

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 d'étude

En vue l'obtention du diplôme de master en électrotechnique

Filière : Electrotechnique

Spécialité : machines électriques

Thème

---

Etude d'une éolienne en fonctionnement autonome à base  
d'une génératrice asynchrone à double alimentation

Réalisé par :

✚ M<sup>s</sup> : AIT ATMANE Sofiane  
✚ M<sup>s</sup> : HAMIDOUCHE Mourad

Encadré par :

✚ D<sup>r</sup> R.BABOURI

Members de jury:

✚ M<sup>r</sup> ALOUI  
✚ M<sup>r</sup> IDJDARENE

Année Universitaire : 2018/2019

# *Dédicaces*

*À nos familles*

*Nos amis(es)*

*Les personnes les plus chères à nos cœurs*

*Toute la section d'électrotechnique*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents auquel  
j'exprimer mes sincères éternelles gratitude pour leur  
soutien, conseils et leur éducation que dieu les garde  
pour moi.*

*A mes chers frères et ma unique sœur et toute la famille  
A tous mes chers amis  
A tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin*

*Hamidouche Mourad*

# NOMENCLATURES

## Liste des symboles

$\Omega_t$ : Vitesse de rotation de la turbine;

$\Omega_t^*$ : Vitesse de rotation de référence de la turbine ;

$\Omega$  : la vitesse mécanique de la génératrice

$\omega_s$ : Pulsation des courants statoriques ;

$\lambda$ : 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;

$\theta_r$ : Position angulaire du vecteur champ tournant rotorique par rapport au rotor ;

$\theta_s$ : Position angulaire du vecteur champ tournant statorique par rapport au stator ;

$\theta_{s,r}$ : Position angulaire du vecteur de tension de référence statorique ou rotorique dans le plan  $dq$ ;

$V_v$ : Vitesse du vent

$V_{s,d}, V_{s,q}$ : Tension simple aux bornes des enroulements rotoriques dans le plan  $dq$ ;

$V_{s,d}^*, V_{s,q}^*$ : 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  $dq$  ;

$V_{ms,r}$ : 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  $dq$ ;

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$ : 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  $abc$  :

$V_{ma}, V_{mb}, V_{mc}$ : 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;

$C_{em}$ : Couple électromagnétique de la MADA ;

$C_{em}^*$ : Couple électromagnétique de référence ;

$C_g$ : Couple produit par la GADA ;

$C_t$ : Couple produit par la turbine éolienne ;

$p_n$ : 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 ;

$R_t$ : Rayon de la surface balayée par les pales de la turbine éolienne ;

$p_{d1}, p_{1q}, p_{2d}, p_{21}$  :Termes de couplages

$L_s$ : Inductance propre des enroulements statoriques ;

$L_r$ : Inductance propre des enroulements rotoriques ;

$L_{s1}$ : Inductance cyclique des enroulements statoriques ;

$L_{r1}$ : 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;

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ : 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  $dq$ ;

## NOMENCLATURES

---

$i_{rd1}, i_{rd2}$ : Courants redressés ;

$i_c$ : Courant traversant le condensateurs de bus continu;

$J_g$ : Inertie de la GADA ramenée au à l'arbre primaire du multiplicateur de vitesse;

$J_t$ : Inertie de la MADA ;

$G$  : Gain de multiplicateur de vitesse de la turbine

$C_p$ : Coefficient de puissance de la turbine éolienne     $S$  :

La surface balayée par les pales de l'éolienne [ $m^2$ ].

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

$A$  : la valeur moyenne de la vitesse du vent.

$ak$  : amplitude de l'harmonique de l'ordre  $k\rho$

## **LISTE DES FIGURES**



**Listes des figures**

**FIGURE DU CHAPITRE I**

<b>Figure I.1</b> fonctionnement d'une éolienne.	3
<b>Figure I.2:</b> éolienne type Savonius	4
<b>Figure I.3:</b> éolienne type darrieus	4
<b>Figure I.4:</b> éolienne à axe horizontale	5
<b>Figure I.5:</b> les composants d'une éolienne	6
<b>Figure I.6:</b> construction de la nacelle	7
<b>Figure I.7:</b> la courbe de puissance d'une éolienne de 3 MW	9
<b>Figure I.8 :</b> Modes et régimes de fonctionnement de la MADA.	12
<b>Figure I.9 :</b> Machine asynchrone à rotor bobiné (document "Joliet Equipement")	13
<b>Figure I.10 :</b> MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée	13
<b>Figure I.11:</b> Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique	14
<b>Figure I.12 :</b> MADA, structure Kramer	14
<b>Figure I.13 :</b> Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	15
<b>Figure I.14 :</b> structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	16

**FIGURE DE CHAPITRE II**

<b>Figure II.1 :</b> Schéma de la turbine éolienne.	18
<b>Figure II.2 :</b> coefficient de puissance $C_P$ en fonction $\lambda$ de pour différents $\beta$ [7].	19
<b>Figure II.3 :</b> Modèle mécanique simplifié du multiplicateur [18].	20
<b>Figure II.4 :</b> Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.	21
<b>Figure II.5 :</b> Schéma bloc de maximisation de la puissance extraite	23
<b>Figure II.6 :</b> Schéma bloc fonctionnel de la turbine avec MPPT	23
<b>Figure II.7 :</b> Les quatre zones de fonctionnement de la turbine	24
<b>Figure II.8 :</b> Schéma bloc de système d'orientation des pales	25
<b>Figure II.9 :</b> Représentation schématique de la MADA	26
<b>Figure II.10 :</b> Schéma d'un onduleur de tension triphasé.	31
<b>Figure II.11 :</b> schéma simple du circuit du bus continu	33
<b>Figure II.12 :</b> Circuit électrique équivalent du modèle simple de la batterie.	33

**FIGURE DU CHAPITRE III**

<b>Figure III.1</b> Boucles de régulation des courants du stator et du rotor	37
<b>Figure III.2</b> Schéma de commande d'une MADA totalement interfacé	38
<b>Figure III.3</b> boucle de régulation de courant	39
<b>Figure III.4</b> Boucle d'asservissement de la vitesse de la turbine	40
<b>Figure (III.5)</b> Allure du la puissance mécanique de la turbine	41
<b>Figure (III.6)</b> Des allures des puissances de stator, rotor de la GADA	42
<b>Figure (III.7)</b> Allure de la vitesse du vent	42
<b>Figure (III.9)</b> Des allures de couple électromagnétique et couple référence	43
<b>Figure (III.10)</b> Des allures des flux de la GADA	44
<b>Figure (III-11)</b> : Allures des pulsations statorique et rotorique	44
<b>Figure (III.12)</b> Allure du la tension de bus continu	45
<b>Figure (III.13)</b> Tension $V_a$ de l'onduleur	45
<b>Figure (III.14)</b> les courants $i_a$ $i_b$ $i_c$ de charge AC	45
<b>Figure (III.15)</b> Allure du courant de la batterie	46
<b>Figure (III.16)</b> Allure du la puissance de la charge (AC)	46
<b>Figure (III.17)</b> Allure du la puissance de la charge	47
<b>Figure (III.18)</b> Allure du la tension de la batterie	47

# SOMMAIRE

Sommaire	
Nomenclatures	
Liste des abréviations	
Liste les figures	
Introduction générale	
Introduction générale.....	(1)
<b>Chapitre I</b> Etat d'art sur l'énergie éolienne	
I.1- Etat de l'art sur l'éolienne .....	(2)
I.1.1. Introduction .....	(2)
I.1.2. Définition d'un éolienne .....	(2)
I.1.3. Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	(2)
I.1.4. Différents types d'éoliennes.....	(3)
I.1.4.1. Eoliennes à axe verticale .....	(3)
I.1.4.1.1 Les éoliennes à axe vertical de type Savonius.....	(3)
I.1.4.1.2 Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus .....	(4)
I.1.4.2. Eoliennes à axe horizontale.....	(5)
I.1.4.2.1. Avantage.....	(5)
I.1.4.2.2. Inconvénient.....	(5)
I.1.5. Les composantes d'une éolienne .....	(5)
I.1.5.1. Le mat.....	(6)
I.1.5.2. Les pales.....	(6)
I.1.5.3. La fondation.....	(6)
I.1.5.4. La nacelle.....	(6)
I.1.6 La production éolienne.....	(8)
I.1.7 Notions théoriques sur l'éolien.....	(9)
I.1.7.1 Loi de Betz .....	(9)
I.1.8 Mode d'application de l'énergie éolienne.....	(10)
I.1.8.1 Eolienne à vitesse fixe.....	(10)
I.1.8.2 Eolienne à vitesse variable.....	(10)
I.1.8.2.1 Les avantages .....	(10)
I.1.8.2.2 Les inconvénients.....	(11)
I.2. Aérogénérateurs à base de la machine asynchrone à double alimentation.....	(11)
I.2.1. Description de la machine asynchrone à double alimentation.....	(11)
I.2.2. Modes opérationnels de la MADA.....	(11)

---

a). Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	(12)
b). Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	(12)
c). Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.....	(12)
d). Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.....	(12)
I.2.3. Configuration de la MADA .....	(12)
I.2.3.1. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné".....	(12)
I.2.3.1.1. MADA à énergie rotorique dissipée.....	(13)
I.2.3.1.2. MADA- Structure de Kramer .....	(14)
I.2.3.1.3.MADA-Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur (15)	
I.2.3.1.4.MADA-Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI(15)	
I.3. Technologies des systèmes de stockage.....	(16)
a) Batterie au lithium-Ion (li-Ion) .....	(16)
b) Batterie au nickel-cadmium (Ni-Cd) .....	(16)
c) Batterie au Plomb-acide (Pb-acide) .....	(16)
I.4. La charge.....	(17)
I.5.Conclusion.....	(17)

## **Chapitre II** Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

II.1. INTRUDUCTION .....	(18)
II.2. Modélisation de la turbine éolienne .....	(18)
II.2.1. Modélisation de la turbine .....	(18)
II.2.2. Modèle du multiplicateur .....	(19)
II.2.3. Equation dynamique de l'arbre de la génératrice .....	(20)
II.2.4. Stratégies de commande de la turbine éolienne.....	(21)
II.2.4.1. Extraction du maximum de puissance (MPPT) .....	(21)
II.2.4.2. Schéma bloc de la turbine en MPPT .....	(23)
II.2.4.3. Différentes phases de fonctionnement.....	(24)
a- Phase de démarrage .....	(24)
b- Phase d'extraction de la puissance maximale (phase M.P.P.T) .....	(24)
c- Phase à vitesse mécanique quasi constante.....	(24)
d- Phase à puissance constante .....	(24)
II.2.5. Système d'orientation des pales .....	(25)
II.3. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) .....	(26)

---

II.3.1. Hypothèses simplificatrices .....	(26)
II.3.2. Modèle et identification des paramètres de la MADA .....	(26)
II.3.2.1. Equations électriques .....	(27)
II.3.2.2. Equation magnétique.....	(27)
II.3.2.3. L'équation mécanique .....	(28)
II.3.3.Changement de repère.....	(28)
II.3.4. La transformation de Park .....	(28)
II.3.5. Application de la transformation de Park à la MADA .....	(29)
II.4. Modélisation de convertisseur MLI.....	(31)
II.5. Modélisation du bus continu .....	(33)
II.6. Modélisation du système du stockage .....	(33)
II.7. Conclusion .....	(34)

## **Chapitre III** Commande et la simulation du système

III.1 Commande et la simulation de système .....	(35)
III.2 Introduction .....	(35)
III.3 Commande vectorielle .....	(35)
III.4 La machine commandée par le stator et le rotor.....	(36)
III.5 Synthèse des régulateurs de courant de la MADA.....	(39)
III.5.1 La régulation des courant de la MADA .....	(39)
III.5.2 La régulation de vitesse .....	(40)
III.6 Présentation et interprétation des résultats de simulation.....	(41)
III.7 Conclusion.....	(48)
Conclusion générale .....	(49)

---

INTRODUCTION  
GENERALE

### Introduction général

Les sources d'énergies fossiles telles que le pétrole, le charbon et le gaz naturel représentent plus des trois-quarts (75%) de l'énergie mondiale consommée pour la production d'électricité [48]. leur utilisation émet du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) dans l'atmosphère, gaz qui est reconnu comme un des responsables du réchauffement climatique. Tel qu'elle est actuellement exploitée, l'énergie nucléaire ne permet pas de résoudre les défis à venir sans aborder la problématique de sûreté.

Il apparaît donc indispensable d'adopter une politique de maîtrise efficace et raisonnée de l'énergie permettant, d'une part d'augmenter l'efficacité énergétique de nos équipements et de réaliser des économies d'autre part. Cela doit nécessairement être accompagné par un changement de comportement des citoyens. L'intérêt est de consommer moins et mieux c'est-à-dire, plus efficacement.

L'éolienne à machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très populaire puisqu'elle bénéficie de certains avantages par rapport à tous les autres types à vitesse variable. En effet, le convertisseur d'énergie utilisé afin de redresser - onduler les courants alternatifs du rotor a une puissance nominale fractionnaire de celle du générateur. Ceci implique moins de pertes par commutations, un coût de production du convertisseur moins élevé et une réduction de la taille des filtres passifs impliquant ainsi une réduction des coûts et des pertes additionnelles. Il existe déjà plusieurs techniques de commande de la MADA dans la littérature. Malheureusement, elles sont complexes et dépendent largement des paramètres de la machine [49].

Ce mémoire propose une étude d'une éolienne en isolé ou autonome, ce travail est divisé en trois parties, Dans le premier nous présentons l'état de l'art de la conversion électromécanique nous exposons les différents types d'éoliennes, leur composition et leur avantage et inconvénient. Puis nous représentons l'état d'art la conversion électromécanique on cite les différentes machines génératrices utilisées pour exploiter l'énergie éolienne. Puis on a utilisé deux types de charges : une charge alternatif et une charge à courant continu. Puis l'utilisation d'un système de stockage.

Dans le deuxième chapitre on présente la modélisation des différentes parties de l'éolienne; la turbine, le multiplicateur de vitesse, la génératrice et l'électronique de puissance associée, et une batterie de stockage.

Le troisième chapitre sera consacré pour la commande et simulation du système.



# CHAPITRE I

## **I.1- Etat de l'art sur l'éolienne**

### **I.1.1. Introduction**

L'exploitation de l'énergie éolienne pour la génération de l'énergie électrique connaît un grand essor. L'aspect le plus visible de cette évolution est sans conteste, celui de l'utilisation des grandes centrales de production de masse, reliées au réseau, et dont la puissance unitaire ne cesse de croître.

Un autre aspect, moins visible mais qui a tout autant d'importance, est celui des petites unités de production. En effet, ces dernières sont de plus en plus prisées pour des fonctionnements autonomes pour assurer l'alimentation de sites isolés et/ou autonomes.

Dans le cas de l'utilisation en centrales autonomes, différentes machines électriques peuvent assurer la conversion électromécanique en tant que génératrice. [2].

### **I.1.2. Définition d'une éolienne :**

Dispositif destiné à convertir une partie d'une énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Les éoliennes, on peut aussi les appeler les aérogénérateurs sont composées des pales en rotation autour d'un rotor et actionnées par le vent. Elles sont utilisées pour produire de l'électricité et entrent dans la catégorie des énergies renouvelables. [1]

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [2]

- Eolienne de petite puissance inférieur à 40 KW
- Eolienne de moyenne puissance de 40 à quelques centaines de KW
- Eolienne de forte puissance supérieure à 1MW

### **I.1.3 principe de fonctionnement de l'éolienne :**

L'éolienne utilise l'énergie mécanique des vents pour faire tourner un rotor, de la même manière que les moulins anciens. Ce rotor est lui-même relié à un générateur d'électricité, qui produit de l'électricité, qu'il faut ensuite encore réguler pour qu'elle soit utilisable. [3]

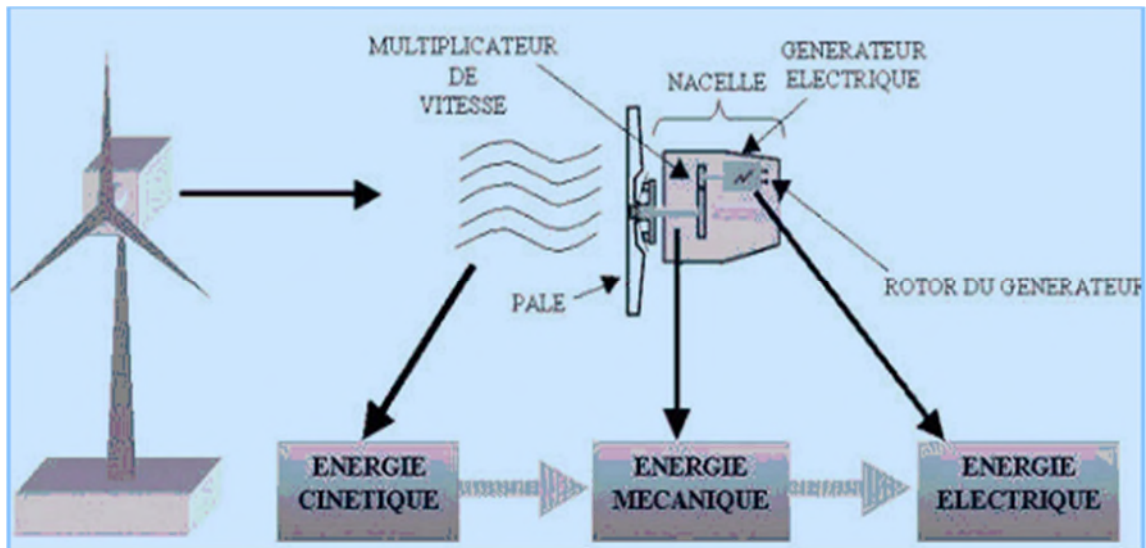


Figure I.1 : fonctionnement d'une éolienne.

#### I.1.4. Différentes type d'éoliennes :

La forme de l'éolienne est tout d'abord conditionné par l'orientation de l'axe de rotation du rotor, la partie de l'éolienne composée des pales qui va donc tourner en présence de vent. L'axe de rotation du rotor peut être soit horizontal, soit vertical.

Ensuite, de nombreuses variantes existent selon la forme des pales. Mais voyons les principales formes utilisées

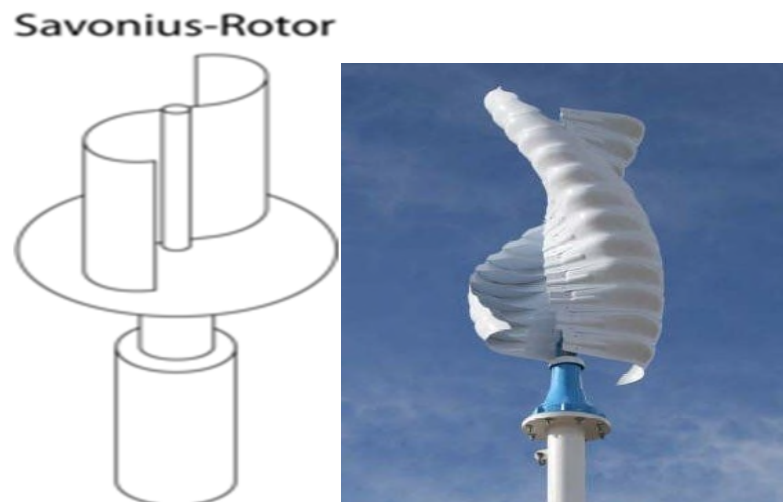
##### I.1.4.1. l'éolienne à axe verticale :

Les éoliennes à axe vertical sont plus onéreuses que les éoliennes à axe horizontal et de conception plus complexes mais s'adaptent plus facilement à des zones de vent irrégulier. Une éolienne à axe vertical est surtout utile dans les endroits où il n'y a pas beaucoup de place : en ville, sur le toit d'un immeuble ou sur le toit d'une maison.

Il existe deux modèles d'éoliennes à axe vertical : **Savonius** et **Darrius**.

##### I.1.4.1.1 Les éoliennes à axe vertical de type Savonius

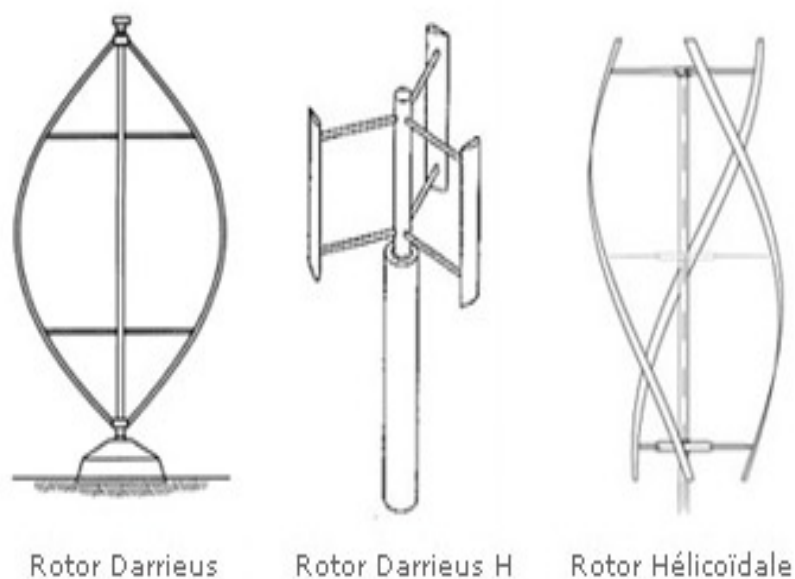
Les éoliennes de type Savonius possèdent un rotor composé de deux demi-cylindres qui tournent sur un même axe. Ces machines ont l'avantage d'être très peu encombrantes et esthétiques et elles peuvent facilement se placer sur le toit d'une maison. Elles démarrent avec une faible vitesse de vent contrairement aux éoliennes de type **Darrius**. Peu bruyantes, elles s'intègrent parfaitement en ville et il n'y a pas de contraintes sur la direction du vent. L'inconvénient est le rendement qui reste malgré tout assez faible la masse car ces machines sont assez lourdes.



**Figure I.2:** éolienne type Savonius

#### **I.1.4.1.2 Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus**

Les éoliennes de type Darrieus peuvent développer une puissance plus grande que les éoliennes Savonius mais sont plus complexes et sophistiquées. Elles sont peu répandues, l'inconvénient majeur étant qu'elles ne peuvent pas démarrer toutes seules. L'éolienne Darrieus porte le nom de son inventeur, Georges Darrieus qui posa le brevet en 1931. Ces éoliennes sont la plupart du temps de puissance moyenne et ne dépasse que très rarement 500kW en raison de sensibilité



**Figure I.3:** éolienne type Darrieus

### I.1.4.2 l'éolienne à axe horizontale :

L'éolienne horizontale est le modèle le plus répandu. Elle capte le vent (de face ou de dos selon le modèle) grâce à des pales assemblées en hélice. Celles-ci tournent autour d'un mât placé horizontalement par rapport au sol.

Le générateur, actionné par la rotation de l'hélice, et situé en haut de l'éolienne. C'est la plus utilisée par les particuliers car son rendement est plus important.



Figure I.4: éolienne à axe horizontale

#### I.1.4.2.1 Les avantages :

- Coût limité.
- Exposées à peu de contraintes mécaniques.
- Grande efficacité.

#### I.1.4.2.2 Les inconvénients :

- Bruit conséquent.
- Vibration non négligeable.
- Grande sensibilité au flux éolien et sa variation.

### I.1.5 Les composantes d'une éolienne :

Les principaux composants de l'éolienne sont : le mat, la pale, la fondation et la nacelle

### I.1.5.1. Le mat ou la tour :

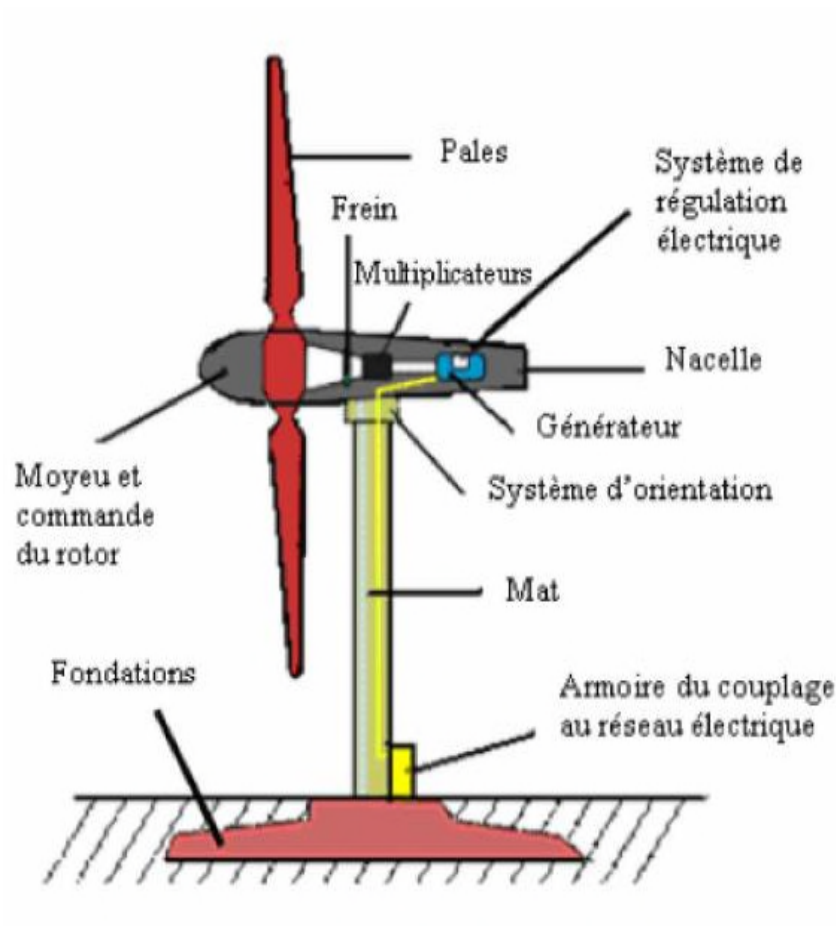
C'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol.

### I.1.5.2. Les pales :

C'est l'outil qui capte l'énergie cinétique du vent pour la transférer au rotor. Il existe différents types d'éolienne selon le nombre de pals (une éolienne mono-pale, bipales et tripale), les éolienne mono-pales et bipales ont une vitesse de rotation plus élevée, mais l'inconvénient réside dans les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor, la plupart des installations éoliennes sont des éoliennes tripales.

### I.1.5.3. La fondation :

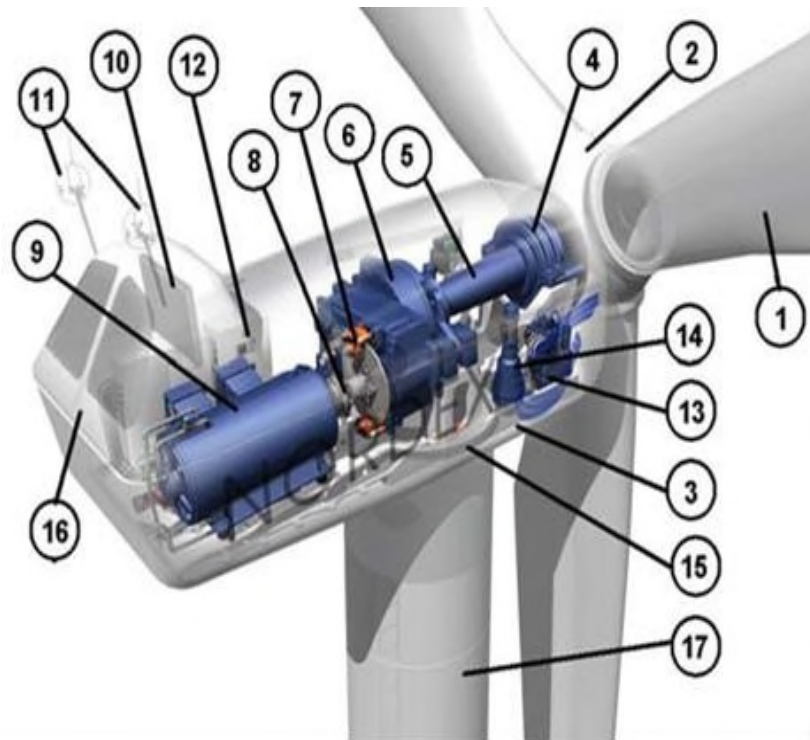
Elle doit être solide pour assurer la résistance de l'ensemble en cas de grand vent ou dans des conditions de givrage.



**Figure I.5:** les composants d'une éolienne [26]

### I.1.5.4. La nacelle :

Elle regroupe les éléments mécaniques qui permettent de coupler la génératrice électrique à l'arbre d'éolienne, la figure suivante présente les composantes de la nacelle



**Figure I.6:** construction de la nacelle [35]

1. pales
2. Moyeu rotor
3. Nacelle
4. Cardan
5. Transmission
6. Multiplicateur de vitesse
7. Frein à disque
8. Accouplage
9. Génératrice
10. Radiateur de refroidissement
11. Centrale de mesure du vent
12. Contrôle
13. Tour
14. Mécanisme d'orientation face au vent
15. Paliers du système
16. Capot
17. Tour

### I.1.6 La production éolienne

Pour pouvoir démarrer, une éolienne nécessite une vitesse de vent minimale d'environ 15 km/h.

Pour des questions de sécurité, l'éolienne s'arrête automatiquement de fonctionner lorsque le vent dépasse 90 km/h.

Le rotor entraîne un axe dans la nacelle, appelé arbre, relié à un alternateur.

Grâce à l'énergie fournie par la rotation de l'axe, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.

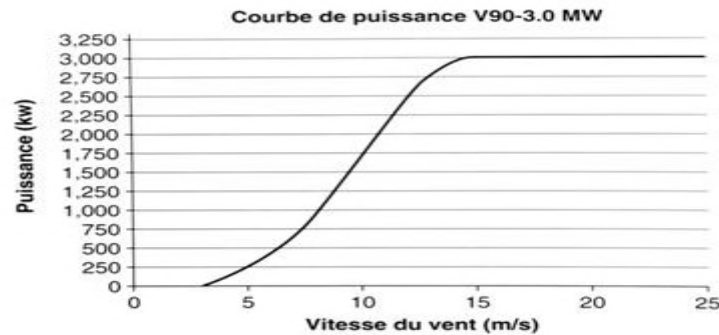
Les éoliennes tournent plus de 80% du temps, à des vitesses variables en fonction de la puissance du vent. Ainsi, un parc éolien de 4 à 6 éoliennes couvre les besoins en électricité de près de 12 000 personnes.

Un transformateur situé à l'intérieur du mât élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne tension du réseau [7].

Les éoliennes professionnelles peuvent fonctionner avec des vents de 5 à 200 km/h. Les éoliennes domestiques, pour leur part, fonctionnent avec des vents de 10 à 90 km/h ; mais il faut avoir des vents généralement supérieurs à 20 km/h pour une production d'énergie éolienne correcte.

L'énergie éolienne dépend de la taille de l'aérogénérateur. Les éoliennes professionnelles peuvent produire entre 5 kW et 5 MW (le plus souvent 1 à 3 MW). Les éoliennes pour particulier ont une puissance 10 fois inférieure : elles génèrent entre 100 W et 20 kW d'électricité (le plus souvent 3 à 5 kW) [8].





**Figure I.7:** la courbe de puissance d'une éolienne de 3 MW

## I.1.7 Notions théoriques sur l'éolien

### I.1.7.1 Loi de Betz

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active  $S$  de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active  $S$  de l'éolienne est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$$

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité.

La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} P_v = 0,59 \cdot P_v$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p = \frac{P_{\max}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\rho \cdot S \cdot v^3} = 0,59$$

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent :

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{eol}}{\rho \cdot S \cdot v^3}$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne une grandeur spécifique est utilisée :

la vitesse réduite , qui est un rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de

la vitesse de vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v}$$

Plusieurs systèmes peuvent être utilisés pour exploiter l'énergie fournie par le vent :

### **I.1.8 Mode d'application de l'énergie éolienne :**

#### **I.1.8.1 Eolienne à vitesse fixe**

Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. En effet, c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, une fiabilité et un coût. Cela permet une installation rapide de centaines de KW de génération éolienne [9]. Ainsi, le couple mécanique entraînant tend à accélérer la génératrice, et le système fonctionne alors en hyper synchronisme. Pour adapter la vitesse de la génératrice à celle du rotor de l'éolienne pour avoir une vitesse de rotation supérieur à celle du synchronisme, il faut ajouter un multiplicateur [10].

#### **I.1.8.2 Eolienne à vitesse variable**

L'éolienne à vitesse variable connectée au réseau est composée d'une turbine, d'un multiplicateur, d'un générateur et d'un convertisseur électronique de puissance destiné à assurer les conditions de couplage au réseau.

##### **I.1.8.2.1 Les avantages**

- Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité ;
- Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses du vent (augmentation du rendement énergétique) ;
- Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique ;
- Elles réduisent le bruit lors du fonctionnement à faible puissance car la vitesse est alors lente ;
- Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire

le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevées. En conséquence, pour de faible vitesse de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe ;

- Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien.

#### **I.1.8.2.2 Les inconvénients**

- Convertisseur de puissance complexe ;
- Gestion du transfert de puissance entre le redresseur MLI et l'onduleur et le placement au point de puissance optimal de l'éolienne ;
- Utilisation des machines spéciales.

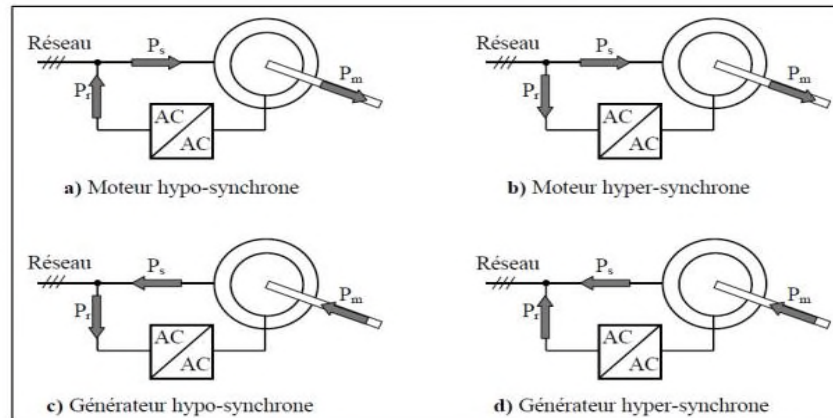
### **I.2. Aéro-générateurs à base de la machine asynchrone à double alimentation**

#### **I.2.1. Description de la machine asynchrone à double alimentation**

La machine asynchrone à double alimentation, est une machine asynchrone à rotor bobiné, avec deux enroulements triphasés accessibles, dans lesquels la puissance peut être fournie ou extraite. Ce type de machine nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'entraînement et de génération de l'énergie électrique à vitesse variable [27].

#### **I.2.2. Modes opérationnels de la MADA**

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet, une machine à cage doit tourner au-dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en mode moteur et au-dessus pour être en mode générateur. Ici, 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 ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement Figure (I.12) [34].



**Figure (I.8) :** Modes et régimes de fonctionnement de la MADA.

#### **a). mode moteur hypo synchrone**

La figure (1.8.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. Ce régime est généralement connu comme mode de récupération d'énergie de glissement [34], [28].

#### **b). mode moteur hyper synchrone**

La figure (1.8.b) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme [34], [28].

#### **c). mode générateur hypo synchrone**

La figure (1.8.c) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme [28], [34].

#### **d). mode générateur hyper synchrone**

La figure (1.8.d) 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 générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme [28], [34].

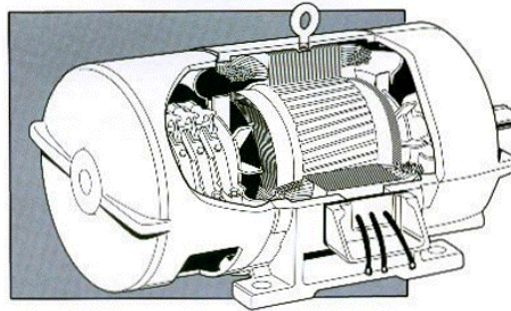
### **I.2.3. Configuration de la MADA**

#### **I.2.3.1. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"**

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et

l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine.

Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur.

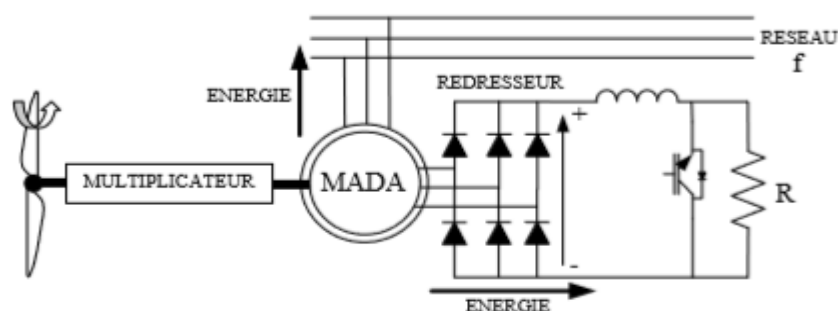


**Figure I.9 :** Machine asynchrone à rotor bobiné (document "Joliet Equipement")

#### I.2.3.1.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la ci-dessous, 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 [15].

Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

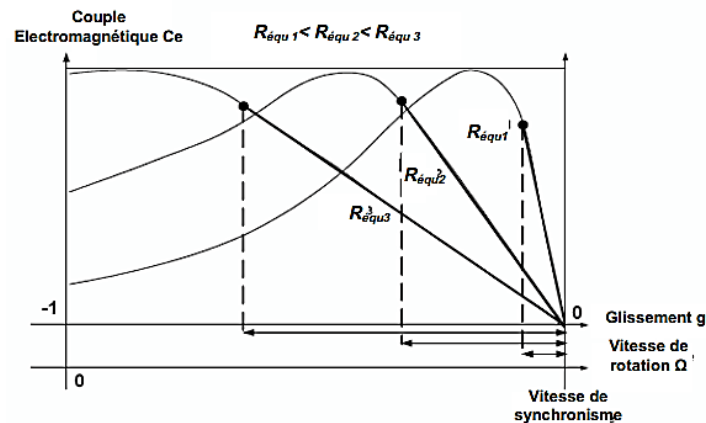


**Figure I.10 :** MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

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. De plus cela augmente la puissance transitant dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.

Le fabricant "VESTAS" dans son dispositif "OPTI-SLIP" a mis en oeuvre ce système en utilisant des composants qui tournent avec le rotor et une transmission optique des signaux de commande.

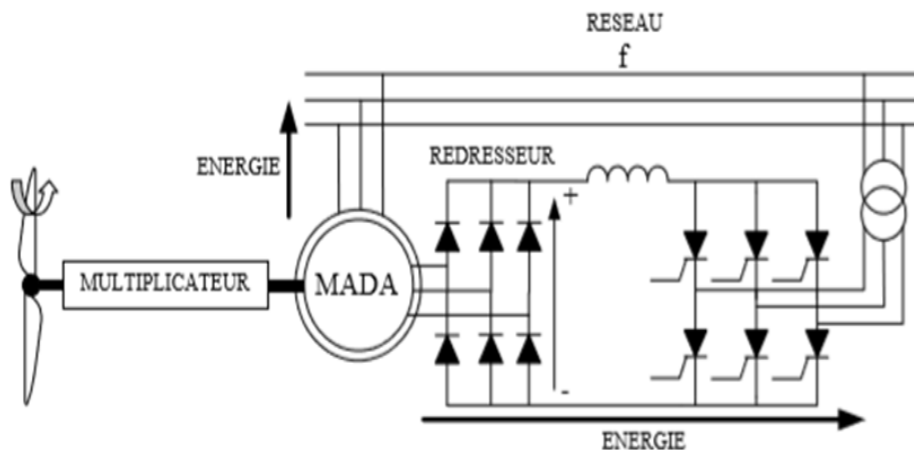
Les contacts glissants sont ainsi évités. La variation maximale du glissement obtenue dans ce procédé est de 10%.



**Figure I.11** : Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

### I.2.3.1.2. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, ci-dessous) [16].



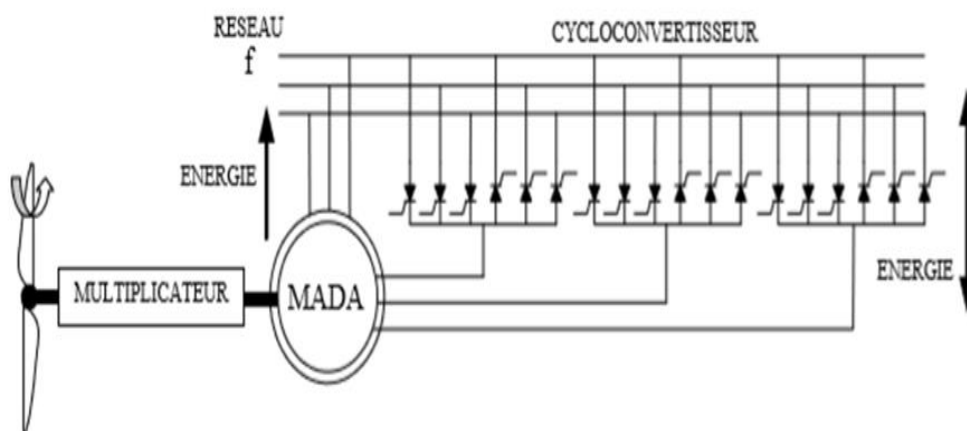
**Figure I.12** :MADA, structure Kramer

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. 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, 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.

#### I.2.3.1.3. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur (ci-dessous), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius [17].

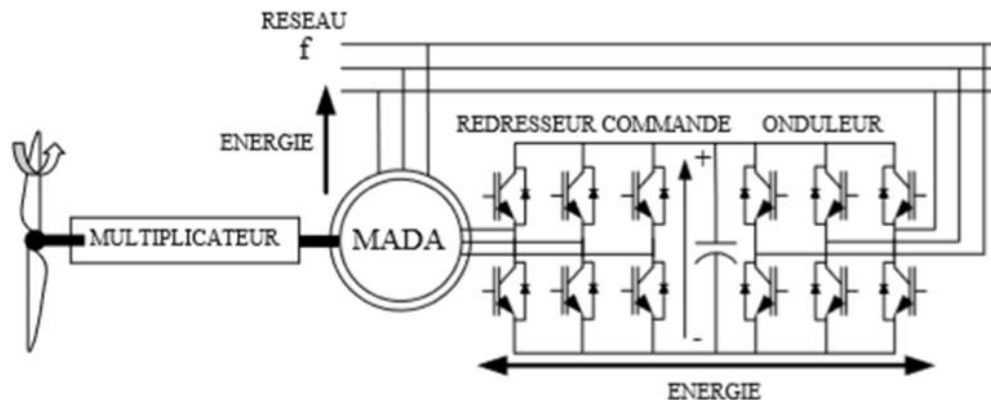


**Figure I.13 :** Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Figure I.12. En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hypo-synchrone) ou négative (fonctionnement hyper-synchrone).

#### I.2.3.1.4. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Cette configuration ci-dessous a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO [18]. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).



**Figure I.14 :** structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

### I.3. Technologies des systèmes de stockage

De nos jours, les technologies les plus émergentes dans les SEH sont les technologies électrochimiques et principalement les systèmes de stockage d'énergie à batterie. En particulier les trois types des batteries : plomb-acide, nickel-cadmium et lithium-ion, en raison de leurs maturités et de leurs faibles coûts. Ils présentent la propriété de pouvoir transformer de l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques en énergie électrique, sans émission de polluants [32].

#### a) Batterie au Plomb-acide (Pb-acide)

Elle présente plusieurs avantages, c'est la moins chère par rapport à d'autres technologies, elle est presque entièrement recyclable (plus de 90%) et leur autodécharge est faible. Cependant, ce genre de batteries sont sensibles aux décharges trop profondes conduisant à une diminution importante de leur durée de vie [32].

#### b) Batterie au lithium-Ion (li-Ion)

Les performances de ce type sont bien meilleures que les autres. Leur autodécharge est très faible (1 % par mois), Mais le coût est beaucoup plus élevé à cause de leur fabrication qui nécessite un investissement bien supérieur que celui des batteries au Plomb. En plus, la batterie lithium contient un pourcentage élevé de métaux lourds et dangereux, en effet leur recyclage est compliqué et n'atteint pas la maturité [32]

#### c) Batterie au nickel-cadmium (Ni-Cd)

Elle est robuste, mais souffre d'un coût élevé, d'une tension de cellule relativement faible, une autodécharge assez rapide (20% par mois). Telle la batterie lithium-Ion, leur recyclage est compliqué à cause du cadmium qui est un métal lourd et polluant [32].

D'après ses trois types de technologies, nous préférons la batterie au plomb. Dans notre travail, nous proposons un système de contrôle de la charge et de la décharge de



batteries, afin de prolonger la durée de vie et éviter la dégradation due aux décharges profondes ou des surcharges.

#### **I.4. la charge :**

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc.

Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système [33].

#### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement.

Les éoliennes à vitesse fixe permettent peu de réglage et fonctionnent comme des générateurs passifs. Les éoliennes à vitesse variables offrent plus de possibilités de réglage. L'éolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation offre des capacités qui pourraient lui permettre de participer aux réglages du réseau avec une commande bien adaptée. Dans notre travail nous allons s'intéresser au fonctionnement autonome de ce type d'éolienne, à base de la MADA.

## CHAPITRE II

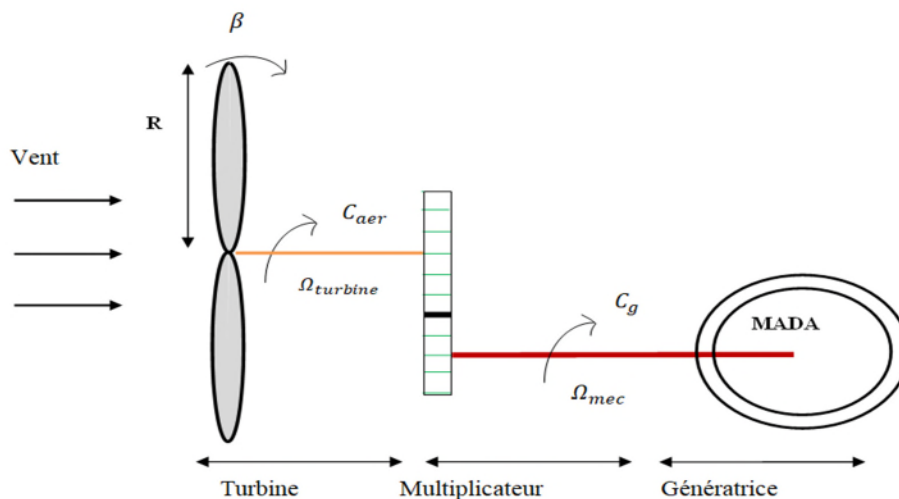
**II.1. INTRUCTION :**

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la Compréhension du système éolien. Dans ce chapitre nous allons procéder a la modélisation des différents constituants de la chaîne de conversion éolienne, composée d'une partie mécanique et d'une autre électrique, notre choix se porte sur une génératrice asynchrone a double alimentation qui a comme rôle de convertisseur électromécanique débitant sur une charge et une batterie par le billet d'une interface d'électronique de puissance.

La modélisation des différents éléments constituant mis en jeu dans la chaîne, a pour but de simuler le comportement du système global.

**II.2. Modélisation de la turbine éolienne :**

Considérons une turbine éolienne à trois pâles orientables fixées sur un arbre de la turbine, formant un bloc mécanique capable de tourner, grâce à l'énergie du vent. Ceci permet de déduire que chaque partie de cet ensemble subit trois contraintes : l'inertie, le frottement et la contrainte élastique. De manière générale, l'arbre de la turbine entraine la génératrice à travers un multiplicateur de vitesse. [34]



**Figure II.1 :** Schéma de la turbine éolienne [34].

**II.2.1. Modélisation de la turbine :**

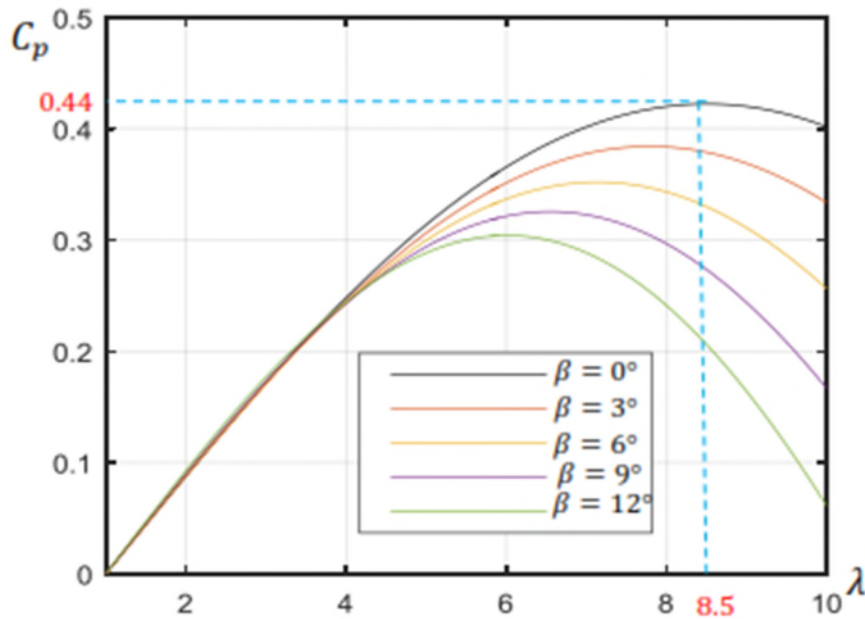
La puissance éolienne du vent est exprimée par la relation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 \tag{II.01}$$

La puissance mécanique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'écrit par :

$$P_t = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_v \quad (\text{II.02})$$

$C_p$  : Le coefficient de puissance représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure II.2 représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse et de l'angle de l'orientation des pales.



**Figure II.2 :** coefficient de puissance  $C_p$  en fonction  $\lambda$  de pour différents  $\beta$  [30].

Le rapport de vitesse en bout des pâles est donné par :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V} \quad (\text{III.03})$$

La couple de la turbine éolienne est donnée par :  $C_p \text{ max}$

$$C = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_p(\lambda, \beta) \rho S V^3}{\Omega_t} \quad (\text{II.04})$$

### II.2.2. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur de gain  $G$  représentée par la (figure II.3) permet d'adapter les grandeurs mécaniques (vitesses et couples) de la turbine et la génératrice.

Il est modélisé par les deux équations suivantes :

$$C_{méc} = \frac{C_t}{G} \quad (II.05)$$

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_t \quad (II.06)$$

Avec :

$C_{méc}$ ,  $\Omega_{mec}$ : Le couple et la vitesse d'entraînement de la GADA respectivement ;

$C_t$ ,  $\Omega_t$  : Le couple et la vitesse, développées par la turbine éolienne respectivement ;

$G$  : Le gain de multiplicateur de vitesse.

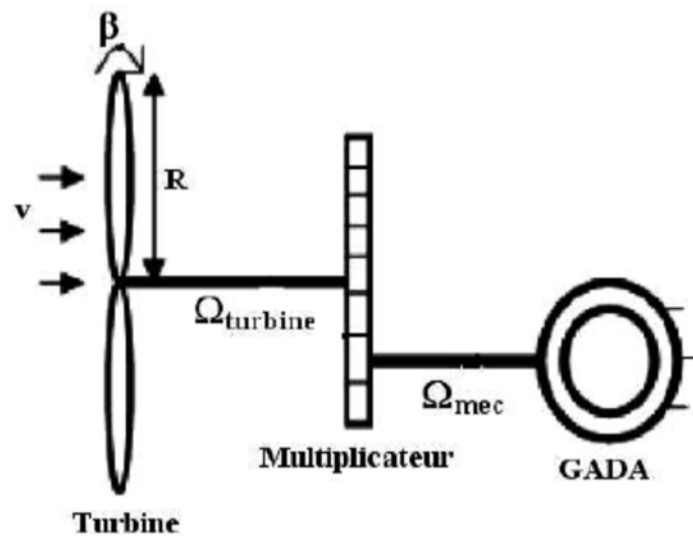


Figure II.3 : Modèle mécanique simplifié du multiplicateur [36].

### II.2.3. Equation dynamique de l'arbre de la génératrice :

En ramenant les paramètres mécaniques de la turbine à l'arbre de la génératrice, on obtient le modèle défini par la relation suivante :

$$C_{méc} - C_{em} = f \cdot \Omega_{mec} + J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \quad (II.07)$$

$J$  : l'inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine ( $kg \cdot m^2$ )

$f$  : coefficient de frottement ( $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ ).

On déduit le modèle de la turbine éolienne représenté sur la figure suivante :

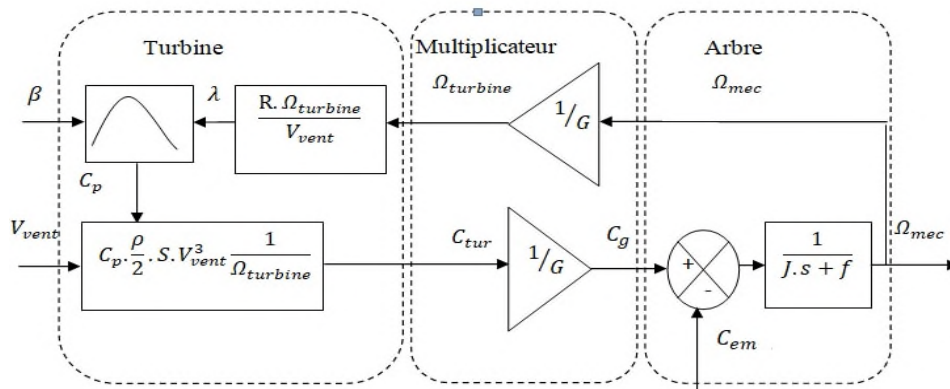


Figure II.4 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.

## II.2.4. Stratégies de commande de la turbine éolienne

### II.2.4.1. Extraction du maximum de puissance (MPPT)

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

Dans cette partie, nous présentons une stratégie pour contrôler le couple électromagnétique et indirectement la puissance électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance générée. On distingue deux familles de structure de commande :

- Stratégie de commande avec asservissement de vitesse mécanique.
- Stratégie de commande sans asservissement de vitesse mécanique.

La plupart des éoliennes sont contrôlées par la seconde stratégie, car en pratique la mesure de la vitesse de vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui erroné la mesure de la vitesse du vent.
- Le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70 m pour une éolienne de 1.5 MW), une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure local de vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

De ce fait, nous nous limitons ici uniquement à la stratégie de commande sans asservissement de vitesse. Cette stratégie de commande repose sur l'hypothèse que la

vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine [37]:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.08)$$

Le couple électromagnétique de référence (réglage) est déterminé à partir d'une estimation du couple aérodynamique :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-est}}{G} \quad (II.09)$$

Le couple aérodynamique peut être déterminé partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique :

$$C_{turbine-est} = C_{p-max} \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-est}} V_{vent-est}^3 \quad (II.10)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine  $\Omega_{turbine-est}$  est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{turbine-est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.11)$$

La mesure de la vitesse de vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation :

$$V_{vent-est} = \frac{\Omega_{turbine-est}}{\lambda_{opt}} \quad (II.12)$$

En regroupant ces quatre équations, on obtient une relation globale de contrôle :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (II.13)$$

L'expression du couple de référence est alors proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice.

Avec :

$$C_{em-ref} = A \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (II.14)$$

$$A = \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2G^3} \tag{II.15}$$

Le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de vitesses est le suivant :

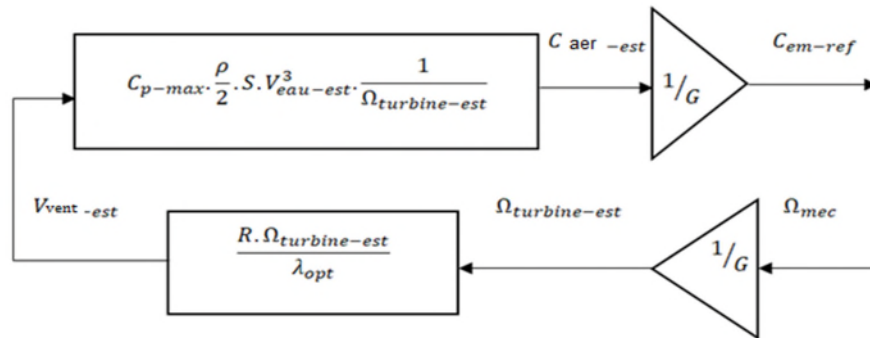


Figure II. 5: Schéma bloc de maximisation de la puissance extraite

### II.2.4.2. Schéma bloc de la turbine en MPPT

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine avec MPPT se déduit à partir des équations précédentes, qui sont représentées sur la figure (II.7)

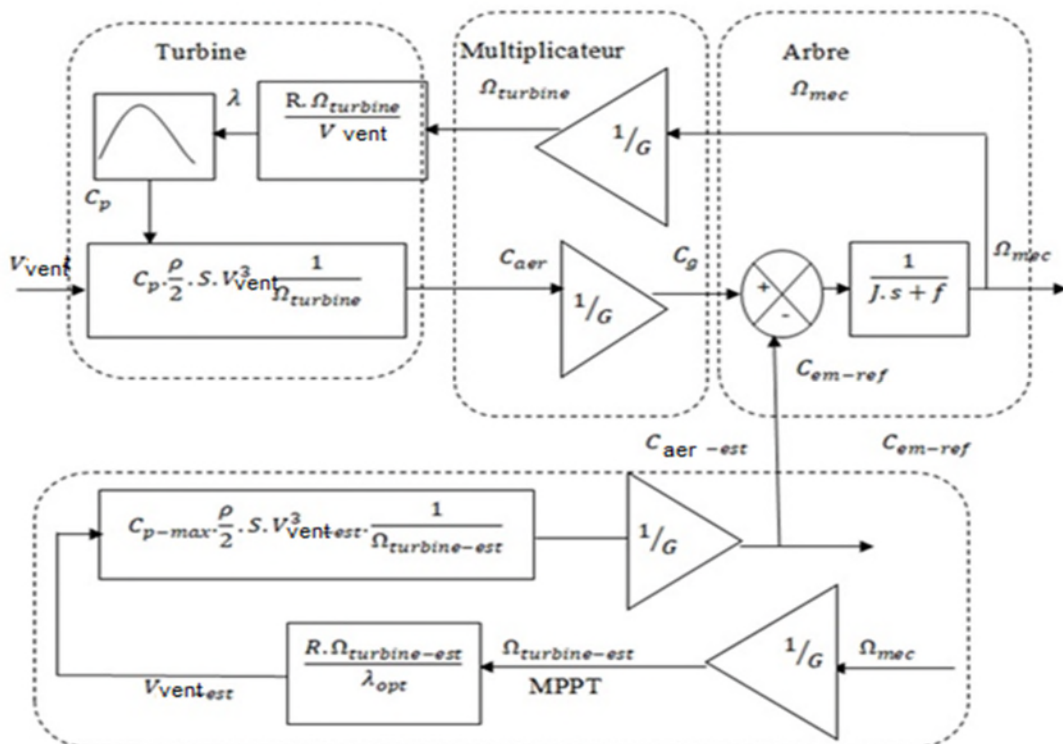
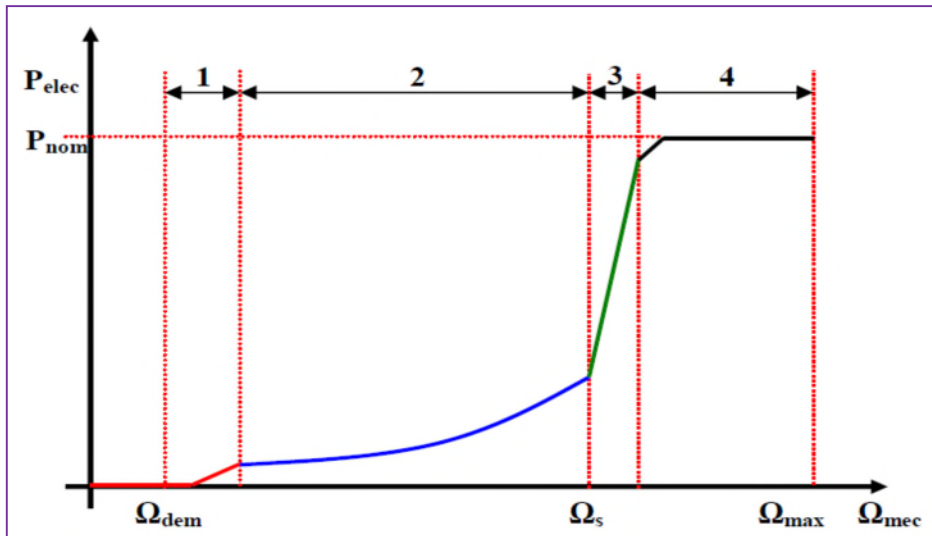


Figure II.6 : Schéma bloc fonctionnel de la turbine avec MPPT



**II.2.4.3. Différentes phases de fonctionnement**



**Figure II. 7:** Les quatre zones de fonctionnement de la turbine

Il y a quatre phases (zones) de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

**a- La phase de démarrage**

La production électrique commence lorsque la vitesse mécanique atteint environ 70% de la vitesse de synchronisme de la génératrice, la puissance électrique reste assez faible.

**b- La phase d'extraction de la puissance maximale (phase M.P.P.T)**

Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale de la génératrice. La puissance électrique augmente rapidement. Dans cette zone, l'angle de calage des pales  $\beta$  est maintenu constant à sa valeur nominale afin d'obtenir un  $C_p$  maximal. La puissance maximale est ainsi obtenue pour chaque valeur de vitesse mécanique et pour des vitesses de vent moyennes.

**c- Phase à vitesse mécanique quasi constante**

L'angle de calage des pales  $\beta$  varie afin d'obtenir une puissance électrique maximale pour différentes valeurs de vent, C'est le pitch control La puissance électrique augmente jusqu'à sa vitesse nominale.

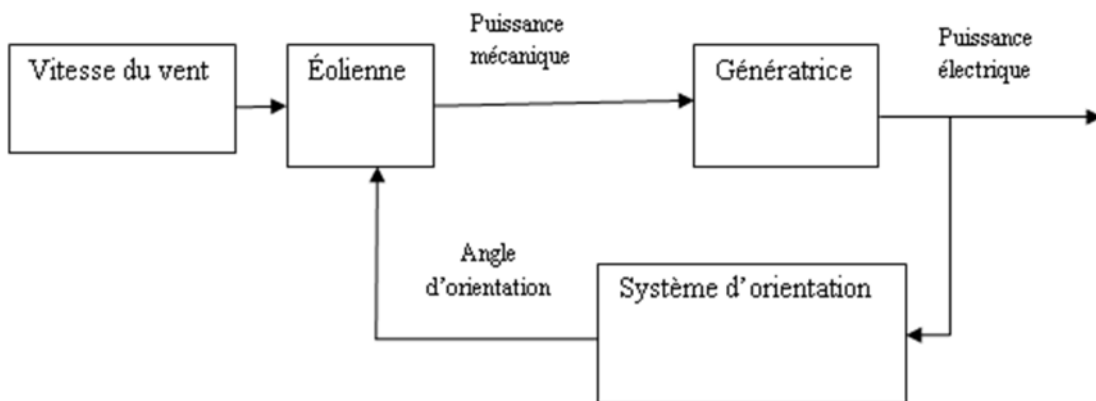
**d- Phase à puissance constante**

Le système d'orientation des pâles à une dynamique mécanique bien plus lente que la dynamique électrique de la génératrice. Ainsi une lenteur de la régulation de l'angle de calage peut entraîner un dépassement de la vitesse de rotation limite lors d'une rafale de vent se produisant pendant un fonctionnement en zone III. Il est dans ce cas intéressant de concevoir une procédure permettant d'anticiper l'action du dispositif d'orientation en réglant le couple électromagnétique de manière à contrôler la vitesse de rotation

**II.2.5. Système d'orientation des pales**

Les éoliennes à vitesse variable utilisent un système d'orientation des pales. Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé 'pitch control'. En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine et plus exactement le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses, puis pour les fortes vitesses de vent s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance. Elles atteignent la position en drapeau à vitesse maximale.

Afin d'obtenir un système de conversion d'énergie le plus efficace possible, l'angle de calage des pales  $\beta$  est adapté en permanence afin de maximiser le rendement de l'hélice.



**Figure .II. 8:** Schéma bloc de système d'orientation des pales

Dans notre travail, nous nous limitons à phase d'extraction de la puissance maximale, donc on maintient l'angle de calage à sa valeur minimale  $\beta=0$  afin d'obtenir un  $C_p$  maximal.

### II.3. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) :

#### II.3.1. Hypothèses simplificatrices:

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certains nombres d'hypothèses simplificatrices, à savoir [30]:

- 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.3.2. Modèle et identification des paramètres de la MADA :

Sois la représentation schématique de la MADA donné par la figure II.10.

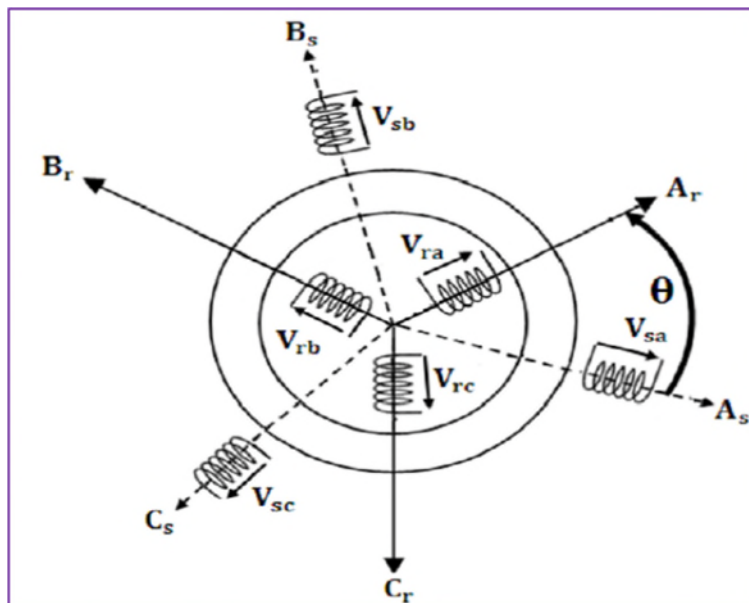


Figure II.9 : Représentation schématique de la MADA [30]

### II.3.2.1. Equations électriques

La loi de Faraday et la loi d'Ohm permettent de relier les tensions sur les enroulements aux flux totalisés et aux courants dans ces bobinages. Avec les conventions utilisées, les deux équations matricielles suivantes expriment les tensions sur les différents axes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \quad (\text{II.16})$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \quad (\text{II.17})$$

Avec:

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} ; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} ; \quad [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} ; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} ; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} ; \quad [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} ; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

### II.3.2.2. Equation magnétique :

Les équations magnétiques sont données par les expressions suivantes :

$$[\phi_s] = [L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \quad (\text{II.18})$$

$$[\phi_r] = [L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s] \quad (\text{II.19})$$

En remplaçant II.11 et II.12 dans II.9, on obtient le système d'équation électrique de la machine asynchrone à double alimentation dans le domaine de Laplace.

$$[VS] = [R_s][i_s] + p([L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r]) \quad (\text{II.20})$$

$$[Vr] = [R_r][i_r] + p([L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s]) \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix} ; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} I_r & M_r & M_r \\ M_r & I_r & M_r \\ M_r & M_r & I_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{rs}] = M_{\max} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Où  $M_{\max}$  représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque leurs axes magnétique sont confondus

### II.3.2.3. L'équation mécanique :

L'équation mécanique de la machine est donnée suit :

$$C_{em} = C_r + f_r \cdot \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.23})$$

L'expression de couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p[is]t \frac{d}{d\theta} [[M_{sr}] \cdot [ir]] \quad (\text{II.24})$$

Avec : p le nombre paire de pôles de la MADA.

### II.3.3. Changement de repère :

Le but du changement de repère est de rendre l'écriture des équations électriques et mécaniques plus simple à exploiter. Dans notre cas nous avons utilisé la transformation de Park.

### II.3.4. La transformation de Park.

Vu que La MADA est une machine fortement couplée avec ses interactions électromagnétiques entre les deux armatures statorique et rotorique, sa représentation dans le système triphasé s'avère complexe, d'où la nécessité de faire appel à un modèle précis et simple qui est le modèle diphasé (d,q) donné par la transformation de Park. Cette transformation définie par la matrice de rotation  $[P(\theta)]$ , permet de ramener les variables du repère triphasé naturel (a,b,c) sur les axes d'un repère fictif diphasé tournant (d,q,o). Le produit matriciel définissant la transformation de Park est exprimé par : [38]

$$[X_{dqo}] = [p(\theta)][X_{abc}]$$

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

### II.3.5. Application de la transformation de Park à la MADA :

Pour chaque vecteur défini précédemment (tension, courant, flux), on va faire un changement de repère de Park aussi bien au stator qu'au rotor, en remplaçant dans la matrice de Park  $\theta$  par  $(\theta_s = \theta_e)$  pour les équations du stator, et par  $\theta_r$  pour celles du rotor, on obtient :

❖ Pour le stator :

$$[idqo]_s = [p(\theta_s)].[is] ; [is] = [p(\theta_s)]^{-1}.[idqo]_s \quad (\text{II.26})$$

$$[Vdqo]_s = [p(\theta_s)].[Vs]; [Vs] = [p(\theta_s)]^{-1}.[Vdqo]_s \quad (\text{II.27})$$

$$[\varphi dqo]_s = [p(\theta_s)].[\varphi_s] : [\varphi_s] = [p(\theta_s)]^{-1}.[\varphi dqo]_s \quad (\text{II.28})$$

❖ Pour le rotor :

$$[idqo]_r = [p(\theta_r)].[ir] ; [ir] = [p(\theta_r)]^{-1}.[idqo]_r \quad (\text{II.29})$$

$$[Vdqo]_r = [p(\theta_r)].[Vr] ; [Vr] = [p(\theta_r)]^{-1}.[Vdqo]_r \quad (\text{II.30})$$

$$[\varphi dqo]_r = [p(\theta_r)].[\varphi_r] : [\varphi_r] = [p(\theta_r)]^{-1}.[\varphi dqo]_r \quad (\text{II.31})$$

En appliquant cette transformation on obtient :

➤ Les expressions des tensions :

• pour le stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

• pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Car on a ( $\omega_r = \omega_s - \omega$ ), avec:  $\omega_s = \left(\frac{d\theta_s}{dt}\right)$ ,  $\omega = \left(\frac{d\theta}{dt}\right)$

Avec respectivement :

$V_{ds}$ ,  $V_{qs}$ ,  $V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont les tensions statoriques et rotoriques directe et en quadrature du système diphasé ;

$\omega_s$  et  $\omega_r$  sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques.

➤ Les expressions des flux totalisés sont :

○ Pour le stator

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

○ Pour le rotor

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$L_s = L_s - M_s$  : inductance cyclique propre du stator.

$L_r = L_r - M_r$  : inductance cyclique propre du rotor.

$M = \frac{3}{2} M_{max}$  : inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

➤ L'équation de couple électromagnétique :

Pour le couple électromagnétique, son expression générale est donnée par :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\varphi_{qs} i_{dr} - \varphi_{ds} i_{qr}) \quad (\text{II.36})$$

➤ Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

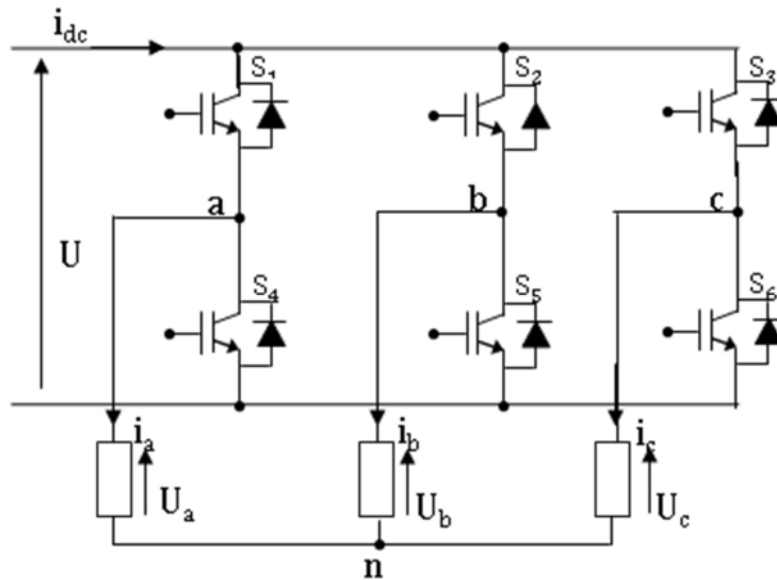
$$\begin{cases} P = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \\ Q = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

**II.4. Modélisation de convertisseur MLI:**

Afin de générer un courant sur la charge alternatif on est appelé à utiliser un onduleur, qui est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source à tension continue en une énergie à tension alternative. Une structure intéressante est celle avec convertisseur MLI, qui consiste en l'utilisation de deux ponts triphasés d'IGBT commandables par la modulation de largeur d'impulsions. Pour simplifier l'étude vous supposons que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

Un onduleur de tension est donné par la figure II-10



**Figure II.10:** Schéma d'un onduleur de tension triphasé [26]

Les tensions composée sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = U_{an} - U_{no} \\ U_{bc} = U_{bn} - U_{no} \\ U_{ca} = U_{cn} - U_{no} \end{cases} \quad (II.38)$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :



$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nn0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nn0} = V_{cn0} \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn0} = \frac{1}{3}[V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (\text{II.41})$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits  $\Leftrightarrow$  Si (i=a, b, c), on a :

$$V_{in0} = S_i \cdot U_{dc} - \frac{U_{dc}}{2} = (S_i - 0.5)U_{dc} \quad (\text{II.42})$$

On trouve donc :

$$\begin{cases} V_{an0} = (S_a - 0.5)U_{dc} \\ V_{bn0} = (S_b - 0.5)U_{dc} \\ V_{cn0} = (S_c - 0.5)U_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

En remplaçant dans les équations précédentes, on obtient

$$\begin{aligned} V_{an} &= \frac{2}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{bn} &= \frac{1}{3}V_{an0} + \frac{2}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{cn} &= \frac{1}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} + \frac{2}{3}V_{cn0} \end{aligned} \quad (\text{II.44})$$

En remplace dans les équations précédentes, on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.45})$$

Afin de générer un courant sur la charge continu on est appelé à utiliser un redresseur, qui est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source à tension alternative en une énergie à tension continu.

$$I_{dc} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c$$

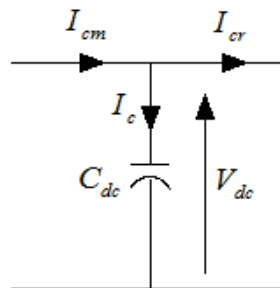
$V_{dc}$  : Tension redressée.

$I_{dc}$  : Courant redressé.

$S_a, S_b, S_c$  : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

### II.5. Modélisation du bus continu

Le bus continu est un élément de stockage d'énergie, représenté par une capacité qui sert de source tampon d'énergie entre le convertisseur coté machine et le convertisseur coté charge. Il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit.



**Figure II.11:** schéma simple du circuit du bus continu

Le condensateur du bus continu est modélisé par :

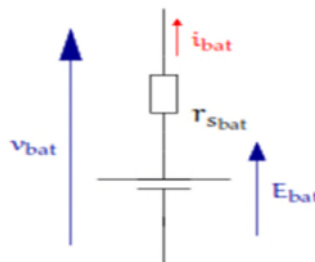
$$\frac{d}{dt} v_{dc} = \frac{1}{C} i_c$$

Le courant de condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur :

$$I_c = I_{cm} - I_{cr}$$

### II.6. Modélisation du système de stockage [40].

Dans cette étude, nous avons adopté un modèle de batterie construit par une source de tension contrôlée en série avec une résistance constante ( $R_{batt}$ ). Comme illustré à la figure 2.13.



**Figure II.12:** Circuit électrique équivalent du modèle simple de la batterie [39].

La tension de la batterie ( $V_{batt}$ ) est donnée par la relation :

$$V_{batt} = E - R_{batt} \cdot I_{batt}$$

Où :  $I_{batt}$  : est le courant de la batterie.

$R_{batt}$  : est la résistance interne.

$E$  : est la tension de circuit ouvert de la batterie.

Afin d'éviter la dégradation de la batterie et prolonger sa durée de vie, leur état de charge doit être maintenu dans un certain intervalle défini comme suit:

$$SOC_{min}(t) \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$$

Où :  $SOC_{max}$  : Etat de charge maximale de la batterie.

$SOC_{min}$  : Etat de charge minimale de la batterie.

L'état de Charge ( $SOC$ ) de la batterie est exprimée par :

$$SOC(t) = 100 \cdot \left(1 - \frac{1}{Q} \int Idt\right)$$

Avec :  $Q$  est capacité nominale de la batterie.

### II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation en mode générateur, en se basant sur quelques hypothèses simplificatrices.

La modélisation d'un système éolien, un système de stockage (batterie) et des convertisseurs pour adapter les sources avec la charge continue et alternative. Tous ces éléments sont reliés à travers un bus continu.

## CHAPITRE III

### III.1 Commande et la simulation du système :

#### III.2 Introduction

Dans ce chapitre, on propose une commande et simulation de la MADA en tant que génératrice à vitesse variable pour application à la production éolienne. Avec la MADA est entièrement interfacée avec la charge et le stockage, les deux armatures, stator et rotor, sont alimentés par deux convertisseurs de tension indépendants reliés a un même bus de tension continu.

En site isolé, le système de production doit réaliser deux objectifs : premièrement, assurer l'autonomie énergétique du site, par la maximisation de la puissance récupérée par la source, et deuxièmement, la rentabilité économique et écologique, en récupérant certes le plus possible d'énergie à un moment donné, mais aussi en maximisant la durée de vie des composants du système.

#### III.3 Commande vectorielle

L'idée fondamentale de cette méthode de commande est la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux dans la machine ( $d, q$ ), afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique nécessaire. De plus, pour une même puissance étant donné que le moment d'inertie d'une machine asynchrone est plus faible que celui d'une machine à courant continu ou une machine synchrone. Cependant, l'implantation de cette structure de commande est très difficile car souvent des schémas de commande très complexes sont employés. La transformation des cordonnées en temps réel. L'estimation du glissement et de la position du flux rotorique constituent des étapes importantes à considérer lors de l'implantation de la loi de commande vectorielle.

Des nombreuses variétés de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer : [43].

#### Suivant la source d'énergie :

- Commande en tension
- Commande en courant

**Suivant l'orientation de repère :**

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

**Suivant la détermination de la position de flux :**

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement

**III.4 La machine commandée par le stator et le rotor :**

Dans cette configuration le stator et le rotor sont alimentés par deux convertisseurs indépendants. Avec cette solution, il est possible et recommandée de partager la puissance électrique fournie entre les deux armatures de la machine. Le couple et le flux de la machine sont contrôlés par l'intermédiaire de quatre boucles de courant [44][45].

En se basant sur le modèle dynamique de la machine dans le repère tournant à la vitesse du champ tournant statorique, les expressions des tensions du stator et du rotor s'écrivent

$$Vsd = (Rs + \sigma.Ls.s).ids - Rr.\frac{Lm}{Lr}.idr - ws.\varphi qs + wr.\frac{Lm}{Lr}.\varphi qr + \frac{Lm}{Lr}.vrd$$

$$Vsqs = (Rs + \sigma.Ls.s).iqs - Rr.\frac{Lm}{Lr}.iqr + ws.\varphi dr - wr.\frac{Lm}{Lr}.\varphi dr + \frac{Lm}{Lr}.vrq$$

$$Vrd = (Rr + \sigma.Lr.s).idr - Rs.\frac{Lm}{Ls}.ids - wr.\varphi qr + ws.\frac{Lm}{Ls}.\varphi qs + \frac{Lm}{Ls}.vsd$$

$$Vsq = (Rr + \sigma.Lr.s).iqr - Rs.\frac{Lm}{Ls}.iqr + wr.\varphi dr - ws.\frac{Lm}{Ls}.\varphi ds + \frac{Lm}{Ls}.vsq$$

Dans le but d'obtenir un bon découplage entre les grandeurs suivant l'axe d et q nous définissons de nouvelles tensions intermédiaires, tel que :

$$V^*sd = vsd - \frac{Lm}{Lr}.Vrd$$

$$V^*sq = vsq - \frac{Lm}{Lr}.Vrq$$

$$V^*rd = vrd - \frac{Lm}{Ls}.Vsd$$

$$V^*rq = vrq - \frac{Lm}{Ls}.Vsqs$$

Ces expressions particulières nous permettent d'obtenir des relations directes entre les tensions intermédiaires et les courants statoriques et rotoriques dans les deux axes [46][47].

$$V^*_{sq} = (R_s + \sigma.L_s.s) . i_{sq} - R_r . \frac{L_m}{L_r} . i_{dr} - w_s . \varphi_{qs} + w_r . \frac{L_m}{L_r} . \varphi_{qr}$$

$$V^*_{sd} = (R_s + \sigma.L_s.s) . i_{sd} - R_r . \frac{L_m}{L_r} . i_{dq} + w_s . \varphi_{ds} - w_r . \frac{L_m}{L_r} . \varphi_{dr}$$

$$V^*_{rd} = (R_r + \sigma.L_r.s) . i_{rd} - R_s . L_m/L_s . i_{ds} - w_r . \varphi_{qr} + w_s . L_m/L_s . \varphi_{qs}$$

$$V^*_{rq} = (R_r + \sigma.L_r.s) . i_{rq} - R_s . \frac{L_m}{L_s} . i_{dq} + w_r . \varphi_{dr} - w_s . \frac{L_m}{L_s} . \varphi_{ds}$$

Des termes de couplage témoignent de l'interaction entre les axes et les cotés de la machine apparaissent. Afin qu'on puisse définir les fonctions de transfert de chaque grandeur, il est indispensable de procéder à la compensation de ces termes :

$$P1 = -R_r . \frac{L_m}{L_r} . i_{dr} - w_s . \varphi_{qs} + w_r . \frac{L_m}{L_r} . \varphi_{qr}$$

$$P2 = -R_r . \frac{L_m}{L_r} . i_{dq} + w_s . \varphi_{ds} - w_r . \frac{L_m}{L_r} . \varphi_{dr}$$

$$P3 = -R_s . \frac{L_m}{L_s} . i_{ds} - w_r . \varphi_{qr} + w_s . \frac{L_m}{L_s} . \varphi_{qs}$$

$$P4 = -R_s . \frac{L_m}{L_s} . i_{dq} + w_r . \varphi_{dr} - w_s . \frac{L_m}{L_s} . \varphi_{ds}$$

Des fonctions de transfert entre les courants et les tensions d'un même axe au stator ainsi qu'au rotor peuvent être définies. Ces fonctions sont communes de cote de la machine.

$$F_s(s) = \frac{1}{(R_s + \sigma L_s . S)}$$

$$F_r(s) = \frac{1}{(R_r + \sigma L_r . S)}$$

La structure de la régulation des courants dans les deux axes d et q est représenté sur la figure III.1. Dans cette figure, des régulateurs de type PI sont utilisés pour pouvoir imposer les quatre courants à leurs références. Pour le calcul des paramètres des régulateurs la méthode par compensation de pôles, est utilisée.

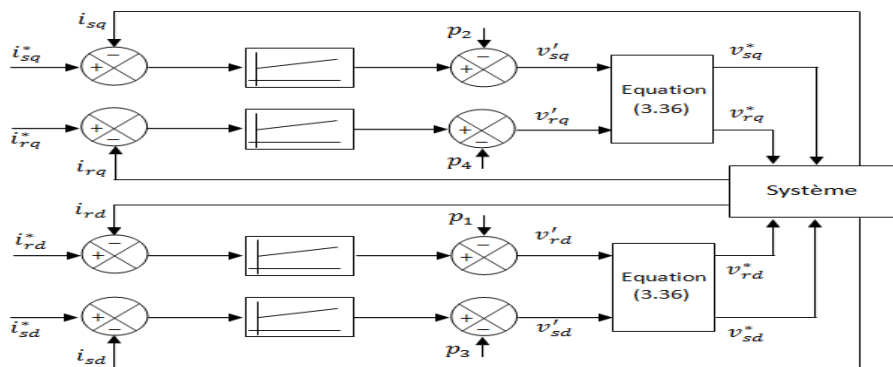


Figure III.1 Boucles de régulation des courants du stator et du rotor [50].

Ce schéma montre l'indépendance qui existe entre les deux axes de commande et mis en évidence le couplage du coté de la machine, stator et rotor, sur un même axe par le biais des tensions intermédiaires croisées [47].

Comme nous avons opté pour une orientation du flux statorique suivant l'axe d du repère tournant, les références des courants en quadrature peuvent être déterminées directement à partir de l'équation du couple électromagnétique et la relation de proportionnalité qui existe entre les deux courants d'axe q.

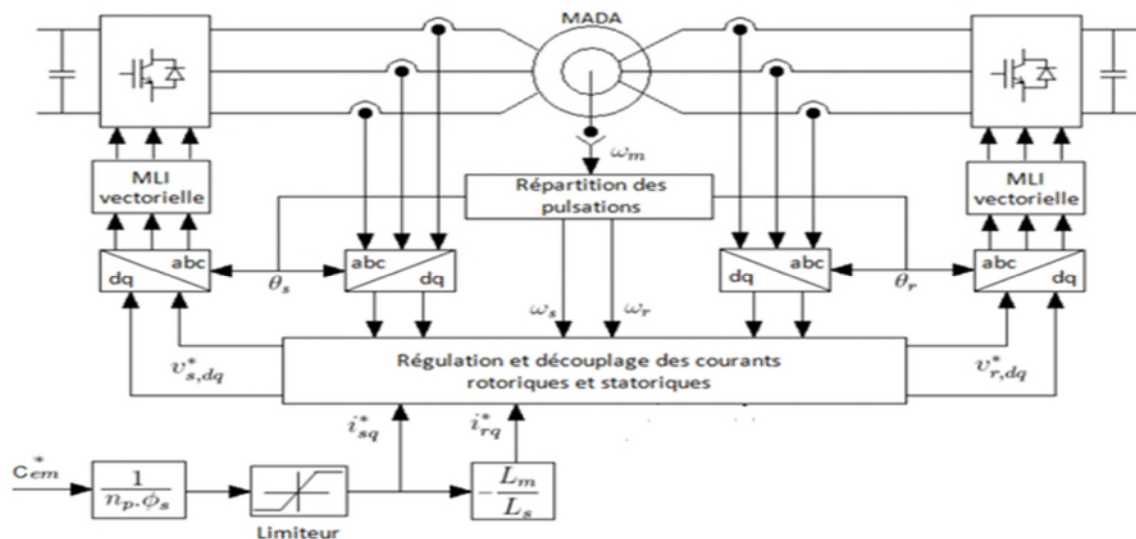
$$i^*_{sq} = \frac{1}{np \cdot \phi_s} \cdot C^*_{em}$$

Concernant la magnétisation de la machine plusieurs choix peuvent être faits. Dans le présent travail, nous souhaitons partager égalité le courant de magnétisation, nécessaire pour imposer le module du flux statorique, entre les deux convertisseurs. Soit :

$$i^*_{sd} = i^*_{rd} = \frac{\phi^*_{s}}{L_s + L_m}$$

Afin d'améliorer les performances de la commande un contrôle en boucle fermée du flux statorique est mis en œuvre. L'ensemble de la chaîne de régulation nous conduit au schéma de commande global développée sur la figure III.2. Les grandeurs mesurables sont respectivement les courants du stator et du rotor et la vitesse mécanique de la machine.

Afin d'améliorer les performances de la commande un control en boucle fermée du flux statorique est mis en œuvre. L'ensemble de la chaîne de régulation nous conduit au schéma de commande global développé sur la figure III.2. Les grandeurs mesurables sont respectivement les courants du stator et du rotor et la vitesse mécanique de la machine.



**Figure III.2** Schéma de commande d'une MADA totalement interfacé [50].



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 égale à -1, donc en négligeant les termes résistifs de la machine :

$$\frac{P_s}{P_r} = \frac{ws}{-wr} = 1 \rightarrow ws = -wr$$

Et d'après la loi d'autopilotage :

$$\Omega r = ws - wr = 2ws = -2wr \quad \text{II.30}$$

La relation (II-30) 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.

### III.5 Synthèse des régulateurs

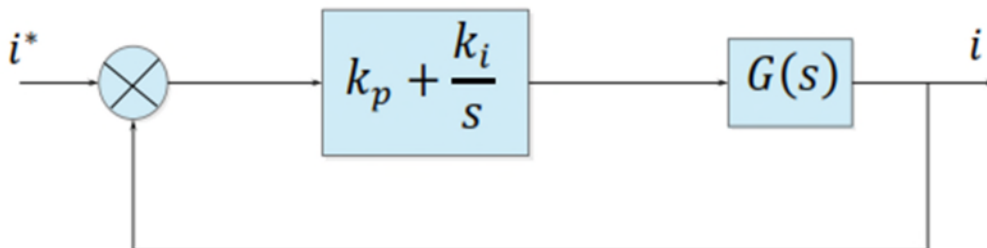
#### III.5.1 La régulation des courant de la MADA

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

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

Où : est le gain statique et 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.



**Figure III.3** boucle de régulation de courant

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit :

$$FBO = \left(kp + \frac{ki}{s}\right) \left(\frac{G}{1+\tau s}\right) \quad \text{(A-2)}$$

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

$$\tau = \frac{kp}{ki} \quad \text{(A-3)}$$

Ainsi :

$$FBO = \frac{Gki}{s} \quad \text{(A-4)}$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$F_{BO} = \frac{Gki}{Gki+s} \quad (A-5)$$

Le temps de repense  $t_r$  du système bouclé pour atteindre 95% de la consigne est donné par :

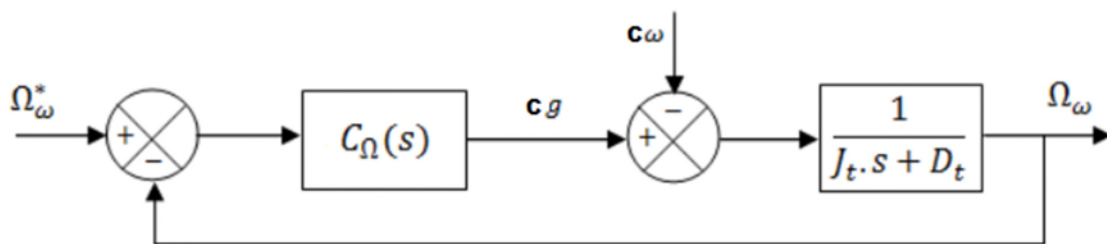
$$T_r = 3. \frac{1}{Gki} \quad (A-6)$$

A partir des expressions (A-3) et (A-6), on déduit les gains de correcteur en fonction des paramètres de la MADA et du temps de repense choisi :

$$K_i = 3. \frac{1}{Gtr}$$

$$K_p = 3. \frac{\tau}{3Gtr}$$

### III.5.2 La régulation de vitesse



**Figure III.4** Boucle d'asservissement de la vitesse de la turbine

Le régulateur mis en œuvre est de type Proportionnel-Intégral (PI), la fonction de transfert classique du régulateur est donnée par l'expression suivante:

$$C_{\Omega}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (A.1)$$

tel que  $K_p$  et  $K_i$  sont respectivement les gains proportionnel et intégral du régulateur PI.

Le couple  $C_{\omega}$  est une fonction non linéaire de  $\Omega_{\omega}$ , la compensation de ce couple permet de linéariser le processus. La synthèse du correcteur se trouve alors simplifiée. Ainsi, la fonction de transfert en boucle fermée s'exprime par :

$$F(s) = \frac{K_p.s + K_i}{J_t.s^2 + (D_t - K_p).s + K_i} \quad (A.2)$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique de deuxième ordre, que nous pouvons identifier à la forme canonique suivante

$$P(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2.\xi.s + \omega_n^2} \quad (A.3)$$

Pour calculer les paramètres du régulateur, on procède à l'identification des dénominateurs des deux fonctions de transfert précédentes. Nous avons donc à résoudre le système d'équations suivant :

$$\frac{1}{\omega n^2} = \frac{Jt}{Ki} \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{2.\xi}{\omega n} = \frac{Dt - Kp}{Ki}$$

Pour un coefficient d'amortissement unitaire  $\xi = 1$ , nous avons :

$$\omega n . tr \approx 4.75$$

Où  $\omega n$  est la pulsation naturelle et  $tr$  est le temps de réponse de vitesse du système.

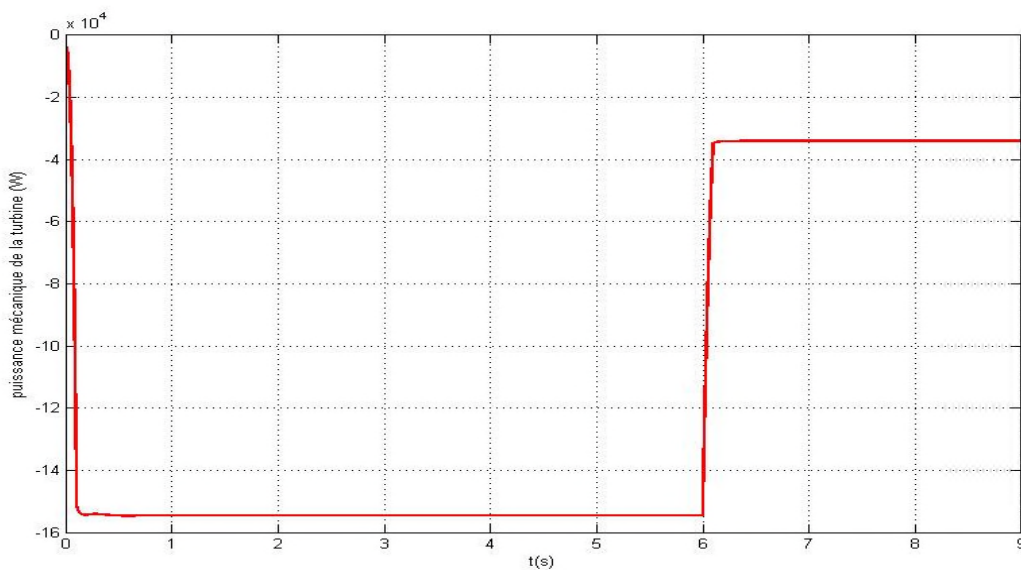
Les paramètres du régulateur PI sont alors les suivants

$$Ki = Jt \left( \frac{4.75}{tr} \right)^2$$

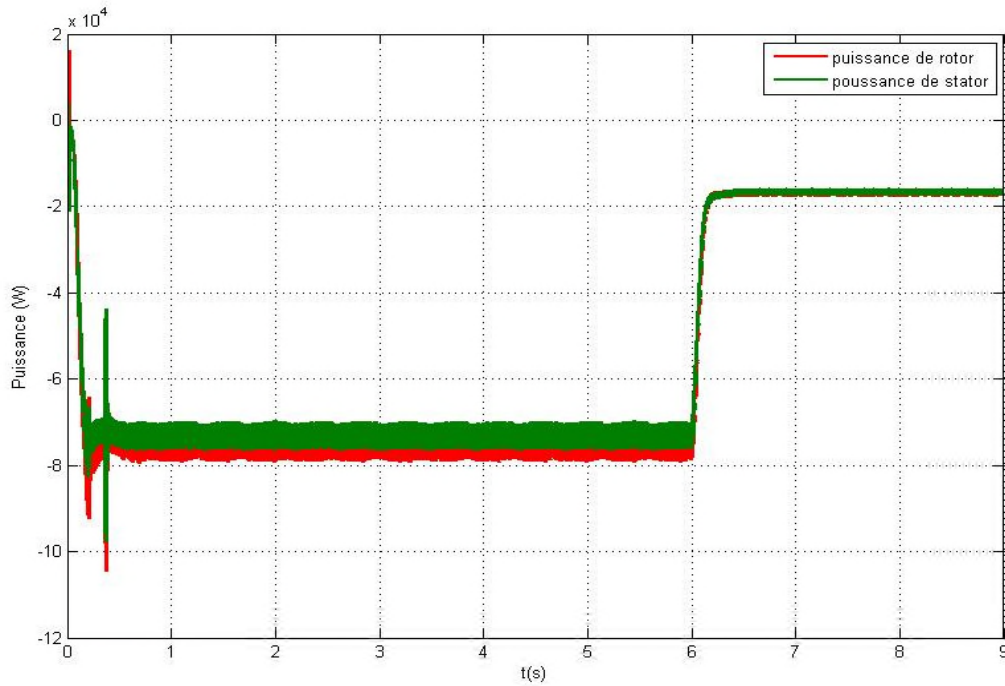
$$Kp = Jt \left( \frac{9.5}{tr} \right) - Dt$$

Le choix de la dynamique de la boucle de vitesse apparaît comme un compromis entre oscillations de la puissance électrique et l'énergie captée par la turbine. Dans le but de régler efficacement la dynamique de la boucle de vitesse, nous avons testé le système pour différentes dynamiques de la boucle. Le principal critère adopté dans notre étude est de s'assurer que la puissance électrique est toujours positive pour le profil de vent considéré.

### III.6 Présentation et interprétation des résultats de simulation

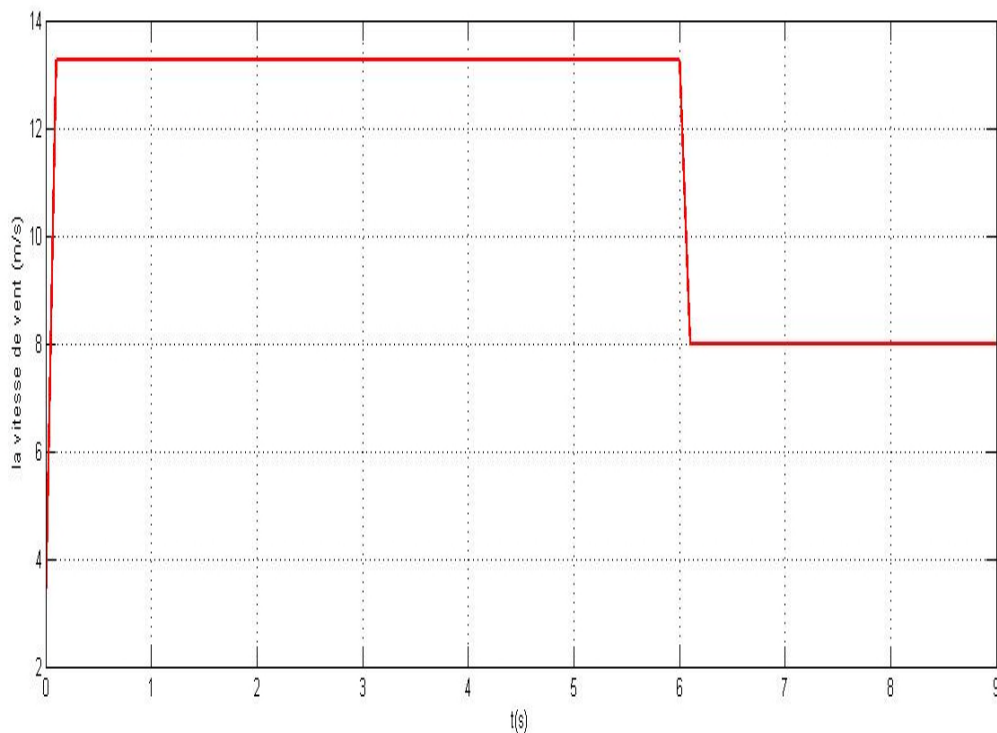


**Figure (III.5)** Allure de la puissance mécanique de la turbine

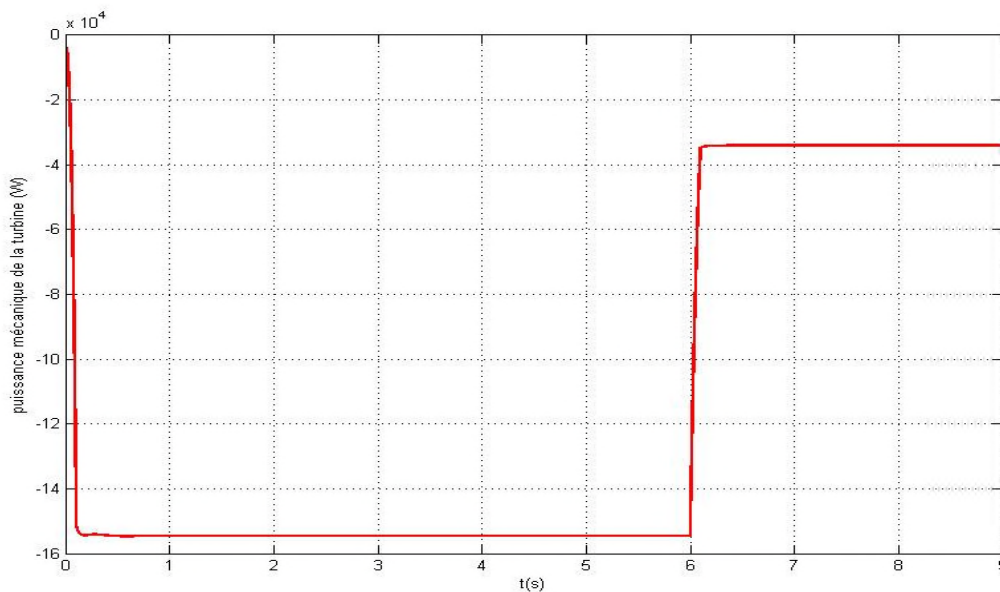


**Figure (III.6)** Allures des puissances de stator, rotor de la GADA

On remarque sur la figure (III-6) que la puissance générée par la GADA égale à la somme des puissances statorique et rotorique. Et la puissance de ce dernier est inférieur à la puissance générée par la turbine figure (III-5), cela est dû aux pertes dans les différents éléments de l'aérogénérateur.



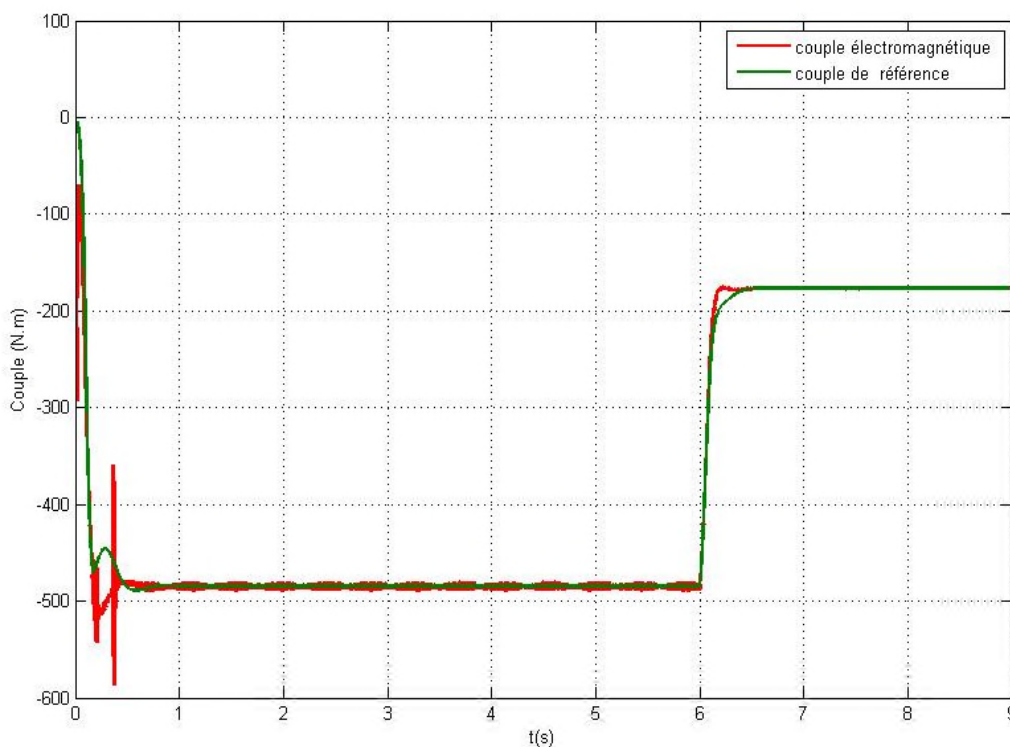
**Figure (III.7)** Allure de la vitesse du vent



**Figure (III.5)** Allure de la puissance mécanique de la turbine

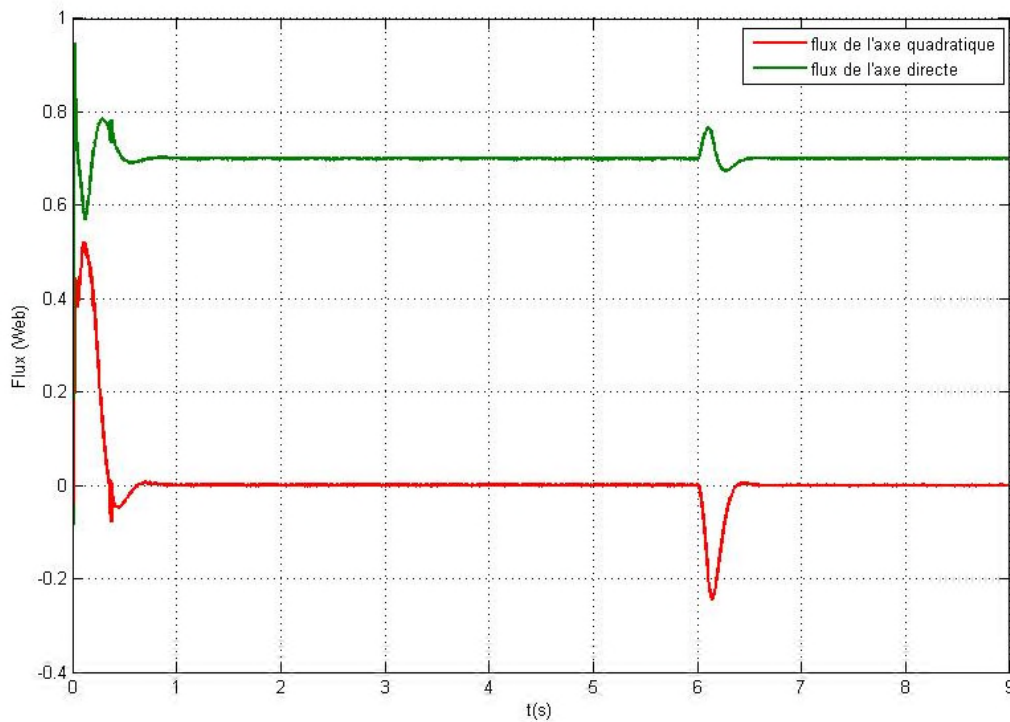
La figure (III.5), représente l'évolution de la puissance mécanique de la turbine. On constate qu'elle est proportionnelle à la vitesse de vent figure (III.7).

Allure de la vitesse du vent



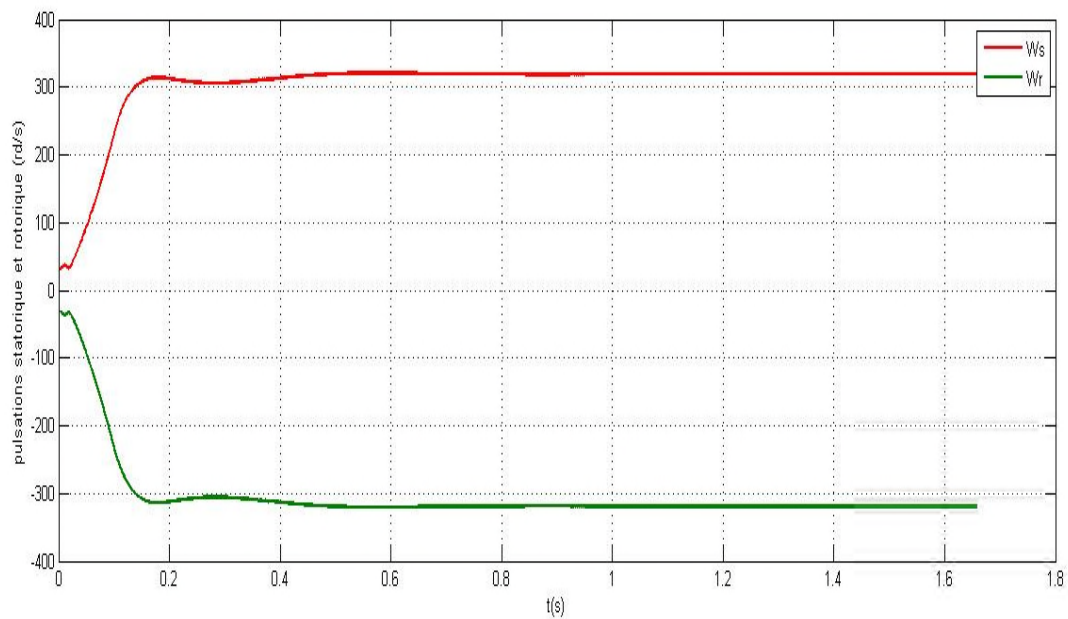
**Figure (III.9)** Allures de couple électromagnétique et couple référence

La figure (III.9), représente le couple électromagnétique de la GADA et il apparaît clairement qu'il suit sa référence issue de l'algorithme MPPT.



**Figure (III.10)** Allures des flux de la GADA

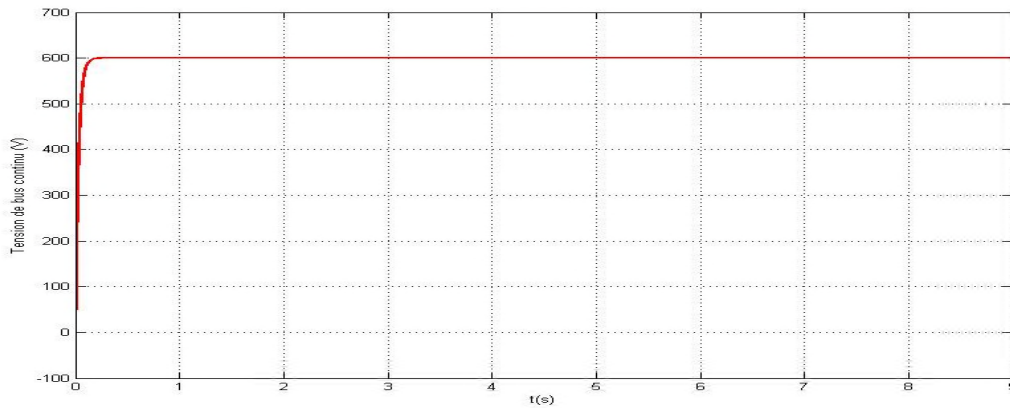
La figure (III.10) représente les allures des flux statorique direct et quadrature. On peut constater que l'orientation du flux selon l'axe direct et le découplage de la machine sont réalisés et cela apparaît clairement sur la valeur de qui est nulle.



**Figure (III-11)** : Allures des pulsations statorique et rotorique

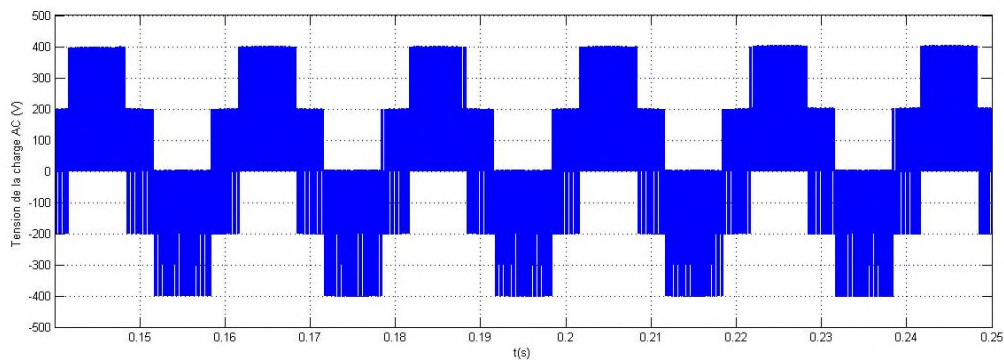
La répartition des pulsations statorique et rotorique figure (III-11), nous a conduit à la répartition des puissances active de la GADA, telles que pour des pulsations statorique et

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.

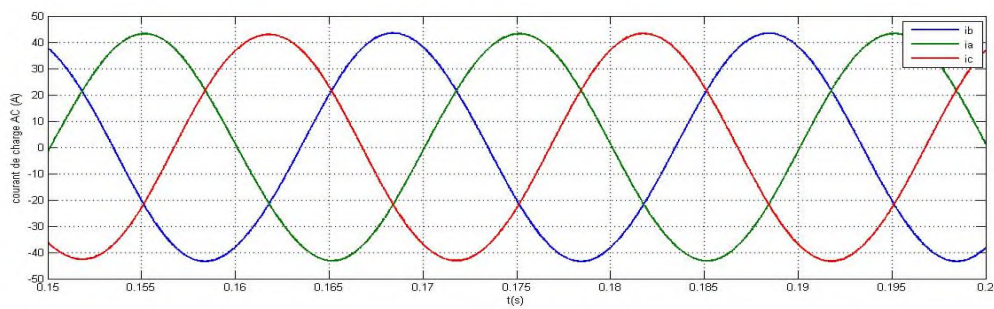


**Figure (III.12)** Allure du la tension de bus continu

Les résultats obtenus montrent que la tension du bus continu suit la tension de référence avec une bonne précision et stabilité.



**Figure (III.13)** Tension  $V_a$  de l'onduleur



**Figure (III.14)** Courants  $i_a$   $i_b$   $i_c$  de charge AC

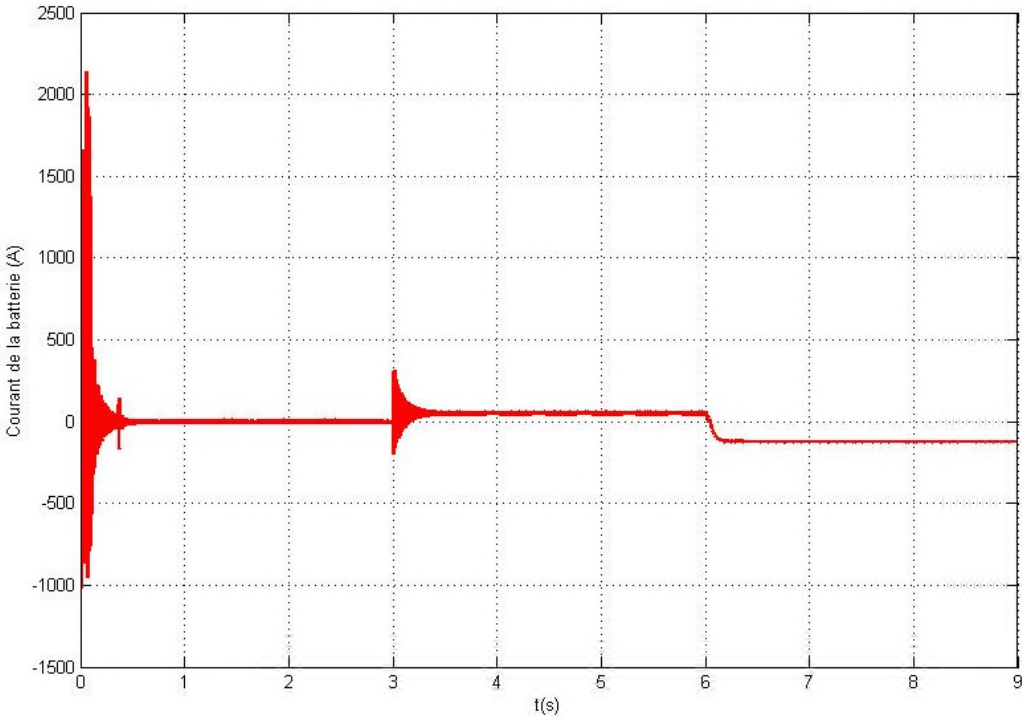


Figure (III.15) Allure du courant de la batterie

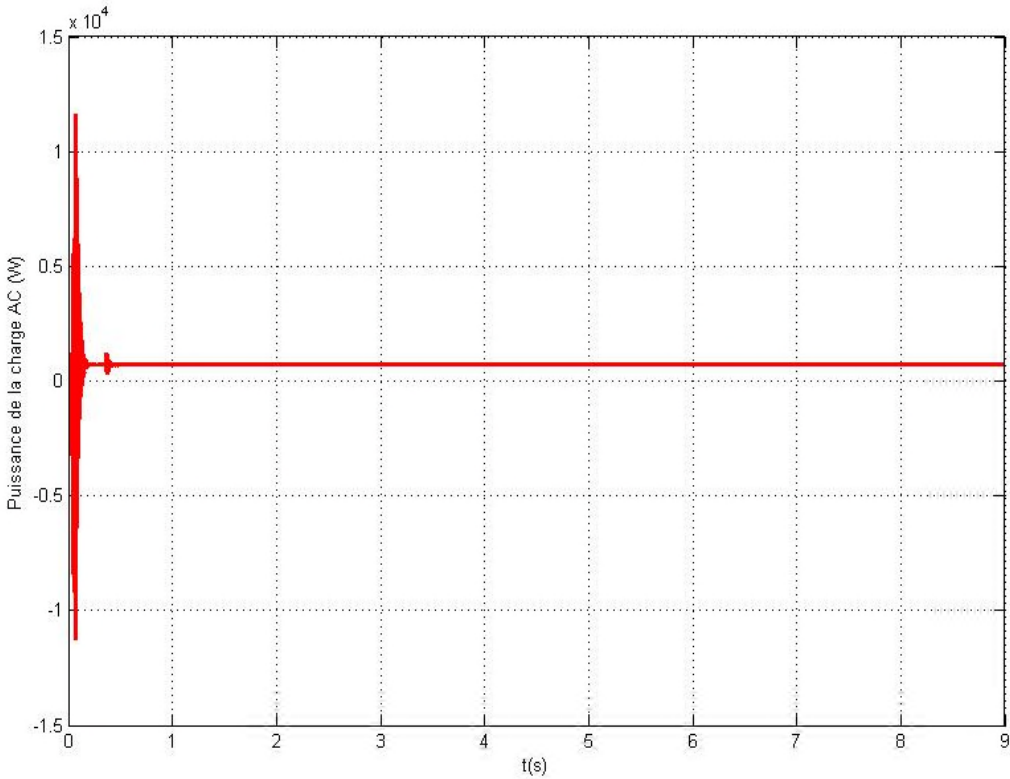
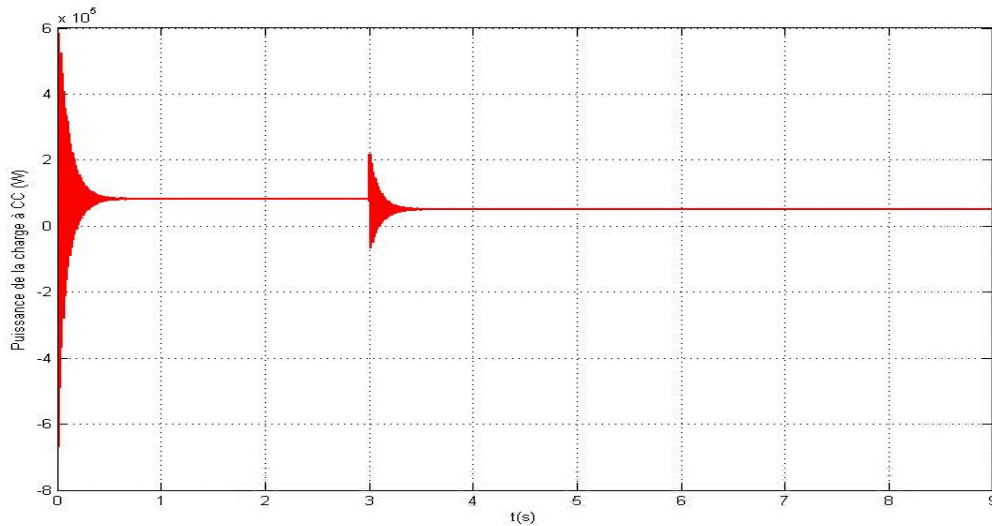


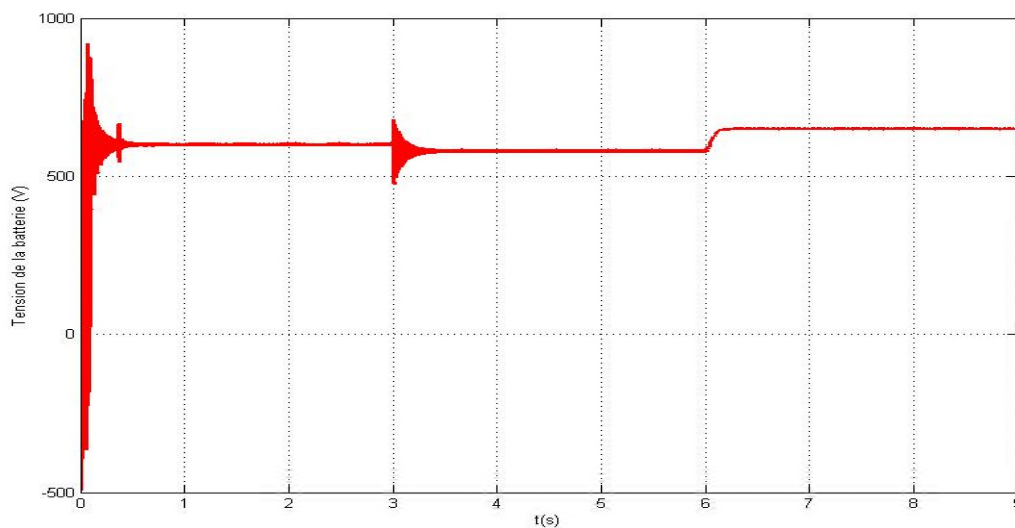
Figure (III.16) Allure du la puissance de la charge (AC)





**Figure (III.17)** Allure de la puissance de la charge (CC)

La Figure (III.15) représente le courant de batterie. On peut constater qu'il est positif en cas de charge, et négatif en cas de décharge. Dans le cas que la puissance générée par l'éolienne égale à la somme des puissances consommées par des charges (AC, CC) figure (III.16) figure (III.17), ce qui réalise aucun Changement de l'état de la batterie, et dans le cas que la puissance générée par l'éolienne est supérieure de celle de la charge (AC, CC), ce qui réalise le chargement de la batterie ce qui induit un courant positif aux bornes de la batterie, et dans le cas que la puissance générée par l'éolienne est inférieure de celle de la charge (AC, CC), ce qui réalise un manque d'énergie : la source ne répond pas à la demande de la charge, donc la batterie intervient pour assurer la demande de la charge, ce qui induit un courant négatif aux bornes de la batterie, le déchargement de la batterie.



**Figure (III.18)** Allure de la tension de la batterie

La Figure (III.18) représente la tension de la batterie. On peut constater des petites légères variations de tension causé par la chute de tension et la surtension dans la batterie.

### **III.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, on à procédé à la simulation de la turbine avec MPPT qui a pour but de montrer le comportement de la turbine. Aussi une commande vectorielle a été établie pour prédire le comportement du système lors de l'imposition d'un couple de référence afin d'optimiser la puissance extraite et enfin une gestion de puissance de l'énergie provenant de l'éolienne et du stockage suivant la puissance exigé par la charge.

CONCLUSION  
GENERALE

### Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire et à pour but l'étude d'un système éolien en fonctionnement autonome, en traquant le maximum de puissance qu'on peut extraire d'une turbine éolienne, basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation avec un système de stockage (batterie) et des convertisseurs pour adapter les sources avec la charge continue et alternative. Tous ces éléments sont reliés à travers un bus continu.

Nous avons répartis notre travail en trois chapitres, Dans le premier chapitre une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée.

Dans le second chapitre nous avons abordés la modélisation des différentes constitutions du système de conversion d'énergie éolienne étudié, à savoir la turbine, la machine asynchrone à double alimentation, le convertisseur et la batterie. Aussi la charge AC et la charge à CC.

Dans le troisième chapitre nous avons étudiés la structure d'alimentation de la GADA associés à la stratégie de contrôle appliquée, qui a permet d'extraire le maximum de puissance sur une large gamme de la variation de vitesse du vent.

La loi de répartition des pulsations statorique et rotorique à permet de faire fonctionner la GADA jusqu'à deux fois de sa vitesse nominale, aussi la puissance extraite à atteint deux fois sa puissance nominale.

Avec les résultats obtenus, le système étudié est pratique dans les applications en fonctionnement autonome.

### Références bibliographiques

[1]: [https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/energie\\_eolienne.php4](https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/energie_eolienne.php4)

[2]: F.Poitier, << Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau >>, Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, France, 2003.

[3]: <https://eolienne.ooreka.fr/comprendre/energie-eolienne>

[4]: <https://jardi-brico.com/les-differents-types-de-eoliennes/>

[5]: <http://www.info-eolien.com/eoliennes-vertical.html>

[6]: <https://www.quelleenergie.fr/questions/difference-eolienne-verticale-horizontale>

[7]: <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-eolienne>

[8]: <https://eolienne.ooreka.fr/comprendre/energie-eolienne>

[9]: S. HAMICHE, Ep. BOUREKACHE, << étude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents >>, Mémoire de magister, université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013

[10]: M. A. HASSAD, <<influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électrique >>, Mémoire de Magister, université de SITIF I, 2012

[11]: J. Ancel, "Machines Asynchrones, Fonctionnement et Calcul", Techniques de l'ingénieur, traité de Génie électrique, D 451-9, D3II.

[12]: A. Tounzi, "Utilisation de l'Energie Eolienne dans la Production de l'Electricité", Revue 3EI, Mars 2000, pp. 24-38.

[13]: D. Schreiber, "State of art of variable speed wind turbines", 11<sup>th</sup> International symposium on power electronics – Ee 2001, Novi Sad, Oct.-Nov. 2001, CDROM proceedings.

---

- [14]: C. Colliez, A. Tounzi, F. Piriou, "Vector Control of an Autonomous Induction Generator Connected to a PWM Rectifier", Proceedings of EPE 97, vol. 2, pp. 711-716, Trondheim, Norvège, 8-10 Septembre 1997.
- [15]: S.Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems" , Publication John Wiley & Sons , ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [16]: L. Refoufi, B.A.T. Al Zahawi, A.G. Jack "Analysis and modeling of the steady state behavior of the static Kramer induction generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 14, Issue 3, 1999, pp 333-339.
- [17]: G.A. Smith, K.A. Nigim, "Wind-energy Recovery by a Static Scherbius Induction Generator", Proc. IEE, 1981, 128, pp. 317-324.
- [18]: N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, "Power Electronics, Converters, Applications and design", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-58408-8.
- [19]: M. Machmoum, "Contribution à l'Etude et la Commande Numérique de l'Ensemble Cyclonconvertisseur Triphasé - Machine Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1989.
- [20]: R. Datta and V. T. Ranganathan, "Variable-Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine - A Comparison With Alternative Schemes", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 17, No. 3, September 2002, pp 414-421.
- [21]: K.IDJDARENE << Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eolien autonomes >> Thèse de Doctorat Université Abderrahmane MIRA- Bejaia, Université Lille 1, 2010
- [22]: M.LOPEZ « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse de doctorat Ecole Doctorale « Sciences et
-

## Références bibliographiques

---

Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes », Université paris-sud 11, 2008

[23]: A. SCHMIDHOFER, H. WEISS « Optimization of Power Electronics for small Stand alone wind power stations », 10<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications EPE'03, Toulouse, France, 2003, pp. 1-6.

[24]: A. MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie Dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2005.

[25]: L. LECLERCQ « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un Réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.

[26]: Mlle, EL Kabira EL MJABBER « modélisation et commande de la MADA pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » PFE en électrotechnique université sidi mohamed ben abdellah .2012/2013

[27]: D. Abdelhakim. Contrôle des puissances active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation. Thèse de doctorat, 2009, Université de Batna, Algérie.

[28]: AZEDDINE CHAIBA « COMMANDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION PAR DES TECHNIQUES DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE » thèse DOCTORAT EN SCIENCES EN ELECTROTECHNIQUE, 11/ 07/ 2010

[29]: P. Vidal. Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double Alimentation. Thèse de Doctorat, 2004, Institut national polytechnique de Toulouse, France.

[30]: R. Babouri. Amélioration des Performances des Convertisseurs Electromécaniques Basés sur les Machines Asynchrones Doublement Alimentées. Thèse de doctorat, 2016, Université A.MIRA-BEJAIA

[31]: André MARQUET, Philippe JAUD, Séverine LAURENT, Alain DAVRIU et Clotilde LEVILLAIN : Stockage d'électricité dans les systèmes électriques. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, D4030, Mai 1998.

[32]: MADACI BOUTHAINA. Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les

---

## Références bibliographiques

---

Multi-systèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs. Université des Frères Mentouri Constantine. 2018

[33]: B Nacer et H Slimane. Alimentation d'un site isolé par un système hybride (éolienne –diesel) . UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA. juin 2017

[34] : BOUSSAID Rafik MORAD Mohammed Abdelhalim « Commandes non linéaires d'une machine asynchrone double alimentation » PFE en master académique, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen). 20 /06/2016

[35]: LATRECHE Mohammed Taha, « commande floue de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilise dans un système éolien » mémoire de magister 24/06/2012.

[36] : site internet « machine asynchrone à double alimentation  
[www.google.dz/search?q=mod%C3%A9le+m%C3%A9canique+simplifi%C3%A9+du+multiplicateur&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEwj5msjdtKPbAhVIPBQKHRNmCu4QsAQIQ&biw=1517&bih=68](http://www.google.dz/search?q=mod%C3%A9le+m%C3%A9canique+simplifi%C3%A9+du+multiplicateur&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEwj5msjdtKPbAhVIPBQKHRNmCu4QsAQIQ&biw=1517&bih=68). visite 11/05/2018

[37] : Vidal, P. É « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation» Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.

[38] : BAKOURI Nacera « étude et commande des générateur pour réseaux autonomes de bord d'avions » mémoire fin d'étude Magister en Electrotechnique 2012/201

[39] : Paire DAMIEN. DIMENSIONNEMENT ET GESTION D' ÉNERGIE DE SYSTÈMES D' ENTRAINEMENTS ÉLECTRIQUES HYBRIDES : APPLICATION À UN ASCENSEUR AVEC RÉCUPÉRATION D' ÉNERGIE .

Professeur agrégé au département Génie Électrique et Systèmes de Commande  
Laboratoire Systèmes et Transports Université de Technologie de Belfort-Montbéliard le 6 décembre 2010

[40] : Ribeiro E, Marques Cardoso AJ, Boccaletti C. Standalone diesel-photovoltaic system with batteries and super capacitors as energy storage components for telecommunications. *IEEE34th Int. Telecommunications Energy Conf.*; 30 Sep-4 Oct 2012 .

[41] :I. Vechiu, “modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome “ Thèse Doctorat, Université du Havre, 2005.

[42]: B. Madaci, R. Chenni, E. Kurt, K. E.Hemsas, “Design and control of a stand-alone hybrid power system”, *International Journal of Hydrogen Energy*, p. 1-12, 2016.

---



## Références bibliographiques

---

[43] : L Benamor ‘ Etude des lois de commande par retour d’état optimale au sein d’un critère quadratique et par régulateur PI : Application à la commande de vitesse d’une machine asynchrone alimentée par un commutateur de courant » Thèse de doctorat, université québec à trois- rivières, 1991.

[44] : S. Khojet El Khil et al. Power distribution law in a doubly fed induction machine. Mathematics and Computers in Simulation, 71 (2006) 360-368 Elsevier.

[45] : Jean-Claude Sabonnadière. Nouvelles technologies de l’énergie 1 : Les énergies renouvelables. Edition Hermès, 2006.

[46] : S. Khojet el khil. Commande vectorielle d’une machine asynchrone doublement alimenté. optimisation des pertes dans les convertisseurs reconfiguration de la commande pour un fonctionnement sécurisé. Thèse de doctorat de l’institut polytechnique de Toulouse, 2006.

[47] : P. Vidal. Commande non-linéaire d’une machine asynchrone `a double alimentation. Thèse de doctorat de l’institut polytechnique de Toulouse, 2004.

[48] : L. Croci, “Gestion de l’énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super-condensateurs “, Thèse Doctorat, Université de Poitiers, 2013.

[49]: Mille, EL Kabira EL MJABBER « modélisation et commande de la MADA pour l’utilisation dans la production de l’énergie éolienne » PFE en électrotechnique université sidi mohamed Ben abdellah. 2012/2013

[50] :Adjeroude Mohamed Amine. Etude d’une éolienne en fonctionnement autonome.mémoire de fin d’études option énergie renouvelable promotion 2015

---

# **ANNEXES**

**Annexe A** : Paramètres des systèmes étudiés et calcul 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	$(U_{rn})$	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>
Frottement	$(F)$	0.0394 N.m.s/rd
Nombre de paires de pôles	$(P)$	2

**Paramètres de la Turbine :**

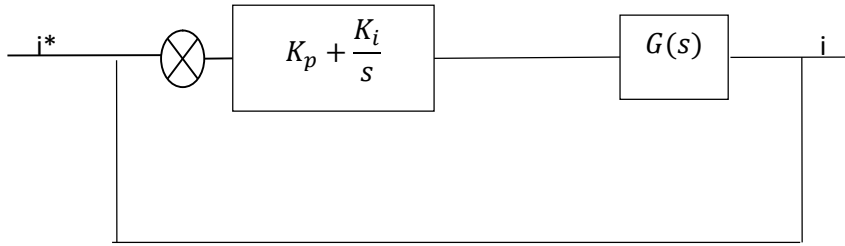
La puissance nominale	$(P_n)$	150kW
Rayon de la turbine	$(R_t)$	8 m
Moment d'inertie de la turbine	$(J_t)$	100 kg.m <sup>2</sup> c
Fréquence de turbine	$(f_t)$	0.000024 N.m.s/rd
Coefficient de puissance	$(C_{pmax})$	0.44
la vitesse spécifique	$(\lambda_{opt})$	8.5
La densité d'air	$(\rho_{air})$	1.225kg/m

**Annexe B :**

**Synthèse des régulateur des courant de la MADA**

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

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



Où :  $G$  est le gain statique et  $\tau$  est la constante du temps statprique 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 :

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

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

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

$$\tau = \frac{K_p}{K_i} \quad (I - 3)$$

Ainsi :

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

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

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

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

$$t_r = 3 \cdot \frac{1}{G K_i} \quad (I - 6)$$

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

$$K_i = 3 \cdot \frac{1}{G t_r}$$

$$K_p = 3 \cdot \frac{\tau}{G t_r}$$