

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A.MIRA-BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique



# Mémoire de Fin de d'études

En vue l'obtention du diplôme de master en électrotechnique

Spécialité: machines électriques

Thème

---

Etude d'une éolienne à base d'une GADA, raccordée au  
réseau à travers une cascade deux redresseurs deux  
niveaux-onduleur trois niveaux

---

présenté par :

✚ M<sup>r</sup>. IHDENE Abdenour  
✚ M<sup>elle</sup> DJEDRA Saida

Encadré par :

✚ M<sup>r</sup> Rabah BABOURI

Members de jury:

✚ M<sup>me</sup> Sofia. BELAID  
✚ M<sup>r</sup> Loucif. ALOUI

Année Universitaire : 2018/2019

## Remerciements

*N*ous remercions **DIEU**, le tout-puissant de nous avoir donné le foie qui nous a guidée jusqu'à la réalisation et l'aboutissement de ce travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur M<sup>r</sup> **Rabah BABOURI** pour son orientation, ses conseils, ses encouragements, son aide précieux, et le temps qu'il nous a accordé tout au long de notre travail, nous exprimons notre profond remerciement et respect.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à M<sup>me</sup> **S. BELAID**, et à M<sup>r</sup> **L. ALOUI** d'avoir accordé de leur temps et d'avoir accepté de juger notre travail.

Nos remerciements les plus sincères vont à tous les professeurs du département d'**Electrotechnique** de l'université de **Bejaïa** qui n'ont pas hésité un instant pour nous orienter, et d'être à notre disposition à tout moment pour la réussite et la réalisation de notre travail.

Nos chères **parents**, pour leurs patiences et leurs sacrifices pour voir ce jour. Ils ont tout donné pour notre réussite.

Nos fidèles **amis(es)**, tous nos remerciements pour vous, pour avoir participé soit de près soit de loin à la réalisation de ce travail.

*Mr. Abdenour IHEDENE*

*Mlle. Saida Djedraa*

# *Dédicaces*

*À nos familles*

*Nos amis(es)*

*Les personnes les plus chères à nos cœurs*

*Toute la promotion d'électrotechnique.*

## Liste des symboles

$\Omega_t$	Vitesse de rotation de la turbine;
$\Omega_t$	Vitesse de rotation de référence de la turbine
$W_g$	Pulsation des courants injectés au réseau;
$W_s$	Pulsation des courants statoriques ;
$W_r$	Pulsation des courants rotoriques
$\lambda$	Coefficient de vitesse relative ;
$\lambda_{opt}$	Coefficient de vitesse relative optimale
$\sigma$	Coefficient de dispersion ;
$\rho$	Densité volumique de l'air ;
$\beta$	Angle de calage des pales de la turbine
$\Phi_{sa} \ \Phi_{sb} \ \Phi_{sc}$	Flux créés par les enroulements statoriques
$\Phi_{ra} \ \Phi_{rb} \ \Phi_{rc}$	Flux créés par les enroulements rotoriques
$\Theta$	Position angulaire de la phase rotorique par rapport à la phase statorique
$\Theta_m$	Position angulaire mécanique du rotor par rapport au stator;
$\Theta_s$	Position angulaire du vecteur champ tournant statorique par rapport au stator
$\Theta_r$	Position angulaire du vecteur champ tournant rotorique par rapport au rotor
$\Theta_{s,r}$	Position angulaire du vecteur de tension de référence statorique ou rotorique dans le plan $dq$ ;
$V_v$	Vitesse du vent
$V_{sd}, V_{sq}$	Tension simple aux bornes des enroulements rotoriques dans le plan $dq$ ;
$V^*_{sd}, V^*_{sq}$	Tensions simple de références des enroulements rotoriques dans le plan $dq$
$V^*_{s,r}$	Vecteur de tension de référence statorique ou rotorique dans le plan $dq$ ;
$V^{*'}_{s,r}$	Vecteur de tension de référence statorique ou rotorique dans le plan $d', q'$
$V^{*'}_{sd}, V^{*'}_{sq}$	Composantes du vecteur de tension de référence statorique ou rotorique dans le plan $d', q'$ ;
$V_{sm,r}$	Amplitude maximale du vecteur de tension de référence $V_{s,r}^*$ ;
$V'_{s,r}$	Amplitude maximale du vecteur de tension de référence $V_{s,r}^{*'}$ ;
$V_{md}, V_{mq}$	Tensions modulées par l'onduleur coté réseau dans le plan $dq$ ;
$V_{s,a}, V_{s,b}, V_{s,c}$	Tensions simples aux bornes des enroulements statoriques dans le plan $abc$

$V_{s,a}^*, V_{s,b}^*, V_{s,c}^*$	Tensions simples de références aux bornes des enroulements statoriques dans le plan $abc$ ;
$V_{sd}, V_{sq}$	Tensions simples aux bornes des enroulements statoriques dans le plan $dq$ ;
$V_{std}, V_{tsd}$	Tensions intermédiaires statoriques dans le plan $dq$ ;
$V_{s,d}^*, V_{s,q}^*$	Tensions simples de références des enroulements statoriques dans le plan $dq$ ;
$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$	Tensions simples aux bornes des enroulements rotoriques $abc$ ;
$V_{ra}^*, V_{rb}^*, V_{rc}^*$	Tensions simples de références aux bornes des enroulements rotoriques dans le plan $abc$ :
$V_{ga}, V_{gb}, V_{gc}$	Tensions simples du réseau dans le plan $abc$ ;
$V_{gd}, V_{gq}$	Tensions du réseau dans le plan $dq$ ;
$V_{ma}, V_{mb}, V_{mc}$	Tensions simples modulé par l'onduleur coté réseau dans le plan $abc$ ;
$V_{ma}^*, V_{mb}^*, V_{mc}^*$	Tensions simples de références l'onduleur coté réseau dans le plan $abc$ ;
$U_{dc}$	Tension du bus continu ;
$U_{rd1} U_{rd2}$	Tensions redressées;
$U_{dc1} U_{dc2}$	Tensions à la sortie de filtre de bus continu;
$T_{em}$	Couple électromagnétique de la MADA ;
$C_{em}^*$	Couple électromagnétique de référence ;
$T_g$	Couple produit par la GADA ;
$T_t$	Couple produit par la turbine éolienne
$T_s, T_r$	Constantes de temps électriques statorique et rotorique
$P_n$	Puissance nominale de la GADA
$P_s, P_r$	Puissances actives statoriques et rotoriques
$P_v$	Puissance du vent
$P_{topt}$	Puissance optimale de la turbine ;
$P_g$	Puissance active injecté dans le réseau électrique ;
$V_g^*$	Puissance active de référence à injecter dans le réseau
$Q_g$	Puissance réactive injecté dans le réseau électrique
$V_g^*$	Puissance réactive injecté dans le réseau électrique
$Q_s, Q_r$	Puissances réactives statoriques et rotoriques ;
$R_t$	Rayon de la surface balayée par les pales de la turbine éolienne

$P_{d1}, P_{1q}, P_{2d}, P_{21}$	Les termes de couplages
$R_f$	Résistance du filtre de connexion au réseau
$C_{em}$	Couple électromagnétique (N/m)
$L_{dc}$	Inductances de filtre de bus continu;
$L_f$	Inductance du filtre de connexion au réseau;
$L_s$	Inductance propre des enroulements statoriques ;
$L_r$	Inductance propre des enroulements rotoriques ;
$L_s$	Inductance cyclique des enroulements statoriques
$L_r$	Inductance cyclique des enroulements rotoriques
$M_s$	Inductance mutuelle entre phases statoriques ;
$M_r$	Inductance mutuelle entre phases rotorique
$M_{sr}$	Inductance mutuelle stator-rotor
$M$	Valeur maximale de l'inductance mutuelle stator-rotor;
$I_{gd}^*, i_{gq}^*$	Courants de références du réseau dans le plan $dq$ ;
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	Courants des enroulements statoriques dans le plan $abc$
$i_{sa}^*, i_{sb}^*, i_{sc}^*$	Courants de références des enroulements statoriques dans le plan $abc$
$i_{sq}, i_{sd}$	Courants des enroulements statoriques dans le plan $dq$ ;
$i_{sd}^*, i_{sq}^*$	Courants de références des enroulements statoriques dans le plan $dq$ ;
$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$	Courants des enroulements rotoriques dans le plan $abc$ ;
$i_{ra}^*, i_{rb}^*, i_{rc}^*$	Courants de références des enroulements rotoriques dans le plan $abc$ ;
$i_{rd}, i_{rq}$	Courants des enroulements rotoriques dans le plan $dq$ ;
$i_{rd1}, i_{rd2}$	Courants redressés ;
$i_{c2}, i_{c2}$	Courants traversant les condensateurs de filtre de bus continu;
$i_{sd}^*, i_{sq}^*$	Courants de références des enroulements rotoriques dans le plan $dq$ ;
$J_g$	Inertie de la GADA ramenée au à l'arbre primaire du multiplicateur de vitesse;
$J_t$	Inertie de LA turbin ;
$G_t$	Gain de multiplicateur de vitesse de la turbine
$C_p$	Coefficient de puissance de la turbine éolienne
$\Omega$	La vitesse mécanique de la génératrice

- S:** La surface balayée par les pales de l'éolienne [ $\text{m}^2$ ].
- p*:** La densité du vent en [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ].
- A:** La valeur moyenne de la vitesse du vent.
- ak*:** Amplitude de l'harmonique de l'ordre  $kp$
- Tt:** Le couple développé par la turbine sous l'action du vent ;

## Abréviations

<b>MADA:</b>	Mchine A Double Alimentation,
<b>IGBT:</b>	Transistor bipolaire à grille isolée.,
<b>GTO:</b>	Gate Turn Off,
<b>MLI:</b>	Modulation de la largeur d'impulsion,
<b>GADA:</b>	Géniratrice a double alimentation,
<b>EDF:</b>	Electricité de France.
<b>MPPT :</b>	maximum pointe power trakingu
<b>C.V :</b>	Commande vectoriel
<b>FTBO :</b>	Fonction de transfert en boucle ouvert
<b>FTBF :</b>	Fonction de transfert en boucle fermé



# Table des matières

## Introduction Générale

Introduction Générale .....	1
-----------------------------	---

### Chapitre I

I.1	Introduction.....	2
I.2	Principe de conversion d'énergie éolienne .....	2
I.3	Généralité sur la conversion de l'énergie éolienne.....	3
I.3.1	L'éolienne .....	3
I.3.2	Principaux composants d'une éolienne .....	3
I.3.3	Les différents types des turbines éoliennes.....	6
A.	Les éoliennes à axe verticale.....	6
B.	Les éoliennes à axe horizontale.....	7
I.3.4	Comparaison entre les éoliennes à axe horizontale et axe verticale .....	7
I.3.5	Eoliennes à vitesse fixe et variable .....	8
A.	Eolienne à vitesse fixe .....	8
B.	Eolienne à vitesse variable.....	8
I.3.6	Comparaison entre les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable.....	9
I.3.7	Chaîne de conversion de l'énergie éolienne .....	9
I.4	Utilisation de la génératrice asynchrone à double alimentation dans la conversion éolienne	10
I.4.1	Description de la machine asynchrone à double alimentation :.....	10
I.4.2	Fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants .....	10
I.4.3	Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone et hyper-synchrone.....	10
I.4.4	Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone et hyper-synchrone .....	11
I.4.5	Les avantages de la MADA .....	12
I.4.6	Inconvénients de la MADA .....	12
I.5	Les différentes configurations de la MADA.....	12
1.5.1.	Machine asynchrone à double alimentation partiellement interfacée .....	12
1.5.2.	Machine asynchrone à double alimentation entièrement interfacée .....	15
I.6	Conclusion .....	17

### Chapitre II

II.1	Introduction.....	18
II.2.	Modélisation de la turbine éolienne .....	18
	Le coefficient de puissance $C_p$ est donné par la formule suivante [12] : .....	19
II.3.	Modélisation du multiplicateur de vitesse.....	19

II.4. Modélisation des machines asynchrones à double alimentation .....	20
II.4.1 Equations électriques : .....	20
II.4.2 Equations magnétiques .....	22
II.4.3 Equation mécanique .....	24
II.5. Modélisation de l'onduleur trois niveaux .....	27
II.5.1 Etat d'un bras de l'onduleur.....	27
II.5.2 Tension de sortie de l'onduleur.....	28
II.6 Modalisation du redresseur à deux niveaux .....	29
II.7 Modélisation de la liaison au réseau.....	30
II.7.1 modélisation de bus continue .....	30
II.7.2 Modélisation du filtre de connexion au réseau .....	31
II.8 Conclusion.....	31

### **Chapitre III**

III.1 Introduction.....	32
III.2 Zones de fonctionnement d'une éolienne .....	32
III.3 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse .....	33
III.4 La commande vectorielle de la MADA.....	34
III.4.1 Modèle de la MADA en vue de la commande.....	35
III.5.1 Modulation sinusoïdale (ou sinus-triangle) .....	39
a) Modulation sinusoïdale naturelle .....	40
b) Modulation sinusoïdale à double triangles.....	40
III.6 Contrôle des puissances .....	41
III.7 Commande la liaison au réseau .....	42
III.8 Contrôle de bus continu .....	42
III.9 Contrôle des courants envoyés au réseau .....	42
III.10. Présentation de système étudié .....	43
III.11 Simulation et interprétation.....	44
II.11 Conclusion .....	49

### **Conclusion Générale**

Conclusion Générale.....	50
--------------------------	----

# Liste des figures et tableaux

## Chapitre I

Figure (I- 1) : principe de conversion d'énergie éolienne .....	2
Figure (I- 2) : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur. ....	3
Figure (I- 3): Tour d'une turbine.....	4
Figure (I- 4): Rotor d'une turbine.....	4
Figure (I- 5) : Constitution d'une éolienne à axe horizontal. ....	6
Figure (I- 6): éolienne à axe verticale.....	7
Figure (I- 7) : Eolienne à axe horizontal. ....	7
Figure (I- 8): Chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique.....	9
Figure (I- 9): la machine asynchrone à double alimentation.....	10
Figure (I- 10): Fonctionnement moteur de la MADA : (a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone .....	11
Figure (I- 11): Fonctionnement générateur de la MADA : (a) mode hypo synchrone, (b) mode hyper synchrone. ....	11
Figure (I- 12): MADA à énergie rotorique dissipée. ....	13
Figure (I- 13): Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique [9] ....	13
Figure (I- 14): MADA, structure Kramer .....	14
Figure (I- 15): Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.....	14
Figure (I- 16): Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	15
Figure (I- 17): Eolienne à base de MADA totalement interfacée avec quatre convertisseurs MLI. ....	16
Figure (I- 18): Eolienne à base de MADA totalement interfacée avec quatre convertisseurs MLI. ....	16

## Chapitre II

Figure (II- 1): Voilure éolienne.....	18
Figure (II- 2) : Schéma bloc du modèle de la turbine.....	20
Figure (II- 3) : Représentation schématique de la MADA.....	21
Figure (II- 4) : Onduleur triphasé à trois niveaux à diodes flottantes.....	27
Figure (II- 5): structure du redresseur de courant à deux niveaux.....	29
Figure (II- 6) : bus continu.....	30
Figure (II- 7): Filtre de raccordement au réseau .....	31

## Chapitre III

Figure (III- 1) : Zones de fonctionnement d'une éolienne.....	32
Figure (III- 2) : Schéma bloc de la commande MPPT sans régulation de vitesse. ....	34
Figure (III- 3) : Equivalence entre la MCC et la MADA. ....	35
Figure (III- 4) : vecteurs flux dans le système d'axe choisit.....	37
Figure (III- 5): différentes de la commande MLI.....	39
Figure (III- 6): schéma de principe de la technique sinus-triangle.....	40
Figure (III- 7): Schéma de principe de contrôle de la liaison au réseau. ....	42
Figure (III- 8) : GADA connectée au réseau à travers un onduleur trois niveaux. ....	43
Figure III- 9: Schémas de simulation. ....	44
Figure (III- 10) : profile vent. ....	44
Figure (III- 11) : Allure de flux statorique direct.....	45
Figure (III- 12):Allures de flux rotorique direct .....	45
Figure (III- 13) : Allures de flux statorique quadratique .....	45
Figure (III- 14): Allure de flux rotorique quadratique.....	46
Figure (III- 15): Allures de couple de référence et électromagnétique .....	46
Figure (III- 16) : Allures de puissance rotorique .....	46
Figure (III- 17): Allures de puissance statorique .....	47
Figure (III- 18): allure de puissance injecter au réseau .....	47

<b>Figure (III- 19):</b> Allures des pulsations statorique et rotorique.....	48
<b>Figure (III- 20):</b> zoom de tension de l'onduleur trois niveaux.....	48
<b>Figure (III- 21):</b> tension de bus continu.....	49

### **Les Tableaux**

<b>Tableau (I- 1):</b> Comparaison des éoliennes à axe horizontal et vertical .....	8
<b>Tableau (I- 2):</b> Comparaison des éoliennes a vitesse fixe et a vitesse variable.....	9
<b>Tableau (III- 1) :</b> stratégie de commande appliquée à la MADA .....	38

# INTRODUCTION GENERALE

## Introduction Générale

Avec la croissance des industries intense et l'évolution démographique remarquable dans le monde, la consommation d'énergie augmente d'une manière considérable. Par conséquent avec l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, le problème des énergies renouvelables est un sujet d'actualité. C'est pour cette raison, que nous allons ici nous intéresser à un des outils permettant de produire une énergie renouvelable: les éoliennes. En effet, elles sont aujourd'hui de plus en plus répandues dans le monde.

Dans ce mémoire, nous allons étudier une chaîne de conversion d'énergie éolienne utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), liée au réseau, avec une cascade deux redresseurs à deux niveaux-onduleur à trois niveaux. Notre travail est réparti sur trois chapitres.

Un premier chapitre sera consacré aux ; généralités sur l'énergie éolienne, les différents types d'éoliennes, le principe de fonctionnement d'une éolienne et les différentes configurations de connexion de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) au réseau.

Dans le deuxième chapitre, nous allons modéliser les différents éléments qui composent la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, à savoir : la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse, la génératrice asynchrone à double alimentation, les convertisseurs d'électronique de puissance et le filtre de connexion au réseau.

Le troisième chapitre consacré pour la commande de la chaîne de conversion, à savoir la commande MPPT, la commande vectorielle de la GADA basée sur l'orientation du flux statorique, ainsi, la commande MLI sinus-triangle.

Nous terminons notre travail avec une conclusion générale et quelques perspectives.

# CHAPITRE I

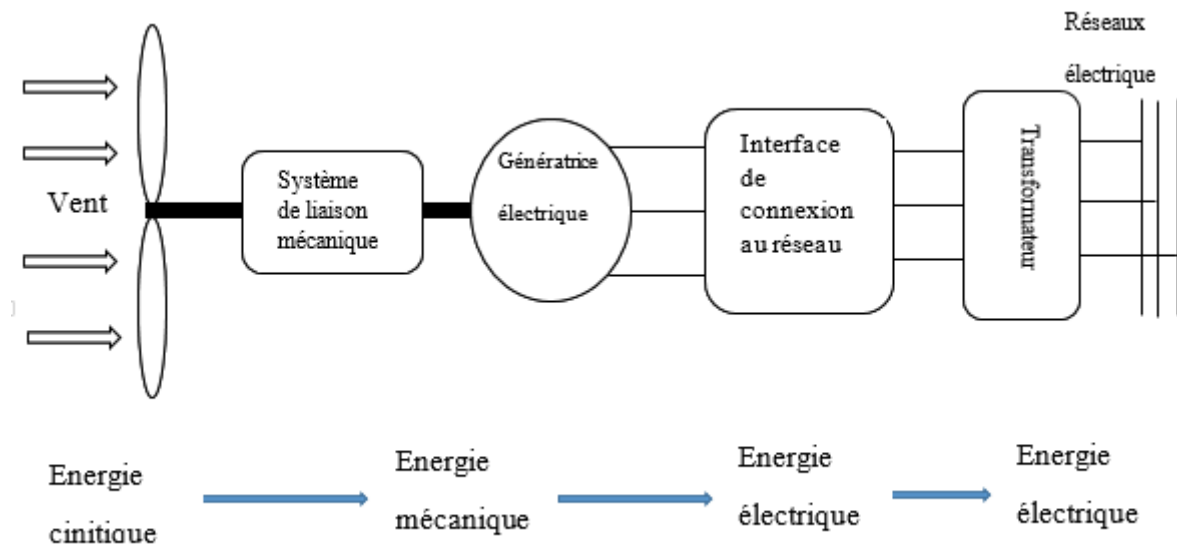
## I.1 Introduction

La centrale éolienne ou aérogénérateur produit de l'électricité grâce à la l'énergie cinétique vent, une source d'énergie renouvelable, inépuisable, propre et gratuite.

Afin de comprendre son principe de fonctionnement, nous allons consacrer ce chapitre à l'explication du principe de la conversion de l'énergie éolienne, les principaux composants d'une éolienne, les différents types d'éolienne, et les différentes configurations de la MADA et des convertisseurs d'électronique de puissance utilisés pour cette conversion.

## I.2 Principe de conversion d'énergie éolienne

L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique disponible sur l'arbre de la turbine, puis en énergie par le générateur. Celle-ci ensuite distribuée aux normes sur le réseau électrique, via un transformateur .le fonctionnement général est illustré par la figure (I-1) :



**Figure (I- 1) :** principe de conversion d'énergie éolienne [1]

Il existe différentes configurations possibles, qui peuvent avoir des différences importantes selon la conception mécaniques et la technologie utilisée. Néanmoins, un aérogénérateur classique est constitué de mêmes éléments de bases, à savoir [1] :

- ☞ une turbine ou l'hélice avec ses annexes mécaniques dont le rôle est de convertir une partie de l'énergie du vent en énergie mécanique ;
- ☞ un générateur électromécanique qui reçoit de l'énergie mécanique et la convertir en énergie électrique ;
- ☞ un système de liaison au réseau électrique.



### I.3 Généralité sur la conversion de l'énergie éolienne

#### I.3.1 L'éolienne

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie électrique [2].

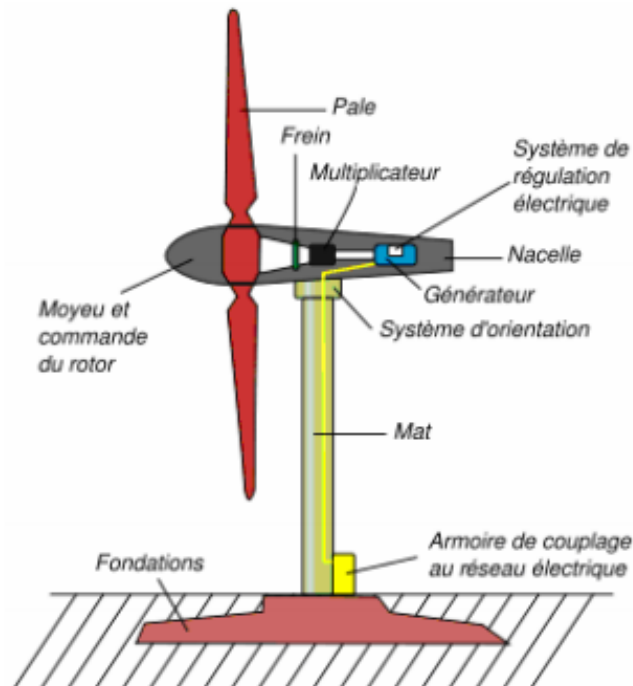


Figure (I- 2) : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur [2].

Pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique le générateur va utiliser le phénomène d'induction. En effet ce dernier est composé de deux parties, une partie mobile le rotor et une partie fixe, le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Elle doit être également fixée solidement au sol.

#### I.3.2 Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de :

- **Mât**

Généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). en effet, le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas

perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maison etc. La puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [3].



**Figure (I- 3):** Tour d'une turbine [3].

La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor [3].

- **Rotor**

Composé de plusieurs pales (en général 3) et du moyeu de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor [3].



**Figure (I- 4):** Rotor d'une turbine [3].

Un rotor balaye un disque circulaire au cours d'une rotation et peut donc récolter l'énergie des molécules d'air traversant ce disque. La surface  $A$  d'un disque circulaire est égale à:

$$A = \pi \times r^2 = \pi \times \left(\frac{1}{2}d\right)^2 \quad (I.1)$$

Où :

$r$  : Le rayon du disque circulaire,

$d$ : Le diamètre, et  $\pi$  est ( $\pi = 3,1415\dots$ ).

Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu, Elle transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [3].

- **La nacelle**

Montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine [3].

- **Le multiplicateur de vitesse**

Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.

- **L'arbre secondaire**

Comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

- **La génératrice**

Elle convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

- **Le contrôleur**

Assure également la gestion de l'éolienne et des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile. Grâce à un système de supervision et contrôle d'une éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu [3].

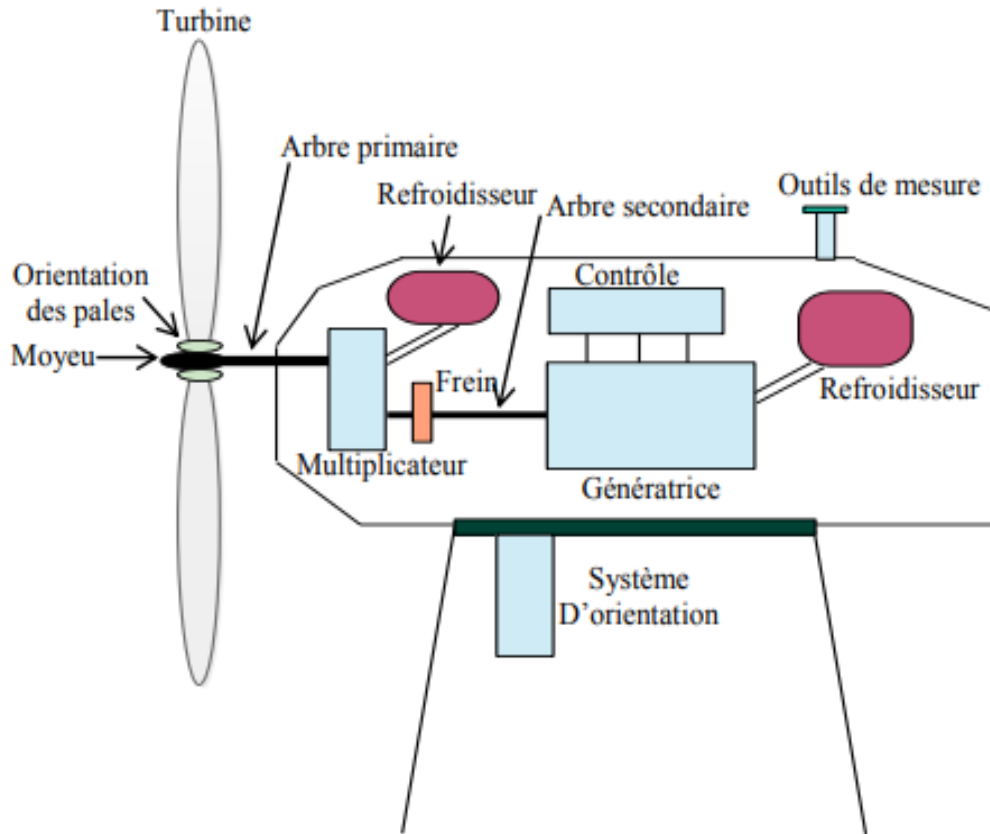


Figure (I- 5) : Constitution d'une éolienne à axe horizontal [3].

### I.3.3 Les différents types des turbines éoliennes

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui diffèrent essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéro-turbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient [3] :

- ☞ Les éoliennes à axe verticale.
- ☞ Les éoliennes à axe horizontale.

#### A. Les éoliennes à axe verticale

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation ; le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus. De nos jours, ce type d'éoliennes est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue.



Figure (I- 6): éolienne à axe verticale [3].

### B. Les éoliennes à axe horizontale

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, les tripales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales.

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus répandues et les plus utilisées dans les fermes éoliennes à grandes puissances car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe verticale, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important [3].



Figure (I- 7) : Eolienne à axe horizontal [3].

### I.3.4 Comparaison entre les éoliennes à axe horizontale et axe verticale

Le Tableau 1 résume les points forts et faibles de chaque type de turbine. Pour les applications à grande puissance les Eoliennes à axe horizontal dominent le marché grâce à leur fort rendement et leur accès au vent fort. Par contre, les éoliennes à axe vertical sont plus appropriées pour les applications domestique en toit d'immeubles, vu que cela leurs donnent

automatiquement accès au vent fort et qu'elles sont facilement abordable pour la maintenance [3].

**Tableau (I- 1):** Comparaison des éoliennes à axe horizontal et vertical [3]

Types de Turbines	Avantages	Inconvénients
<b>Eoliennes à Axe Horizontal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fort rendement de conversion d'énergie</li> <li>• Accès au vent plus fort</li> <li>• Régulation de la puissance via décrochage et calage en cas de vent dépassant les limites nominales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût d'installation élevé, mat très dur qui doit supporter le poids de la nacelle.</li> <li>• Des câbles plus long du haut de la tour jusqu'au la terre</li> <li>• Systèmes d'orientation requis</li> </ul>
<b>Eoliennes à Axe Vertical</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût d'installation moins important, et maintenance plus facile vu qu'elle est proche de la surface.</li> <li>• Fonctionnement indépendant du sens du vent.</li> <li>• Adéquat pour les toits de d'immeuble.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement moins faible.</li> <li>• Fluctuation importante du couple et forte vibrations mécaniques.</li> <li>• Solutions limitées pour la régulation en cas de rafale de vent.</li> </ul>

### I.3.5 Eoliennes à vitesse fixe et variable

#### A. Eolienne à vitesse fixe

Comme leur nom l'indique les turbines à vitesse fixes tournent à une vitesse relativement constante. Cette vitesse est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice. Ces turbines atteignent un rendement de conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée, et l'efficacité du système dégrade une fois la vitesse de vent change. La turbine à vitesse fixe est protégée par un contrôle aérodynamique des éventuelles rafales de vent, elle génère une puissance électrique très fluctuante par rapport aux autres sources d'énergies qui offrent une énergie constante dans le temps et facilement réglable [4].

#### B. Eolienne à vitesse variable

D'une autre part les turbines à vitesse variable, peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. La turbine change constamment sa vitesse de rotation dépendamment de la vitesse du vent pour maximiser la puissance. Dans ce cas, la vitesse spécifique  $\lambda$ , qui représente la vitesse du bout de la pale par rapport à la vitesse du vent, peut être maintenue dans ces valeurs optimales de manière à réaliser une extraction maximale de la puissance électrique. Afin que la vitesse de la turbine soit ajustable, l'éolienne est connectée au réseau électrique via des convertisseurs de puissance [4].

### I.3.6 Comparaison entre les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable

Tableau (I- 2): Comparaison des éoliennes a vitesse fixe et a vitesse variable [4]

Mode de Fonctionnement	Avantages	Inconvénients
Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simple, robuste, fiable.</li> <li>• Faible cout de construction et maintenance.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement de conversion est faible.</li> <li>• Forts stress mécanique qui augmentent le coût de la structure devant supporter ceci</li> </ul>
Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fort rendement de conversion d'énergie.</li> <li>• Puissance électrique de meilleure qualité.</li> <li>• Stress mécanique réduit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût et perte supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs</li> <li>• Contrôle de système plus compliqué</li> </ul>

### I.3.7 Chaîne de conversion de l'énergie éolienne

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, on retrouve dans les différentes configurations les mêmes éléments de base à savoir [4] :

- ☞ Une turbine qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique.
- ☞ Une transmission mécanique.
- ☞ Une génératrice.
- ☞ Un système de liaison électrique.

Selon l'utilisation de l'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développées, on distingue deux grandes familles d'éoliennes:

- ☞ Les éoliennes raccordées au réseau.
- ☞ Les éoliennes autonomes.

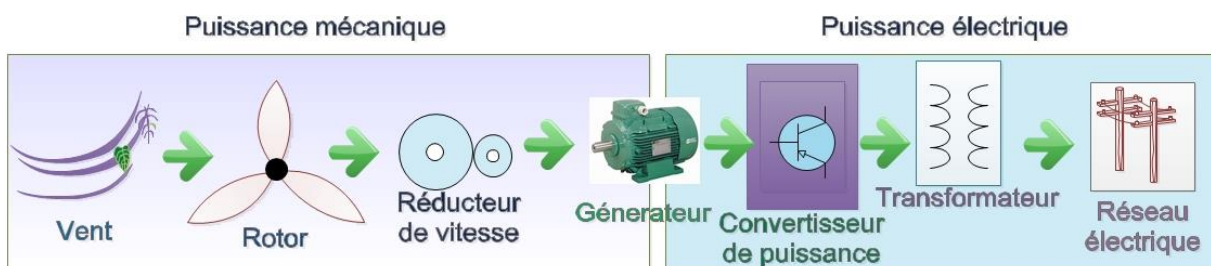


Figure (I- 8): Chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique.

## I.4 Utilisation de la génératrice asynchrone à double alimentation dans la conversion éolienne

### I.4.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation :

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), il est constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer des enroulements décalés de  $120^\circ$  dans l'espace. Il est constitué de trois bobinages dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [5].

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation qui peut alimenter le stator et le rotor en même temps. Dans les domaines d'application à vitesse variable la MADA présente un avantage principale où le glissement peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du coté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois [6].



Figure (I- 9):la machine asynchrone à double alimentation [6].

### I.4.2 Fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants

Généralement, la MADA est capable de travailler en moteur ou en générateur. Pour cette machine, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement. On sait que la machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur [7].

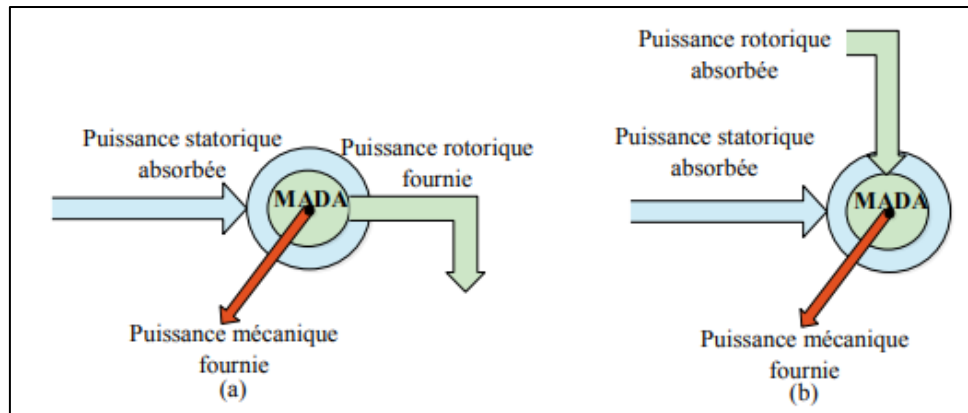
Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper- synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [6].

### I.4.3 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone et hyper-synchrone

La figure (I-10) (a), montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un



fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme (hypo-synchrone). La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner, mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [8].

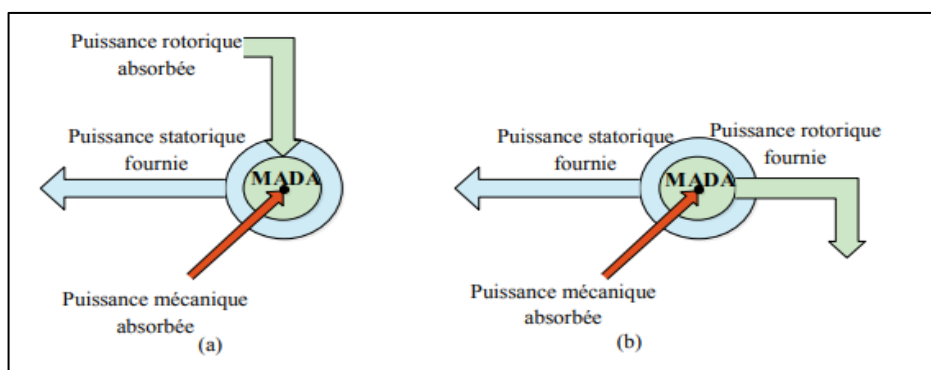


**Figure (I- 10):** Fonctionnement moteur de la MADA : (a) mode hypo-synchrone, (b) mode hyper-synchrone [9]

La figure (I-10) (b) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor, on a donc un fonctionnement au-dessus de la vitesse de synchronisme (hyper-synchrone). La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [8].

#### I.4.4 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone et hyper-synchrone

La figure (I-11) (a), montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est alors absorbée par le rotor. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme (hypo-synchrone). La machine à cage ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [8].



**Figure (I- 11):** Fonctionnement générateur de la MADA : (a) mode hypo synchrone, (b) mode hyper synchrone [9].

La figure (I-11) (b), montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement au-dessus de la vitesse de synchronisme (hyper-synchrone). La machine

asynchrone classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor [8].

#### I.4.5 Les avantages de la MADA

- ☞ L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électrique du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- ☞ La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse de synchronisme.
- ☞ La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un les deux onduleurs tombe en panne).
- ☞ En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournit à la charge.
- ☞ La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- ☞ Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.
- ☞ Fonctionnement à vitesse de rotation variable.
- ☞ Régulation découplée des puissances active et réactive.

#### I.4.6 Inconvénients de la MADA

- ☞ Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.
- ☞ Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique.
- ☞ Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais.

### I.5 Les différentes configurations de la MADA

#### 1.5.1. Machine asynchrone à double alimentation partiellement interfacée

Dans ce cas-là, le stator de la génératrice est directement couplé au réseau alors que l'enroulement rotorique est connecté à ce même réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance, constituée de deux convertisseurs à mli et généralement d'un transformateur selon la plage de vitesse souhaitées. Cette structure est actuellement en fort développements chez plusieurs constructeurs d'éoliennes de grandes puissances [9] .

##### 1.5.1.1.MADA à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure (I-12), 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 montre la technologie qui permet une variation limitée de la vitesse à environ 10% autour de celle de synchronisme par le changement de la résistance rotorique. Outre la plage de

variation de vitesse limitée, l'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance rotorique dans les éléments résistifs [9].

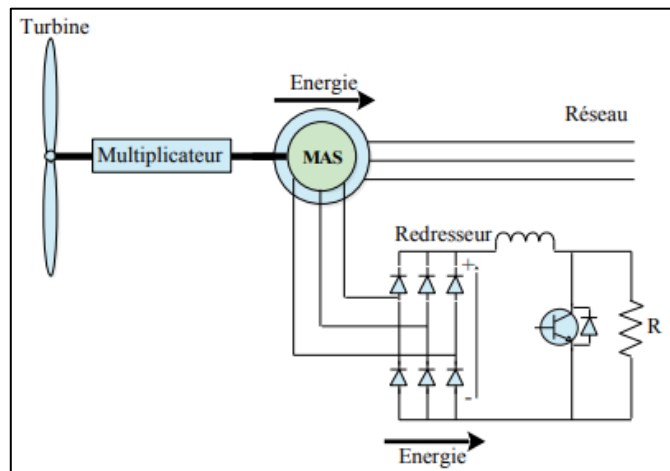


Figure (I- 12): MADA à énergie rotorique dissipée [9].

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance  $R$ , ce qui nuit au rendement du système.

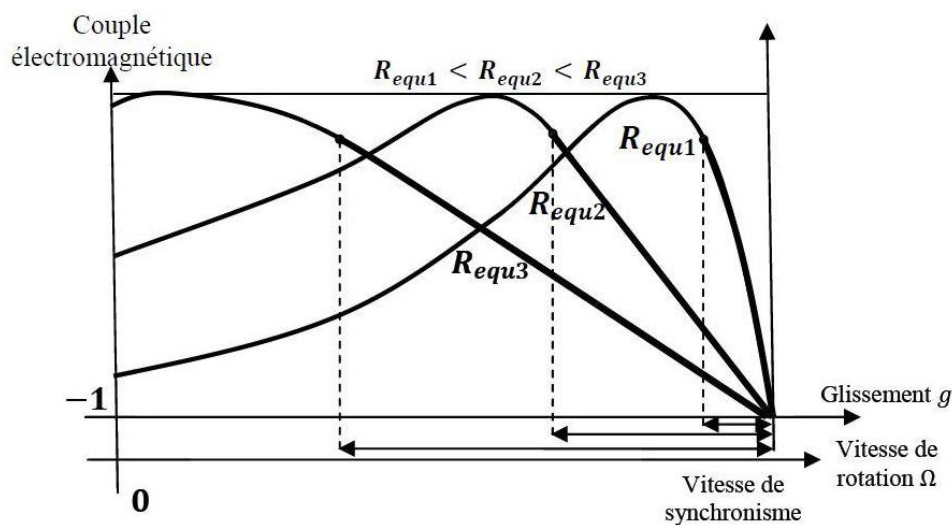


Figure (I- 13): Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique [9]

### 1.5.1.2.MADA structure de Kramer

Pour augmenter le rendement de la structure du système précédent, cette structure, figure (I-14). Pour améliorer la structure du système précédent, tout en réduisant les pertes d'énergie, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau [10].

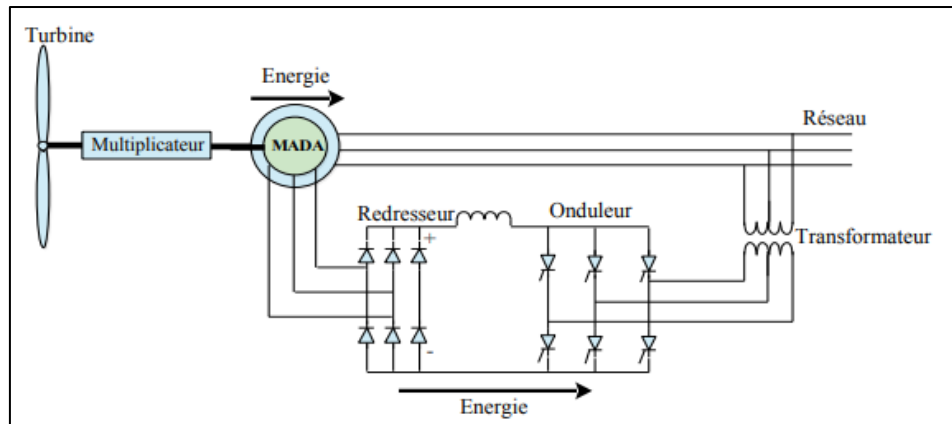


Figure (I- 14): MADA, structure Kramer [9].

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus 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 [10].

### 1.5.1.3.MADA structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, cette topologie consiste à remplacer l'association redresseur-onduleur par un cyclo-convertisseur. La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Kramer, Cette variation peut être positive (fonctionnement hypo-synchrone) ou négative (fonctionnement hyper-synchrone) [10]. Comme dans le cas de la machine brushless, 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%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance. L'inconvénient de cette structure est la génération des perturbations harmoniques importantes qui diminue le facteur de puissance du dispositif. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT [11].

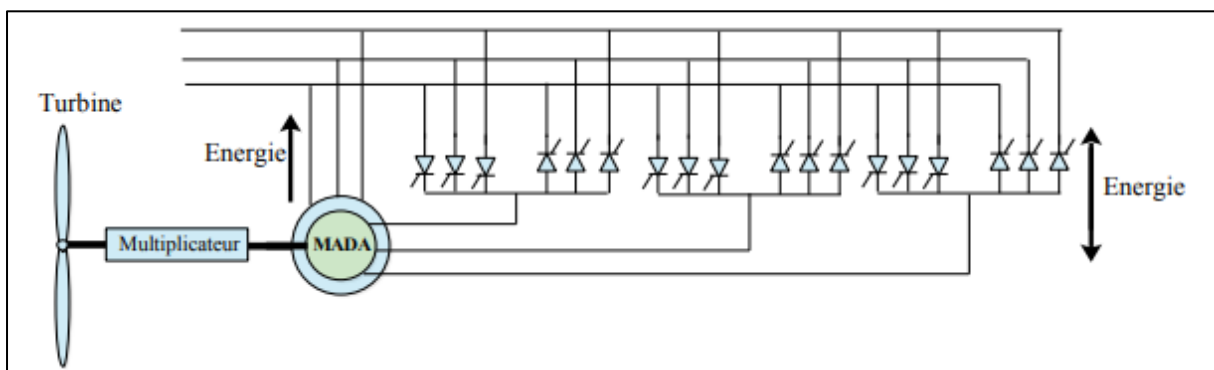


Figure (I- 15): Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur [9].

#### 1.5.1.4. MADA structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Une autre structure intéressante figure (I-16) 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.

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.

Cette structure est alors particulièrement adaptée pour la génération d'électricité dans les systèmes et qui a fait l'objet du plus grand nombre d'études et d'applications [11].

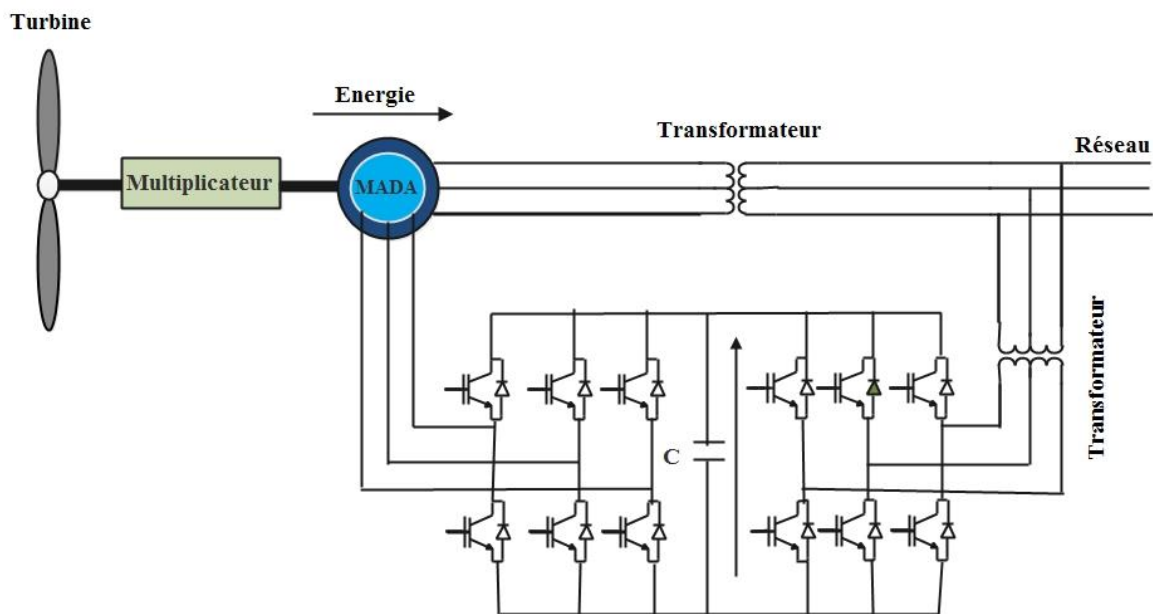
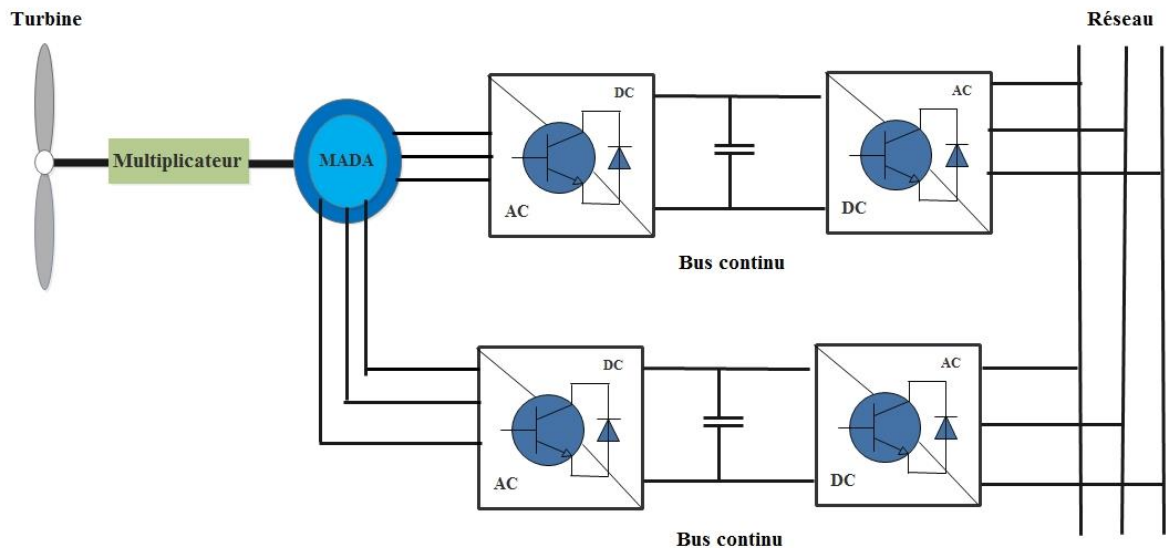


Figure (I- 16): Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

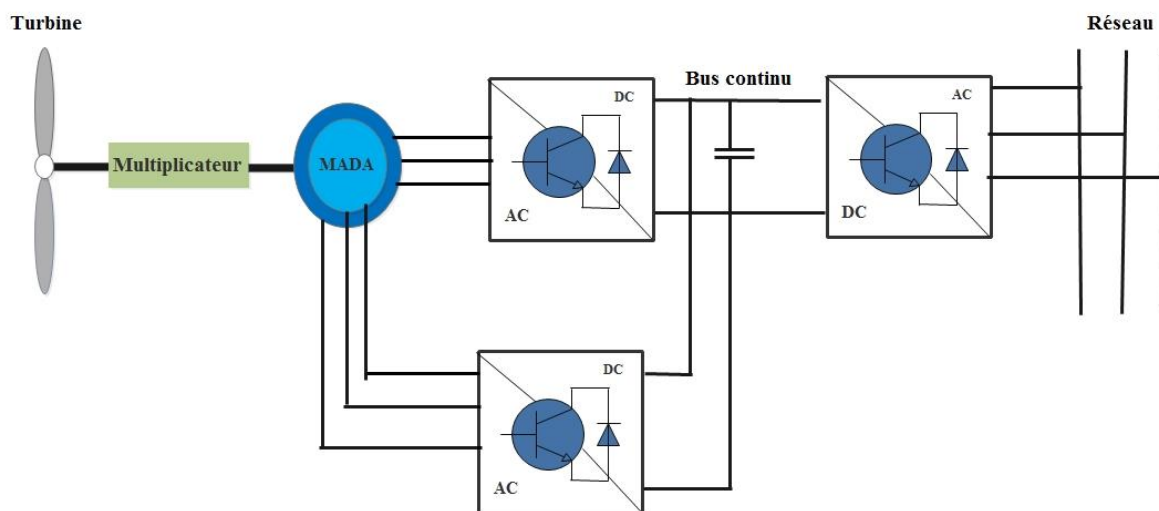
#### 1.5.2. Machine asynchrone à double alimentation entièrement interfacée

Autres structures d'alimentation à également sont envisagées. Elles consistent en une MADA dont les deux côtés, stator et rotor, sont alimentés par des convertisseurs triphasés commandables par MLI. Il n'existe donc aucun lien entre la génératrice et le réseau. La structure d'alimentation peut prendre deux configurations très similaires.

La configuration montrée sur la figure (I-17) utilise un seul convertisseur côté réseau, cette dernière elle est alors couplée par un bus continu commun avec ceux de la MADA et c'elle de la figure (I-18) utilise deux convertisseurs côté réseau, couplés à la MADA par deux bus continu. Toutefois, il faut noter que cette configuration exige que les deux côtés de la machine soient dimensionnés de façons identiques en termes de tenue en tension. C'est à dire que le rapport de transformation de la machine doit être très proche de l'unité [1].



**Figure (I- 17):** Eolienne à base de MADA totalement interfacée avec quatre convertisseurs MLI.



**Figure (I- 18):** Eolienne à base de MADA totalement interfacée avec quatre convertisseurs MLI.

Ces deux structures héritent des mêmes caractéristiques que la structure à base de la machine synchrone, en ce qui concerne le comportement face aux perturbations affectant le réseau et l'échange de puissance réactive avec le réseau. Elle présente aussi de nombreux avantages comparée à la structure avec un seul convertisseur au rotor.

Les convertisseurs disposés aux bornes des deux circuits permettent une bonne maîtrise du flux et du couple de la machine et confère une dynamique particulièrement élevée sur toute la plage de variation de vitesse.

- ☞ Cette structure permet un fonctionnement sur une large plage de vitesse, ce qui permet d'envisager une réduction de la complexité du système mécanique de régulation de la puissance.
- ☞ La possibilité de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et

augmentant son rendement, et les puissances sont également partagées évitant ainsi le surdimensionnement de ces convertisseurs.

La structure de la figure (I-18) à base de la MADA fera l'objet principal de notre étude.

## **I.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur les différents éléments et les différentes structures d'une éolienne ainsi que leurs principes de fonctionnement.

Quelques systèmes de conversion de l'énergie éolienne utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation ont été présentés.

Une modélisation de tous les éléments de la chaîne de conversion choisie sera présentée dans le chapitre suivant.

# CHAPITRE II



## CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

### II.1 Introduction

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

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

### II.2. Modélisation de la turbine éolienne

L'éolienne est un élément tridimensionnel, ayant des formes complexes, en mouvement et plongée dans un flux d'air. Toutefois, et c'est un point important, le modèle en question doit décrire la dynamique mécanique réelle de la voilure, et non pas uniquement le comportement quasi-statique. Une voilure éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique [12].

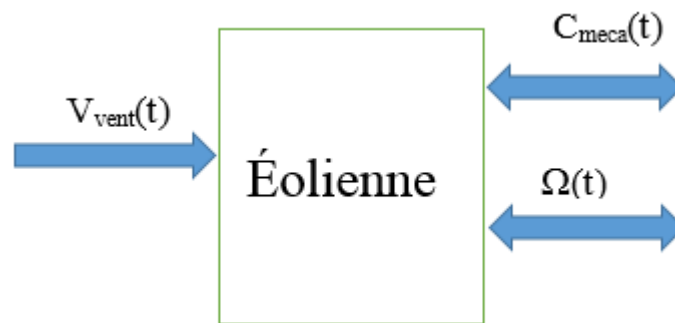


Figure (II- 1): Voilure éolienne

La puissance extraite par une éolienne est donnée par la relation suivante [12]:

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{II-1})$$

Avec :

$C_p$ : Coefficient de puissance qui est fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ .

$\lambda$ : Vitesse spécifique, qui représente le rapport entre la vitesse linéaire de l'extrémité d'une pale et de la vitesse du vent  $\lambda = R\Omega / V_v$ .

$\rho$  : La densité du vent en  $[\text{Kg}/\text{m}^3]$ .

$S$  : La surface balayée par les pales de l'éolienne  $[\text{m}^2]$ .

$\Omega$  : La vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine éolienne  $[\text{rad}/\text{s}]$ .

$V_v$  : Vitesse du vent  $[\text{m}/\text{s}]$ .

$R$  : Rayon d'une pale de la turbine  $[\text{m}]$ .

## CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

Le coefficient de puissance  $C_p$  est donné par la formule suivante [12] :

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin \left[ \frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta} \right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot \beta \quad (\text{II-2})$$

### II.3. Modélisation du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de gain  $G$  permet d'adapter les grandeurs mécaniques (la vitesse et le couple) de la turbine et la génératrice qui s'exprime [12]:

$$T_{em} = \frac{T_t}{G} \quad (\text{II-3})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{G} \quad (\text{II-4})$$

Avec :

- ☞  $G$  : est le gain du multiplicateur ;
- ☞  $T_{em}$  : le couple électromagnétique développé par la génératrice synchrone ;
- ☞  $T_t$  : le couple développé par la turbine sous l'action du vent ;
- ☞  $\Omega$  : la vitesse mécanique de la génératrice ;
- ☞  $\Omega_t$  : la vitesse de la turbine.

La masse de la turbine éolienne est rapportée sur l'arbre de la turbine sous forme d'une inertie  $J_t$ , qui comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique considère l'inertie totale  $J_{tg}$  comme étant la somme de l'inertie de la turbine et celle de la GADA.

$$J_{tg} = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (\text{II-5})$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir de couple mécanique total appliqué au rotor de la GADA.

$$J_{tg} \frac{d\Omega_g}{dt} = T_{mec} \quad (\text{II-6})$$

Où  $J_{tg}$  est l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la GADA. Ce couple mécanique prend en compte le couple électromagnétique produit par la GADA  $T_{em}$ , le couple de frottement visqueux  $T_{vis}$  et le couple issu de multiplicateur de vitesse  $T_g$ .

$$T_{mec} = T_g - T_{em} - T_{vis} \quad (\text{II-7})$$

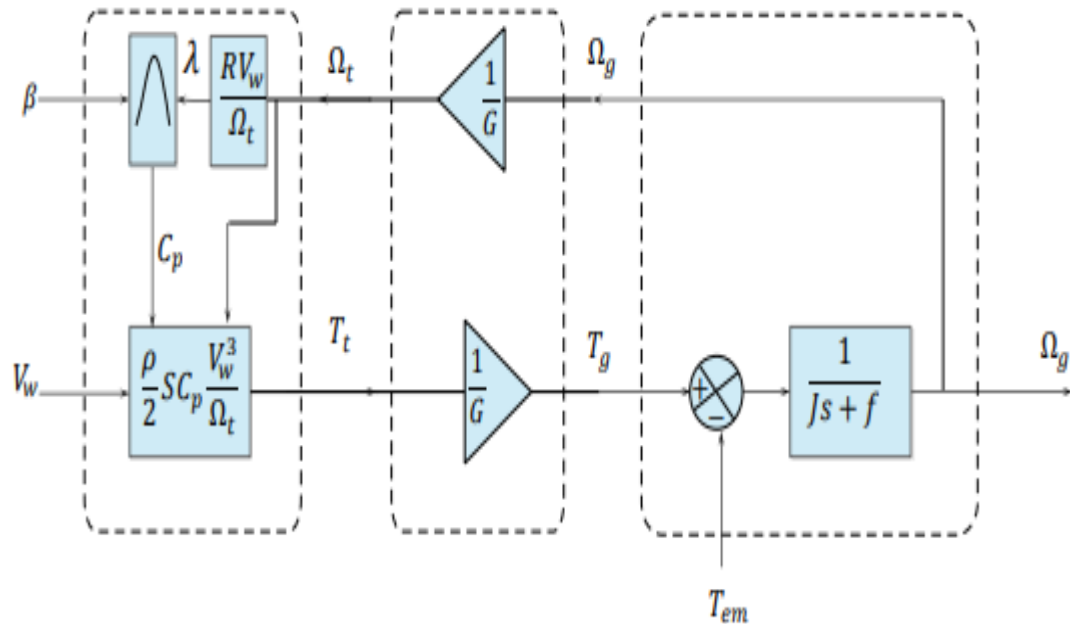


Figure (II- 2) : Schéma bloc du modèle de la turbine

### II.4. Modélisation des machines asynchrones à double alimentation

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certains nombres d'hypothèses simplificatrices, à savoir [13]:

- ☞ L'entrefer entre le rotor et le stator constant ;
- ☞ L'effet d'encoches ainsi l'effet de peau sont négligeables ;
- ☞ Circuit magnétique non saturé ;
- ☞ Les pertes ferromagnétiques sont négligées ;
- ☞ Les grandeurs homopolaires nulles ;

Trois types d'équation permettent de modéliser la MADA :

- ☞ Equations électriques ;
- ☞ Equations magnétiques ;
- ☞ Equation mécanique.

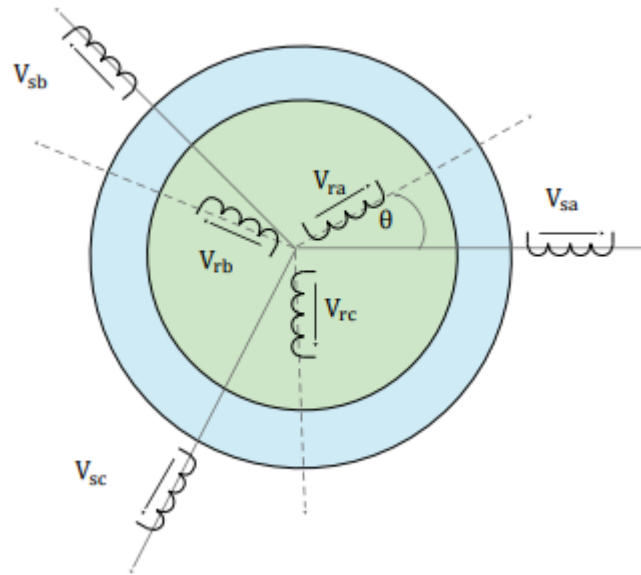
#### II.4.1 Equations électriques :

Les enroulements statoriques et rotoriques (figure (II-3)) sont alimentés respectivement par les tensions ( $V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$ ) et ( $V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$ ) et parcourus par les courants ( $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ ) et ( $i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$ ) [13].

## CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire:

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt} \\ V_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-8})$$



**Figure (II- 3) :** Représentation schématique de la MADA

L'écriture des équations précédentes sous forme matriciel donne :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \\ \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-9})$$

## CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \\ [V_r] = R_r i_r + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-10})$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}; \quad (\text{II-11})$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; \quad (\text{II-12})$$

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix}; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}; \quad (\text{II-13})$$

Telles que :

- ☞  $[V_s], [V_r]$ : Vecteurs des tensions statorique et rotorique;
- ☞  $[R_s]; [R_r]$ : Matrices des résistances statorique et rotorique ;
- ☞  $[\varphi_s]; [\varphi_r]$ : Vecteurs des flux statorique et rotorique ;
- ☞  $[i_s]; [i_r]$ : Vecteurs des courants statorique et rotorique.

### II.4.2 Equations magnétiques

Les équations magnétiques sont les équations des flux statoriques et rotoriques,  $(\varphi_{as}, \varphi_{bs}, \varphi_{cs})$  et,  $(\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr})$  en fonction des courants statoriques et rotoriques  $(i_{as}, i_{bs}, i_{cs})$  et  $(i_{ar}, i_{br}, i_{cr})$  respectivement. Ces équations sont obtenues à partir de la matrice inductance  $[L(\theta)]$ , celle-ci comporte 36 coefficients non nuls dont la moitié dépend du temps par l'intermédiaire de l'angle électrique  $\theta$ , position de l'axe magnétique (ar) du rotor par rapport à l'axe magnétique (as) du stator

Comme la montre la figure (II-3), elle est donnée par la relation suivante :

$$\theta = p\theta_m \quad (\text{II-14})$$

Où :

$p$  : Nombre de paires de pôles de la machine ;

$\theta_m$  : La position mécanique du rotor par rapport au stator.

## CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

L'équation matricielle reliant les flux et les courants est donnée comme suit :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \\ \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s + l_{fs} & M_s & M_s & M_{sr1} & M_{sr2} & M_{sr3} \\ M_s & l_s + l_{fs} & M_s & M_{sr3} & M_{sr1} & M_{sr2} \\ M_s & M_s & l_s + l_{fs} & M_{sr2} & M_{sr3} & M_{sr1} \\ M_{sr1} & M_{sr3} & M_{sr2} & l_r + l_{fr} & M_r & M_r \\ M_{sr2} & M_{sr1} & M_{sr3} & M_r & l_r + l_{fr} & M_r \\ M_{sr3} & M_{sr2} & M_{sr1} & M_r & M_r & l_r + l_{fr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-15})$$

Avec :

$l_s$  : Inductance propre des enroulements statoriques ;

$l_r$  : Inductance propre des enroulements rotoriques ;

$l_{fs}$  : Inductance de fuite des enroulements statoriques ;

$l_{fr}$  : Inductance de fuite des enroulements rotoriques ;

$M_s$  : Inductance mutuelle entre les enroulements statoriques ;

$M_r$  : Inductance mutuelle entre les enroulements rotoriques ;

$M_{sr(1,2,3)}$  : Inductance mutuelle entre les enroulements statorique et rotorique;

$$\begin{aligned} M_{rs1} &= M \cos(\theta); \\ M_{rs2} &= M \cos(\theta - 2\pi/3); \\ M_{rs3} &= M \cos(\theta + 2\pi/3); \end{aligned} \quad (\text{II-16})$$

Où M est la valeur maximale des inductances mutuelles entre les phases du stator et les phases de rotor.

La matrice L [ $\theta$ ] fait apparaître quatre sous-matrices inductances :

$$\begin{bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [l_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [l_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II-17})$$

☞ La matrice inductance statorique :

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

☞ La matrice inductance rotorique :

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

La matrice inductance mutuelle stator-rotor :

## CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II-20})$$

Où  $M_{max}$  : La valeur maximale des inductances mutuelles entre les phases du stator et les phases du rotor.

L'équation matricielle (II-15) peut se mettre sous forme d'un système d'équation comme suit :

$$\begin{aligned} [\varphi_s] &= [l_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [\varphi_r] &= [l_r][i_r] + [M_{rs}][i_s] \end{aligned} \quad (\text{II-21})$$

### II.4.3 Equation mécanique

La loi fondamentale de la dynamique permet d'écrire l'équation mécanique de la machine comme suit :

$$T_{em} - T_r - f\Omega_{mec} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \quad (\text{II-22})$$

### II.4.4. Transformation de Park

L'application de la transformation de Park, s'avère nécessaire, cette transformation appliquée aux (courants, tensions, et flux) permet d'obtenir des équations différentielles à coefficients constants [14] :

$$[A]^{-1}[V_{abc}] = [R][A]^{-1}[i_{abc}] + \frac{d[A]^{-1}[\phi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II-23})$$

$$[V_{dq0}] = [R][i_{dq0}] + \frac{d[\phi_{dq0}]}{dt} + [A] \left[ \frac{d}{dt} [A]^{-1} [\phi_{dq0}] \right] \quad (\text{II-24})$$

Tel que:

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

Avec :

## CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

$$[A] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II-26})$$

On remplace la relation (II-24) dans (II-25) et on obtient le modèle biphasé suivant :

$$\begin{cases} V_d = R i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \phi_q \\ V_q = R i_q + \frac{d\phi_q}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \phi_d \\ V_0 = R i_0 + \frac{d\phi_0}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-27})$$

Pour un système équilibré les composantes homopolaires sont nulles, de ce fait on conclut les équations électriques dans le repère dq :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_{sd} i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II-28})$$

Les expressions des puissances actives et réactives statoriques et rotoriques sont donnée respectivement par :

$$\begin{cases} P_s = (V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq}) \\ Q_s = (V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq}) \end{cases} \quad (\text{II-29})$$

$$\begin{cases} P_r = (V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq}) \\ Q_r = (V_{rq} i_{rd} + V_{rd} i_{rq}) \end{cases} \quad (\text{II-30})$$

Application aux équations magnétiques

On applique la transformation de Park au système d'équation (II-21) on obtient :

$$\begin{cases} [\phi_{sdq0}] = [A(\theta_s)][l_s][A(\theta_s)^{-1}][i_{sdq0}] + [A(\theta_s)][M_{sr}][A(\theta_s)^{-1}][i_{rdq0}] \\ [\phi_{rdq0}] = [A(\theta_r)][l_r][A(\theta_r)^{-1}][i_{rdq0}] + [A(\theta_r)][M_{rs}][A(\theta_r)^{-1}][i_{sdq0}] \end{cases} \quad (\text{II-31})$$

La mise sous forme matricielle de système (II-31) nous donne :



## CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

$$\begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{s0} \\ \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \\ \phi_{r0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - M & 0 & 0 & 2/3 M & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M & 0 & 0 & 2/3 M & 0 \\ 0 & 0 & l_s + 2M & 0 & 0 & 0 \\ 2/3 M & 0 & 0 & l_r - M & 0 & 0 \\ 0 & 2/3 M & 0 & 0 & l_r - M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_r + 2M \end{bmatrix} \quad (\text{II-32})$$

Tel que :

$L_s = l_s - M_s$  Inductance cyclique statorique ;

$L_r = l_r - M_r$  Inductance cyclique rotorique ;

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$  Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor;

$L_{0s} = l_s + 2M_s$  Inductance homopolaire statorique ;

$L_{0r} = l_r + 2M_r$  Inductance homopolaire rotorique.

Si on élimine les composantes homopolaires du système d'équation (II-31) on obtient :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II-33})$$

L'équation (II-31) peut se mettre sous le système d'équation :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II-34})$$

D'où on peut tirer les expressions des courants suivantes :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\phi_{sd}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = \frac{\phi_{sq}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ i_{rd} = \frac{\phi_{rd}}{L_r} - \frac{M}{L_r} i_{sd} \\ i_{rq} = \frac{\phi_{rq}}{L_r} - \frac{M}{L_r} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II-35})$$

Nous avons exprimé les équations électriques et magnétiques, mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être dérivé de l'expression de la co-énergie ou obtenu à l'aide d'un bilan de puissance .il en résulte plusieurs expressions tout égales :

## CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

$$T_{em} = p(\phi_{sd}i_{sq} - \phi_{sq}i_{sd}) \quad (\text{II-36})$$

$$T_{em} = p(\phi_{rq}i_{rd} - \phi_{rd}i_{rq}) \quad (\text{II-37})$$

$$T_{em} = pM(i_{sq}i_{rd} - i_{sd}i_{rq}) \quad (\text{II-38})$$

$$T_{em} = p \frac{M}{L_r} (\phi_{rd}i_{sq} - \phi_{rq}i_{sd}) \quad (\text{II-39})$$

### II.5. Modélisation de l'onduleur trois niveaux

L'onduleur trois niveaux est de trois bras, chaque bras possède quatre interrupteurs  $S_{ij}$ , bidirectionnels réalisés par la mise en antiparallèle d'un transistor et une diode figure (II-4), pour chaque interrupteur  $S_{ij}$  on définit une fonction de commutation  $F_{ij}$  de la manière suivante [14] :

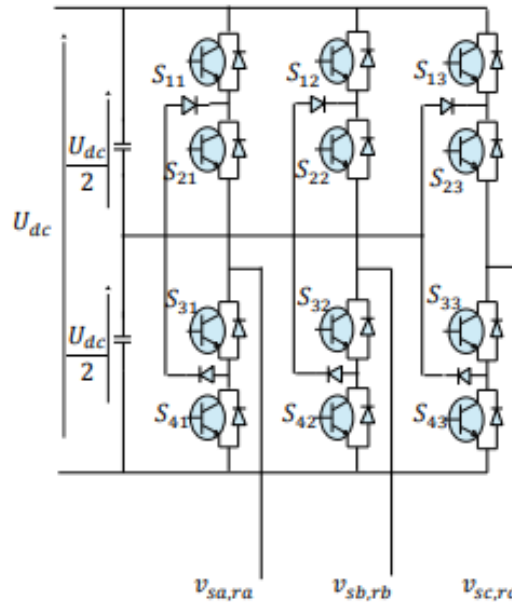
$$F_{ij} = 1 \text{ si } S_{ij} \text{ est fermé} \quad (\text{II-40})$$

$$F_{ij} = 0 \text{ si } S_{ij} \text{ est ouvert}$$

Les interrupteurs de chaque bras sont complémentaires deux à deux :

$$F_{ij} = 1 - F_{(i-2)j} \quad (\text{II-41})$$

$$(i = 3,4 \text{ et } j = 1,2,3)$$



**Figure (II- 4) :** Onduleur triphasé à trois niveaux à diodes flottantes.

#### II.5.1 Etat d'un bras de l'onduleur

En commande, chaque bras de l'onduleur a trois états possibles [14]:

## CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

**Etat p :** Les deux interrupteurs de haut  $S_{1j}$  et  $S_{2j}$  sont fermés, tandis que les deux interrupteurs de bas  $S_{3j}$  et  $S_{4j}$  sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de source ( $o$ ) est  $U_{dc}/2$ .

**Etat O :** les deux interrupteur de milieu  $S_{2j}$  et  $S_{3j}$  sont fermés, tandis que les deux interrupteurs

Des extrémités  $S_{1j}$  et  $S_{4j}$  sont ouverts, la tension de sortie par rapport au neutre de la source ( $o$ ) est 0.

**Etat N :** Les interrupteurs de milieux  $S_{3j}$  et  $S_{4j}$  sont fermés, tandis que les deux interrupteurs de haut  $S_{1j}$  et  $S_{2j}$  sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source ( $o$ ) est  $-U_{dc}/2$ .

On définit pour chaque bras ( $j$ ) de l'onduleur trois fonctions de connections, correspondant aux trois états du bras.

$$\begin{cases} F_{1j}^b = F_{1j}F_{2j} \\ F_{2j}^b = F_{2j}F_{3j} \\ F_{3j}^b = F_{3j}F_{4j} \end{cases} \quad (\text{II-42})$$

Ainsi chaque bras de l'onduleur peut prendre trois états, donc pour les trois bras de l'onduleur on a  $3^3 = 27$  états possibles, ces états sont identifiés en indiquant les états bras, par exemple l'état OPN indique que le premier bras est à l'état O, le deuxième à l'état P et le troisième est à l'état N.

### II.5.2 Tension de sortie de l'onduleur

Les tensions de sortie par rapport au neutre de la source continue ( $o$ ) sont exprimées par [14] :

$$\begin{pmatrix} v_{sa,ra} \\ v_{sb,rb} \\ v_{sc,rc} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ F_{12}^b & F_{22}^b & F_{32}^b \\ F_{13}^b & F_{23}^b & F_{33}^b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -U_{dc} \\ 2 \\ 0 \\ -U_{dc} \\ 2 \end{pmatrix} \quad (\text{II-43})$$

L'équation (II-40) donne les tensions composées les deux phases de la charge.

$$\begin{pmatrix} v_{sa,ra} \\ v_{sb,rb} \\ v_{sc,rc} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} F_{11}^b - F_{12}^b & F_{21}^b - F_{22}^b & F_{31}^b - F_{32}^b \\ F_{12}^b - F_{13}^b & F_{22}^b - F_{23}^b & F_{32}^b - F_{33}^b \\ F_{13}^b - F_{11}^b & F_{23}^b - F_{21}^b & F_{33}^b - F_{31}^b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -U_{dc} \\ 2 \\ 0 \\ -U_{dc} \\ 2 \end{pmatrix} \quad (\text{II-44})$$

Dans le cas d'une charge équilibré, les tensions de sortie par rapport au neutre de la charge son exprimées par :

## CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

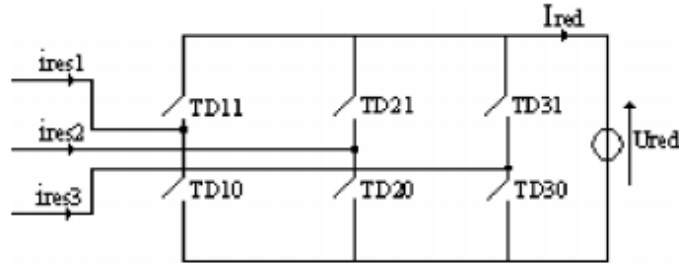
$$\begin{pmatrix} v_{sa,ra} \\ v_{sb,rb} \\ v_{sc,rc} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} F_{11}^{b11} & F_{21}^{b21} & F_{31}^{b31} \\ F_{12}^{b12} & F_{22}^{b22} & F_{32}^{b32} \\ F_{13}^{b13} & F_{23}^{b23} & F_{33}^{b33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{U_{dc}}{2} \\ 0 \\ -\frac{U_{dc}}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{II-45})$$

Tel que :

$$\begin{cases} F_{11}^{b11} = 2F_{11}^b - F_{12}^b - F_{13}^b \\ F_{11}^{b12} = 2F_{12}^b - F_{11}^b - F_{13}^b \\ F_{11}^{b13} = 2F_{13}^b - F_{12}^b - F_{11}^b \\ F_{11}^{b21} = 2F_{21}^b - F_{22}^b - F_{23}^b \\ F_{11}^{b22} = 2F_{22}^b - F_{21}^b - F_{23}^b \\ F_{11}^{b23} = 2F_{23}^b - F_{21}^b - F_{22}^b \\ F_{11}^{b31} = 2F_{31}^b - F_{32}^b - F_{33}^b \\ F_{11}^{b32} = 2F_{32}^b - F_{31}^b - F_{33}^b \\ F_{11}^{b33} = 2F_{33}^b - F_{31}^b - F_{32}^b \end{cases} \quad (\text{II-46})$$

### II.6 Modalisation du redresseur à deux niveaux

La structure du redresseur est celle de la figure (II-5).



**Figure (II- 5):** structure du redresseur de courant à deux niveaux.

La commande complémentaire utilisée est la suivante :

$$\begin{cases} B_{11} = \bar{B}_{10} \\ B_{21} = \bar{B}_{20} \\ B_{31} = \bar{B}_{30} \end{cases} \quad (\text{II-47})$$

Les tensions d'entrée du redresseur sont données par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{U_{red}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{II-48})$$

## CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

Avec  $F_{Ki}$  : fonction de connexion de l'interrupteur  $TD_{Ki}$ . Le courant de sortie du redresseur en fonction des fonctions de connexion des interrupteur et des courants d'entrée, est donné par :

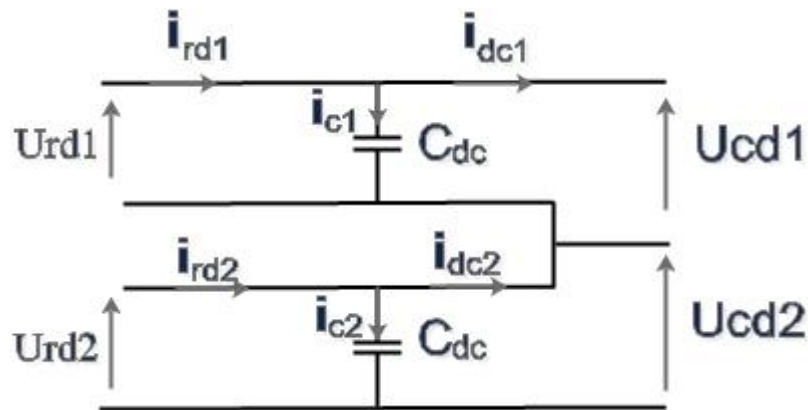
$$I_{red} = F_{11}i_{res1} + F_{21}i_{res2} + F_{31}i_{res3} \quad (II-49)$$

### II.7 Modélisation de la liaison au réseau

La liaison du système au réseau est réalisé par bus continue, un onduleur trois niveaux et un filtre de connexion au réseau. Le rôle du l'onduleur est de contrôler les puissances active et réactive injectées au réseau [14].

#### II.7.1 modélisation de bus continue

Les deux redresseur cote GADA sont reliés à l'onduleur à travers un bus continue, constitué de deux condensateurs (figure (II-6)). Ils sont utilisés pour filtrer la tension redressée.



**Figure (II- 6) : bus continu**

Le modèle du bus continue est donné par les systèmes d'équation (II-61) et (II-62) :

$$\begin{cases} U_{dc1} = U_{rd1} = \frac{1}{C_{dc}} \int i_{c1} \partial t \\ U_{dc2} = U_{rd2} = \frac{1}{C_{dc}} \int i_{c2} \partial t \end{cases} \quad (II-50)$$

$$\begin{cases} i_{c1} = i_{rd1} - i_{dc1} \\ i_{c2} = i_{rd2} - i_{dc2} \end{cases} \quad (II-51)$$

$i_{rd1}, i_{rd2}$ : Les courants modulés par l'onduleur trois niveaux, ils sont exprimés en fonction des courants du réseau et des fonctions de connexion de demi-bas haut et bas

$$\begin{cases} i_{dc1} = F_{11}^b i_{g1} + F_{12}^b i_{g2} + F_{13}^b i_{g3} \\ i_{dc2} = F_{31}^b i_{g1} + F_{32}^b i_{g2} + F_{33}^b i_{g3} \end{cases} \quad (II-52)$$

### II.7.2 Modélisation du filtre de connexion au réseau

La liaison du l'onduleur au réseau électrique est réaliser par un filtre R-L dans le but de respecter l'alternance des sources et de minimiser les composantes harmonique dues aux commutations du l'onduleur .la figure (II-7)

Les tensions modulées et les courants qui transitent filtre sont regroupés dans l'équation différentielle suivante [13]:

$$\begin{pmatrix} V_{ma} \\ V_{mb} \\ V_{mc} \end{pmatrix} = R_f \begin{pmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \\ i_{mc} \end{pmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \\ i_{mc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{ga} \\ V_{gb} \\ V_{gc} \end{pmatrix} \quad (\text{II-53})$$

En appliquant la transformation de Park, l'équation précédente devient :

$$\begin{cases} V_{md} = (R_f + L_f s) i_{md} - L_f \omega_g i_{mq} + V_{gd} \\ V_{mq} = (R_f + L_f s) i_{mq} + L_f \omega_g i_{md} + V_{gq} \end{cases} \quad (\text{II-54})$$

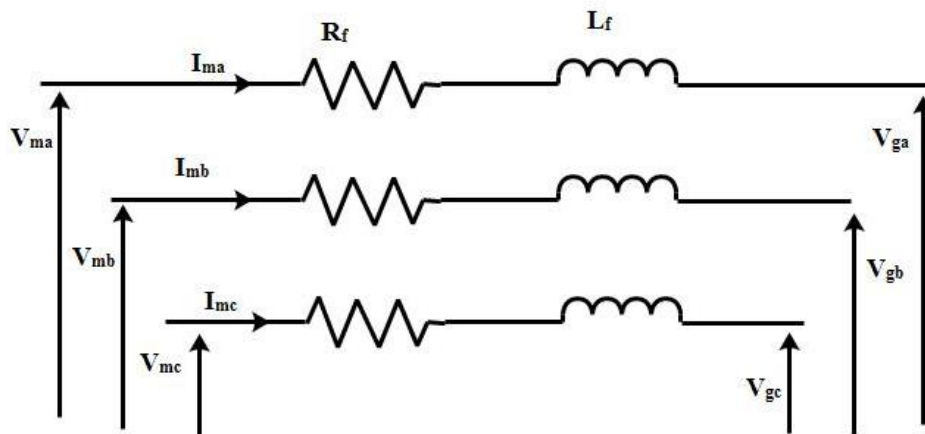


Figure (II- 7): Filtre de raccordement au réseau

### II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés et modélisés les différentes parties de l'aérogénérateur. A savoir la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse, le génératrice asynchrone à double alimentation, la cascade de deux redresseurs deux niveaux-onduleur trois niveaux et le filtre de connexion au réseau.

Dans le chapitre suivant nous allons procéder à la commande et à la simulation de la chaîne de conversion.

# CHAPITRE III

### III.1 Introduction

La chaîne de conversion d'énergie éolienne complète a été modélisée dans le chapitre précédent, dans ce chapitre nous allons procéder à la commande de cette chaîne.

Dans le but d'augmenter l'efficacité de système et la qualité de la puissance produite nous allons appliquer la technique de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse, puis pour la MADA nous allons appliquer la commande vectorielle pour assurer le découplage de commande du couple et du flux et la loi de répartition des pulsations, pour assurer la répartition des puissances actives statorique et rotorique. Puis nous allons appliquer la technique de la commande MLI sinus triangle pour le contrôle des convertisseurs d'électronique de puissance.

### III.2 Zones de fonctionnement d'une éolienne

On peut définir quatre zones de fonctionnement figure (III-1);

- ☞ **Zone I:** Le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine ;
- ☞ **Zone II:** La puissance fournit par l'arbre dépend de la vitesse du vent, dans cette zone  $\lambda = \lambda_{opt}$ ,  $C_p = C_{popt}$  et  $\beta = 0$ . On cherche à extraire le maximum de puissance du vent, le contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne de manière à rester aux alentours de  $\lambda_{opt}$ . Comme l'angle de calage est fixe et égale à zéro, le coefficient de puissance de l'éolienne est alors égal à sa valeur maximale.
- ☞ **Zone III:** Dans cette zone de fonctionnement on cherche à limiter la puissance éolienne extraite et de la maintenir égale à la puissance nominale de la turbine.
- ☞ **Zone IV:** la vitesse du vent est trop important, les pales de la turbine sont mis en drapeau ( $\beta = \frac{\pi}{2}$ ), afin de ne pas détériorer le générateur éolienne [13].

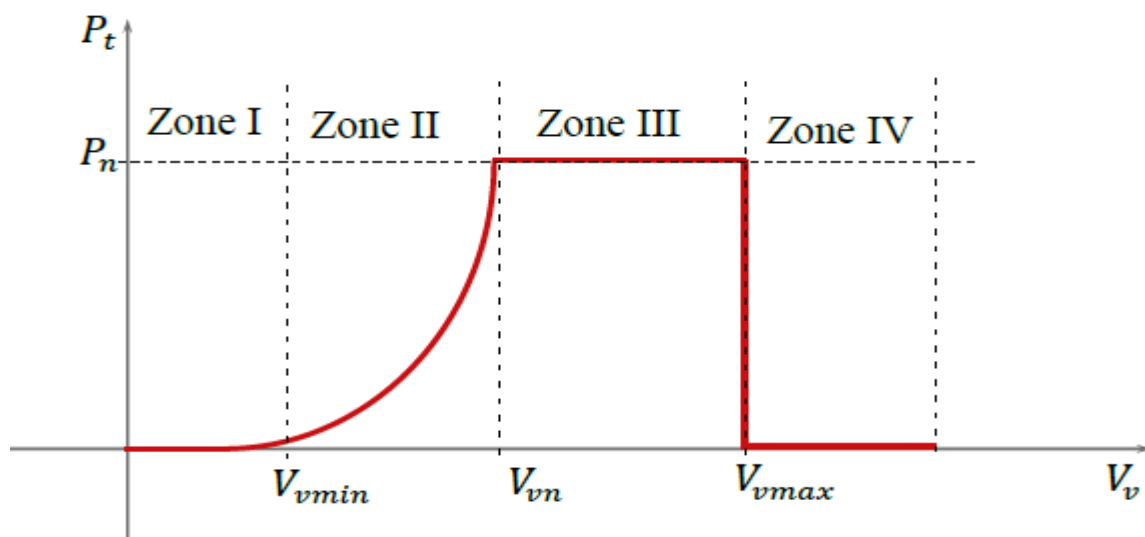


Figure (III- 1) : Zones de fonctionnement d'une éolienne [9].

D'après la caractéristique de la figure (III-1), on dispose de types de fonctionnement de l'aérogénérateur, fonctionnement à charge partielle et fonctionnement à pleine charge [13].



### III.3 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul [15].

L'équation mécanique en régime permanent est donnée par :

$$T_t = (f\Omega_t + T_t)G_t \quad (\text{III-1})$$

Une estimation de la vitesse de rotation de la turbine, notée  $\Omega_t$ , est obtenue à partir de la mesure de la vitesse de rotation de la MADA :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad (\text{III-2})$$

Une mesure précise de la vitesse du vent étant difficile, une estimation de celle-ci, notée  $V_t$ , est obtenue à partir de l'estimation de vitesse rotation de la turbine :

$$V_t = \frac{\Omega_T \cdot R}{\lambda} \quad (\text{III-3})$$

Le couple de la turbine éolienne peut ensuite être obtenu à partir des estimations de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine. Il peut s'exprimer par :

$$T_{topt} = \frac{SC_p^{max} \rho V_v^3}{2\Omega_t} \quad (\text{III-4})$$

Le couple de référence est alors obtenu à partir de l'estimation du couple de la turbine éolienne :

$$T_{em}^* = \frac{T_{topt}}{G} \quad (\text{III-5})$$

Afin d'extraire le maximum de puissance, il faut fixe la vitesse relative à sa valeur optimal  $\lambda_{opt}$  afin de d'obtenir le coefficient de puissance maximum  $C_p^{max}$ . Le couple électromagnétique de référence s'exprime donc par :

Ou K est une constante définie par définie par :

$$k = \frac{C_p^{max} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot G^3 \cdot \lambda_{opt}^3} \quad (\text{III-6})$$

Pour la zone de fonctionnement étudiée (Zone 2) et dans le cas du contrôle MPPT, le couple électromagnétique de référence est donc proportionnel au carré de la vitesse de rotation de la MADA [15].

$$T_{em}^* = K. \Omega_g^2 \tag{III-7}$$

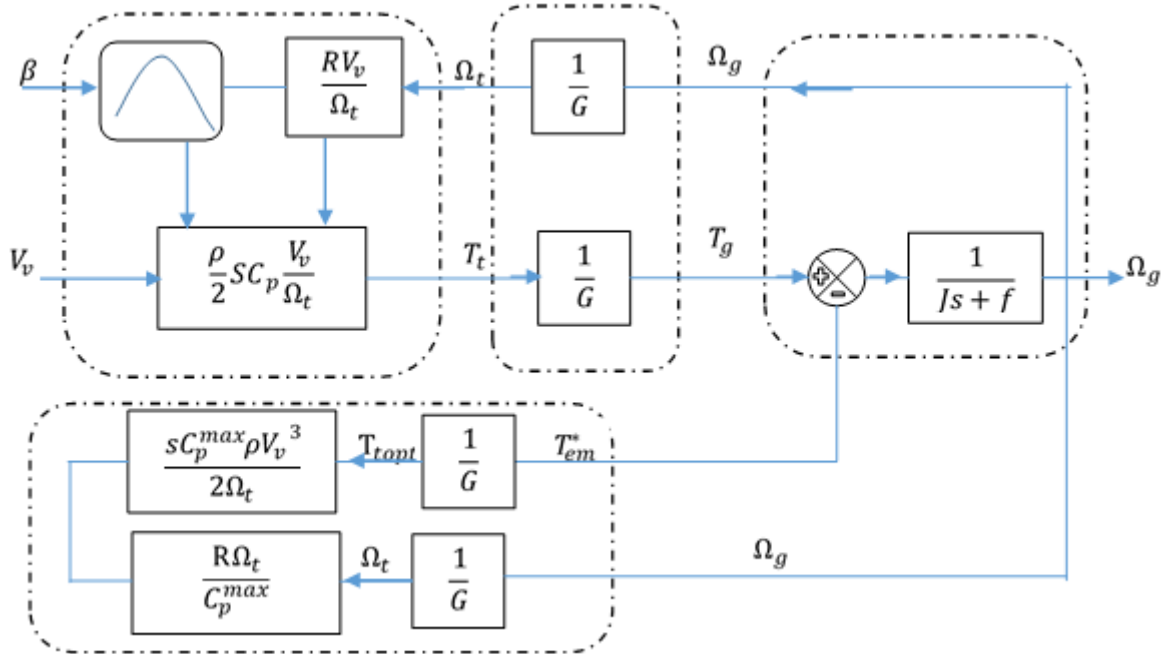
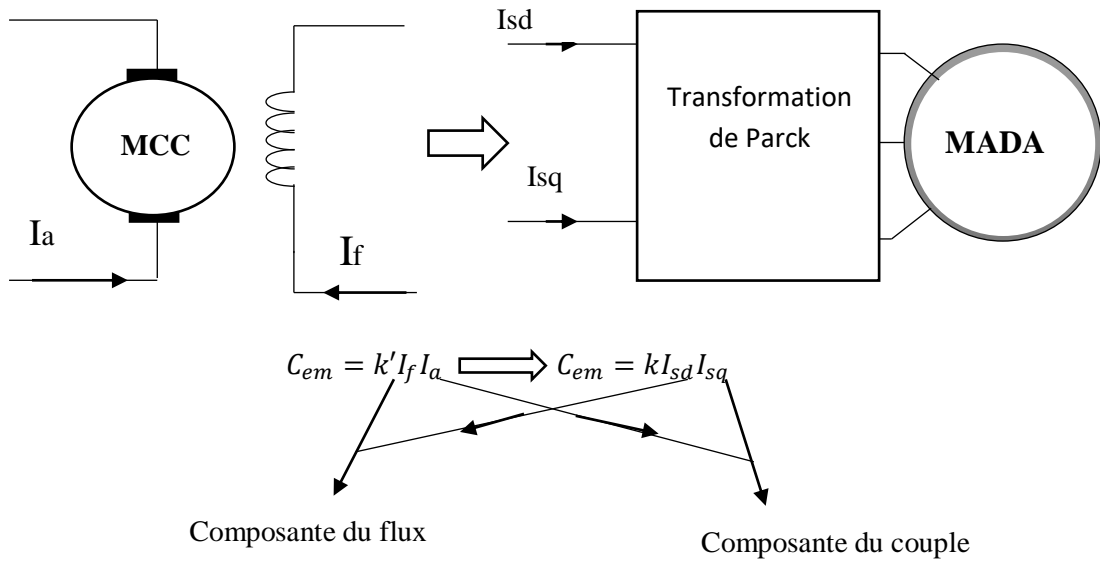


Figure (III- 2) : Schéma bloc de la commande MPPT sans régulation de vitesse.

### III.4 La commande vectorielle de la MADA

La commande vectorielle de la MADA est une solution plus attractive pour les applications à hautes performances comme l’entraînement à vitesse variable et les systèmes de génération de l’énergie électrique. En générale la commande vectorielle peut être représentée selon deux méthodes, l’une appelée directe est due à Blaschke, et l’autre appelée méthode indirecte a été développe par Hasse [16].

Elle est pour objectif de commander la MADA comme une machine à C.C à excitation séparée ou il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d’excitation) et celle liée au couple (le courant d’induit).Ce découplage permet d’obtenir une réponse très rapide du couple. Pour cela, il faut choisir un système d’axe (d, q) et une loi de commande qui assure ce découplage entre les grandeurs à contrôler [17]. La Figure (III-3) montre le but recherché par cette commande.



**Figure (III- 3) :** Equivalence entre la MCC et la MADA.

Dans notre application nous nous intéresserons au fonctionnement de la MADA en mode génératrice intégrer dans un système éolien, et cela nécessite le contrôle des convertisseurs de telle sorte à avoir le mode de fonctionnement désiré [16].

### III.4.1 Modèle de la MADA en vue de la commande

Nous avons défini au chapitre II, les équations de la MADA dans le repère (d, q) lié au champ tournant. Si on exprime les équations du système (III-8) en utilisant la transformation de Laplace on obtient

$$\begin{cases}
 V_{sd}(s) = R_s i_{sd}(s) + s\phi_{sd}(s) - \omega_s \phi_{sq}(s) \\
 V_{sq}(s) = R_s i_{sq}(s) + s\phi_{sq}(s) + \omega_s \phi_{sd}(s) \\
 V_{rd}(s) = R_r i_{rd}(s) + s\phi_{rd}(s) - \omega_r \phi_{rq}(s) \\
 V_{rq}(s) = R_r i_{rq}(s) + s\phi_{rq}(s) + \omega_r \phi_{rd}(s)
 \end{cases} \tag{III-8}$$

Dans la suite de notre travail on simplifie les variables obtenues par la transformation de Laplace ; par exemple nous noterons  $V_{sd}$  au lieu de  $V_{sd}(s)$  ; s est l'opérateur de Laplace. Dans la but d'obtention un bon découplage entre les axes d et q, nous définissons des tensions intermédiaires comme suite [16]:

$$\begin{cases} V_{sd} - \frac{M}{L_r} V_{rd} = V_{tsd} \\ V_{rd} - \frac{M}{L_s} V_{sd} = V_{trd} \\ V_{sq} - \frac{M}{L_r} V_{rq} = V_{tsq} \\ V_{rq} - \frac{M}{L_s} V_{sq} = V_{trq} \end{cases} \quad (\text{III-9})$$

Des termes de couplage a compensé apparaissent  $P_{1d}, P_{1q}, P_{2d}, P_{2q}$  ; ces expressions nous permettent d'obtenir des relations entre les tensions intermédiaires et les courants statoriques et rotoriques dans les axes d ou q.

Il devient :

$$\begin{cases} V_{tsd} = R_s(1 + sT_s\sigma)I_{sd} + p_{1d} \\ V_{tsq} = R_s(1 + sT_s\sigma)I_{sq} + p_{1q} \\ V_{trd} = R_r(1 + sT_r\sigma)I_{rd} + p_{2d} \\ V_{trq} = R_r(1 + sT_r\sigma)I_{rq} + p_{2q} \end{cases} \quad (\text{III-10})$$

Avec :

$-T_s = \frac{L_s}{R_s}$  : constante de temps électrique statorique.

$-T_r = \frac{L_r}{R_r}$  : constante de temps électrique rotorique.

$-\sigma = (1 - \frac{M^2}{L_s L_r})$  : coefficient de dispersion.

Les termes de couplage peuvent être comme suite :

$$\begin{cases} p_{1d} = -\frac{M}{L_r} R_r I_{rd} - \omega_s \phi_{sq} + \omega \frac{M}{L_r} \phi_{rq} \\ p_{1q} = -\frac{M}{L_r} R_r I_{rq} - \omega_s \phi_{sd} + \omega \frac{M}{L_r} \phi_{rd} \\ p_{2d} = -\frac{M}{L_s} R_s I_{sd} - \omega_s \frac{M}{L_s} \phi_{sq} - \omega \phi_{rq} \\ p_{2q} = -\frac{M}{L_s} R_s I_{sq} - \omega_s \frac{M}{L_s} \phi_{sd} + \omega \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

De système d'équation (II-10), on tire les fonctions de transfert suivantes :

$$\begin{cases} G_{sd} = \frac{I_{sd}}{V_{tsd} - P_{1d}} = \frac{1/R_s}{1 + sT_s\sigma} \\ G_{sq} = \frac{I_{sq}}{V_{tsq} - P_{1q}} = \frac{1/R_s}{1 + sT_s\sigma} \\ G_{rd} = \frac{I_{rd}}{V_{trd} - P_{2d}} = \frac{1/R_r}{1 + sT_r\sigma} \\ G_{rq} = \frac{I_{rq}}{V_{trq} - P_{2q}} = \frac{1/R_r}{1 + sT_r\sigma} \end{cases} \quad (\text{III-12})$$

La commande vectorielle de la machine asynchrone consiste à orienter l'un des flux de la machine suivant l'axe d ou q.

Dans notre cas on choisit l'orientation de repère (d, q) suivant le vecteur flux statorique  $\phi_{sd}$  ; ainsi le modèle de la MADA sera simplifié et dispositif de commande qui en résulte l'est également.

$$\begin{aligned} \phi_{sd} &= \phi_s \\ \phi_{sq} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{III-13})$$

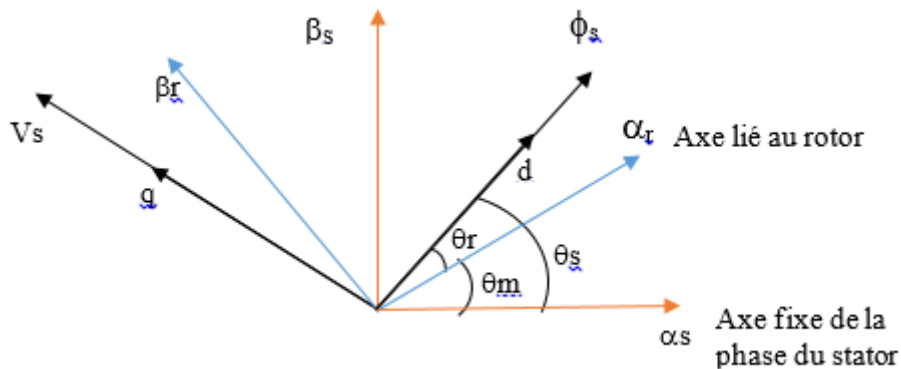


Figure (III- 4) : vecteurs flux dans le système d'axe choisit.

.Avec ce choix d'orientation du flux, les expressions des systèmes d'équations (III-8) et (III-9) en régime permanent deviennent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} - \omega \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \omega \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III-14})$$

Telle que :

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

Compte tenu des hypothèses de travail retenues, cela nous incite à prendre le courant statorique dans l'axe d nul,  $i_{sd} = 0$ . Le courant et la tension dans cet axe sont alors en phase

$$V_{sq} = V_s \text{ et } i_{sd} = i_s$$

Dans ce cas nous obtenons un facteur de puissance unitaire au stator, donc la puissance réactive statorique est nulle  $Q_s = 0$

Ces simplifications nous conduisent à l'expression de couple électromagnétique :

$$C_{em} = P\Phi_s i_{sq} \tag{III-15}$$

Cette expression est semblable à celle de la machine à courant continu à excitation séparée.

L'analyse des équations de flux en régime permanent permet de conclure que  $\Phi_{sd}$  ne peut être imposé que par le courant rotorique  $i_{rd}$  :

$$\begin{aligned} \phi_{sd} &= M i_{rd} \\ \phi_{sq} &= 0 = L_s i_{sd} + M i_{rq} \\ \phi_{rd} &= L_r i_{rd} \\ \phi_{rq} &= L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{aligned} \tag{III-16}$$

Afin de garantir l'état magnétique de la machine au rotor, ( $\phi_{sd} = \phi_{sn}$ ), nous procédons à la régulation du courant rotorique  $i_{rd}$ . la magnétisation est donc assurée par le rotor.

D'après les expressions des équations qui viennent d'être établies, nous pouvons tracer un tableau récapitulatif mettant en liaison les objectifs de la stratégie de commande avec les références des variables d'action concernées :

**Tableau (III- 1) :** stratégie de commande appliquée à la MADA [16]

Objectifs	Références
$\phi_{sd} = \phi_s = \phi_{sn}$	$i_{rd}^* = \frac{\phi_{sn}}{M}$
$\phi_{sq} = 0$	$i_{rq}^* = -\frac{L_s}{M} i_{sq}^*$
$Q_s = 0, (\cos \varphi = 1)$	$i_{rd}^* = 0$
$C_{em} = C_{em}^*$	$i_{sq}^* = \frac{C_{em}^*}{P\phi_{sn}}$

La répartition des puissances actives entre le stator et le rotor est une exigence dans la stratégie de contrôle à adopter, en effet dans notre travail on a choisi de faire fonctionner la MADA avec un glissement égal a-1, donc en négligeant les termes résistifs de la machine :

$$\frac{P_s}{P_r} = \frac{\omega_s}{\omega_r} = 1 \quad \omega_s = -\omega_r \quad (\text{III-17})$$

Et d'après la loi d'autopilotage :

$$\Omega_r = \omega_s - \omega_r = 2\omega_s = -\omega_r \quad (\text{III-18})$$

La relation (III-17) montre que la loi de répartition des puissances actives permet de faire fonctionner la MADA avec une vitesse de rotation mécanique égale à deux fois la valeur absolue des pulsations des courants statoriques ou rotoriques [16].

### III.5. Technique de commandes MLI

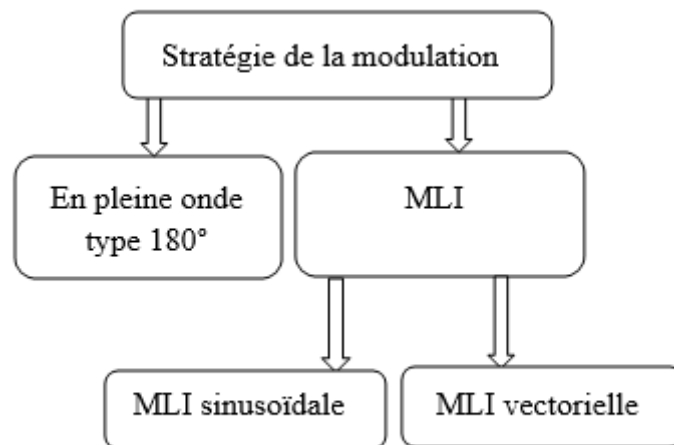


Figure (III- 5): différentes de la commande MLI

Notre travail se base sur la technique sinus triangle

#### III.5.1 Modulation sinusoïdale (ou sinus-triangle)

La modulation sinusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante, généralement sinusoïdale, avec une onde de modulation ou porteuse, généralement triangulaire. Cette technique exige une commande séparée pour chacune des phases de l'onduleur [18].

La figure ci-dessous illustre le principe de base de cette technique

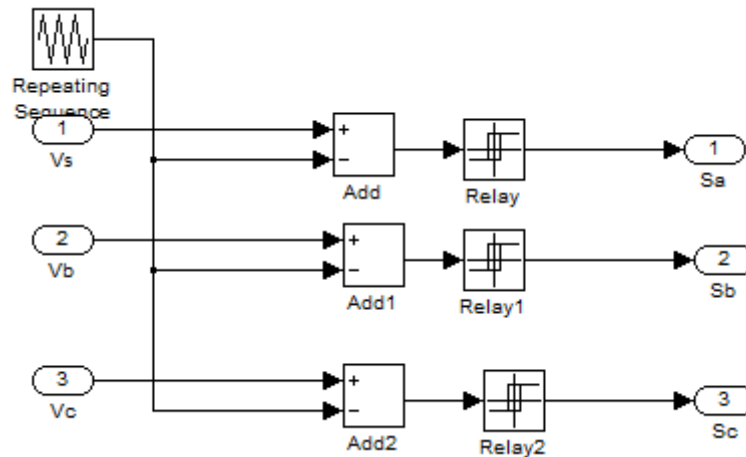


Figure (III- 6): schéma de principe de la technique sinus-triangle

Dans le cas d'une référence sinusoïdale, les caractéristiques sont :

- L'indice de modulation  $m$  égal au rapport de la fréquence  $f_p$  de la porteuse à la fréquence de la référence:  $m = f_p / f_m$
- Le coefficient de réglage  $r$  égal au rapport de l'amplitude  $A_m$  de la référence à l'amplitude crête  $A_p$  de la porteuse :  $r = A_m / A_p$
- Le facteur d'évaluation des performances de la MLI qui est la distorsion facteur de total des harmonique de la tension de sortie (THD), défini par le rapport de la valeur efficace des harmoniques de tension à la valeur efficace du fondamental de cette tension :

$$THDv = \frac{V_h}{V_1} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2}}{V_1} \tag{III-19}$$

**a) Modulation sinusoïdale naturelle**

Comme pour les onduleurs a deux niveaux, les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur NPC sont obtenus à partir des intersections des trios signaux de référence sinusoïdaux déphasés entre eux de  $120^\circ$ , de fréquence  $f_m$  et d'amplitude  $A_m$ , avec un signal triangulaire d'amplitude  $A_p$  et de fréquence  $f_p$ , très supérieure à  $f_m$  [19].

**b) Modulation sinusoïdale à double triangles**

Cette stratégie est basée au principe sur la modulation sinusoïdale. Pour les onduleurs deux niveaux, elle recommande l'utilisation de deux signaux triangulaires symétriques de même fréquence  $f_p$ , et de même amplitude  $A_p$ , ces signaux triangulaires sont comparés, pour chaque phase, avec un signal de référence d'amplitude  $A_m$  et de fréquence  $f_m$ . c'est la modulation sinusoïdale à double triangle.



Pour les onduleurs avec un nombre de niveaux  $n$  supérieur à trois, la technique sinusoïdale naturelle avec son signal triangle unique, ne permet pas la génération de tous les signaux de commande requis. Alors, cette technique nécessite  $(n-1)$  signaux triangulaires de même fréquence  $f_p$ , et de même amplitude  $A_p$  [20].

### III.6 Contrôle des puissances

Le dispositif de commande permet d'imposer les courants transités à suivre leurs références cela entraîne les puissances active et réactive transitée suivantes :

$$P_g = V_{gd} i_{md}^* + V_{gq} i_{mq}^* \quad (\text{III-20})$$

$$Q_g = V_{gq} i_{mq}^* + V_{gd} i_{md}^* \quad (\text{III-21})$$

En multipliant l'équation (III.20) par  $V_{gd}$  et l'équation (III.21) par  $V_{gq}$ , on aura :

$$P_g V_{gd} = V_{gd}^2 i_{md}^* + V_{gq} V_{gd} i_{mq}^* \quad (\text{III-22})$$

$$Q_g V_{gq} = V_{gq}^2 i_{mq}^* + V_{gd} V_{gq} i_{md}^* \quad (\text{III-23})$$

En faisant la somme de ses deux équations, l'expression du courant  $i_{md}^*, i_{mq}^*$  est donnée par :

$$i_{md}^* = \frac{P_g V_{gd} + Q_g V_{gq}}{V_{gd}^2 + V_{gq}^2} \quad (\text{III-24})$$

On remplace  $i_{md}^*$ , dans (III.18) et on tire  $i_{mq}^*$

$$i_{mq}^* = \frac{P_g V_{gq} - Q_g V_{gd}}{V_{gd}^2 + V_{gq}^2} \quad (\text{III-25})$$

Il est donc possible d'imposer des références pour la puissance active  $P_{ref}$  et la puissance réactive  $Q_{ref}$ , en imposant les courants de références comme suit :

$$i_{gd} = \frac{P_g^* V_{gd} + Q_g^* V_{gq}}{V_{gd}^2 + V_{gq}^2} \quad (\text{III-26})$$

$$i_{md} = \frac{i_{gd}^* P_g V_{gd} + i_{gq}^* V_{gq}}{V_{gd}^2 + V_{gq}^2} \quad (\text{III-27})$$

La composante directe du courant est utilisée pour réguler la tension du bus continu. Ce dernier est contrôlé à l'aide d'un régulateur (PI). La composante en quadrature est utilisée.

Pour réguler la puissance réactive transmise, le système de commande doit permettre de maintenir constante la tension du bus continu, et d'obtenir des tensions sinusoïdales au primaire du transformateur de fréquence identique à celle du réseau. La puissance réactive est imposée nulle  $Q_g^* = 0$ .

### III.7 Commande de la liaison au réseau

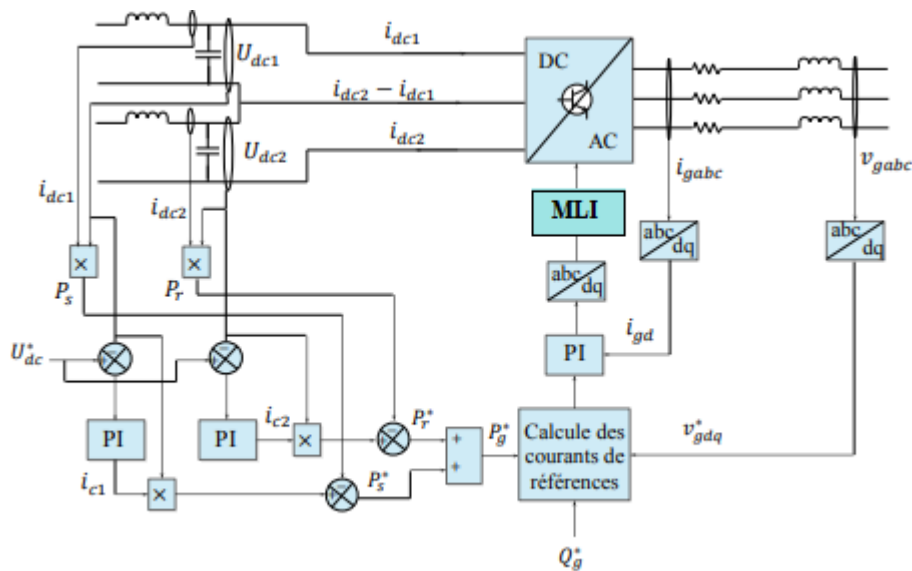


Figure (III- 7): Schéma de principe de contrôle de la liaison au réseau.

Un schéma global de la commande de la liaison au réseau est représenté sur la figure au-dessous

### III.8 Contrôle de bus continu

Le contrôle de bus continu est réalisé avec une boucle qui permet de garder la tension du bus continu constante, au moyen d'un correcteur proportionnel intégral. La puissance dans la capacité est donnée par :

$$P_c = V_{dc} \cdot i_c \tag{III-28}$$

Et sa référence est donnée par :

Les pertes dans le convertisseur et dans le filtre sont considérées négligeables par rapport à la puissance transmise. On alors la [1].

### III.9 Contrôle des courants envoyés au réseau

Le contrôle des courants est obtenu par trois actions spécifiques [21]:

- ☞ Une compensation de la liaison au secondaire du transformateur

$$\begin{cases} e_q = w_g L_f i_{mq} \\ e_d = w_g L_f i_{md} \end{cases} \quad \text{(III-29)}$$

☞ Une action de découplage des courants

$$\begin{cases} V_{md}^* = (R_f + L_f s) i_{md} - e_q + V_{gd} \\ V_{mq}^* = (R_f + L_f s) i_{mq} + e_d + V_{gq} \end{cases} \quad \text{(III-30)}$$

Avec:

$$\begin{cases} V_{bd}^* = (R_f + L_f s) i_{md} \\ V_{bq}^* = (R_f + L_f s) i_{mq} \end{cases} \quad \text{(III-31)}$$

☞ Un contrôle en boucle fermée des courants

$$\begin{aligned} V_{bd}^* &= [PI][i_{gd}^* - i_{gd}] \\ V_{bq}^* &= [PI][i_{gq}^* - i_{gq}] \end{aligned} \quad \text{(III-32)}$$

### III.10. Présentation de système étudié

Le système étudié est représenté sur la figure (III-2), la turbine transmet l'énergie du vent captée par les pales disponible sur l'arbre lent à travers le multiplicateur de vitesse pour entrainer la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Le stator et le rotor de la GADA sont connectés au réseau à travers une cascade deux redresseur MLI deux niveau et un onduleur MLI trois niveaux. L'association des deux bus continus des deux redresseurs forme le bus continu de l'onduleur trois niveaux [9].

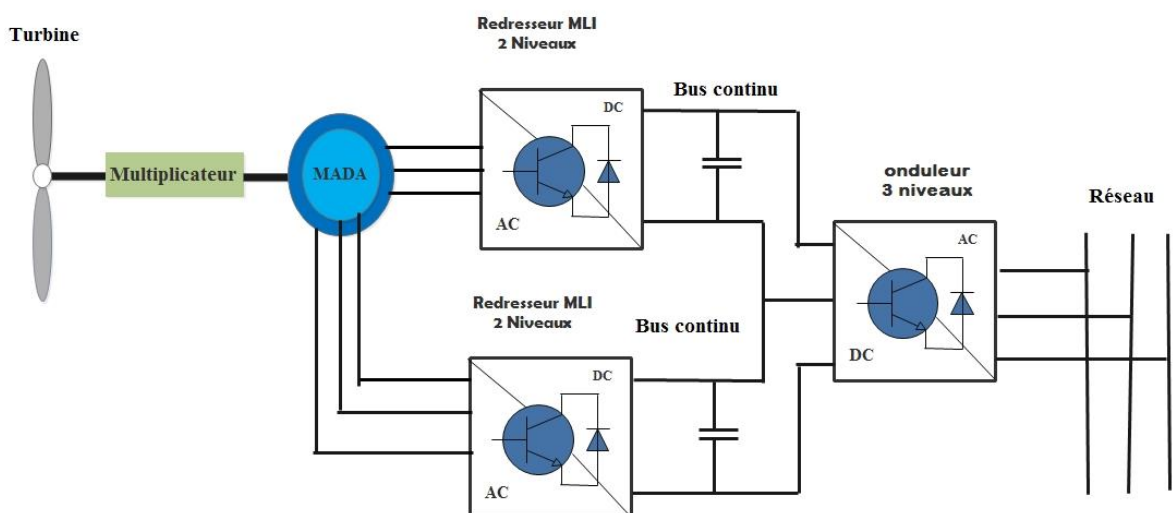


Figure (III- 8) : GADA connectée au réseau à travers un onduleur trois niveaux.

### III.11 Simulation et interprétation

Dans le but d'étudier notre système, nous avons implémenté à l'aide de logiciel MATLAB/Simulink le programme de simulation de la chaine de conversion d'énergie éolienne (figure III-9). Nous avons appliqué un profil de vent variable (figure III-10). Après simulation du programme nous avons relevé les résultats nécessaires à la mise en valeur de la structure d'alimentation de la GADA ainsi que la stratégie de contrôle appliquée.

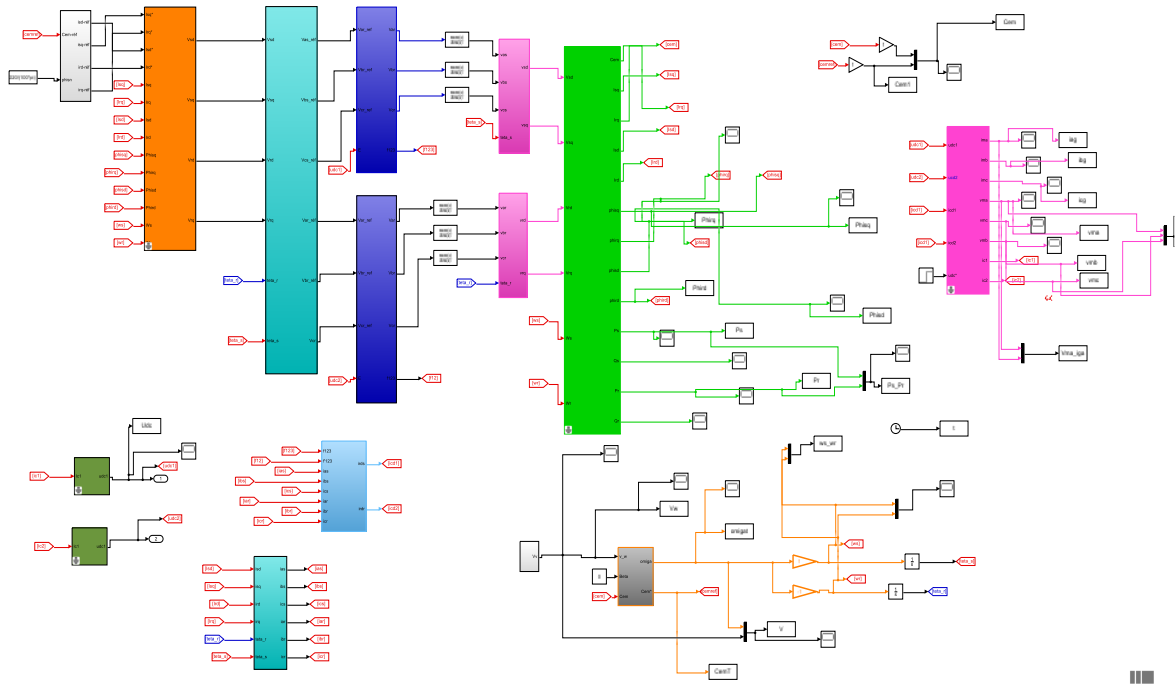


Figure III- 9: Schémas de simulation.

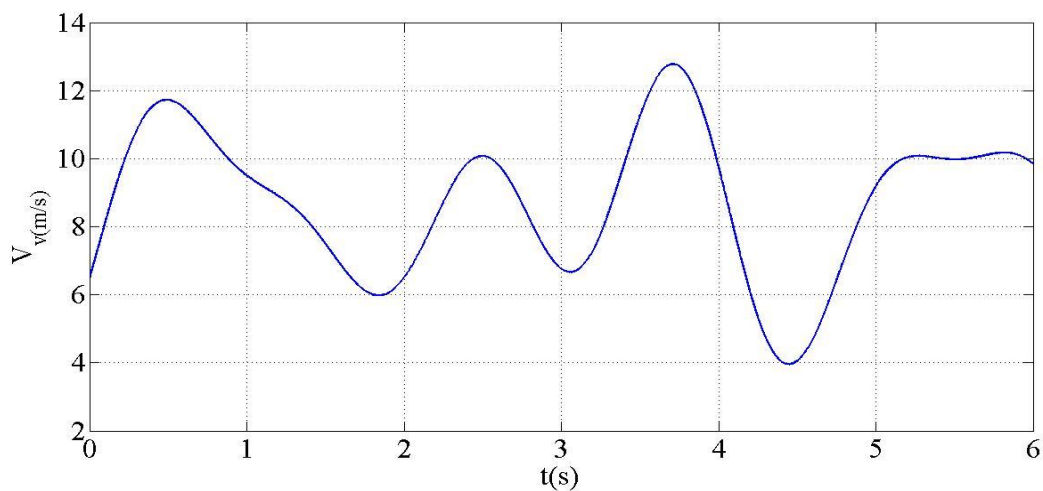


Figure (III- 10) : profile vent.

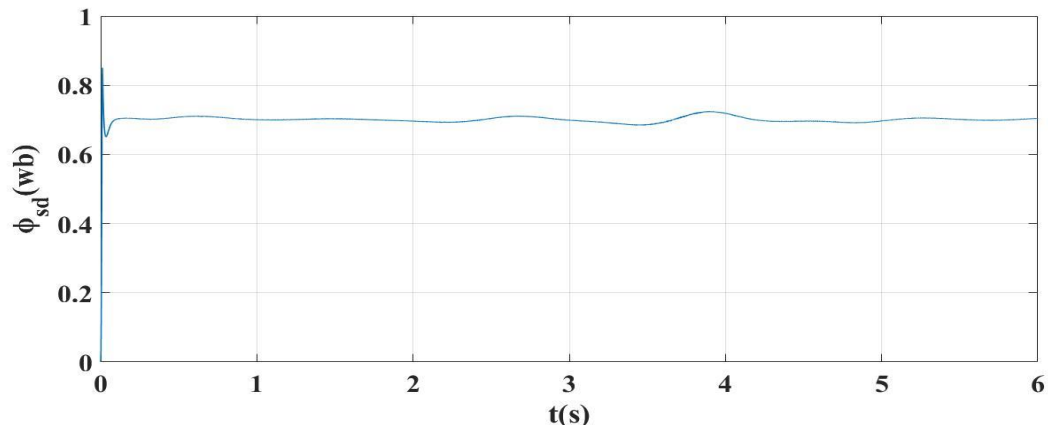


Figure (III- 11) : Allure de flux statorique direct

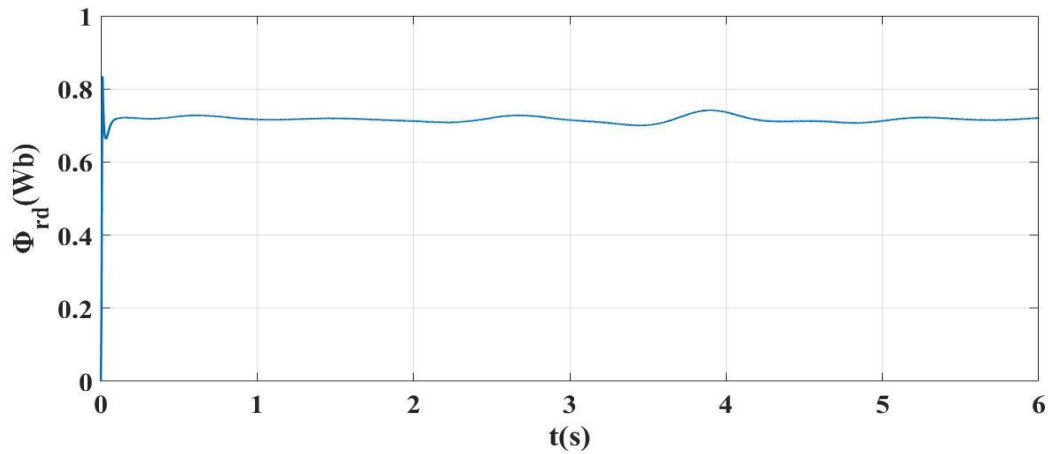


Figure (III- 12):Allures de flux rotorique direct

La référence du flux est maintenue à 0.75Wb, les réponses du couple et flux sont illustrés sur les figures (III-11) et (III-12)

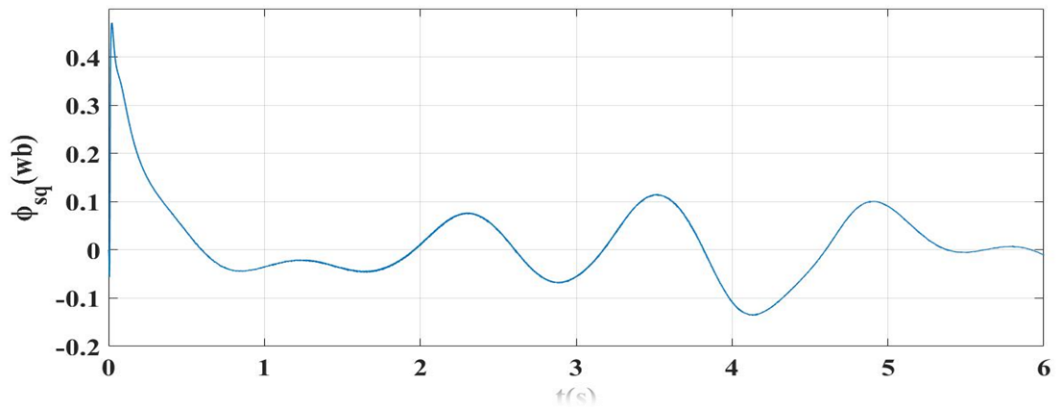


Figure (III- 13) : Allures de flux statorique quadratique

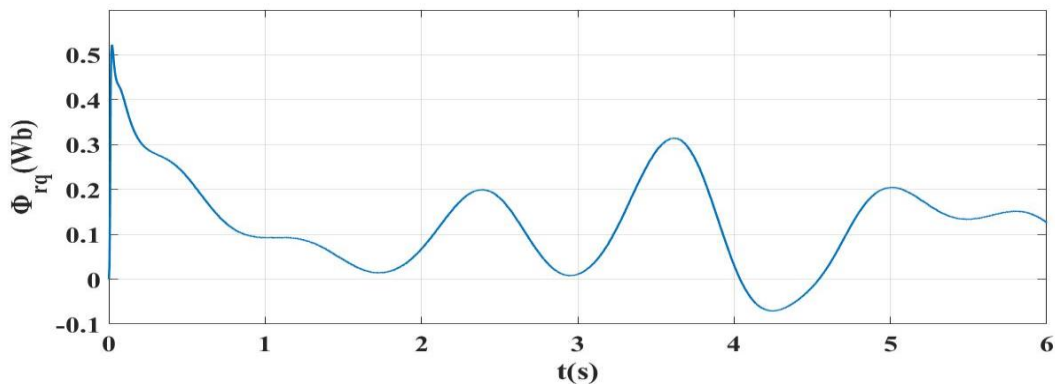


Figure (III- 14): Allure de flux rotorique quadratique

Comme prévue, nous trouvons sur ces courbes des réponses apériodiques avec des dynamiques satisfaisantes. L'impact du couple n'a pas d'influence sur le flux statorique .le flux statorique d'axe d reste à sa valeur de référence et le découplage nous assure un flux

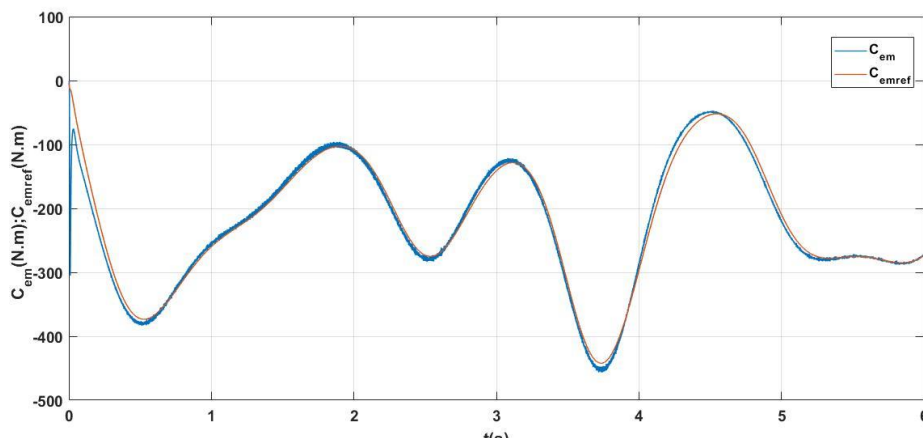


Figure (III- 15): Allures de couple de référence et électromagnétique

statorique d'axe q pratiquement nul, donc une bonne orientation du flux statorique selon l'axe d

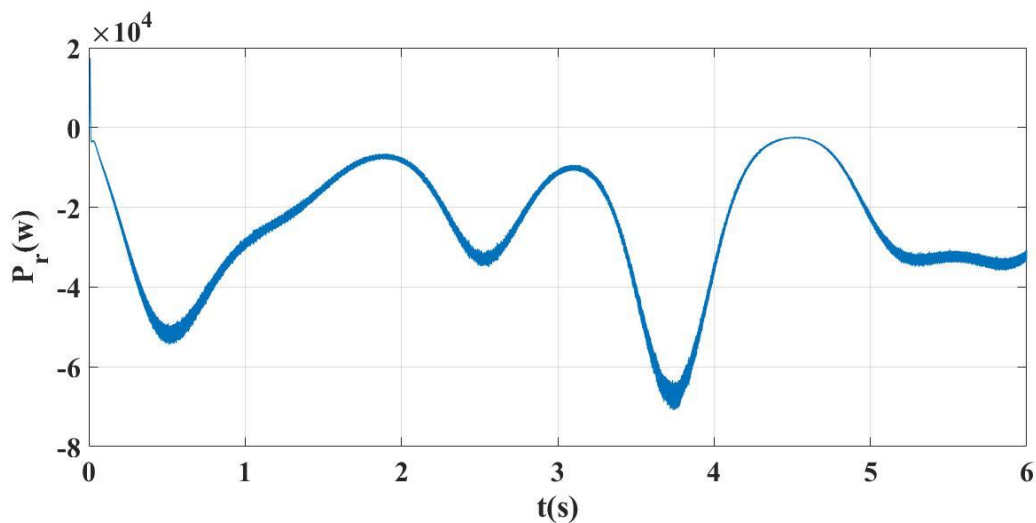
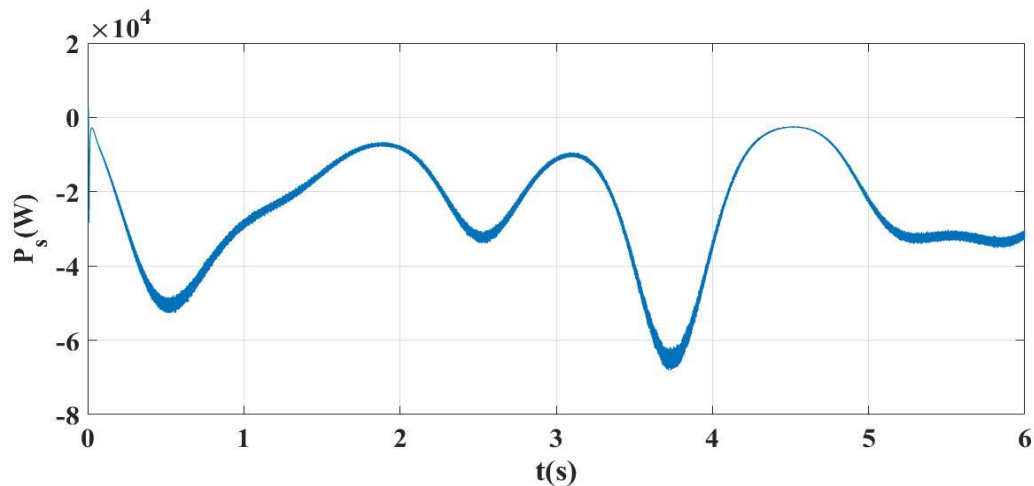


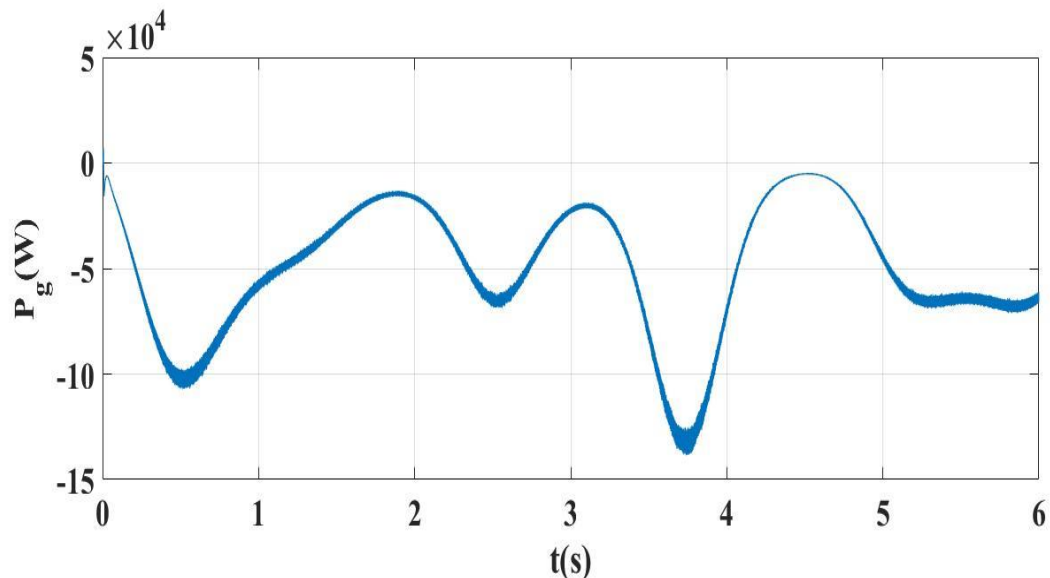
Figure (III- 16) : Allures de puissance rotorique



**Figure (III- 17):** Allures de puissance statorique

Ces résultats montrent que les puissances actives sont bien réparties entre les deux armatures de la machine. D'après les deux figures (III-16) et (III-17), on déduit que les deux puissances rotorique et statorique sont proches de la valeur nominale qui vaut 15kW, et leurs rapport est très proche de l'unité. Concernant les puissances réactives, celle du rotor varie en fonction de la vitesse de rotation, et celle du stator est nulle. Les puissances échangées entre

L'aérogénérateur le réseau ainsi que les tensions et les courants injectés au nœud de connexion sont montrés sur la figure (III.17)



**Figure (III- 18):** allure de puissance injecter au réseau

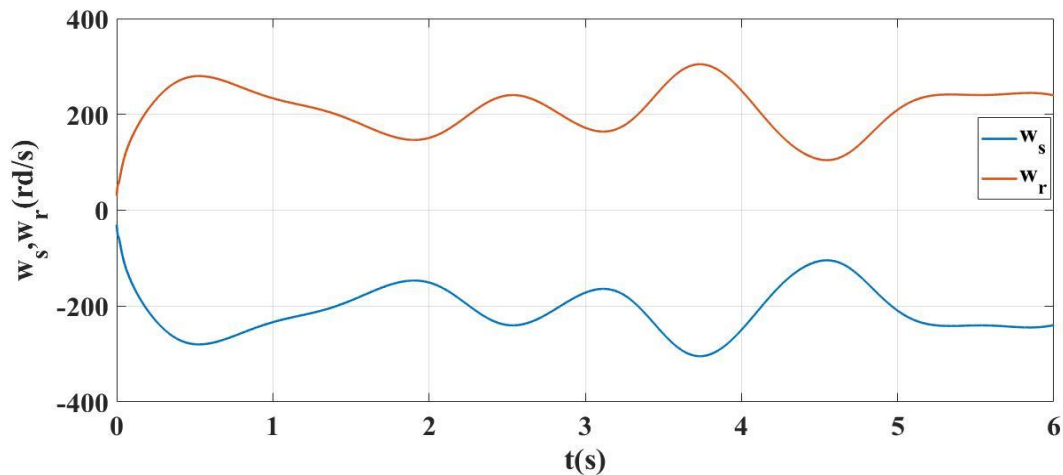


Figure (III- 19): Allures des pulsations statorique et rotorique

La répartition des pulsations statorique et rotorique (figure III-19)), nous a conduit à la répartition des puissances active de la GADA, telles que pour des pulsations statorique et rotorique nominales le rotor et le stator fournissent une puissance égale à la puissance nominale de la GADA, donc leurs somme égale à deux fois la puissance nominale. La stratégie de commande adoptée à permet d'extraire le maximum de puissance sur une large plage de variation de vitesse, avec limitation de vitesse de rotation et de la puissance produite pour des fortes vitesses du vent.

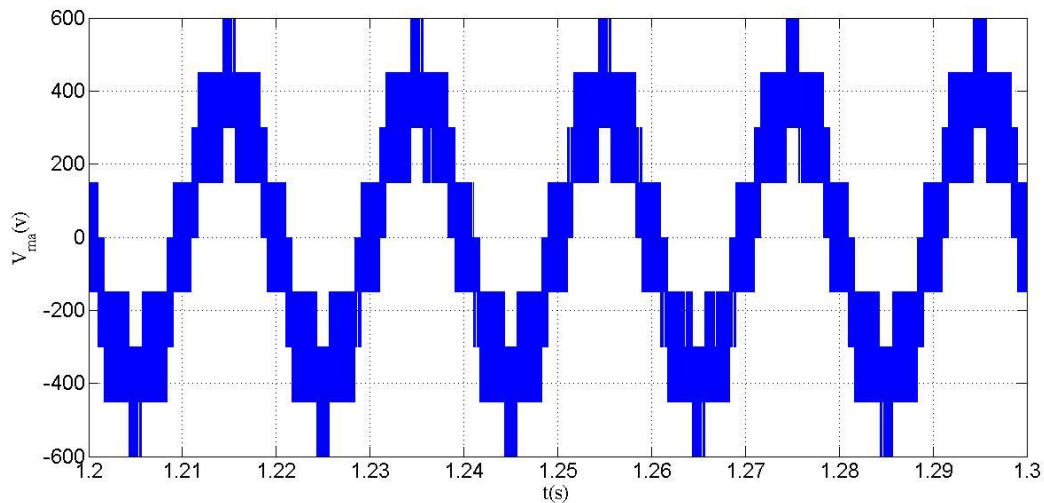
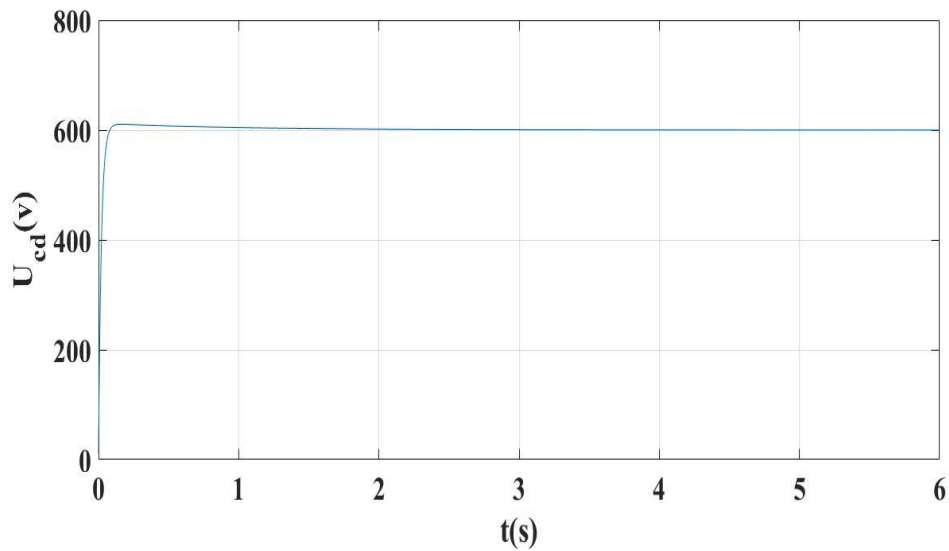


Figure (III- 20): zoom de la tension de l'onduleur trois niveaux





**Figure (III- 21):** tension de bus continu

Enfin, pour mettre en évidence la présence du bus continu, nous avons représenté sur la figure (III-20) l'allure de la tension continue. Celle-ci apparaît convenablement régulée même lorsque la puissance fournie varie.

## II.11 Conclusion

Au cours de ce chapitre, les différentes commandes associées ont été développées en vue de simulation de système avec le logiciel MATLAB/Simulink. Nous avons appliqué un profil de vent très variable pour mettre en évidence l'importance de la stratégie de commande choisie. En effet, les résultats obtenus montrent que le système peut extraire le maximum de puissance sur une large plage de variation de vitesse.

# CONCLUSION GENERALE

## Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude d'une éolienne à base d'une GADA raccordé au réseau à travers une cascade de deux redresseurs deux niveaux –onduleur trois niveaux l'objectif est de trouvé le meilleur stratège pour profiter au maximum de la variation de vitesse.

Notre travail est structuré en trois chapitres, le premier chapitre se porte sur un bref rappel sur les généralités de chaine de conversion de l'énergie éolienne, et les différentes structures de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

Dans le deuxième chapitre, nous avons présentés et modélisés les différentes parties de l'aérogénérateur, à savoir la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse, le génératrice asynchrone à double alimentation, la cascade de deux redresseurs deux niveaux-onduleur trois niveaux, et le filtre de connexion au réseau. .

Et en fin, dans le dernier chapitre, on a exposé la commande vectorielle et la commande MLI sinusoïdale, la technique de maximisation de puissance sans régulation de vitesse (MPPT), ce qui nous a permet d'établir un modèle complet de la commande proposé sur le quel est basé notre simulation. L'analyse des résultats présentés dans ce chapitre affirme les performances de la commande vectorielle proposée qui sont acceptables d'une manière générale, de point de vu pour suite ainsi que certaine perturbation qui apparaissent sur le couple et les flux, au moment de variations, les résultats de simulation obtenus clairement d'une manière générale, les résultats obtenus confirment, la bonne réputation .

La stratégie de commande appliquée, associée à la loi de répartition des pulsations, nous a permet de faire fonctionner la génératrice jusqu'à deux fois sa vitesse nominale. En effet la loi précitée associé à la commande vectorielle et à la commande MPPT a permet d'extraire un maximum de puissance sur une large plage de variation de vitesse, tel que pour des vitesses de rotation de la génératrice égales à deux fois la vitesse nominale (314 rd/s), la puissance extraite égale à deux fois la puissance nominale (150 kW).

Comme perspective, nous proposons :

- L'utilisation des convertisseurs multi-niveaux (supérieur à trois niveaux), à fin d'améliorer la qualité de l'énergie injecté au réseau.
- Prévoir un système de stockage pour les périodes de surproduction de l'aérogénérateur.

## Liste Bibliographique

- [1] A. Fateh, Etude et controle des aérogénérateurs basés sur les machine asynchrone a rotore bobiné, universite de bejaia: memoir magistere en electrotechenique, 11/10/2013.
- [2] S. E. Aimani, Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau demoyenne tension, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL)..
- [3] H. Hansen, Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines, Roskilde, Denmark: Riso national, december 2001.
- [4] A. Zaimi, Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents, 2014.
- [5] A. Boyette, Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne, de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1: Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, 2006.
- [6] M. Hassad, Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques, univirsite Sétif 1: Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Magister, 2012.
- [7] A. Miricki, Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, institut national polytechnique de Toulouse: Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, 2005.
- [8] Y. Bekakra, Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques avancées, Centre Universitaire d'El-Oued: Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de magister, 2010.
- [9] Application de la logique floue pour la commande d'un aérogénérateur à base de la GADA, Universite abderrahmane mira – BEJAÏA, 2013.
- [10] I. BOLDEA, Variable speed generators, Taylor & Francis 2006.
- [11] POLINDER, H.; PIJL, F. F.A. VAN DER; G.J de Vilder; Tavner, P., Comparison of directdrive and geared generator concepts for wind turbines chez IEEE International Conference on, 2005.
- [12] A. MIRECKI, Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance., L'institut national polytechnique de Toulouse , 2005.
- [13] B. Rabah, Amélioration des Performances des Convertisseurs Electromécaniques bases sur les Machines Asynchrones Doublement Alimentées, BEJAIA: Université A.MIRA, 2016.
- [14] K. E. M.CHOUAIB, Régle des puissance active et reactive de la génatrice asynchrone par des régulateur en mode de glissant, université Med Boudiaf de M'sila: thèse d'ingénieur , 2005.
- [15] A. GAILLARD, Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service, Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 30 avril 2010.

- [16] P. VIDAL, Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation, Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de TOULOUSE, 14 Décembre 2004.
- [17] G. Clerc., Contrôle et commande des actionneurs électrique, CEGELY.
- [18] H. c. G. V. G. Agelidis, Low Distortion Variable Level PWM Technique, *IEEE Proc-Electr*, vol. 145, n° %12, pp. 73-78, March 1998..
- [19] A. S. Toled, Commande Directe et Observation des convertisseurs de puissance : Application à l'Onduleur de tension Triphasé, Institut National Polytechnique de Grenoble, France: These de Doctorat, 2000.
- [20] G. S. Jean Bonal, Entraînements Electriques a Vitesse Variable, Vol. 2: Technique et Documentation, Décembre 1998.
- [21] T. Boutabba, Commande vectorielle en temps discret d'une Machine à induction, Université de Batna: Mémoire de magister, 2008.

## ANNEXES

**Annexe A** : Paramètres des systèmes étudiés et calculs des régulateurs des courants de la MADA:

### Paramètres de la MADA:

La puissance nominale	$(P_n)$	75 KW
La tension statorique nominale	$(U_{sn})$	380 V
La tension rotorique nominale	$(R_r)$	380 V
La résistance statorique	$(R_s)$	0.03552 $\Omega$
La résistance rotorique	$(R_r)$	0.02092 $\Omega$
L'inductance statorique	$(L_s)$	0.01545 H
L'inductance rotorique	$(L_r)$	0.01545 H
La mutuelle	$(M)$	0.0151 H
Moment d'inertie	$(J)$	0.25 kg. M <sup>2</sup>
Fréquence	$(F)$	0.0394 N.m.s/rd
Nombre de paires de pôles	$(P)$	2

### Paramètres de la Turbine:

La puissance nominale	$(P_n)$	150kW
Rayon de la turbine	$(R_t)$	8 m
Moment d'inertie de la turbine	$(J_t)$	100 kg.m <sup>2</sup> c
Fréquence de turbine	$(f_t)$	0.000024 N. m. s/rd
Coefficient de puissance	$(C_{pmax})$	0.44
La vitesse spécifique	$(\lambda_{opt})$	8.5
La densité d'air	$(\rho_{air})$	1.225kg/m

### Paramètres du réseau:

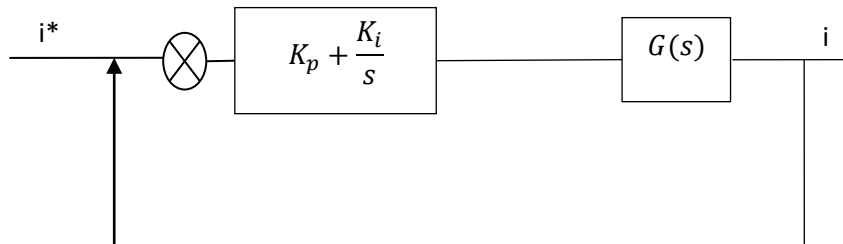
<b>Inductance de filtre</b>	<b><math>(L_f)</math></b>	<b>0.003 H</b>
<b>Résistance de filtre</b>	<b><math>(R_f)</math></b>	<b>1<math>\Omega</math></b>
<b>Condensateur</b>	<b><math>(C)</math></b>	<b>20e – 3 mF</b>

## Annexe B :

### Synthèse des régulateurs des courants de la MADA

La fonction de transfert des courants de la MADA est de la forme suivante :

$$G(s) = \frac{G}{1 + \tau s} \quad (B - 1)$$



Où :  $G$  est le gain statique et  $\tau$  est la constante du temps statorique ou rotorique de la MADA.

La régulation des courants de la MADA est assurée par des régulateurs PI avec compensation des pôles.

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit :

$$F_{BO} = \left( K_P + \frac{K_i}{s} \right) \left( \frac{G}{1 + \tau s} \right) \quad (B - 2)$$

$$F_{BO} = G \frac{K_P + \frac{K_i}{s}}{1 + \tau s} = \frac{K_P s + K_i}{s(1 + \tau s)} = G K_i \frac{1 + \frac{K_P s}{K_i}}{s(1 + \tau s)} \quad (B - 3)$$

Afin d'éliminer le zéro dans la fonction de transfert en boucle ouverte, nous introduisant l'égalité suivante :

$$\tau = \frac{K_P}{K_i} \quad (B - 3)$$

Ainsi :

$$F_{BO} = \frac{G K_i}{s} \quad (B - 4)$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$F_{BO} = \frac{G K_i}{G K_i + s} \quad (B - 5)$$



Le temps de réponse  $t_r$  du système boucle pour atteindre 95% de la consigne est donnée par :

$$t_r = 3. \frac{1}{GK_i} \quad (\text{B} - 6)$$

A partir des expressions et, on déduit les gains de correcteur en fonction des paramètres de la MADA et du temps de repense choisi :

$$K_i = 3. \frac{1}{Gt_r} \quad (\text{B} - 7)$$

$$K_p = 3. \frac{\tau}{Gt_r} \quad (\text{B} - 8)$$