double alimentation dans le référentielle au champ tournant .Ce dernier nous a permet 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 [10].

II.7.1. Hypothèses simplificatrices :

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 créent par le stator ou le rotor a une répartition sinusoïdale.
- ✚ L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.

II.7.2.Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel généralisé description :

La GADA présente un stator triphasé identique à celui d'une machine asynchrone classique dite à cage d'écureuil et un rotor constitué d'un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants (balais). Sa robustesse est légèrement diminuée par rapport à une machine asynchrone classique à cause de ce système bagues/balais.

Une fois le stator de la machine connecté au réseau électrique, un flux magnétique apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et du courant statorique. Lors de la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromotrices (fem) dans les enroulements rotoriques.

II.7.2.1. Equation électrique

$$\begin{cases} V_{sa} = -R_s I_{sa} + \frac{d}{dt} \phi_{sa} \\ V_{sb} = -R_s I_{sb} + \frac{d}{dt} \phi_{sb} \\ V_{sc} = -R_s I_{sc} + \frac{d}{dt} \phi_{sc} \end{cases} \quad (II.3)$$

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d}{dt} \phi_{ra} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d}{dt} \phi_{rb} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d}{dt} \phi_{rc} \end{cases} \quad (II.4)$$

$$[V_{sabc}] = [R_{sabc}] [-I_{sabc}] + d/dt [\Phi_{sabc}] \quad (II.5)$$

$$[V_{rabc}] = [R_{rabc}] [I_{rabc}] + d/dt [\Phi_{rabc}] \quad (II.6)$$

$[\Phi_{abc(S)}]$: Vecteur flux total statorique.

$[V_{abc(S)}]$: Vecteur tension statorique applique aux trois phases.

$[I_{abc(S)}]$: Vecteur courant traversant les enroulements statorique.

$[R_s]$: Matrice résistance statorique.

Par un changement d'indice les vecteurs rotoriques comme suit :

$$[\Phi_{abc(r)}], [V_{abc(r)}], [I_{abc(r)}], [R_r]. \quad (II.7)$$

II.7.2.2. Équations magnétiques :

Maintenant, nous devons exprimer les grandeurs magnétiques au stator et au rotor, toujours dans le repère a, b, c :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s] [-I_{sabc}] + [M_{sr}] [I_{rabc}] \quad (II.8)$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r] [I_{rabc}] + [M_{sr}] [-I_{sabc}] \quad (II.9)$$

Pour l'écriture condensée, on met :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (II.10)$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (II.11)$$

$[L_{ss}]$: Matrice d'inductances statoriques.

$[L_{rr}]$: Matrice d'inductances rotoriques ;

$[L_s]$: Inductance propre d'une phase statorique.

$[L_r]$: Inductance propre d'une phase rotorique ;

$[M_s]$: Inductance mutuelle entre phases statoriques ;

$[M_r]$: Inductance mutuelle entre phase rotoriques.

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (II.12)$$

II.7.2.3.La transformée de Park :

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - biphasée, suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère ($\alpha\beta$), puis vers le repère dq). Le repère ($\alpha\beta$) est toujours fixe par rapport au repère (abc); par contre le repère (dq) est mobile; il forme avec le repère fixe ($\alpha\beta$) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park .

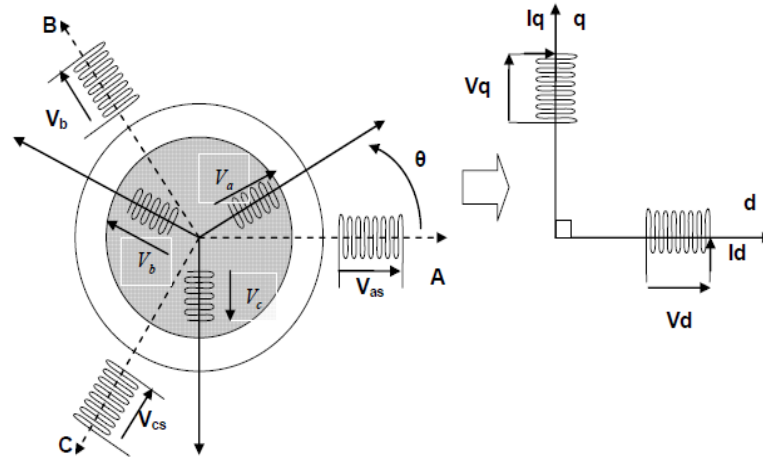


Figure II.7 : Modèle de PARK de la MADA

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système [07].

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$\text{Et } [P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

θ : Est l'angle de rotation du repère(u, v) .

$$\begin{bmatrix} X_u \\ X_v \\ X_o \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.15}) \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P]^T \begin{bmatrix} X_u \\ X_v \\ X_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

En appliquant, la transformation de Park $[P]$ sur les équations:(II.5),(II.6),(I.8),(I.9) et après simplification, les équations électriques et magnétiques modélisant la machine dans le repère biphasé (u, v), sont déduites voir figure(II.7).

II.7.3. Modèle de GADA dans le référentiel (d,q) :

Dans le but d'établir une commande vectorielle de la MADA, nous rappelons ici sa modélisation dans le repère de Park. Dans cette étude, nous ferons apparaitre le rapport de transformation m dans les équations.

Il est donc préférable de travail dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines. Les équations générales de la MADA dans un repère diphasé lié au champ tournant .

$$\text{On a : } \theta_s = \theta_r + \theta \Rightarrow \theta = \theta_s - \theta_r$$

$$\text{Alors : } \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}$$

$$\Rightarrow \omega = \omega_s - \omega_r$$

II.7.3.1. Equations électriques:

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Avec respectivement :

V_{sd}, V_{sq}, V_{rd} et V_{rq} : Sont les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système diphasé.

ω_r et ω_s : Sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques.

II.7.3.2. L'équations magnétiques :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = -L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = -L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} - M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} - M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Avec:

$\varphi_{sq}, \varphi_{sd}, \varphi_{rq}$ et φ_{rd} : Sont les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé.

$L_s = l_s - M_s$: L'inductance cyclique statorique

$L_r = l_r - M$: L'inductance cyclique rotorique

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$: L'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor

II.7.3.3. L'équation mécanique :

$$C_{em} = C_r + f\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (II.19)$$

Avec respectivement :

C_{em} : Le couple électromagnétique ;

C_r : Le couple résistant ;

f : Le coefficient de frottement visqueux de la GADA.

j : moment d'inertie des parties tournantes ;

Ω : La vitesse de rotation de l'axe de la GADA.

✚ L'expression du couple électromagnétique est donnée par les relations suivantes :

$$\begin{cases} C_{em} = -p(I_{sq}\varphi_{sd} - I_{sd}\varphi_{sq}) \\ C_{em} = -p\frac{M}{L_r}(I_{sq}\varphi_{rd} - I_{sd}\varphi_{rq}) \\ C_{em} = p\frac{M}{L_s}(I_{rq}\varphi_{sd} - I_{rd}\varphi_{sq}) \end{cases} \quad (II.20)$$

II.7.3.4. Les puissances actives et réactives:

$$\begin{cases} P_s = -V_{sd}I_{sd} - V_{sq}I_{sq} \\ Q_s = -V_{sq}I_{sd} + V_{sd}I_{sq} \end{cases} \quad (II.21) \quad \text{et} \quad \begin{cases} P_r = V_{rq}I_{rq} + V_{rd}I_{rd} \\ Q_r = V_{rq}I_{rd} - V_{rd}I_{rq} \end{cases} \quad (II.22)$$

II.7.3.5.Equation d'état

A partir des équations (II.17) le modèle peut être exprimé dans l'espace d'état sous la forme suivante :

$$[U]=[A][I]+[L]\frac{d}{dt}[I]$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & M\omega_s & 0 \\ 0 & M\omega_r & R_r & -\omega_r L_r \\ -M\omega_r & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{sd} \\ \dot{I}_{sq} \\ \dot{I}_{rd} \\ \dot{I}_{rq} \end{bmatrix}$$

En considérant les composantes en (d, q) l'équation d'état prend la forme :

$$\dot{X} = AX + BU$$

$$\frac{d}{dt}[I] = -[L]^{-1}[A'] [I] + [L]^{-1}[U]$$

$$A = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & M\omega_s & 0 \\ 0 & M\omega_r & R_r & -\omega_r L_r \\ -M\omega_r & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

II.8.Résultats de simulation numérique du système :

A l'aide de logiciel MATLAB, la simulation de la machine asynchrone à double alimentation pour les deux types de fonctionnement moteur et générateur a été faite. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de R.H.Park. (Plan (d, q)) lié aux champs tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 4 KW.

II.8.1. Résultats de simulation fonctionnement moteur (MADA) :

Les résultats de simulation de la machine asynchrone fonctionnement moteur à rotor en court circuit et présentée sur les figure (II.8), (II.9), (II.10), (II.12) concernant respectivement la vitesse et le couple, les composante du flux statoriques et sont résultante, les composantes du courant statoriques et rotoriques.

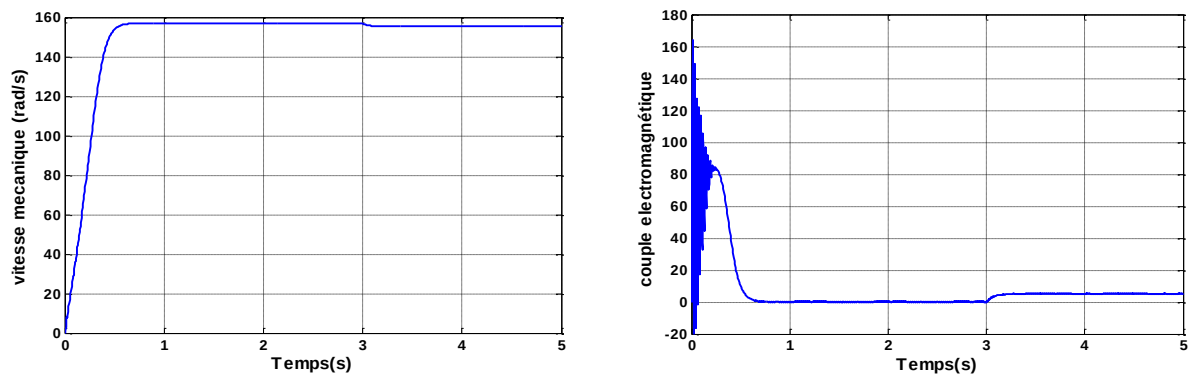


Figure II.8 : Vitesse mécanique et couple électromagnétique.

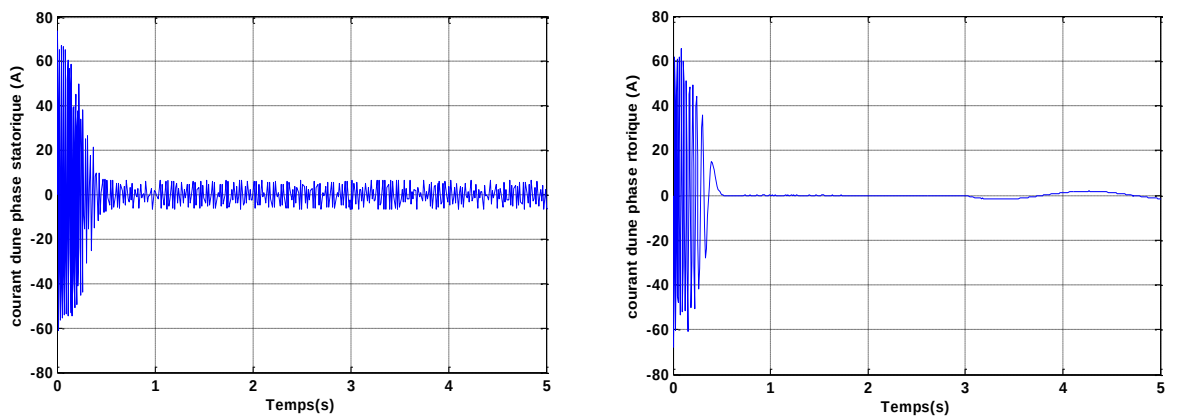


Figure II.9 : Courant statorique et rotorique de phase (I_{sa} et I_{ra})(A).

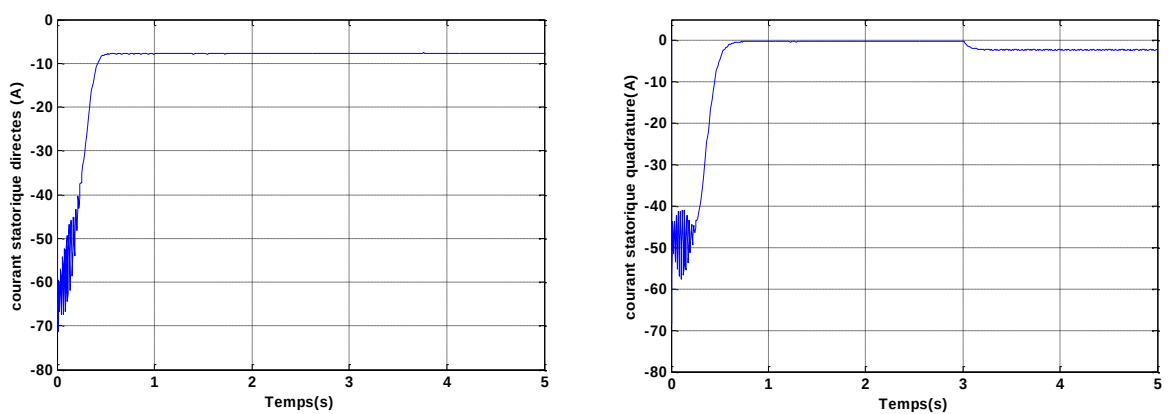


Figure II.10 :Les composantes du courant statoriques.

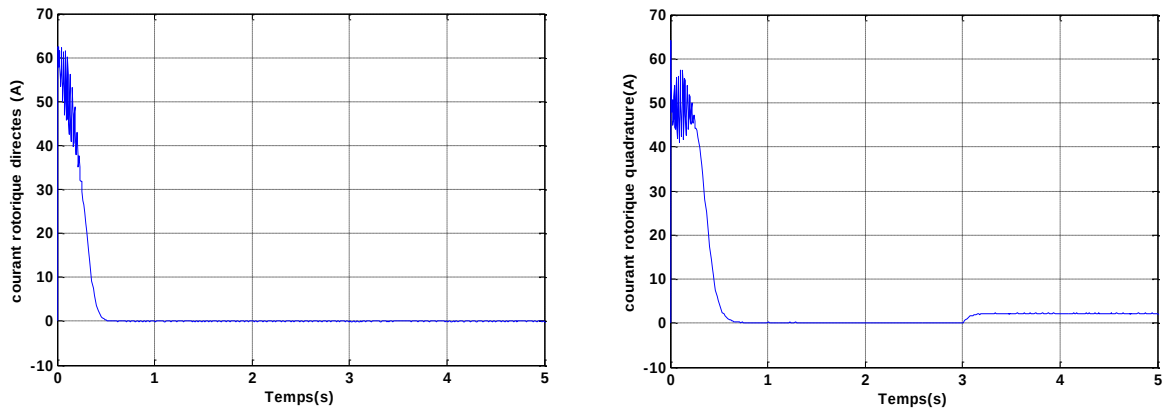


Figure II.11 : Les composantes du courant rotoriques.

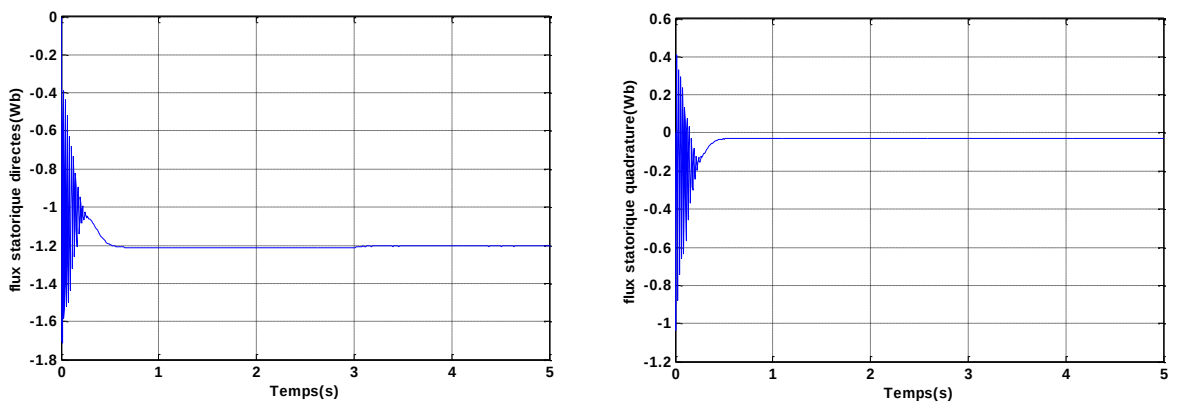


Figure II.12 : Les composantes du flux statorique

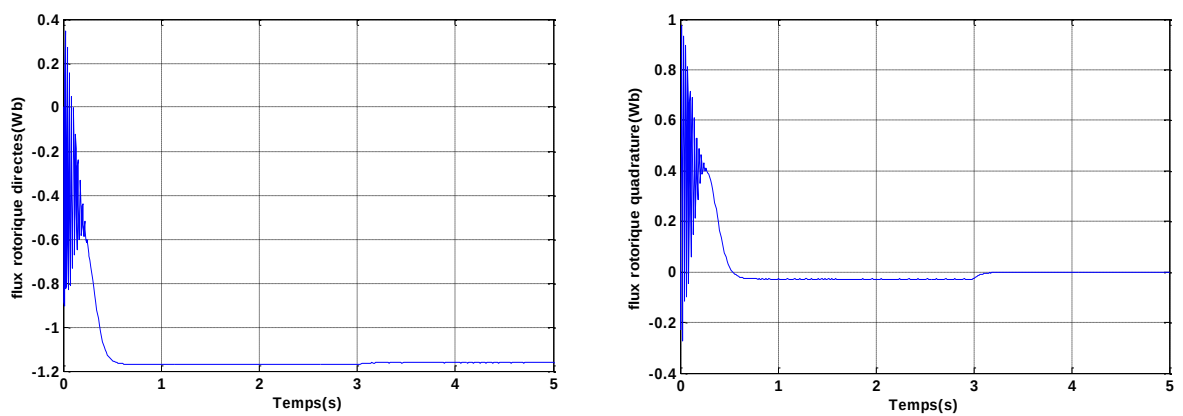


Figure II.13 : Les composantes du flux rotorique

II.8.1.1. Interprétation des résultats :

On remarque que toutes les grandeurs passent par un régime transitoire avant l'établissement du régime permanent caractérisé par une vitesse proche du synchronisme (Figure vitesse et couple) et une fréquence des courants rotoriques presque nulle (Figure I_r dq) (un très faible glissement). En plus, le couple électromagnétique se stabilise à une valeur proche du zéro (Figure vitesse et couple) (présence de frottements visqueux).

L'application d'un couple résistant se traduit par une augmentation du couple électromagnétique, augmentation de l'amplitude des courants statoriques (Figure I_s dq) et une diminution de la vitesse à cause d'un glissement plus important qui se répercute sur les courants rotoriques :

(vérification de la relation ($f_r = g f_s$)). La machine fonctionne alors en moteur hypo synchrone).

II.8.2. Résultats de simulation fonctionnement générateur (GADA) :

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 4KW, alimentée directement par deux sources de tension triphasés parfaite, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de ($220 \text{ v} * \sqrt{2}$; $100 * \pi \text{ rad/s}$; 50 Hz), et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de ($12 * \sqrt{2} \text{ v}$; $24 * \sqrt{2} \text{ v}$; $4 * \pi \text{ rad/s}$; 2 Hz) et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1440 tr/min.

 Pour alimentation à rotor de $V_r = 12V$:

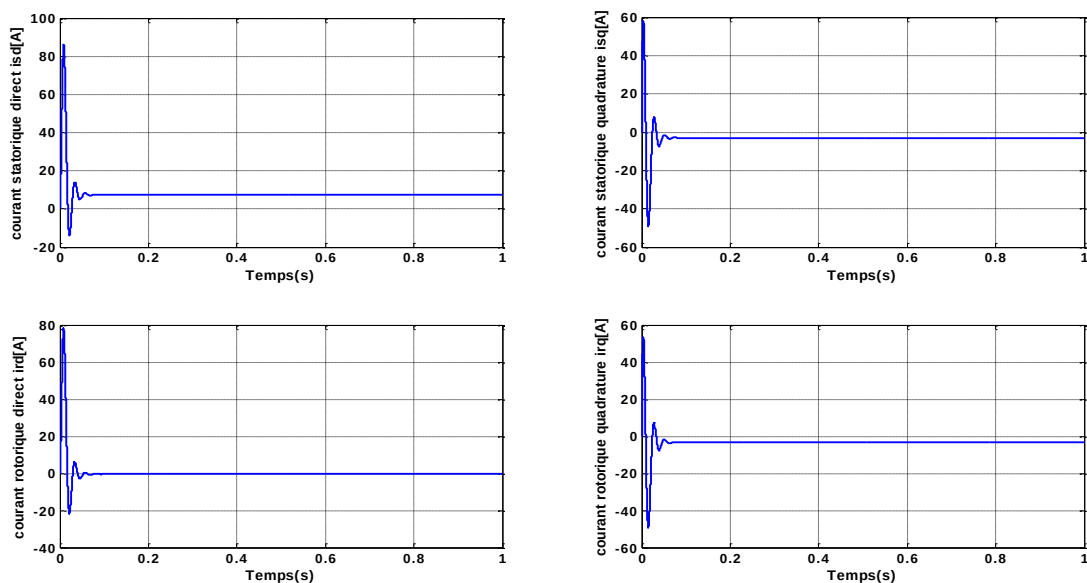


Figure II.14: Courant statorique et rotorique de GADA (d , q)

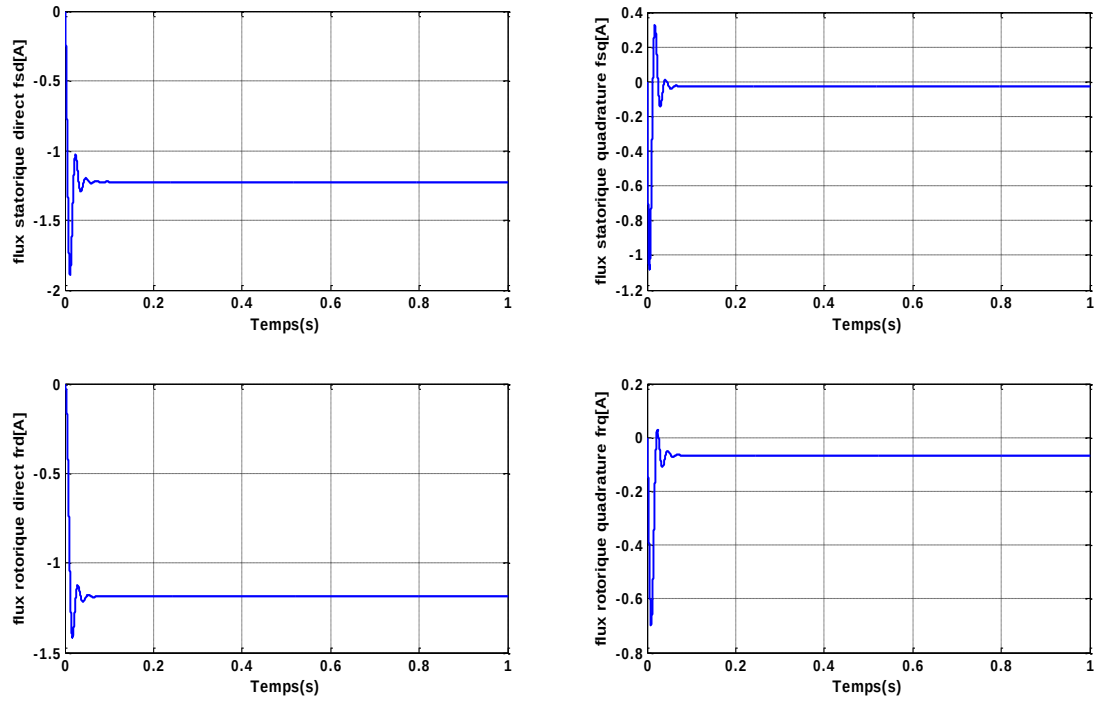


Figure II.15: Flux statorique et rotorique de GADA (d ,q)

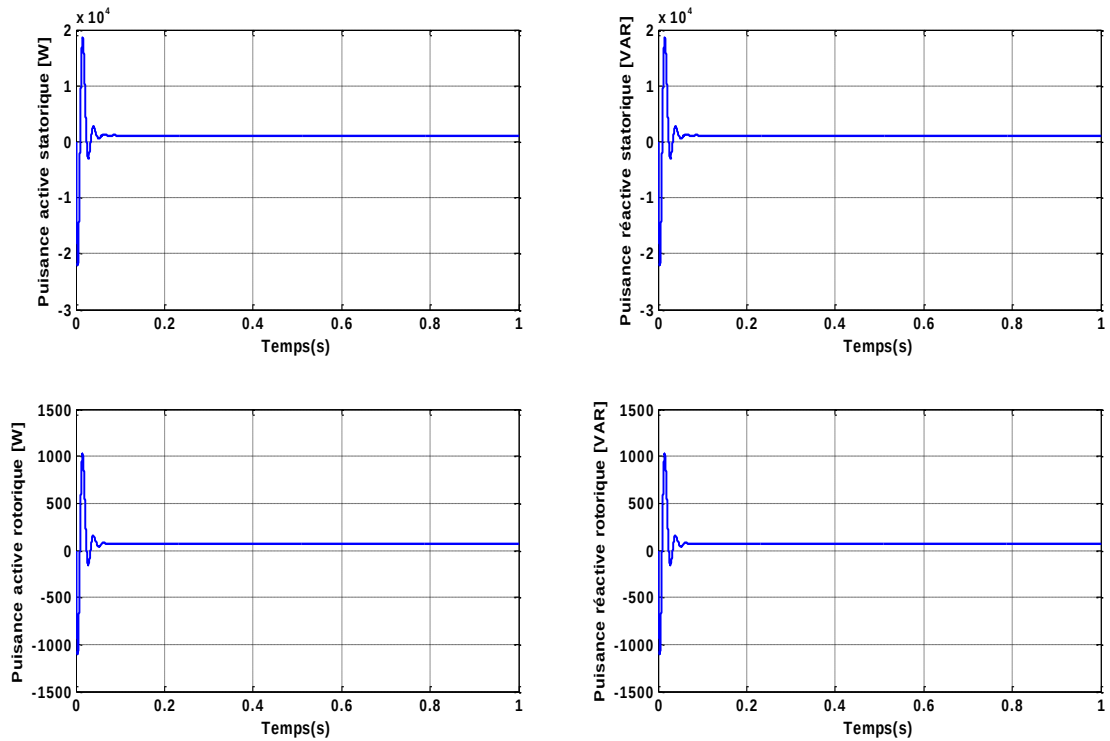


Figure II.16: Puissance statorique (P_s, Q_s) et Puissance rotorique (P_r, Q_r)

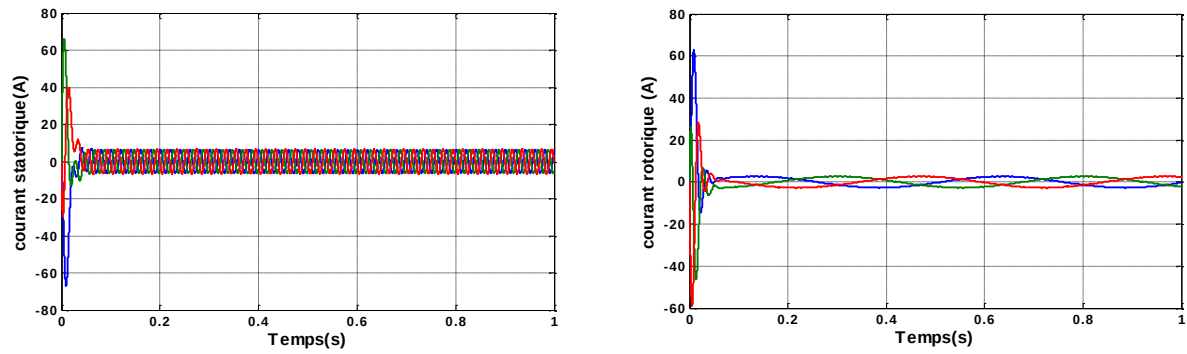


Figure II.17 : Les courants statoriques et rotoriques triphasés

✚ Pour alimentation à rotor de $V_r = 24V$:

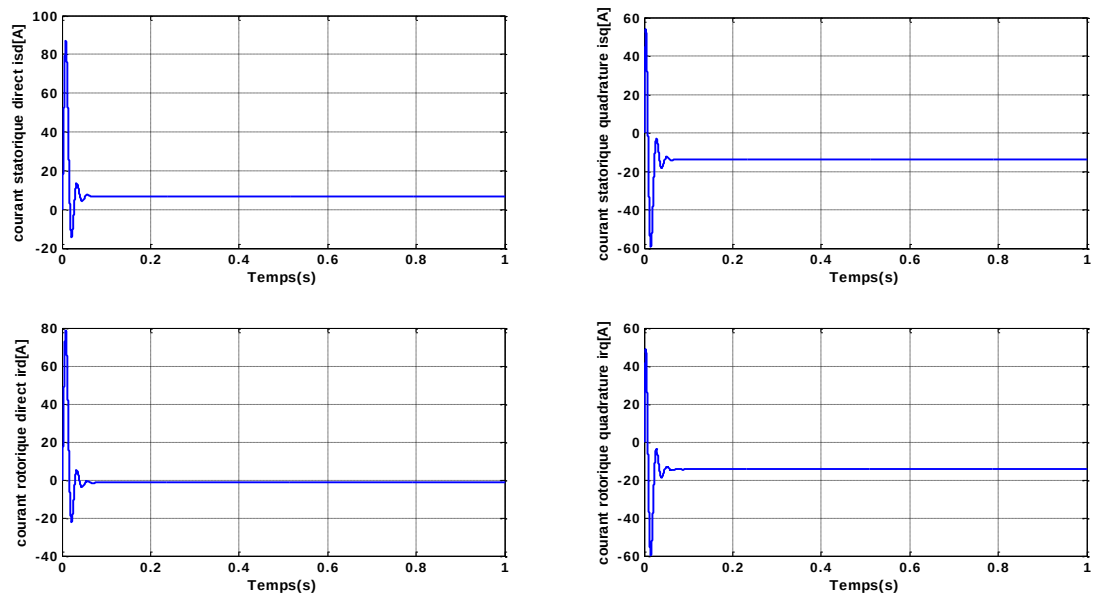


Figure II.18: Courant statorique et rotorique de GADA (d , q)

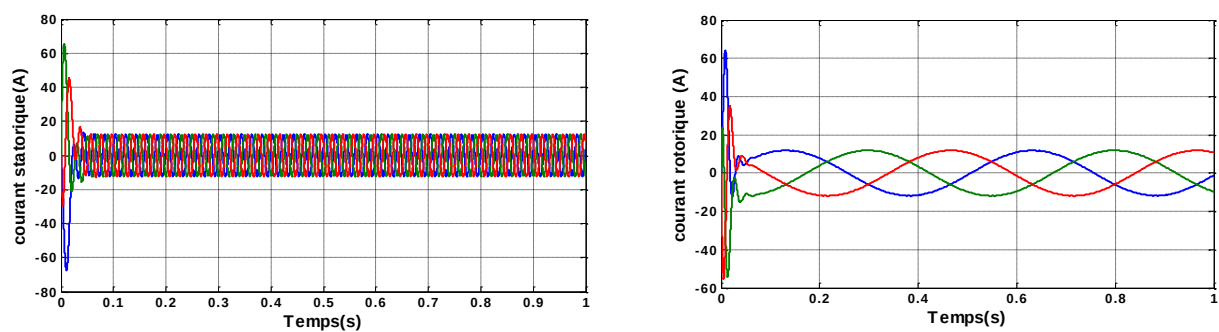


Figure II.19: Les courants statoriques et rotoriques triphasés

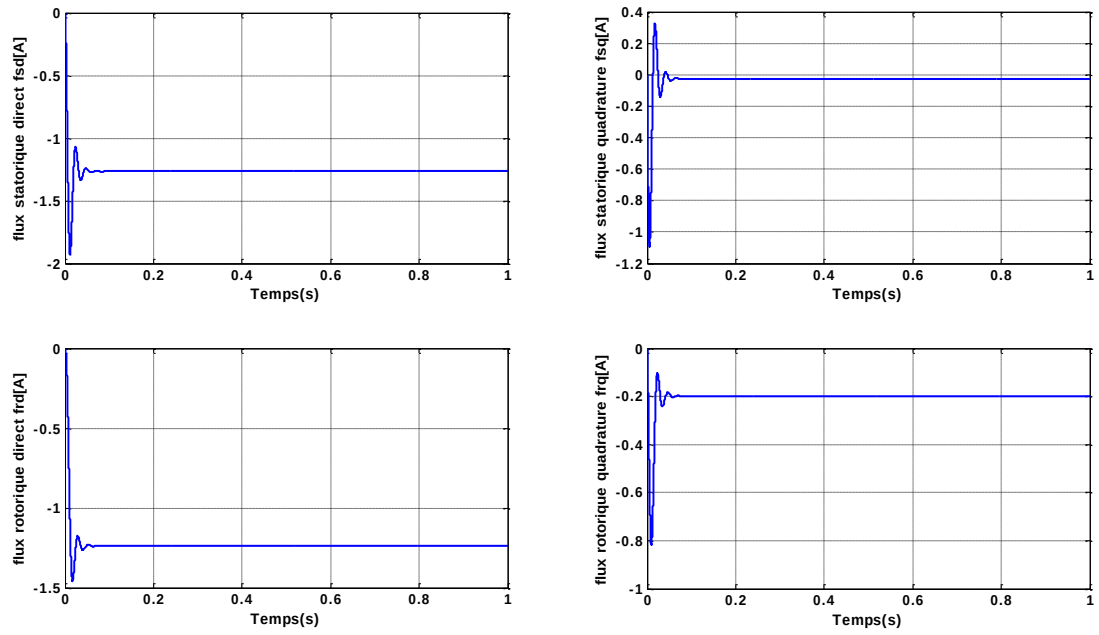


Figure II.20: Flux statorique et rotorique de GADA (d ,q)

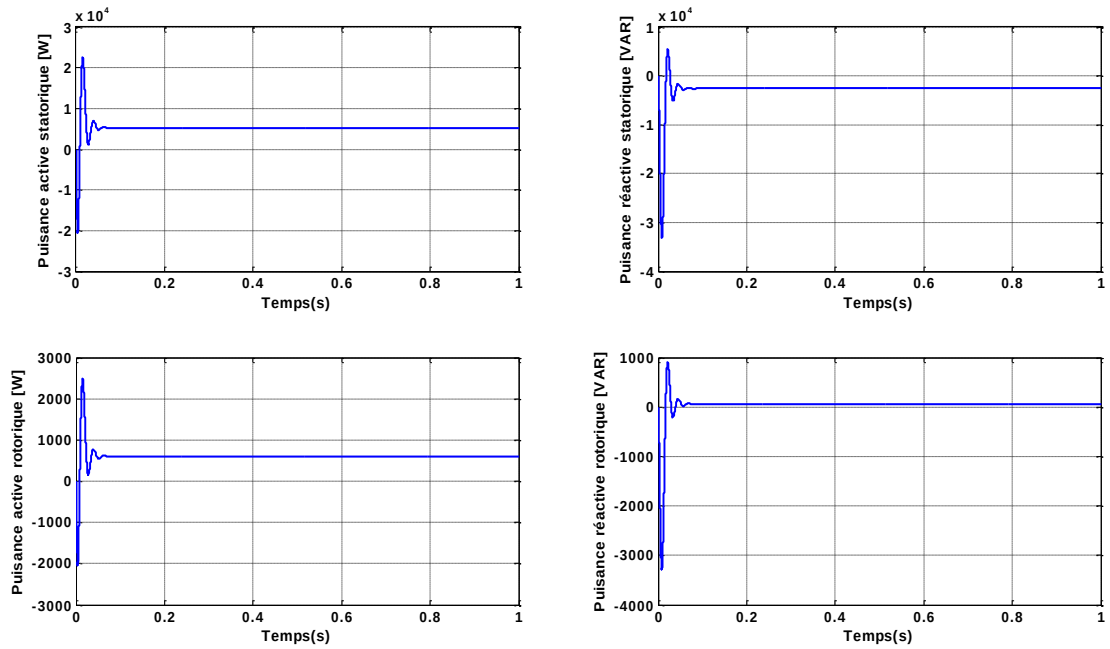


Figure II.21: Puissance statorique (P_s, Q_s) et Puissance rotorique (P_r, Q_r)

II.8.2.1. Interprétations des résultats :

Les figures précédentes représentent les résultats de simulation obtenus montrant que pendant le régime dynamique. Pendant le démarrage on remarque l'importance du courant, après un temps très réduit égale à environs 0.05s, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdale de fréquence 50Hz pour les courants statorique et. $f_r = g f_s$. Pour les courants rotorique. Le couple électromagnétique est négatif atteint au démarrage une valeur maximale (158Nm).

On remarque que l'augmentation au niveau de la tension rotorique implique d'augmentations au niveau des grandeurs de la machine, et on peut signaler aussi que la tension et la fréquence rotoriques influence sur les grandeurs de la génératrice, et influence sur la puissance au niveau de stator.

II.9.Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté une description générale de la machine asynchrone à double alimentation. Dans le but d'étudier le comportement de cette dernière nous avons établi un modèle dynamique en tenant compte certaines hypothèses simplificatrices.

Le modèle de la GADA est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de R.H.Park nous a permis de le simplifier.

Ce modèle sera exploité pour étudier la stratégie de commande de la machine asynchrone à double alimentation en puissance active et réactive au chapitre suivant.

CHAPITRE III:

Commande vectorielle de la *GADA*

III.1.Introduction :

La commande vectorielle de la machine à double alimentation est une solution plus attractive pour des applications à haute performance comme l'entraînement à vitesse variable et les systèmes de génération de l'énergie.

Cette solution convient à toutes les applications où les variations de la vitesse sont limitées autour de la vitesse de synchronisme. Puisque la puissance traitée par le côté rotorique (puissance P de glissement) est proportionnelle au glissement, une conversion d'énergie est possible en utilisant un convertisseur de puissance du côté du rotorique, celui-ci ne traite qu'une petite fraction de puissance du système global, dans les entraînements à vitesses variables [5].

Dans ce chapitre, nous avons utilisé une loi de commande pour la MADA à rotor bobiné alimenté par un onduleur de tension basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [1,30].

Pour établir la commande vectorielle de la génératrice, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques ou rotoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc toutes les composantes homopolaire sont nulles.

Ensuite, on calcule le régulateur nécessaire pour la commande, et enfin on termine par les résultats de la simulation qui signifient la validation de commande.

III.2.Le principe de la commande vectorielle de la GADA :

La commande vectorielle est un terme générique désignant l'ensemble des commandes tenant compte en temps réel des équations du système qu'elle commande. Le nom de ces commandes vient du fait que les relations finales sont vectorielles à la différence des commandes scalaires. Les relations ainsi obtenues sont bien plus complexes que celles des commandes scalaires, mais en contrepartie elles permettent d'obtenir de meilleures performances lors des régimes transitoires. Il existe des commandes vectorielles pour tous les moteurs à courant alternatif.

Par construction, la machine à courant continu produit un champ magnétique statorique toujours perpendiculaire au rotor, c'est ce comportement que l'on va chercher à obtenir pour les machines alternatives. Le calculateur qui va agir sur la commande des interrupteurs se doit d'avoir quelques informations pour effectuer les calculs et particulièrement [19]:

- La position du rotor pour les machines synchrones
- La vitesse du rotor pour les machines asynchrones

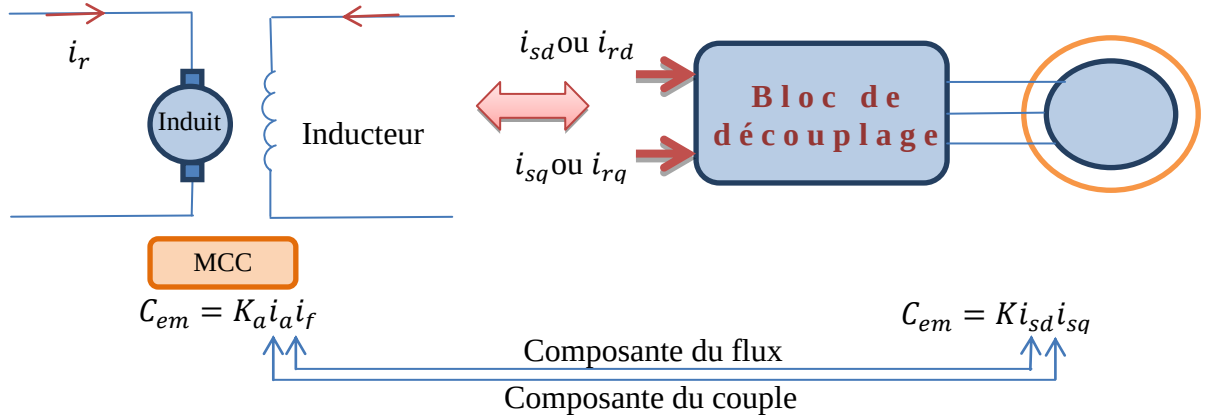


Figure III.1 : Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA.

III.3.Etablissement du modèle de la GADA :

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques [10].

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - W_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + W_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - W_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + W_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (III.1)$$

III .4.Choix du référentiel pour le modèle diphasé :

III.4.1.Suivant l'orientation du repère :

- Le flux rotorique : $\phi_{rd} = \phi_r$
- Le flux statorique : $\phi_{sd} = \phi_s$
- Le flux d'entrefer : $\phi_{gd} = \phi_g$

Dans le cadre de cette partie, nous développons la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) avec orientation du repère (d-q) suivant le flux statorique. Cette commande se décompose de deux parties :

- Le contrôle des courants rotoriques.
- Le découplage ou compensation.

Avec un flux statorique constant et orienté $\varphi_{sd} = \varphi_s$, ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}(\varphi_{rd}) - \omega_r \varphi_{rd} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt}(\varphi_{rq}) + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (III.2)$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = -L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = 0 = -L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} - M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} - M I_{sq} \end{cases} \quad (III.3)$$

✚ Relation entre le courant statorique et le courant rotorique :

A Partir de l'équation de flux, nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{M}{L_s} I_{rd} - \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{sq} = \frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (III.4)$$

✚ Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques:

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

$$\begin{cases} p_s = -V_{sd} I_{sd} - V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = -V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (III.5)$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$\begin{cases} p_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{W_s L_s} - V_{sq} \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (III.6)$$

$$V_{sq} = V_s = W_s Q_s \rightarrow Q_s = \frac{V_s}{W_s}$$

En considérant la mutuelle constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante.

$$\frac{V_s^2}{\omega_s L_s} \text{ Prés imposée par le réseau.}$$

Afin de montrer que la commande par orientation du flux statorique permet d'avoir un découplage effectif des grandeurs réelles (couple, vitesse) de la MADA, on considère les tensions rotoriques V_{dr} , V_{qr} comme variable de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté et les courants rotoriques I_{dr} , I_{qr} comme variable d'état. Ces grandeurs sont fonction des grandeurs de consigne P_{ref} et Q_{ref} .



Figure. III.2: Bloc de contrôle à flux orienté.

$$\begin{cases} P_{s-ref} = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq-ref} \\ Q_{s-ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd-ref} \end{cases}$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites, et si l'on considère l'inductance magnétisante $\mathbf{M}$ comme constante, le système obtenu liée de façon proportionnelle à la puissance active au courant rotorique d'axe $\mathbf{q}$ et la puissance réactive au courant rotorique d'axe $\mathbf{d}$.

Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques :

A partir du système d'équation (III.3) et on en remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante:

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + \frac{M.V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \end{cases} \quad (III.7)$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe $\mathbf{d}$ et $\mathbf{q}$ sont alors intégrées aux expressions tensions rotoriques diphasées de l'équation (III.1). Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g \frac{MV_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.8)$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g \frac{MV_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.9)$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations (II.17), on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) P \right] I_{rd} - g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) P \right] I_{rq} - g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (III.10)$$

V_{rd} et V_{rq} : Sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques désirés.

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

une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

$g \frac{V_s M}{L_s}$: Représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

A partir des systèmes d'équations (III.6) et (III.10), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous :

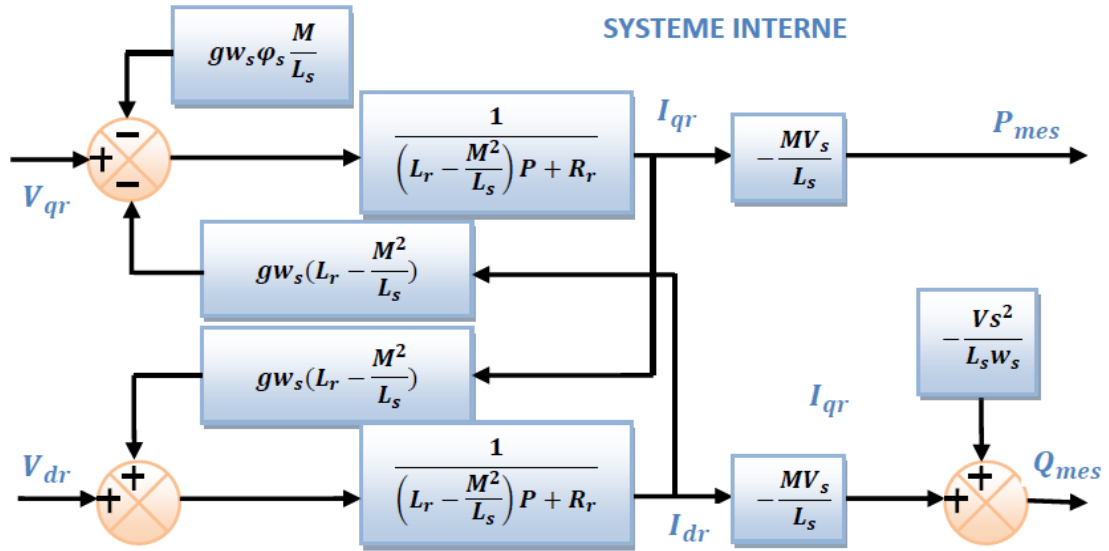


Figure III.3: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Dans ce schéma, nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné que l'influence du couplage est minime, chaque axe peut être commandé indépendamment avec son propre régulateur.

Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe **q** rotorique et la puissance réactive pour l'axe **d** rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder un transfert de puissance de l'éolienne optimal.

III.4.2.Commande vectorielle directe :

Cette méthode a été proposée par **Blaschke** et rendue publique vers 1970, elle se base sur la connaissance exacte du flux (statorique dans notre cas) et de sa position. Il faut donc procéder à une série de mesures aux bornes du variateur. Une première possibilité est de placer des capteurs dans le bobinage statorique et de mesurer directement les composantes du flux de manière à en déduire l'amplitude et la phase. Les capteurs mécaniquement fragiles sont soumis à des contraintes sévères dues aux vibrations et à l'échauffement. En outre, ce mode nécessite l'utilisation d'un moteur équipé des capteurs de flux, ce qui augmente considérablement le coût de sa construction. Par conséquent, dans la grande majorité des cas, on fait appel à des estimateurs ou des observateurs à partir des mesures effectuées sur le variateur.

La méthode directe a l'avantage de prendre beaucoup moins les variations des paramètres de la machine [12].

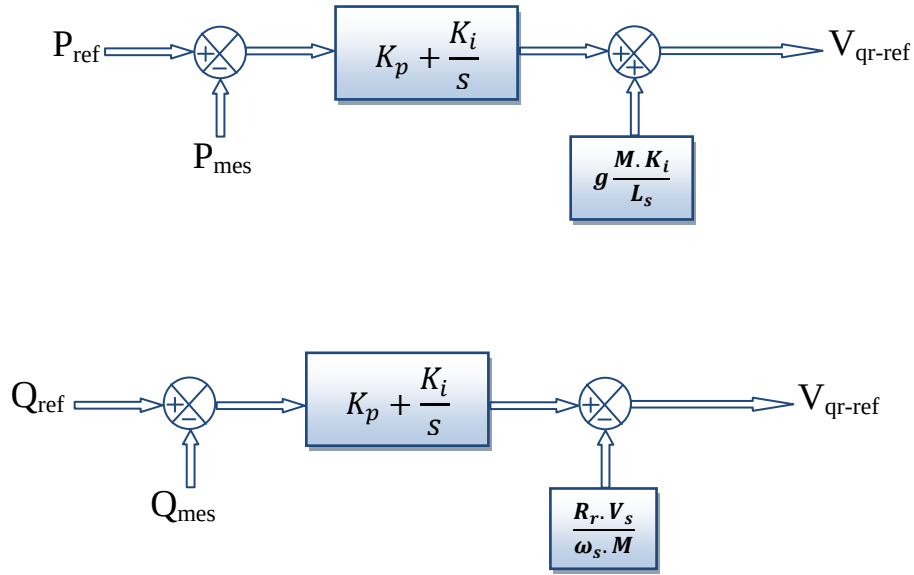


Figure. III.4: Schéma bloc de la commande directe.

III.4.3. Commande vectorielle indirecte :

Cette méthode consiste à estimer les valeurs des tensions rotoriques à partir des valeurs des puissances actives et réactives. Ainsi, les courants rotoriques seront régulés indirectement [10].

III.4.3.1. Commande en boucle ouverte:

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q [02].

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système(III.6) on déduit les références des courants rotoriques directs et quadrature suivant les relations.

$$\begin{cases} I_{rq-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot P_{s-ref} \\ I_{rq-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot Q_{s-ref} + \frac{V_s}{M.\omega_s} \end{cases} \quad (III.11)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous.

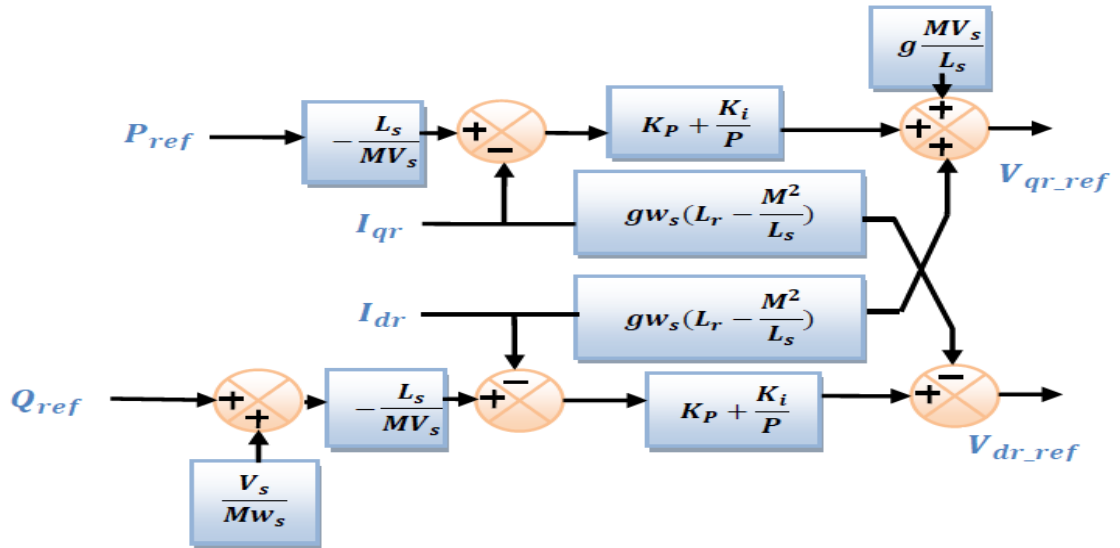


Figure III.5: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive.

III.4.3.2. Commande en boucle fermée :

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante :

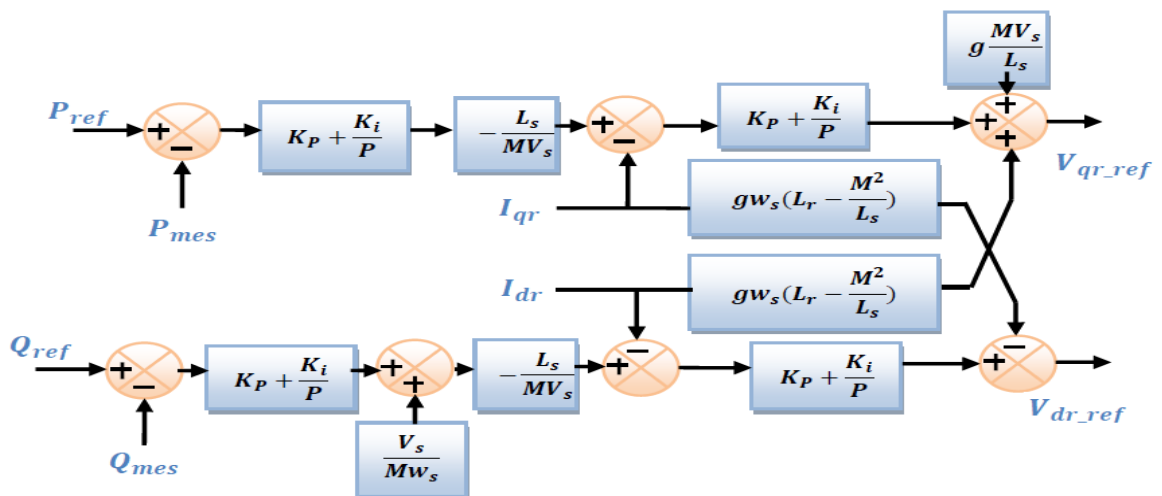


Figure III.6 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.

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.

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toute fois, elle offre une meilleur robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique.

III.5 Résultats de simulation :

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus en appliquant les lois de commande en puissance active et réactive que nous venons de présenter sur le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, sans réglage de vitesse avec un démarrage à vide puis avec application d'une puissance active $P = -3000W$ entre $t = 1s$ et $t = 3s$, et une puissance réactive $Q = 1000VAR$ entre $t = 2s$ et $t = 4s$.

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance actives et réactives statorique appliquée à la MADA et entraînée à une vitesse fixe : 1440tr/min.

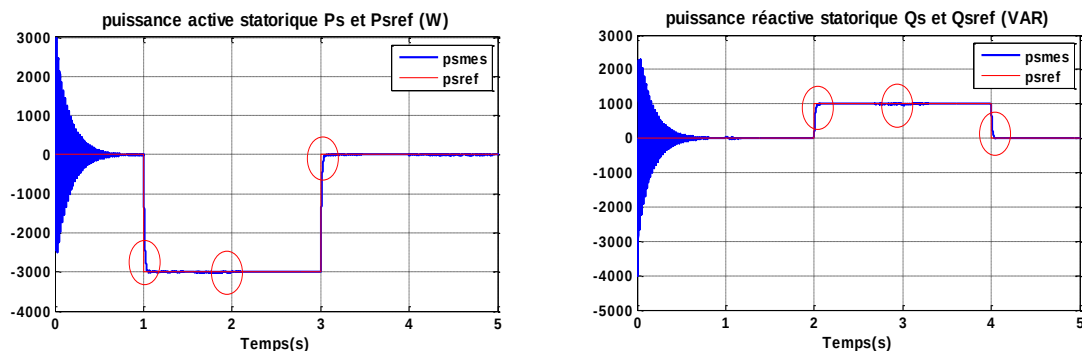


Figure III.7 : La puissance active et réactive statorique et sont reference avec boucle de puissance.

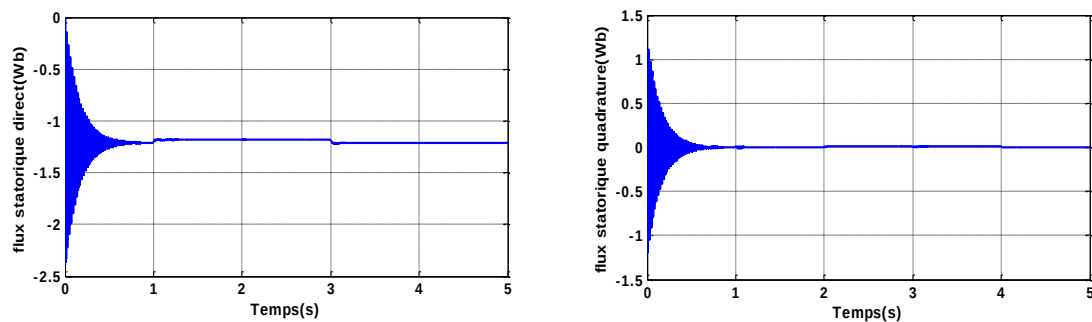


Figure III.8 : Le flux statorique selon l'axe d et q avec boucle de puissance.

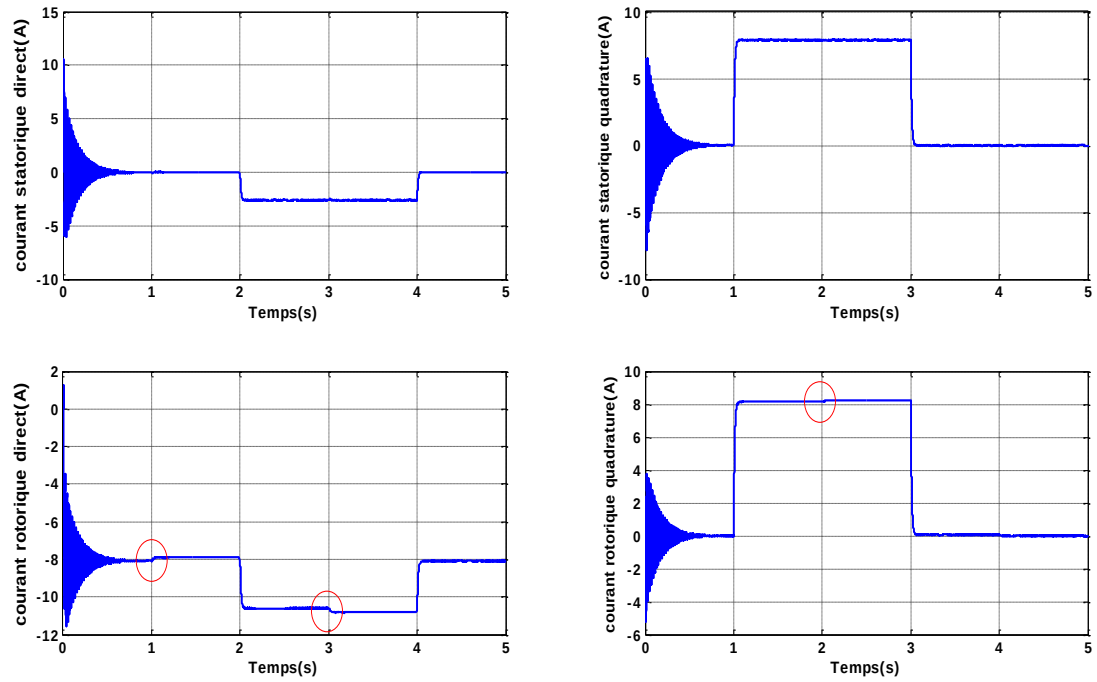


Figure III.9 : Le courant statorique et rotorique selon l'axe d et q avec boucle de puissance.

III.5.1 Résultats de Simulation du système avec turbine :

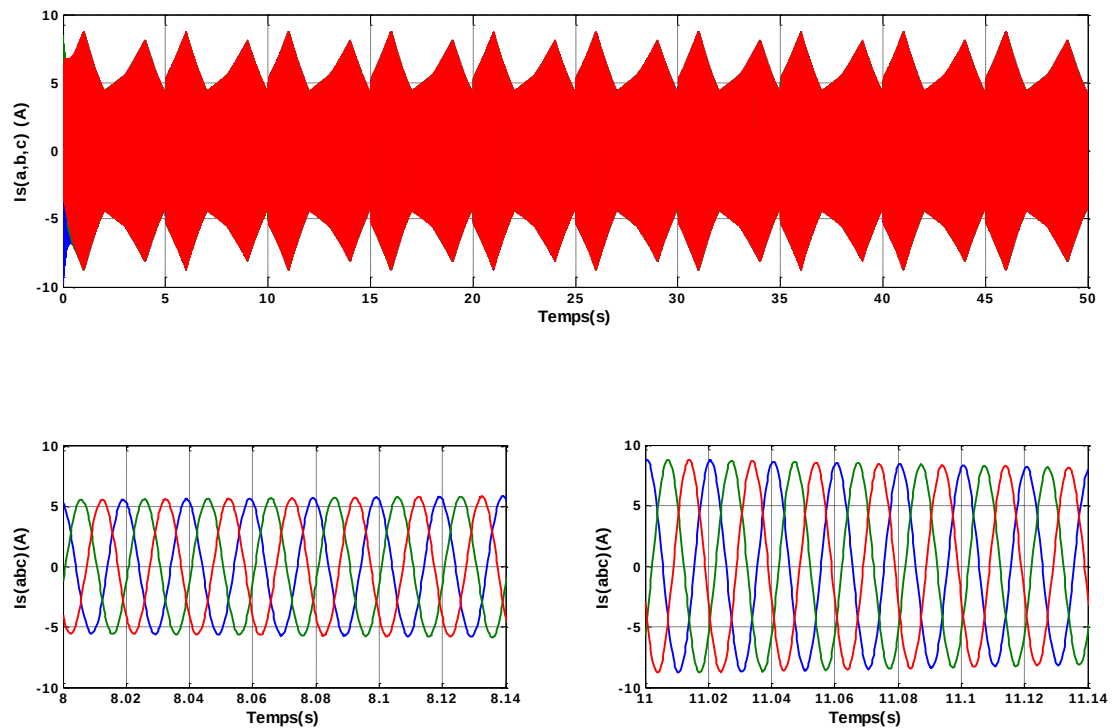


Figure III.10 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.

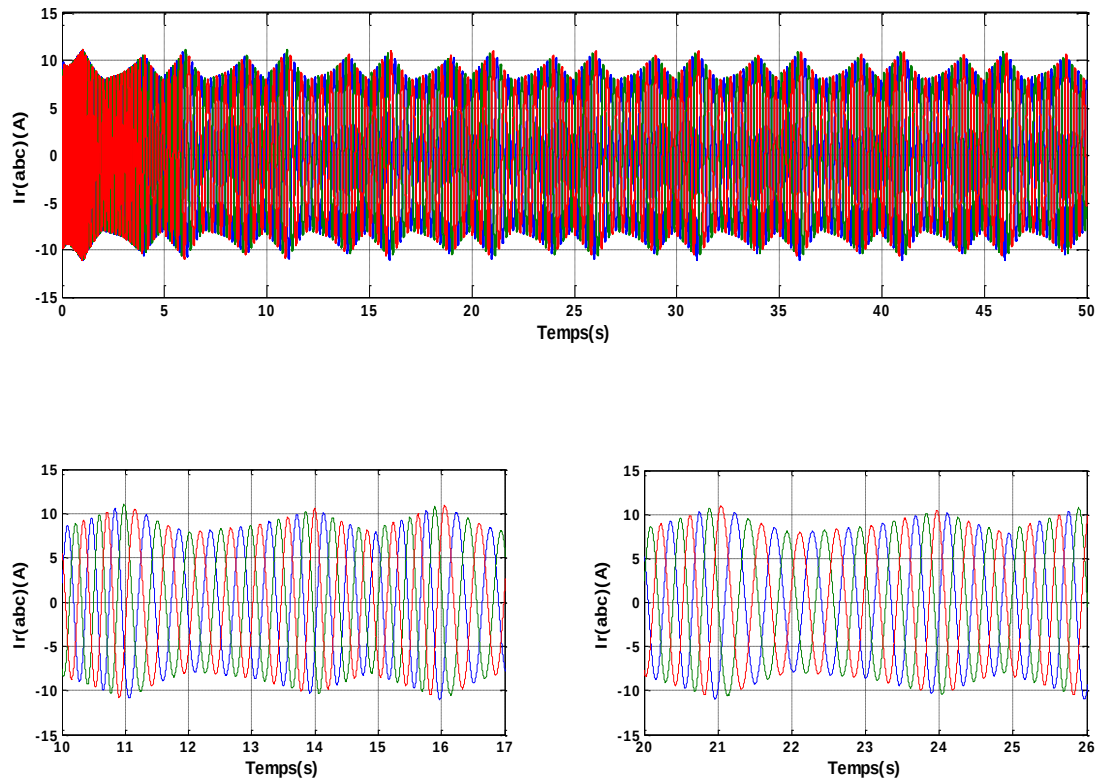


Figure III.11 : Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les différents instants.

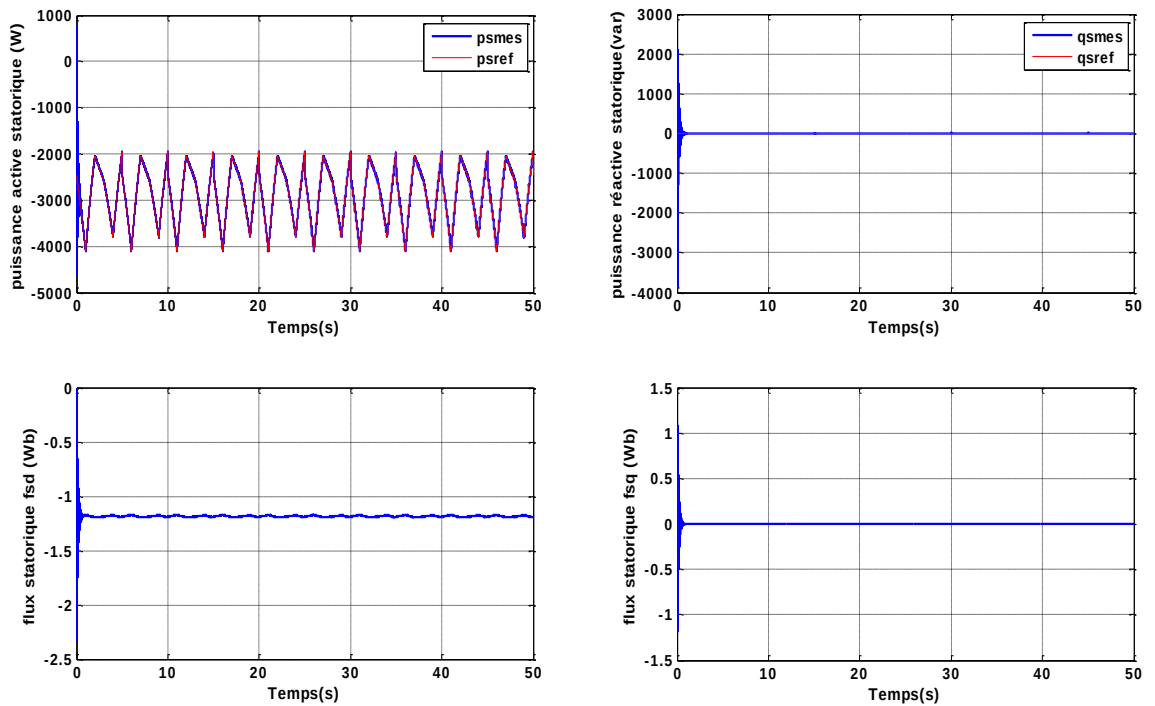


Figure III.12 : La puissance active et réactive et flux statorique.

III.5.2 Interprétation des résultats :

Pour les faibles vents, le système de commande assure l'optimisation de la puissance extraite en maintenant le coefficient de puissance de la turbine à sa valeur maximale.

Les résultats de simulations sont effectués sans onduleur. La consigne de puissance active est fonction de la vitesse du vent (déterminée à partir de la puissance de la turbine). La consigne de puissance réactive est maintenue à zéro de manière à garder le facteur de puissance unitaire côté stator.

III.6 Modélisation des Convertisseurs statiques :

La commande de la MADA nécessite un onduleur qui règle l'amplitude et la fréquence des tensions envoyées à son rotor. Ce convertisseur a besoin à son tour d'une alimentation continue régulée obtenue grâce à un redresseur à MLI. Cette partie vise à modéliser ces convertisseurs à part.

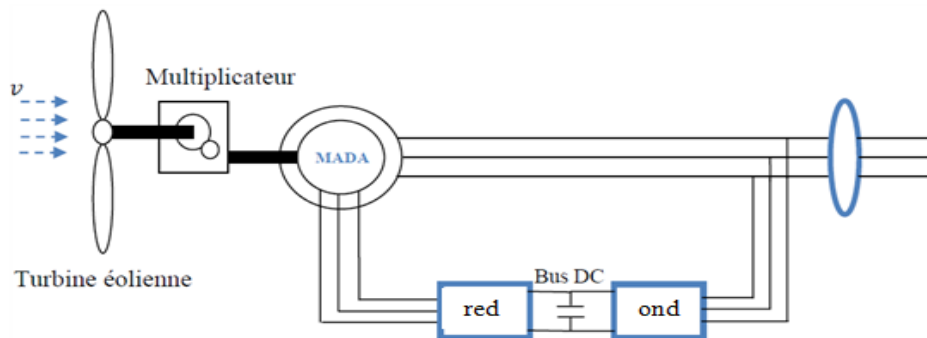


Figure III.13 : Structure de la cascade du redresseur – Onduleurs – MADA.

III.6.1. Modélisation Onduleur de tension :

L'onduleur utilisé est un simple onduleur triphasé à deux niveaux (six interrupteurs). En définissant la fonction de connexion d'un interrupteur F_{ks} , où k représente le numéro du bras ($k = 1, 2$ ou 3) et s le numéro de l'interrupteur considéré ($s = 1$ pour l'interrupteur du haut et $s = 0$ pour l'interrupteur du bas). Et sachant que les interrupteurs d'un même bras sont complémentaires, on peut écrire :

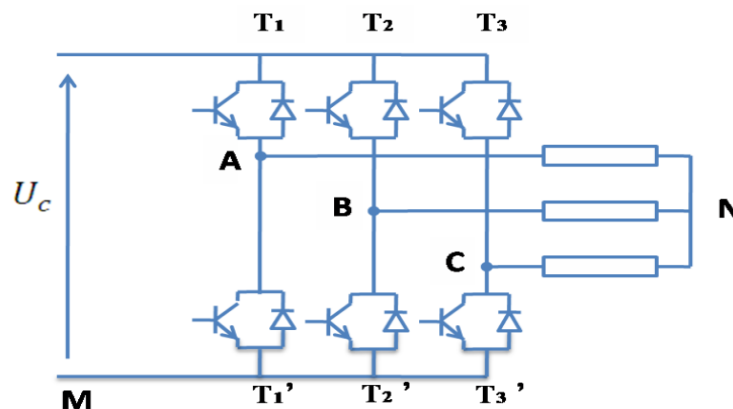


Figure III.14 : Onduleur de tension

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- Le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système triphasé équilibré en tension ne contenant que les harmoniques impairs différents de trois.

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases sont:

$$\begin{cases} V_A = V_{AO} + V_{ON} \\ V_B = V_{BO} + V_{ON} \\ V_C = V_{CO} + V_{ON} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Avec : $V_A + V_B + V_C = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON}$

Sachant que le système des tensions triphasées statoriques est symétrique.

$$V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON} = 0 \rightarrow V_{ON} = \frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (\text{III.13})$$

On remplace (III. 13) dans (III. 12), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = \frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = \frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

On peut écrire le système (III. 14) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

Et :

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{U}{2}S_1 \\ V_{BO} = \frac{U}{2}S_2 \\ V_{CO} = \frac{U}{2}S_3 \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Talque:

$V_{AO}=U/2S_1$		$S_1=1$	si K_1 fermé	($v_{r1} \geq v_p$)	si non	$S_1=-1$
$V_{BO}=U/2S_2$	Ou	$S_2=1$	si K_2 fermé	($v_{r2} \geq v_p$)	si non	$S_2=-1$
$V_{CO}=U/2S_3$		$S_3=1$	si K_3 fermé	($v_{r3} \geq v_p$)	si non	$S_3=-1$

On remplace (III. 16) dans (III. 15) .Les équations précédentes permettent d'exprimer les tensions simples de l'onduleur au moyen des fonctions de connexion comme suite :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{U}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

Le système (III.17) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI.

III.6.2. Modélisation du redresseur :

Les redresseurs sont des convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternative-continu.

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée.

Le redresseur à MLI est composé de six bras, dont chacun comporte deux cellules de commutation constituées d'une diode et d'un transistor en antiparallèle. Cette structure permet de passer le courant dans les deux sens [13].

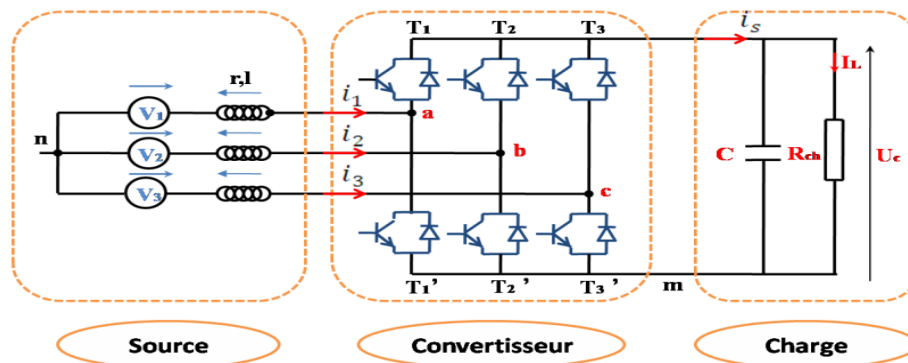


Figure III.15 : Structure du redresseur à MLI.

✚ La source d'alimentation :

La source est modélisée par une FEM triphasée sinusoïdale en série avec une inductance L et une résistance R qui représentent l'impédance totale de la ligne.

On suppose le réseau équilibré, avec les mêmes impédances dans les trois phases, les tensions de ligne sont exprimées comme suit :

$$\begin{cases} v_{res1} = R.i_{res1} + L \frac{di_{res1}}{dt} + v_{an} \\ v_{res2} = R.i_{res2} + L \frac{di_{res2}}{dt} + v_{bn} \\ v_{res3} = R.i_{res3} + L \frac{di_{res3}}{dt} + v_{cn} \end{cases} \quad (III.18)$$

Où V_{an} , V_{bn} et V_{cn} : sont les tensions simples par rapport au neutre de la source à l'entrée du convertisseur.

Et les courants de chaque phase du réseau sont alors donnés par le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{res1} - v_{an} \\ v_{res2} - v_{bn} \\ v_{res3} - v_{cn} \end{bmatrix} \quad (III.19)$$

L'étage Convertisseur

Sachant que la structure du redresseur est identique à celle de l'onduleur déjà modélisé dans la section précédente, la matrice de connexion du pont est similaire à l'équation (III. 17).

Les tensions simples V_{c1} , V_{c2} et V_{c3} :

$$\begin{bmatrix} V_{c1} \\ V_{c2} \\ V_{c3} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (III.20)$$

En plus le courant redressé est donné par :

$$i_{dc} = \begin{bmatrix} S_a & S_b & S_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} \quad (III.21)$$

La charge

Cet étage est constitué d'une capacité C en parallèle avec une résistance R modélisant la charge continue. Et il est régi par les deux équations électriques :

$$\begin{cases} \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C} (i_s - i_l) \\ U_c = R_{ch} i_l \end{cases} \quad (III.22)$$

Ce qui permet d'obtenir la fonction de transfert entre tension et courant redressés :

$$\frac{U_c}{i_s} = \frac{R_{ch}}{1 + R_{ch} C_p} \quad (III.23)$$

A partir des relations (III. 18), (III. 19), (III. 20) et (III. 22), on peut établir le schéma fonctionnel du redresseur à MLI ayant comme entrées la commande des gâchettes des N interrupteurs du haut (S1 , S2,S3) et comme sortie la tension redressée.

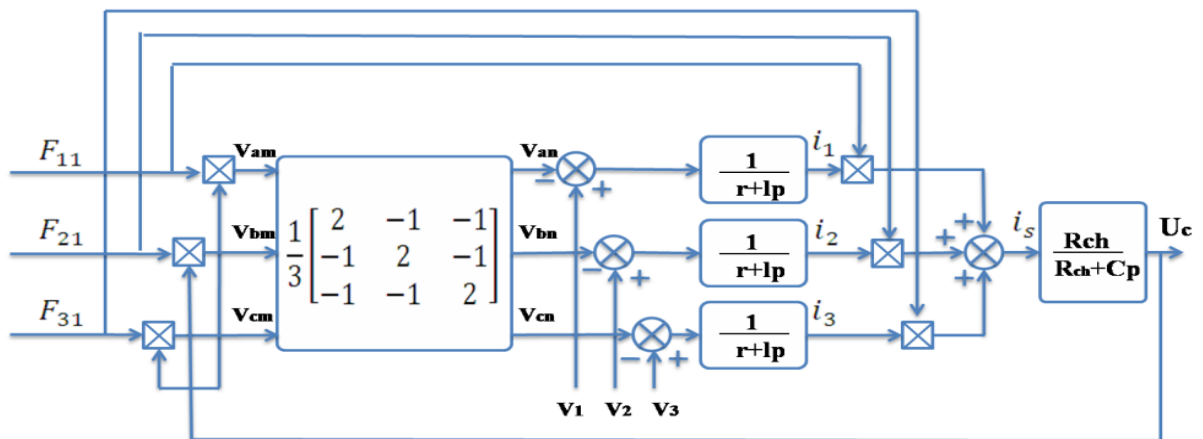


Figure III.16: Schéma fonctionnel du redresseur à MLI

III.6.3. Résultats de simulation :

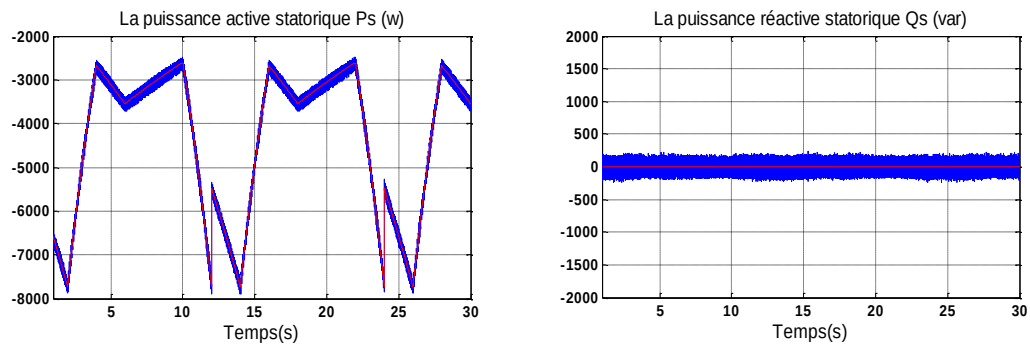


Figure III.17: Les puissances active et réactive statorique

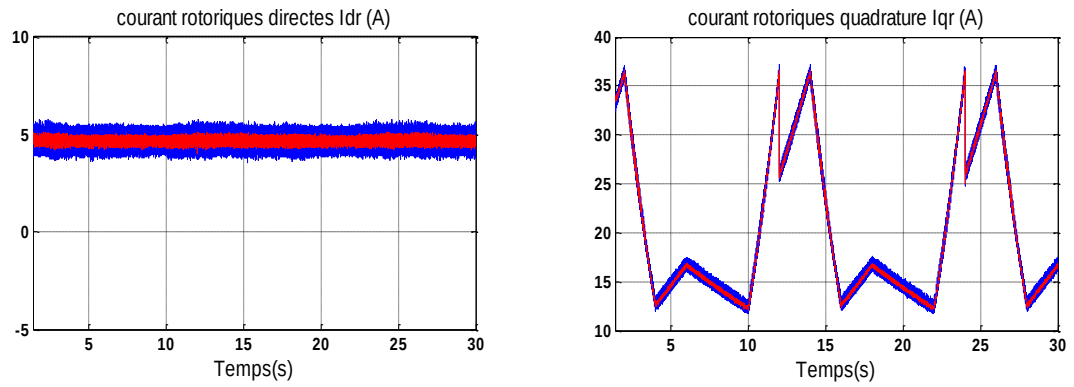


Figure III.18 : Les composantes du courant rotoriques.

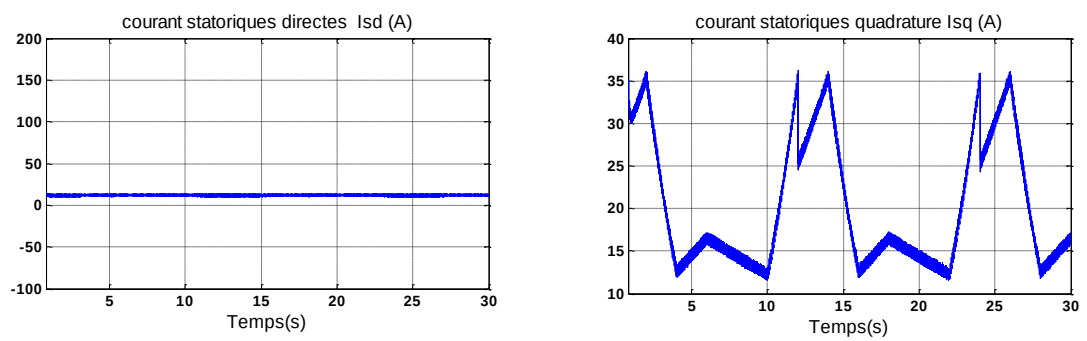


Figure III.19 : Les composantes du courant statoriques

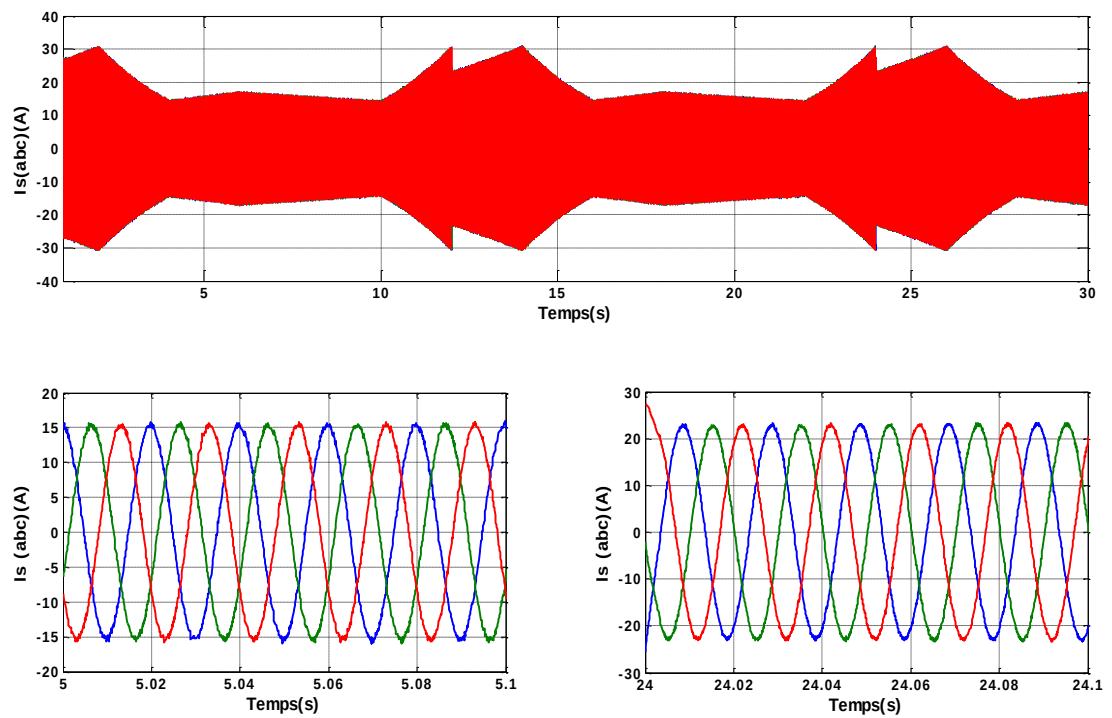


Figure III.20 : Le courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.

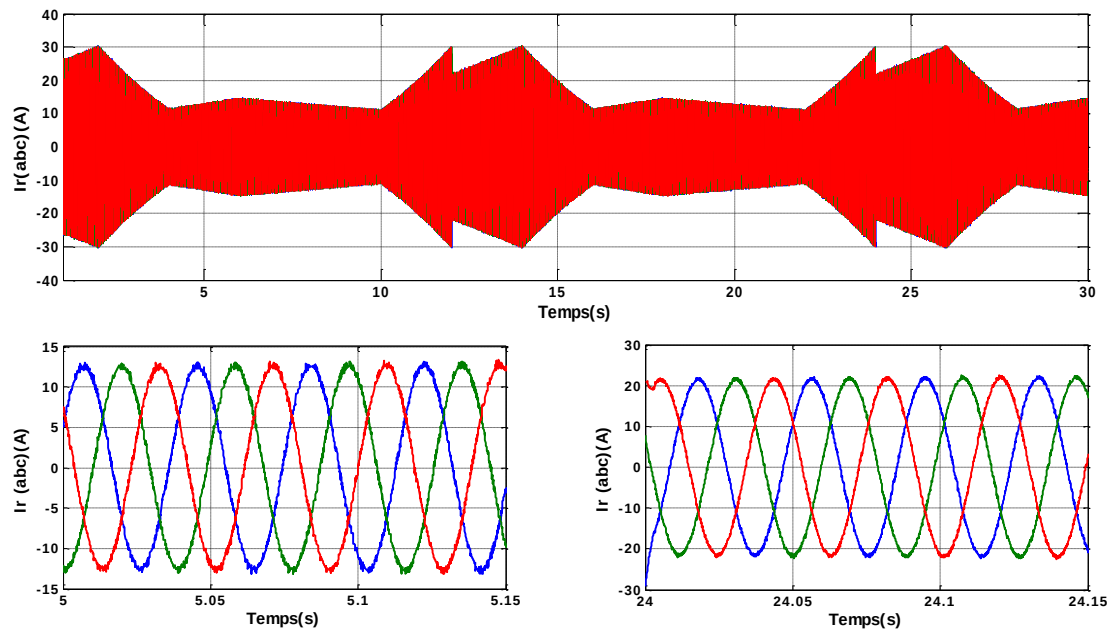


Figure III.21 : Le courant rotoriques avec un zoom entre les différents instants.

III.6.4 Interprétation des résultats :

Les figures présentées montrent les performances de la cascade utilisant un redresseur et un onduleur à deux niveaux connecté au rotor de la GADA qui est entraîné par une turbine éolienne. L'asservissement du redresseur consiste à deux boucles de régulation (une boucle interne et une autre externe). La consigne de la puissance active statorique est déterminée à partir de la puissance de la turbine. On constate un bon suivi de consigne pour la puissance active ainsi que la puissance réactive statorique qui est maintenue nulle par les puissances réelles débitées par la MADA. On remarque aussi la chronologie de fonctionnement de l'éolienne par les variations des différentes grandeurs présentées. La tension redressée est asservie à sa référence.

On constate aussi sur les résultats de simulation une bonne suivi de consigne pour puissance active ainsi que la puissance réactive statorique qui est maintenue nulle par les puissances réelles débitées par la MADA. La fréquence rotorique dépend de la vitesse de rotation de l'éolienne.

III.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons évalué et examiné par simulation les performances des puissances actives et réactives au niveau du stator de la GADA en mode générateur pour un fonctionnement à vitesse constante et variable.

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que la méthode indirecte avec boucle de puissance permet d'obtenir un système de réglage performant de la GADA.

La présence d'une boucle de courant dans la commande indirecte lui offre un avantage, permettant la limitation des courants rotorique pour protéger la machine et aussi la possibilité de superposer des références de courants harmoniques pour une éventuelle application de la MADA.

Le deuxième partie nous avons présenté la modélisation et la simulation de l'association AC/DC/AC.

Les résultats présentés montrent l'effet de la technique MLI pour l'amélioration de qualité de tension et de l'énergie

Au chapitre suivant, nous allons présenter la contribution potentielle de ce système éolien pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

CHAPITRE IV :

L'intégration énergie éolienne dans le réseau électrique

IV.1.Introduction :

A l'origine, le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Ainsi, les transits de puissances circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique de type grosses centrales thermiques, hydraulique ou nucléaire, vers l'aval représenté par les consommateurs. Le « système » réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de ligne, des milliers de poste de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique. Ainsi, des contrôles hiérarchisés assurent la tenue en tension et en fréquence ; ceux-ci couplés aux divers automates, ont la charge de garantir la continuité de service du système [06].

IV.2. Le réseau électrique :

Un réseau électrique est l'ensemble des composantes requises pour produire, transporter, distribution l'énergie électrique de la source (générateur) à la charge (consommateur). Le réseau électrique est normalement composé de multiples sources d'alimentation et de charges, reliées entre elles par un réseau maillé. Les configurations de réseau sont de plus en plus complexes du fait de la généralisation du principe d'interconnexion, des différents types de centrales, de charges, de dispositifs de protection et de régulation, ces derniers étant maintenant électroniques ou numériques. [09].

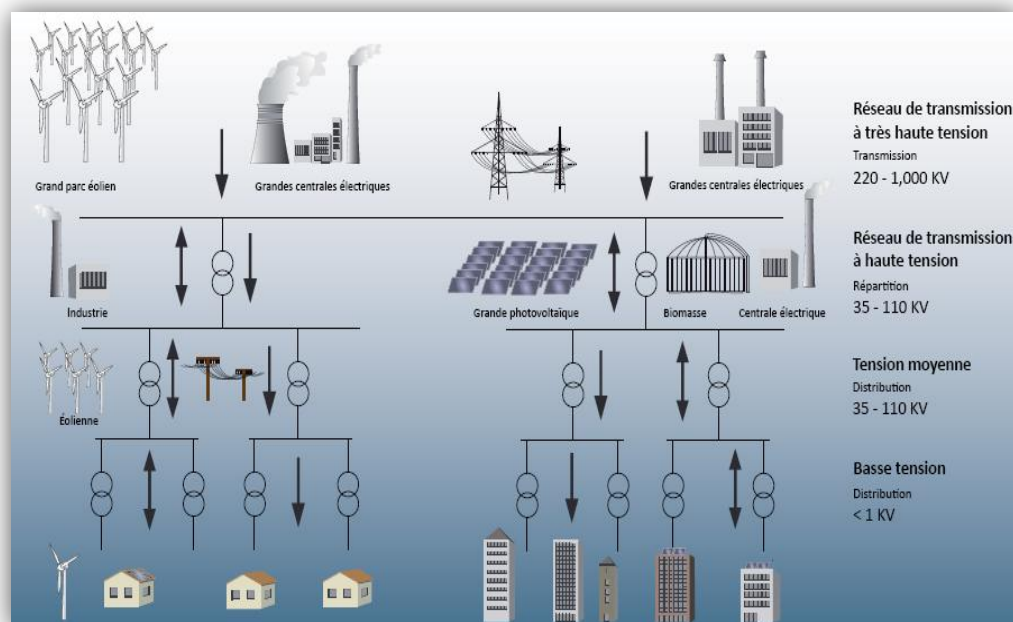


Figure IV.1 : Schéma d'un réseau électrique incorporant de l'énergie renouvelable

IV.3. Le rôle des réseaux électrique:

Le courant alternatif s'est généralisé avec l'évolution technologique qui a permis d'adapter les tensions à des puissances importantes grâce aux transformateurs. Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs.

Le réseau électrique est exploité de manière à assurer trois principaux objectifs :

- ✚ La distribution d'électricité doit pouvoir être garantie et ce malgré les aléas du réseau. En effet, celle-ci est un enjeu à la fois financier et de sécurité pour les biens matériels et des personnes. Ainsi l'opérateur du réseau doit être capable de faire face à ces aléas et d'éviter les dégâts potentiels ainsi que leurs propagations. Cet enjeu de sûreté de fonctionnement en régime normal et en régime perturbé est un des premiers objectifs.
 - ✚ L'onde de tension fait l'objet d'engagement contractuel que l'opérateur se doit de tenir en respectant une règle d'égalité c'est-à-dire une impartialité entre clients en conservant une continuité de service maximale.
 - ✚ Le dernier objectif d'exploitation est un objectif économique, l'exploitation doit être menée de manière optimale dans le but de réduire les pertes ainsi que les coûts de maintenance et d'investissement. D'autre part l'exploitation doit favoriser l'ouverture du marché de l'électricité.
- [06]

IV.4. Notion de qualité d'énergie :

La qualité de l'énergie électrique correspond à fournir un approvisionnement en énergie électrique conforme aux attentes du client (consommateurs, producteurs et gestionnaires de réseau) pour le bon fonctionnement de son installation et appareillage électrique. Différents critères permettent de mesurer le niveau de qualité de l'alimentation en énergie électrique :

- ✚ Le nombre et la durée des coupures de l'alimentation en énergie électrique ;
- ✚ Les perturbations du signal électrique (fréquence, amplitude, forme et symétrie du système) [31]:
 - ❖ Les creux de tension,
 - ❖ Les variations lentes de la tension,
 - ❖ Le flicker (variations rapides de la tension),
 - ❖ Les surtensions transitoires,
 - ❖ Les harmoniques,
 - ❖ Les déséquilibres de tension,
 - ❖ Les variations de fréquence.

IV .5.Fermes éoliennes :

Le regroupement d'un ensemble d'éoliennes à vitesse variable ou à vitesse fixe constitue une ferme éolienne on-shore ou off-shore. Deux architectures de connexion des éoliennes au réseau électrique peuvent être distinguées. La première consiste à les connecter au réseau au moyen des liaisons en tensions alternatives à travers un transformateur [25] .

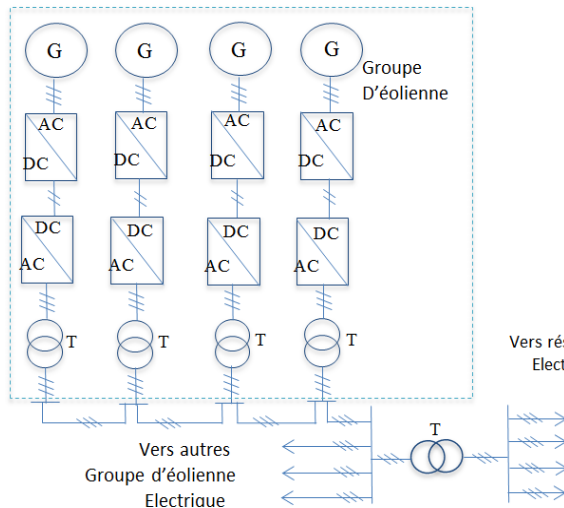


Figure IV.2 : Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons tensions Alternatives

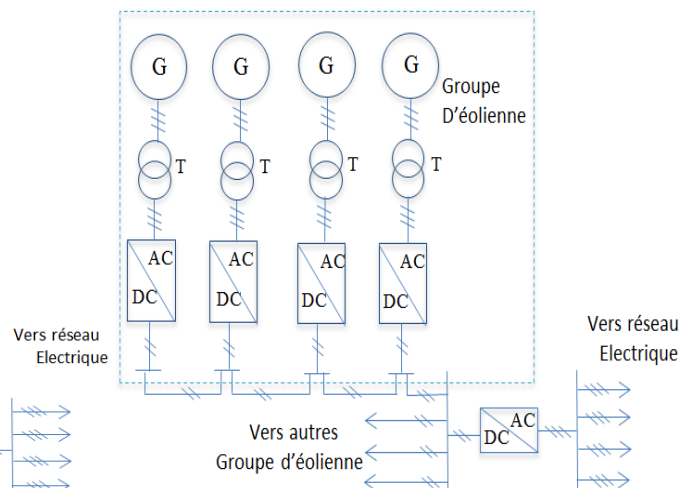


Figure IV.3: Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions continues

La seconde architecture repose sur la connexion des éoliennes entre elles via une liaison en tension continue dont le bus continu est dimensionné pour la tension nominale de la génératrice (Fig. IV.3). Ensuite un seul convertisseur continu - alternatif, permet de relier l'ensemble des éoliennes au réseau électrique. Cette architecture, envisagée particulièrement pour les fermes éoliennes off-shore, permet une meilleure participation de la ferme éolienne au réglage de la tension au point de raccordement [25] .

IV.6.L'intégration d'un système éolien au réseau électrique :

Le raccordement aux réseaux doit prendre en compte les conditions de couplage, qui se résument comme suit :

- ✚ L'égalité de valeurs maximales de tension, donc de leurs valeurs efficaces ;
- ✚ L'égalité de fréquences ;
- ✚ Un déphasage nul entre elles ;
- ✚ En triphasé, même succession des phases.
- ✚ Au support de tension, évalué en fonction de la capacité d'injection ou absorption de la puissance réactive (réglage de tension).
- ✚ A l'équilibre production-consommation, évalué en fonction de la capacité d'injection ou absorption de la puissance active (réglage de fréquence).

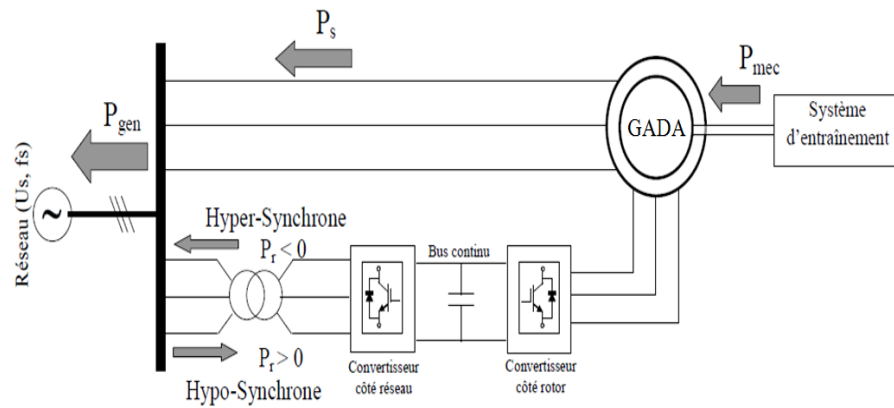


Figure IV.4 : Configuration de la GADA couplée sur un réseau électrique

Le système éolien est poussé à contribuer à ces services-système, en participant au support de tension et à l'équilibre production-consommation [09].

IV.7.Stabilité des réseaux

La stabilité d'un système de puissance peut être globalement définie comme étant la propriété d'un système d'énergie électrique qui lui permet de rester dans un état d'équilibre d'exploitation dans des conditions normales de fonctionnement et de retrouver un nouvel état d'équilibre acceptable après avoir été soumis à une perturbation. Suivant la nature et l'amplitude de la perturbation, on distingue trois types de stabilité [27] :

IV.7.1. L'écroulement de tension :

La stabilité de tension est la capacité d'un réseau électrique de maintenir la tension de fonctionnement normal dans les limites admissibles à tous les jeux de barres, après avoir été soumis à une perturbation, pour une condition de fonctionnement initiale donnée. Elle dépend donc de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre la demande de la charge et la fourniture de la puissance à la charge.[27]

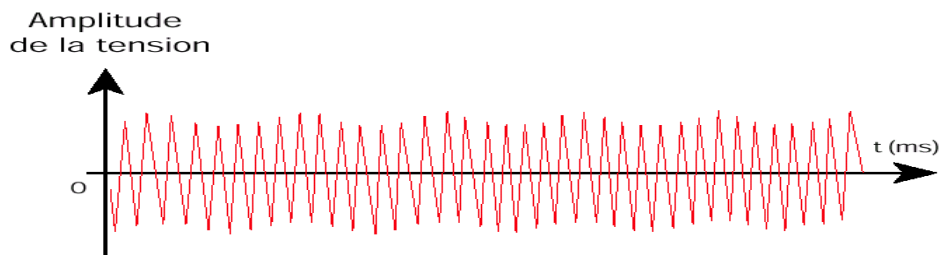


Figure IV.5 : L'écroulement de tension

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120°.

	Niveau de tension [kV]	Fonctionnement normal		Fonctionnement exceptionnel	
		Min [kV]	Max [kV]	Min [kV]	Max [kV]
Réseaux de transport	400	380	420	320	440
	225	220	245	180	250
Réseaux de répartition	90	78	100	72	102
	63	55	72	50	73.5

Tableau IV.1: Plages de variation de la tension du réseau de transport et de répartition

IV.7.2. L'écroulement de la fréquence

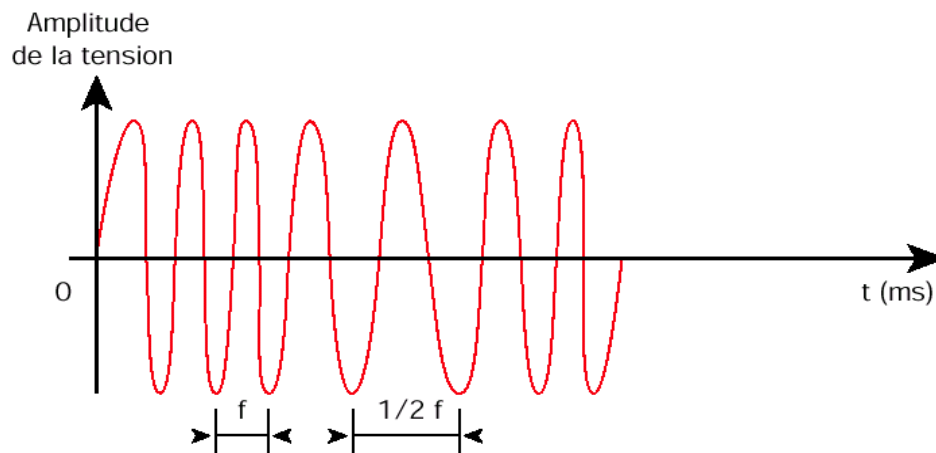
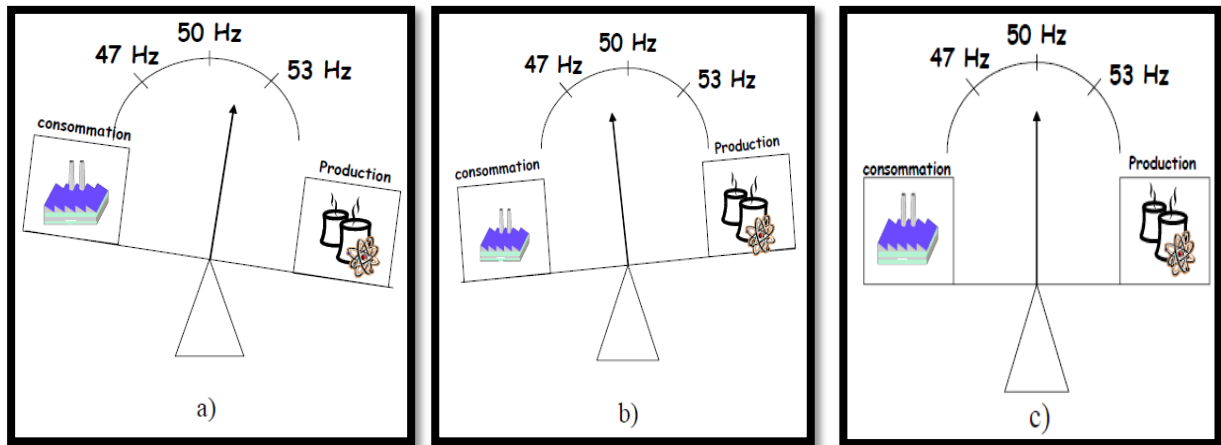


Figure IV.6 : L'écroulement de la fréquence

La stabilité de la fréquence représente l'équilibre entre la production et la consommation et est fixée par la vitesse de rotation des alternateurs. L'équation (IV.1) représente l'équation des masses tournantes décrivant la variation de vitesse des alternateurs (Ω_t) en fonction des variations des couples des centrales de production (T_p) et celui exercé par la consommation et par les pertes (T_c) :

$$J_{rés} \frac{d\Omega_t}{dt} = T_p - T_c \quad (IV.1)$$

où J_s est l'inertie globale du réseau qui est la somme des inerties des groupes de production [33]



- a) Déséquilibre Production – consommation ($PM > PC$)
b) Déséquilibre Production – consommation ($PM < PC$)
c) Equilibre Production – consommation ($PM = PC$)

Figure IV.7: Evolution de la fréquence en fonction du niveau de production / consommation.

IV .8.Choix de réglage de tension :

IV .8.1. Le type de source de production :

Le vent est une source de production variable et difficilement prédictible. Les variations de la vitesse du vent conduisent à une production de puissance électrique variable en sortie des éoliennes. Ainsi, le flux de puissance dans les lignes et les transformateurs change avec les variations de la vitesse du vent, entraînant une variation des pertes et un changement de la valeur de la tension dans les nœuds du réseau électrique. Ceci implique donc, une stratégie de contrôle de la tension plus complexe. [32]

IV .8.2. Le type de machine utilisé :

Il est bien connu que les éoliennes à vitesse fixe et machine asynchrone à cage n'ont pas la capacité de participer au réglage de tension. Dans les réseaux contenant ce type de machines, le réglage doit se faire à l'aide d'éléments de compensation de puissance réactive.

Pour les éoliennes à MADA, les convertisseurs électroniques associés leur permettent de fonctionner en régime capacitif ou inductif de façon à fournir ou absorber de la puissance réactive. La MADA peut ainsi participer au réglage dynamique de tension selon les deux principes suivants: [32]

- ✚ Le convertisseur coté rotor (CRT) est commandé de façon à faire varier l'angle du champ du rotor par rapport à celui du stator selon les besoins de réactif de la MADA ;
- ✚ Le convertisseur coté réseau (CRS) est permettant d'injecter dans le réseau un courant AC contrôlé en phase et en amplitude, et ainsi régler la tension en régimes dynamique et permanent.

IV .8.3.Le point de connexion :

Le point de connexion des éoliennes a aussi une grande importance sur la gestion du réactif .En effet, on compte trois points de connexion possibles en fonction de la tension de raccordement : connexion au réseau de transport, connexion au réseau de distribution dans un départ dédié et connexion au réseau de distribution dans un feeder [32].

IV .9.Contrôle de la fréquence :

Ce réglage est obligatoire pour tous les groupes de production classiques raccordés au réseau de transport. Leur participation est quantifiée par la notion de statisme et par la réserve de puissance active. Le statisme représente la relation linéaire entre la variation de fréquence et la variation relative de puissance active. Il est défini par :

$$stat = \frac{\Delta f / f_0}{\Delta P_G / P_{G0}} \cdot 100 \quad (IV.2)$$

Avec :

stat : Statisme d'un générateur (%)

Δf : Variation quasi-stationnaire de fréquence (Hz)

f_0 : Fréquence nominale (Hz)

ΔP_G : Variation de puissance active d'un générateur (W)

P_{G0} : Puissance fournie par le générateur (W) à la fréquence nominale

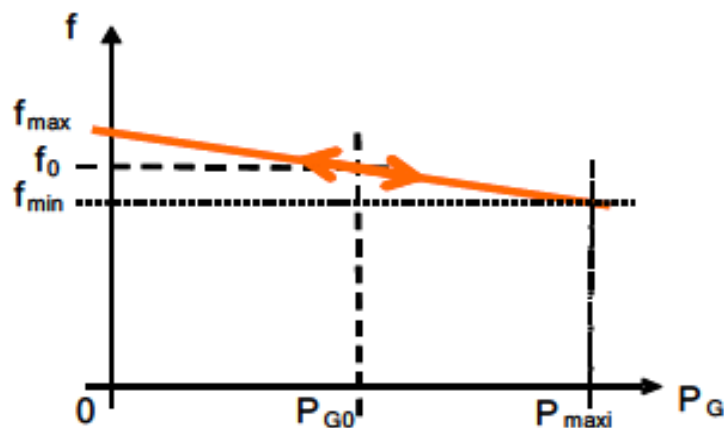


Figure IV.8: Réglage primaire de fréquence – exemple de droite de statisme

IV .10. Contrôle de la tension à travers le contrôle de la puissance réactive :

La stratégie d'action consiste une nouvelle fois à utiliser les possibilités offertes par l'interface d'électronique de puissance pour les structures à vitesse variable et par le contrôle associé.

On s'intéresse ici seulement au réglage primaire de tension pour les éoliennes, par contrôle de l'énergie réactive échangée avec le réseau composé d'un générateur à l'extrémité 1 (poste source), d'une ligne de puissance et d'une charge à l'extrémité 2 (Fig. IV.9). E et V sont respectivement la tension à l'extrémité 1 et à l'extrémité 2. La ligne électrique a une résistance R et une réactance X . P et Q représentent respectivement, les puissances active et réactive transmises à l'extrémité 2.

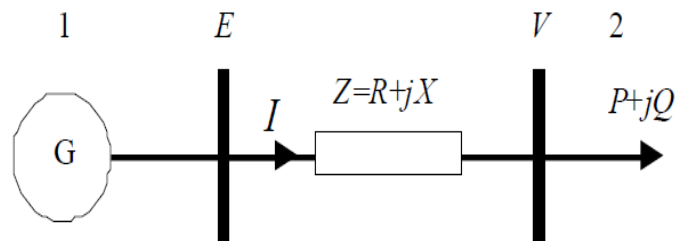


Figure IV. 9 : Réseau mono-machine alimentant une charge par une ligne de transport.

D'après la figure IV.9, la chute de tension est donnée par l'équation :

$$\Delta V = E - V + ZI + RI\cos\varphi + XI\sin\varphi + j(XI\cos\varphi - RI\sin\varphi) = \frac{RP+XQ}{E} + j\frac{XP-RQ}{E} \quad (\text{IV.3})$$

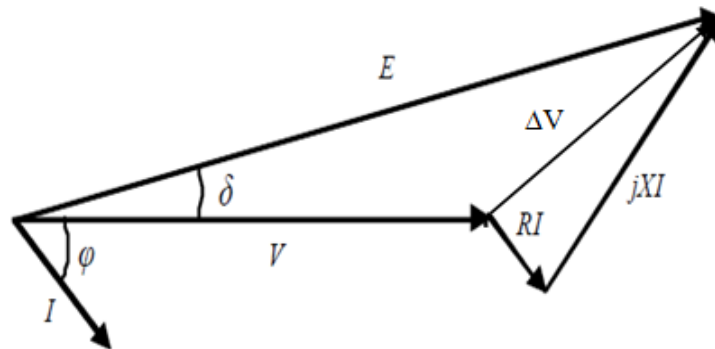


Figure. IV.10 : Diagramme de Fresnel correspondant à une ligne de puissance.

La chute de tension est égale à sa projection.

$$\Delta V \approx \frac{RP+XQ}{E} \quad (\text{IV.4})$$

Le réglage de la tension dans les réseaux de distribution, où la réactance X et la résistance R est du même ordre de grandeur, s'effectue en agissant sur les puissances actives et réactives en même temps.

Cependant, dans la plupart des réseaux électriques de transport la réactance X est très supérieure à la résistance R .

$$X \gg R \quad (\text{IV.5})$$

Donc :

$$\Delta V \approx \frac{XQ}{V} \quad (\text{IV.6})$$

L'équation (IV.6) montre que le contrôle de la tension dans les réseaux de transport dépend exclusivement du contrôle de la puissance réactive.

En intégrant un générateur éolien dans l'extrémité 2 (Figure IV.11), avec P_{gw} et Q_{gw} et représentent respectivement, les puissances active et réactive produit par la générateur éolien.

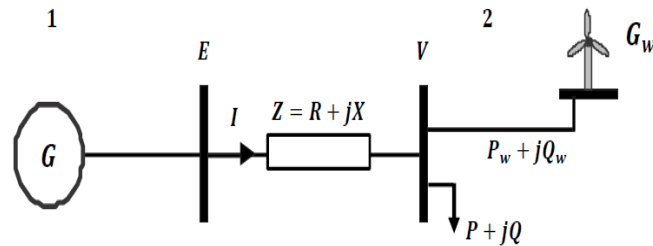


Figure IV.11 : Ferme éolienne connecte au réseau mono-machine alimentant une charge.

L'équation de la chute de tension devient :

$$\Delta V \approx \frac{RP + X(Q - Q_{gw})}{E} \quad (\text{IV.7})$$

L'équation (IV.7) montre qu'en peut contrôler la tension dans les réseaux de transport par le contrôle de la puissance réactive de générateur éolienne Q_{gw} .

IV.11. Résultats de simulation

Les simulations de modèle réseau et du système éolien sont été réalisées dans l'environnement MATLAB/Simulink, afin d'effectuer des tests de la régulation.

Pour effectuer des tests de la régulation de la tension, en appliquant une chute de tension dans l'extrémité 2 à partir de l'instant = 0.0.5s et jusqu'à l'instant = 0.35s .

La Figure IV.5 montre le résultat de simulation de la régulation de la tension.

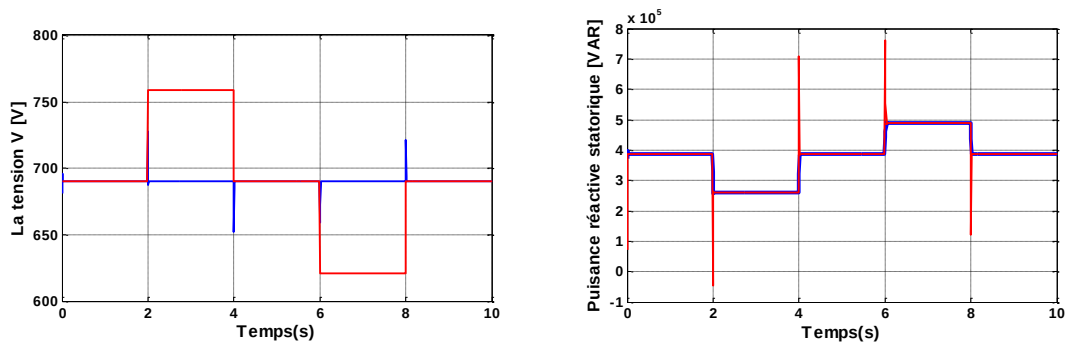


Figure IV. 12 : Evolution de la tension du système et la puissance réactive échangée avec le réseau.

Interprétation des résultats :

Le résultat de simulation de la Figure IV.12 montre que le système éolien est participant au support de tension par la control de la puissance réactive échangée avec le réseau, soit par l'injection ou l'absorption de la puissance réactive.

IV.12.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'efficacité du système éolien pour l'amélioration des performances du réseau électrique à savoir le contrôle de tension et le contrôle de fréquence pour un système de petite taille.

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'objectif préalablement défini de ce travail consistait à la modélisation et la commande des génératrices éoliennes. A la lumière de l'étude effectuée, nous avons vu les étapes successives permettant d'élaborer une stratégie de commande pour une génératrice éolienne jusqu'à sa mise en œuvre.

Dans le contexte des énergies renouvelables, un état de l'art de la génératrice éolienne est présenté dans le premier chapitre, on rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et les différents types d'éoliennes avec les machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie.

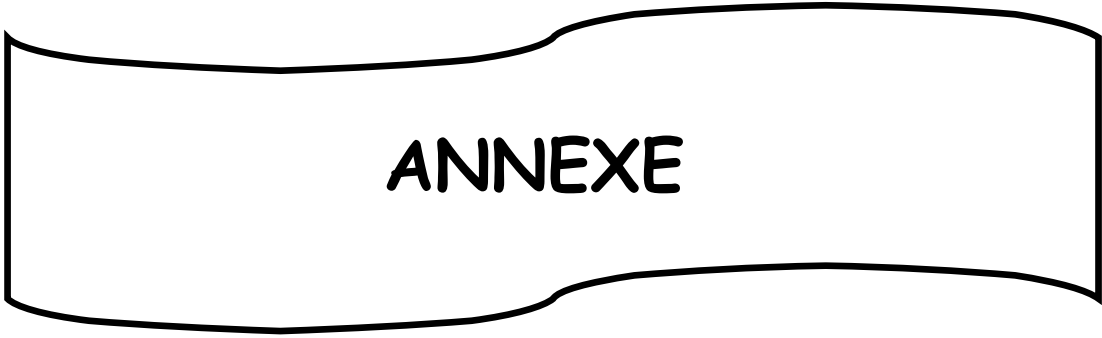
La modélisation d'un système de génération d'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation a été effectuée. La transformation de Park a été utilisée pour modéliser la génératrice et pour concevoir les différentes fonctions de sa commande.

Dans le troisième chapitre est consacré à une étude bibliographique des différentes stratégies de commande de la machine asynchrone à double alimentation. On en déduit que la stratégie de pilotage très majoritairement utilisée sur ce type de machine électrique est le contrôle vectoriel. Ce dernier est basé sur le principe d'orientation d'un champ.

Dans le quatrième chapitre a fait l'objet d'une étude du fonctionnement d'une ferme éolienne basé sur la machine asynchrone fonctionnant à vitesse variable. Ce système de production est intégré dans le réseau électrique.

A l'égard du travail que nous avons présenté, des perspectives pouvant être envisagés Pour l'amélioration de la chaîne turbine-GADA- réseau. Parmi les quels on peut citer :

- L'utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance .
- Faisabilité de control de puissance active et réactive dans la GADA ;
- L'étude et l'application d'autres convertisseurs de niveaux supérieurs pour la minimisation des harmoniques renvoyés au réseau.
- Enfin, l'étude des perturbations de la production d'énergie éolienne vis-à-vis les déséquilibres du réseau électrique.



ANNEXE

ANNEXE A.

Données de la machine asynchrone à double alimentation [06]:

Valeurs nominales : 4KW;220/380 V ; 50Hz ; 1440tr/min

Paramètres :

$$2P=4$$

$$R_s \text{ (résistance de stator)} = 1.2 \, \Omega$$

$$R_r \text{ (résistance de rotor)} = 1.8 \, \Omega$$

$$L_s \text{ (inductance de stator)} = 0.1554 \, \text{H}$$

$$L_r \text{ (inductance de rotor)} = 0.1568 \, \text{H}$$

$$M \text{ (inductances mutuelles)} = 0.15 \, \text{H}$$

Constantes mécaniques :

$$J \text{ (moment d'inertie)} = 0.2 \, \text{Kg.m}^2$$

$$f \text{ (Coefficient de frottement)} = 0.001 \, \text{N.m.s/rad}$$

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

$$\text{Nombre de pale} = 3$$

$$\text{Diamètre d'une pale } R = 3 \, \text{m}$$

$$\text{Gain du multiplicateur } G = 7.2$$

Paramètres du filtre :

$$r = 1\Omega$$

$$l = 0.051\text{H}$$

Capacité du condensateur de lissage de la tension du bus continu :

$$C = 8 \, \text{mF}$$

ANNEXE B.

SYNTHESE DU REGULATEUR PROPORTIONNEL INTEGRAL:

La stratégie de commande de la MADA décrite au chapitre II, utilise un régulateur proportionnel intégral **PI**. C'est un régulateur simple et rapide à mettre en oeuvre et performance. La Figure (A.1) montre un système en boucle fermé corrigé par un régulateur **PI**.

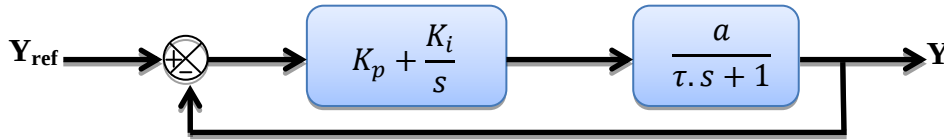


Figure 2.1 Système régulé par un régulateur proportionnel intégral

Ou:

$K_p + \frac{K_i}{s}$: Est la fonction de transfère du régulateur proportionnel intégral.

$\frac{a}{\tau.s+1}$: Est la fonction de transfère du système à régulier.

τ : Est la constante de temps du système.

La fonction de transfère de l'ensemble système-régulateur s'écrit alors sous la forme suivante :

$$FTBO = \frac{\frac{K_p}{K_i} \cdot s + 1}{\frac{s}{K_i}} * \frac{a}{\tau.s+1}$$

On prend : $\tau = \frac{K_p}{K_i}$

La fonction de transfère devient alors :

$$FTBO = \frac{K_i \cdot a}{S}$$

Ce qui donne en boucle fermé :

$$FTBF = \frac{1}{\tau_r \cdot S + 1}$$

$$\tau_r = \frac{1}{K_i \cdot a}$$

Avec:

le temps de repense du système corrigé qui doit être suffisamment rapide

Ainsi, les gains du régulateur peuvent être exprimés de la manière suivante :

$$K_p = \frac{T}{\tau_r \cdot a}$$

$$K_i = \frac{1}{\tau_r \cdot a}$$

Cette méthode de synthèse sera utilisée pour la détermination des gains des différents régulateurs utilisés dans la commande de la MADA. Rappelons que la symétrie du système nous permet de calculer un seul régulateur pour les deux axes pour les puissances et pour les courants.

Boucle des courants:

Si on considère l'hypothèse d'un couplage entre l'axe direct et l'axe en quadrature négligeable pour la commande directe, et parfaitement compensé pour les commandes indirectes en boucle ouvert et en boucle fermé, ainsi que tous les termes de perturbation compensés on obtient le système corrigé de la figure ci-dessous.

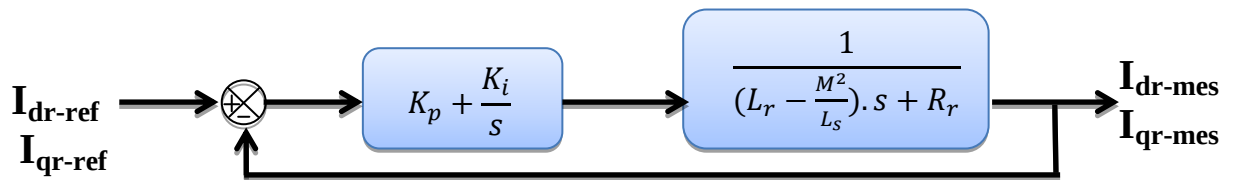


Figure 2.2 Schéma de la régulation des courants rotorique

Boucle des puissances:

Sous les mêmes hypothèses que pour la boucle des courants, on obtient la fonction de transfert à corriger pour le contrôle des puissances comme sur la figure suivante.

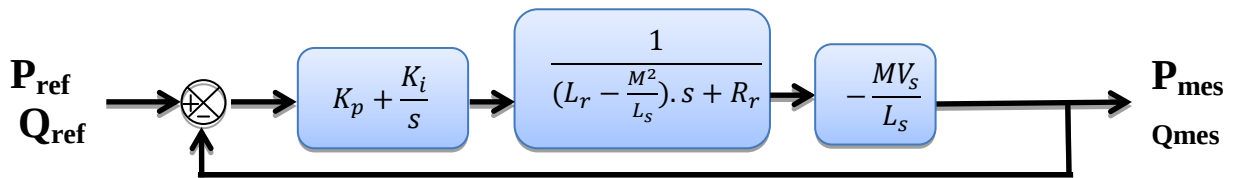
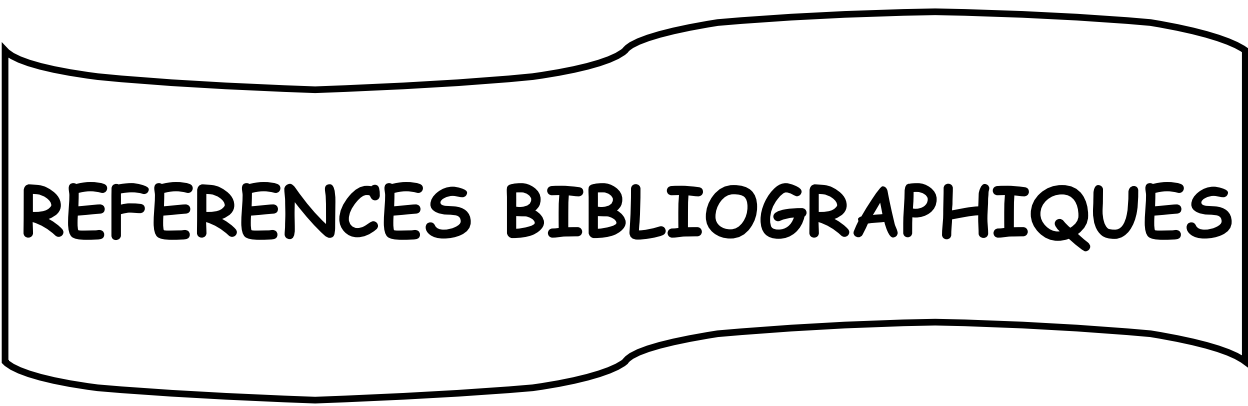


Figure 2.3 Schéma de la régulation des puissances statoriques



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[01] **NAOUEL HAMDI** « Modélisation et commande des génératrices éoliennes » magister, université mentouri de constantine, 24 /01/2008.

[02] **BENNOUR CHERIF** « Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » magister, université mohamed khider – biskra, 19/11/2012.

[03] **DOMINIQUE GUERETTE** « Asservissement d'une éolienne à vitesse variable et à pas fixe dans le cadre d'un système de jumelage éolien-diesel à haute pénétration » ingénierie, l'université du québec à rimouski, novembre 2010.

[04] **WWW.ENR.FR - WWW.FEE.ASSO.FR** « Syndicat des énergies renouvelables », France énergie éolienne février 2009.

[05] **Nadji fouad- Yousfi yacine** « Commande vectorielle de la machine à induction avec observateur de flux » diplôme d'ingénieur d'état, université de m'sila, juin2005.

[06] **KOUADRA Foued** « Etude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau mt » *diplôme de Magister*, université mentouri de constantine.

[07] **AIT RAMDANE NAIMA** « Commande robuste d'une génératrice asynchrone à double alimentation pour la conversion de l'énergie éolienne » ingénieur d'état , université mouloud mammri de tizi-ouzou ,03/07/2012.

[08] **DOUADI TAREK** « Etude et commande d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone » diplôme de magister, université de batna.

[09] **BOIDJELLAL BILAL** « Amélioration des performances du réseau électrique par la commande d'un système éolien à base d'une MADA » master en génie électrique , université de m'sila ,2012/2013.

[10] **MEZERZI IMAD** « Contribution à la modélisation et la commande d'une éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation » master en génie électrique , université de m'sila, 2012/2013.

[11] **CHERFIA NAÏM** « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens » magister, université mentouri – constantine, 07/ 06 / 2010.

- [12] **MR. ABDERRAHIM ZEMMIT** « Commandes en tension d'un moteur asynchrone à double alimentation (MADA) » » master en génie électrique, université de m'sila ,2012/2013.
- [13] **YACINE BENTALEB , YOUSEF HASENE** « Etude d'un émulateur éolien »diplôme d'ingénieur d'état , 2008.
- [14] **MAYOUF MESSAOUD** « Contribution a la modélisation de l'aérogénérateur synchrone a aimants permanents » magister, université de batna ,13/02/2008.
- [15] **HASSINI NEE BELGHITRI HOUDA** « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride eolien-photovoltaïque » magister, université abou-bakrbelkaid de tlemcen, 2010.
- [16] **HARITZA CAMBLONG**« Minimisation de l'impact des perturbation d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » doctorat, école nationale supérieure d'arts et métiers centre de bordeaux ,2003.
- [17] **FARID MERRAHI** « Alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) » diplôme de magister, école nationale polytechnique, 30/06/2007.
- [18] **BOUARAKI MOULOUD** « Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : application sur un site à tindouf » magister ,université m'hamed bougara-boumerdes,2011/2012.
- [19] **KHETTACHE LAID** « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée » diplôme de magister, université de batna ,2007.
- [20] **BENNOUR CHERIF** « Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » diplôme de magister, université mohamed khider – biskra, 19/11/2012.
- [21] **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 mentouri constantine , 25 mars 2011.
- [22] **HASSAD MOHAMED AMINE** « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques. » diplôme de magister, universitesetif 1, 2012.
- [23] **KHALED FERKOUS** « Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne » diplôme de magister, université mentouri constantine, 27 /05 / 2009.

- [24] **MOUSSA SIDDO ABDOULAZIZ** « Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » diplôme d'ingénieur d'état, école nationale polytechnique, 2007.
- [25] **TARAK GHENNAM** « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » docteur, école militaire polytechnique d'Alger, école centrale de Lille, 29/09/2011.
- [26] **FREDERIC POITIERS** « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne *machine asynchrone à cage autonome *machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau » doctorat, université de Nantes, 19 décembre 2003.
- [27] **MOKHNACHE Madiha** « Etude de la stabilité d'une ferme éolienne connectée à un réseau électrique avec des dispositifs FACTS » diplôme De Magister, 08/01/2012.
- [28] **BENARIOUA Sofiane** « Etude d'un Système Eolien à Vitesse Variable » diplôme De Magister, 24/10/2012.
- [29] **DENDOUGA Abdelhakim** «Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM)»; thèse de doctorat en électrotechnique ; BATNA. 2010
- [30] **HAMZAOUI Ihssen** «Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur»; mémoire de magister en électrotechnique ; Ecole Nationale Polytechnique. 2008
- [31] **Arnaud DAVIGNY** « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » titre de Docteur Spécialité Génie Electrique, Université des Sciences et Technologies de Lille .2007.
- [32] **David Marín** « Intégration des éoliennes dans les réseaux électriques insulaires » titre de Docteur Spécialité Génie Electrique, ecole centrale de lille. 22 avril 2009.
- [33] **ARNAUD VERGNOL** « Intégration dans le réseau électrique et le marché de l'électricité de production décentralisée d'origine renouvelable :Gestion des congestions locales » titre de Docteur Spécialité Génie Electrique, l'ecole centrale de lille, 29 novembre 2010.

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DU L'OBTENTION
DU DIPLÔME MASTER EN GENIE ELECTRIQUE
SPECIALITE : INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANIQUE**

PROPOSE ET DIRIGE PAR : M^{me}. BELOUNIS Ouassila & Dr . MESSALTI Sabir

PRESENTE PAR : DJAFER Mohamed

Thème :

**Etude et contrôle de la machine asynchrone à double
alimentation en vue de son utilisation comme
aérogénérateur**

Résumé :

Ce travail présente l'étude et l'utilisation de la génératrice asynchrone à rotor bobiné à double alimentation « GADA » dans la production de l'énergie éolienne. Pour ce faire, un modèle de la turbine éolienne a été établi, puis de la « GADA » faisant appel à des dispositifs d'électronique de puissance, la stratégie de commande développée est basée sur un contrôle vectoriel. Cette étude sera conclue par une étude de l'intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.

Mots clés :

Turbine, éolienne, Génératrice Asynchrone à Double Alimentation « GADA », Modélisation, Commande vectorielle, Convertisseur AC/AC « Redresseur-Filtre- Onduleur », Le réseau électrique

N° d'ordre : ISE-109