

Université Saida Dr Tahar Moulay –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

**En** : Électrotechnique

**Spécialité : Électrotechnique Industrielle**

Par : Kajd Souhila et Rabhi Noureddine

## Sujet

## **Commande de la machine asynchrone à double alimentation montée dans un système éolien**

Soutenue publiquement en .../06/2022 devant le jury composé de :

<b>Pr.Mezouar Abdel kader</b>	Univ. Saida	Président
<b>Pr.Mekri Fatiha</b>	Univ. Saida	Rapporteur
<b>Dr.Cherifi Djamilia</b>	Univ. Saida	Examinateur

Table de matière

# *Remerciements*

*On remercie dieu tout le puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire*

*Tout d'abord ce travail, ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement et l'encadrement de madame Mekri Fatiha, on la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire*

*Je tiens également à exprimer une reconnaissance aux membres de jury:*

*Monsieur Mezouar Abedel kader de m'avoir honoré de présidé le jury de la soutenance*

*Madame Cherifi Djamila d'avoir bien accepté d'examiner le contenu du présent travail.*

*Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'électrotechnique.*

*Enfin je tiens à exprimer mes reconnaissance à tous mes amis et collègues pour le soutien moral.*

*Dédicaces*

*A mes très chers parents et  
ma grande famille.*

*Je dédie ce modeste travail  
A mes très chers frères et mes sœurs.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.*

*Noureddine*

## *Dédicaces*

*Ce travail est dédié particulièrement à mes parents qui m'ont soutenu tout au long de ma vie scolaire et universitaire.*

*A mes très chers frères et mes très chères sœurs.*

*A mes oncles et mes tantes.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou loin pour la réalisation de ce modeste travail.*

*A tous mes camarades de la promotion Master II et tous les autres sans exception .*

*Souhila*

# Table de matière

Remerciement	
Dédicace 1	
Dédicace 2	
Liste des abréviations et symboles	
Introductions Générale.....	1

## **Chapitre 1: Etat d'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne**

1.1 Introduction.....	2
1.2 Descriptif et qualités de l'énergie éolienne.....	2
1.2.1 Définition de l'énergie éolienne.....	2
1.2.2 Principaux composants d'une éolienne.....	3
1.3 Les différents types d'éoliennes.....	4
1.3.1 Eoliennes à axe vertical.....	4
1.3.2 Eoliennes à axe horizontal.....	5
1.4 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique .....	6
1.5 Généralités sur la conversion électromécanique le cas d'un système éolien.....	10
1.5.1 Les Eoliennes à Vitesse Fixe.....	10
1.5.2 Les Eoliennes à Vitesse Variable.....	10
1.6 Machine Asynchrone à Double alimentation [MADA].....	11
1.6.1 Avantages et inconvénients de la GADA.....	12
1.7 Synthèse des différentes éoliennes.....	13
1.8 Conclusion.....	14

## **Chapitre2 : Modélisation d'un système de conversion d'énergie éolienne**

2.1 Introduction.....	15
2.2 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.....	15
2.2.1 Modélisation de la turbine.....	16
2.2.2 Modèle du multiplicateur de vitesse.....	17
2.2.3 Equation dynamique de l'arbre .....	18
2.3 Stratégie de commande de la turbine.....	20
2.3.1 Techniques d'extraction du maximum de la puissance.....	21
2.3.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	22
2.4 Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation.....	24
2.4.1 Hypothèses simplificatrices.....	24
2.4.2 Représentation de la GADA dans un repère triphasé (abc) .....	25
2.4.3 Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park) .....	26
2.4.4 Application de la GADA dans repère biphasé (dq).....	26
2.4.5 Expression de la puissance active .....	28
2.4.6 Expression du couple électromagnétique.....	28
2.5 Conclusion .....	29

**Chapitre 3 : Commande vectorielle de la GADA**

3.1	Introduction.....	31
3.2	Stratégie de commande de la GADA .....	31
3.3	Commande vectorielle de la GADA.....	34
3.3.1	Commande directe.....	34
3.3.2	Modélisation de l'onduleur à commande MLI.....	35
3.4	Résultat de simulation.....	41
3.5	Conclusion.....	50
	Conclusion générale.....	51
	Référence Bibliographiques	
	Annexe	
	Résumé	

## Listes des abréviations et symboles

MADA	Machine Asynchrone à double Alimentation
GADA	Générateur asynchrone à double alimentation
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
CP	Coefficient de puissance
PI	régulateur Proportionnel Intégral

## Symboles GADA, MADA

$P_s; Q_s$	Puissance statorique active et réactive
$\omega_s; \omega_r$	Pulsation statorique et rotorique
$V_s; V_r$	Tension statorique et tension rotorique
$\varphi_s; \varphi_r$	Flux statorique et rotorique
$R_s; R_r$	Résistances du stator et du rotor
$I_s; I_r$	Courants statorique et rotorique
$P$	Nombre de paire de Pole
$P(\theta)$	Matrice de transformation de Park
$[P(\theta)]^{-1}$	Matrice inverse de transformation de Park
$V_{ds} V_{qs}; V_{qr} V_{dr}$	Composantes des tensions statorique et rotorique dans le repère (d, q)
$\varphi_{ds} \varphi_{qs}; \varphi_{dr} \varphi_{qr}$	Composantes des flux statorique et rotorique dans le repère (d, q)
$I_{ds} I_{qr}; I_{qs} I_{dr}$	Courants statoriques et rotoriques dans le repère (d, q)
$\Omega_{mec}$	la vitesse mécanique

## Turbine

$G$	Gain
$S$	Surface Circulaire balayée par la turbine
$R$	Longueur des pales
$P_V$	Puissance de vent
$\rho$	Densité de l'air
$V$	La vitesse du vent
$P_{ear}$	Puissance aérodynamique
$B$	Angle de l'orientation des pales
$\Omega_{turbine}$	La vitesse de la turbine
$C_{aer}$	Couple aérodynamique
$C_g$	Couple du générateur
$J$	L'inertie totale
$C_{em}$	Couple électromagnétique
$C_{vis}$	Couple de frottement visqueux
$\lambda$	Le ratio de vitesse
$C_{Pmax}$	Coefficient de la puissance maximale
$\Omega_{turbine-estime}$	La vitesse estimée de la turbine
$m$	Indice de modulation
$r$	Taux de modulation
$V_{ref}$	La tension de référence
$K_p$	Gain proportionnel
$K_i$	Gain intégral
$U_P$	La porteuse

$f_P$

La fréquence de la porteuse

# Introduction générale

La fourniture de services énergétiques (l'éclairage, le chauffage, la cuisine, la communication, et la mobilité) est essentielle tant pour le bien social que pour le bien économique, mais l'utilisation de combustibles fossiles pour répondre à ces besoins peut également conduire à d'autres problèmes tels que le réchauffement de la planète et la pollution due à l'augmentation de la concentration atmosphérique des émissions de gaz pouvant constituer une menace pour notre bien-être.

Ces dernières années, la demande mondiale en énergie et surtout en énergie éolienne a atteint un seuil préoccupant pour un grand nombre de pays. L'épuisement annoncé des réserves pétrolières par les spécialistes et les changements climatiques dus aux gaz à effet de serre ont incité, en toute urgence, la communauté internationale à réduire leur dépendance aux combustibles fossiles et s'orienter vers les énergies renouvelables notamment l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.

L'énergie éolienne est produite par des aérogénérateurs qui captent à travers leurs pales l'énergie cinétique du vent et entraînent elles-mêmes un générateur produit de l'électricité d'origine renouvelable.

Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type asynchrone double alimentation dans un système éolien. Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

- ✓ Le chapitre 1 sera consacré à la présentation de manière générale d'un système de production de l'énergie éolienne. Nous aborderons quelques définitions des différents composants fondamentaux d'une éolienne ainsi que des généralités sur la conversion électromécanique.
- ✓ Le chapitre 2 portera sur la modélisation des composants du système de conversion de l'énergie éolienne. Nous présenterons tout d'abord la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne. Ensuite, nous présenterons la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation.
- ✓ Le chapitre 3, nous nous intéresserons à la commande et la simulation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation, et des résultats issus des différentes simulations seront effectuées sur le système étudié basée sur des régulateurs classiques. Ce mémoire est clôturé par une conclusion générale.

---

# Etat d'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne

---

1.1 Introduction.....	2
1.2 Descriptif et qualités de l'énergie éolienne.....	2
1.2.1 Définition de l'énergie éolienne.....	2
1.2.2 Principaux composants d'une éolienne.....	3
1.3 Les différents types d'éoliennes.....	4
1.3.1 Eoliennes à axe vertical.....	4
1.3.2 Eoliennes à axe horizontal.....	5
1.4 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique .....	6
1.5 Généralités sur la conversion électromécanique le cas d'un système éolien.....	10
1.5.1 Les Eoliennes à Vitesse Fixe.....	10
1.5.2 Les Eoliennes à Vitesse Variable.....	10
1.6 Machine Asynchrone à Double alimentation [MADA].....	11
1.6.1 Avantages et inconvénients de la GADA.....	12
1.7 Synthèse des différentes éoliennes.....	13
1.8 Conclusion.....	14

## 1.1 Introduction

L'énergie éolienne est employée pendant longtemps dans les fermes pour rectifier les grains ou l'eau de pompe sous forme de moulin de vent. Son principe est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui est transformée en énergie électrique par l'emploi d'une génératrice. L'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelles de même puissance. Les stratégies de commande de machines (synchrone ou asynchrones) et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes. Le principe de fonctionnement de ces éoliennes a été présenté dans plusieurs travaux tels que [1], [2], [3], [4].

L'objectif de ce chapitre est de présenter un état de l'art sur l'énergie éolienne. Au premier lieu, nous présentons un aperçu sur les différents types d'éolienne. Enfin nous citerons leurs avantages et inconvénients.

## 1.2 Descriptif et qualités de l'énergie éolienne

### 1.2.1 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [5], comme le montre la figure 1.1

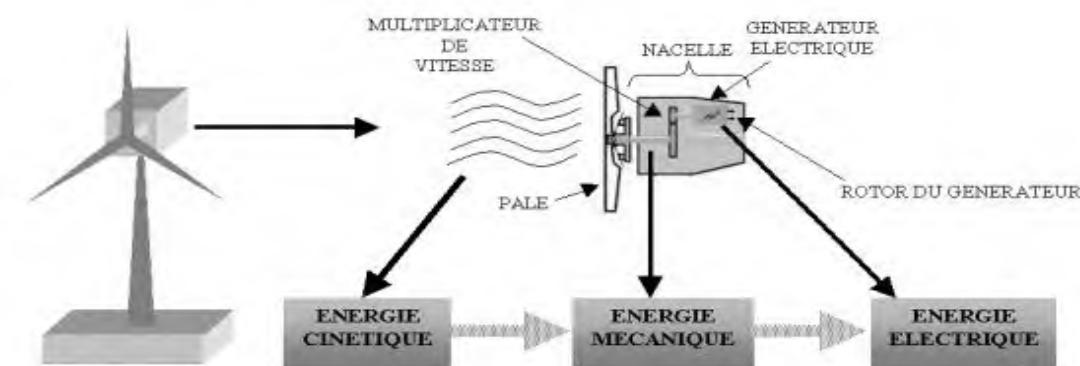


Figure 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulence.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

### **1.2.2 Principaux composants d'une éolienne**

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes [5]. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux, figure 1.2 :

\*Le mât, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.

\*La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

\*Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

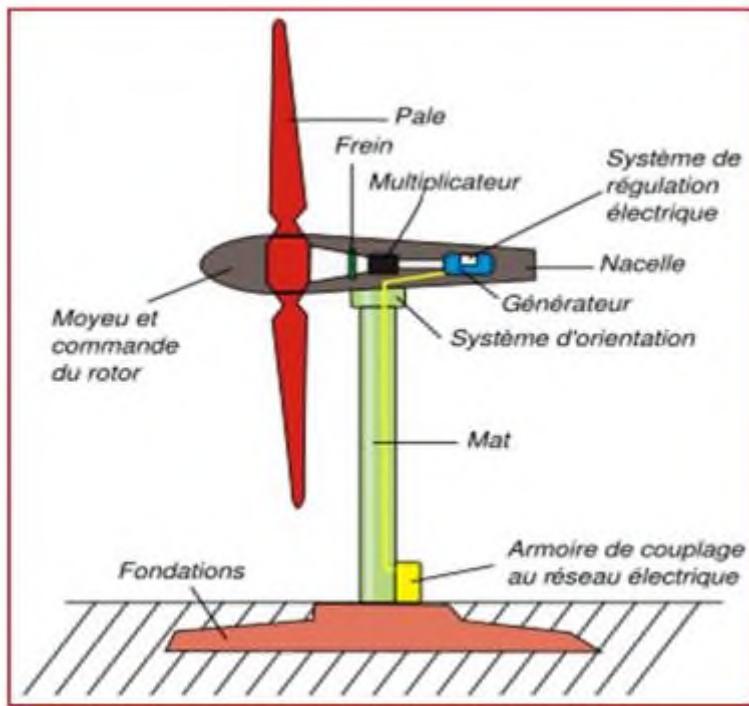


Figure 1.2 : Principaux composants d'une éolienne

### 1.3 Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal [7].

#### 1.3.1 Eoliennes à axe vertical

L'axe de rotation de ces turbines est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent, figure 1.3, elles sont les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenages sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique.

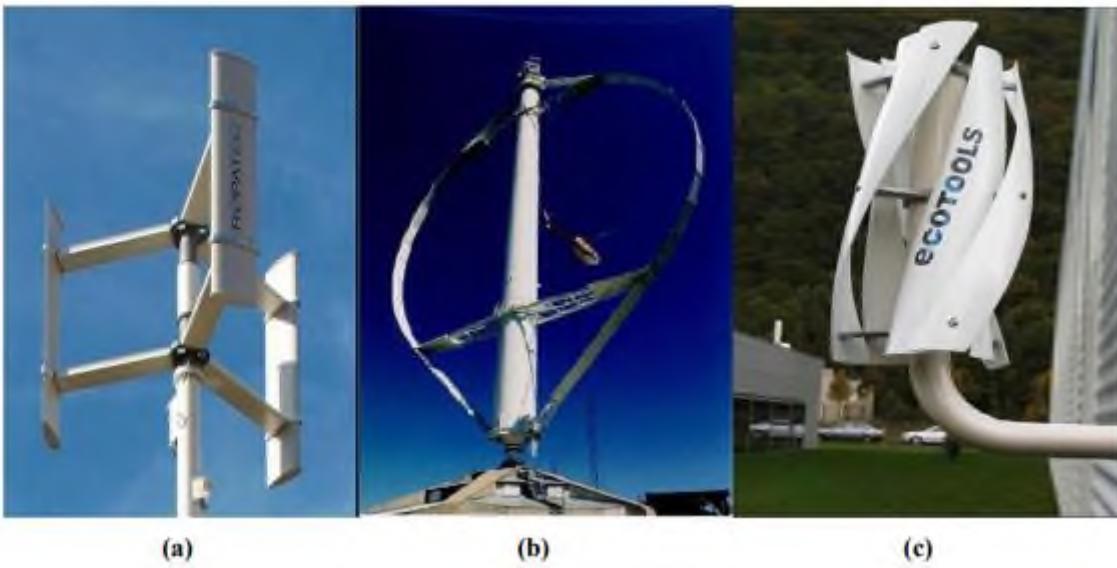


Figure 1.3 : Différentes technologie d'éoliennes à axe vertical : a) Turbine Darrieus en H b)  
Turbine Darrieus, c) Turbine Savonius

### A. Avantages:

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.

### B. Inconvénients:

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.

### 1.3.2 Eoliennes à axe horizontal

L'éolienne se compose en générale de 3 pales portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical qui doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol ,figure 1.4. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne[8].Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

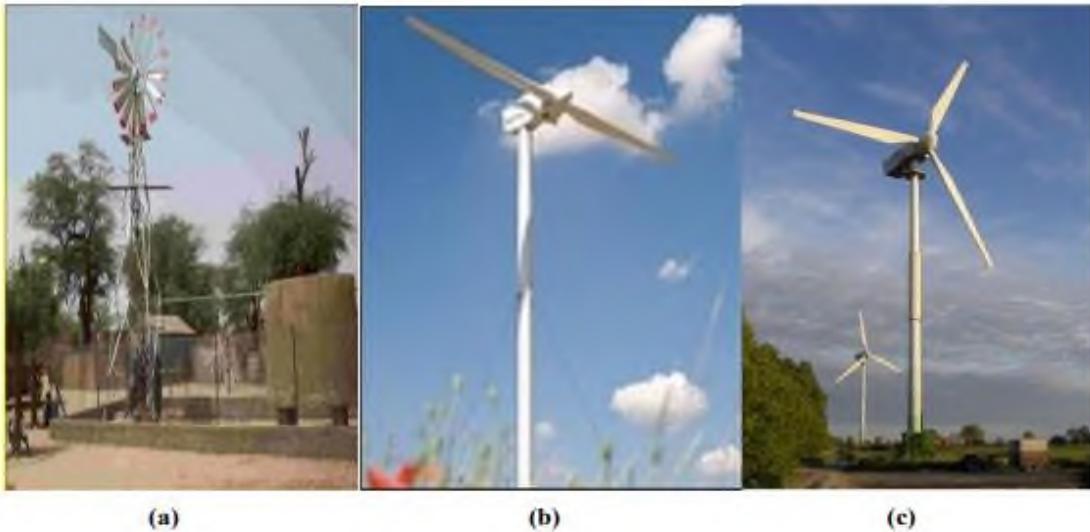


Figure 1.4 : Différentes technologie d'éoliennes à axe horizontale : a) Eolienne multipale  
b) Eolienne horizontale bipale c) Eolienne horizontale tripale

### A. Avantages:

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.

### B. Inconvénients:

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident. Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées.

## 1.4 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

L'énergie cinétique du vent est captée par les pales afin de la transformer en énergie mécanique, figure 1.5. La transformation de cette dernière en énergie électrique est assurée par un générateur électrique de type synchrone ou asynchrone.

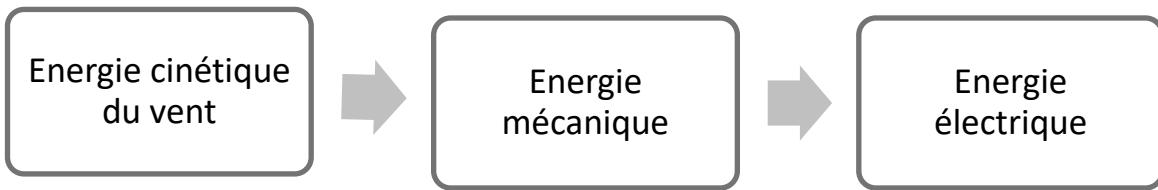


Figure 1.5 : Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne

✓**Loi de BETZ [5]**

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « Le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse  $V_1$  et à l'infini aval d'une vitesse  $V_2$  »

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure 1.6 sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval

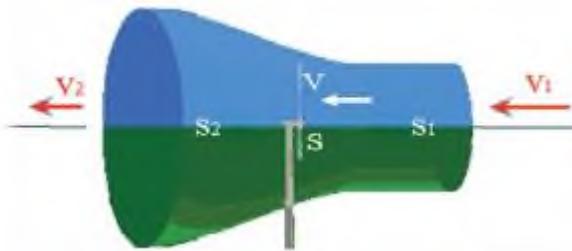


Figure 1.6 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant l'éolienne  $V_1$ , et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$  soit  $\frac{V_1 + V_2}{2}$ , la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales est:

$$m = \frac{\rho \cdot S(V_1 + V_2)}{2} \quad (1.1)$$

La puissance aérodynamique  $P_{aér}$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_{aér} = \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (1.2)$$

En remplaçant m par son expression dans (1.1):

$$P_{aér} = \frac{\rho S(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (1.3)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance  $P_v$  correspondante serait alors :

$$P_v = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (1.4)$$

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

$$\frac{P_{aér}}{P_v} = \frac{\left[1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right] \left[1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right]}{2} = C_p \quad (1.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à L'équation (1.5), donnée par la figure 1.7, on s'aperçoit que le ratio  $P_{aér}/P_v$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maxima de 16/27 soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de BETZ qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent

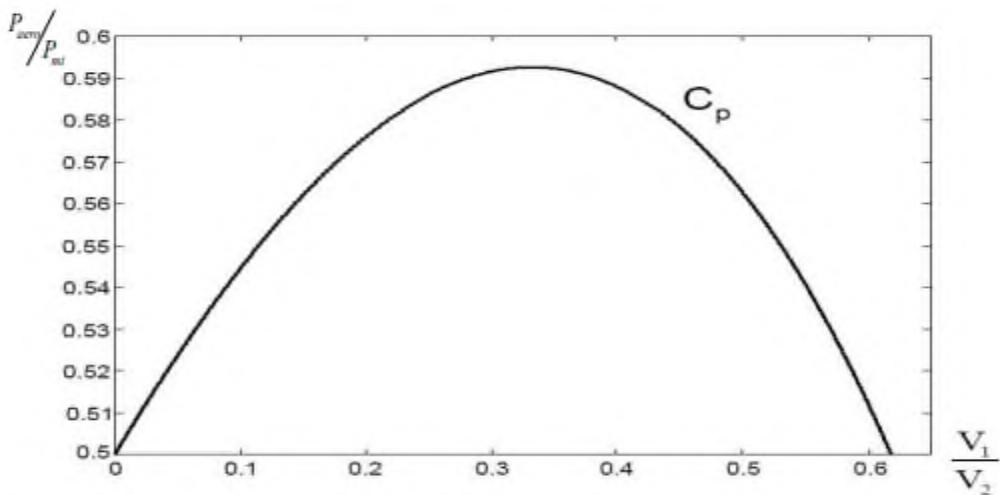


Figure 1.7 : Coefficient de puissance,  $C_p$

### ✓ Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (1.1), (1.4) et (1.5), la puissance aérodynamique  $P_{aér}$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aér} = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} C_p (\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1.6)$$

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (1.7)$$

$\Omega_1$  : vitesse de rotation avant multiplicateur.

R : rayon de l'aérogénérateur.

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

$$P_{aér} = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega_2 R}{KV_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1.8)$$

Avec  $\Omega_2$  : vitesse de rotation après multiplicateur.

## 1.5 Généralités sur la conversion électromécanique le cas d'un système éolien

Dans le cas de la conversion de l'énergie éolienne, les deux types de machines électriques les plus utilisées sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [9]. Ce sont souvent des structures standard à une ou deux paires de pôles.

### 1.5.1 Les Eoliennes à Vitesse Fixe

Dans le cas de l'éolienne à vitesse fixe, figure 1.8, le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine asynchrone (seules les générateurs asynchrones sont utilisés dans ce cas).

Deux générateurs asynchrones sont souvent utilisés dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevées. Le problème majeur de cette solution est la complexité du montage qui augmente la masse embarquée. Une autre solution consiste à utiliser un câblage du stator qui peut être modifié afin de faire varier le nombre de pôles[10].

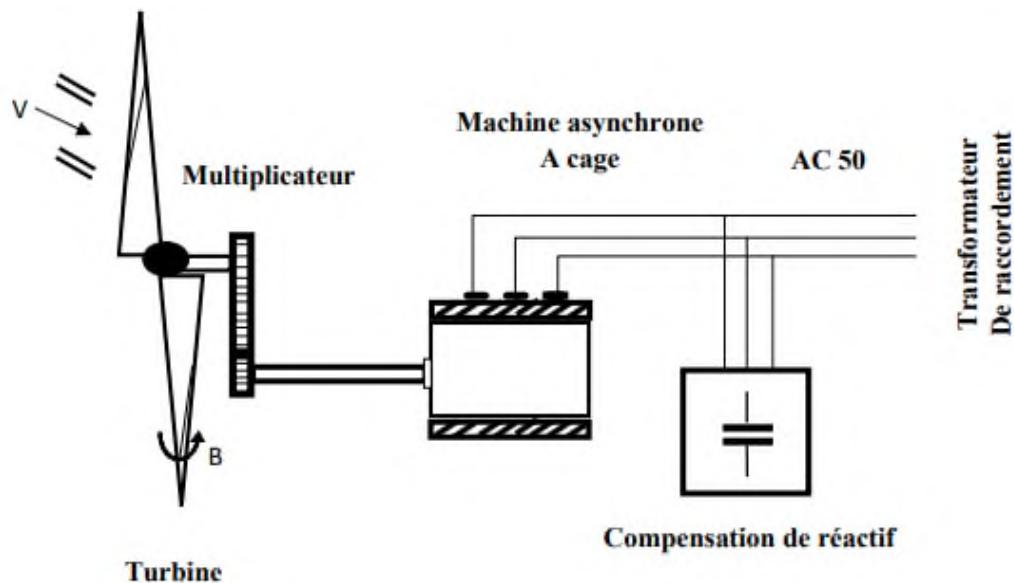


Figure 1.8 : Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage

### 1.5.2 Les Eoliennes à Vitesse Variable

Dans ce cas d'éolienne, la figure 1.9, une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau

donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la génératrice électrique [10].

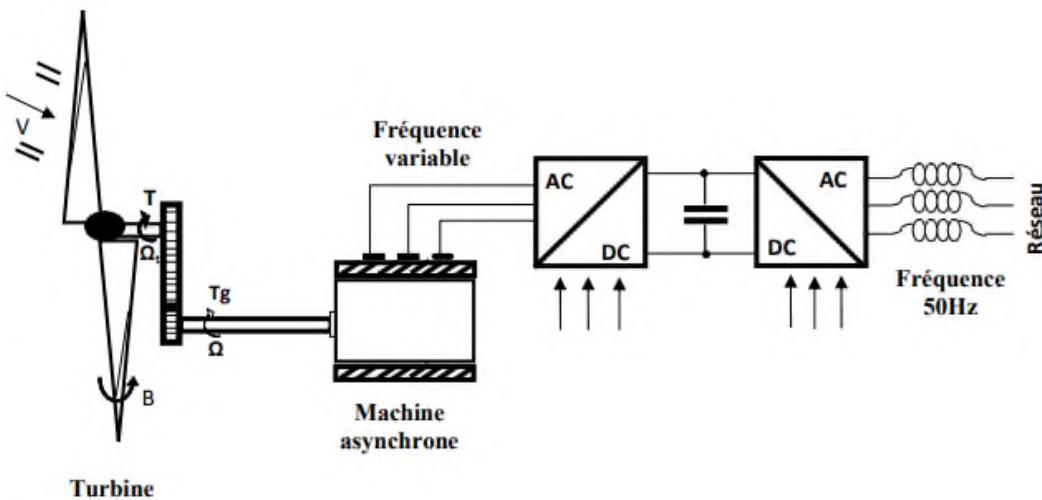


Figure 1.9 : Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage

## 1.6 Machine Asynchrone à Double alimentation [MADA]

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), il est constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer des enroulements décalées de  $120^\circ$  dans l'espace. Son rotor est constitué de trois bobinages dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne. Dans ce type de machine, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur[11].

### ✓ Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone:

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

### ✓ Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone:

- \* La puissance est fournie au réseau par le stator.
  - \* La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
  - \* La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- \* La machine asynchrone à cage peut être fonctionnée ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

#### 1.6.1 Avantages et inconvénients de la GADA

La machine asynchrone à double alimentation est couramment appelée machine généralisée. Son fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de "machine synchrone à excitation alternative[12]. La machine asynchrone à double alimentation réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone en plus les avantages envisagés grâce à sa double alimentation. D'autre part, comme toutes les autres machines électriques, la MADA a des avantages et des inconvénients tels que[12] :

##### A. Avantages

- La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne).
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.

##### B .Inconvénients:

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

## 1.7 Synthèse des différentes éoliennes

La synthèse des différentes éoliennes est résumée dans les tableaux 1 et 2. Le tableau 1 résume les avantages et les inconvénients des différentes éoliennes. Le tableau 2 montre la capacité de réglage de différentes éoliennes [13], [14], [4].

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des différentes éoliennes

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
<b>MAS</b> Vitesse fixe	-Machine robuste -Faible cout -Pas d'électronique de puissance	-Puissance extract non optimisée -Maintenance boite de vitesse -Pas de contrôle de l'énergie réactive -Magnétisation de la machine imposée par le réseau
<b>MADA</b> Vitesse variable	-Fonctionnement à vitesse variable -Puissance extract optimisée -Machine standard -Connexion de la machine plus facile à gérer -Une magnétisation de la machine générée en cas de défaut sur le réseau	-Maintenance boite de vitesse -Prix de d'électronique de puissance -Contrôle_commande complexe -Contact glissant -bagues_balais
<b>MSAP</b> Vitesse variable	-Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesses Puissance extraite optimisée pour les vents faibles -Connexion de la machine plus facile à gérer -Possibilité d'absence de boite de vitesse	-Prix de l'électronique de puissance -Machine spécifique -Grand diamètre de machine -Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice

Tableau 2 : Capacités de réglage des différentes éoliennes

Type d'éolienne	Interface réseau	Moyen de contrôle	Fonctionnement possible	Services système
<b>MAS</b> Vitesse fixe	-Gradateur -Bancs de condensateurs	-pitch control	-Contrôle approximatif P -Contrôle approximatif Condensateur Q	NON
<b>MADA</b> Vitesse variable	-Convertisseur électronique AC/ AC au rotor (AC/DC puis DC/AC)	-pitch control -Couple génératrice	- Contrôle de P - Contrôle de Q	-participation limitée au : Réglage de la fréquence -Réglage de la tension tant qu'il y a du vent
<b>MSAP</b> -Vitesse Variable	-Convertisseur électronique AC/AC au stator (AC/DC puis DC/AC)	-pitch control (ou stalle) -Couple génératrice	-contrôle de P - contrôle de Q -fonctionnement en isolé	-Réglage de la fréquence -Réglage de la tension -ilotage tant qu'il y a du vent

## 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique a été présentée sur les différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique a été illustré. 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, mais ont un coût plus élevé. L'éolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation offre des capacités qui pourraient lui faire permettre de participer aux réglages du réseau avec une commande bien adaptée. Ce type d'éolienne est à la base de ce travail.

---

# Modélisation d'un système de conversion d'énergie éolienne

---

2.1	Introduction.....	15
2.2	Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.....	15
2.2.1	Modélisation de la turbine.....	16
2.2.2	Modèle du multiplicateur de vitesse.....	17
2.2.3	Equation dynamique de l'arbre .....	18
2.3	Stratégie de commande de la turbine.....	20
2.3.1	Techniques d'extraction du maximum de la puissance.....	21
2.3.2	Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	22
2.4	Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation.....	24
2.4.1	Hypothèses simplificatrices.....	24
2.4.2	Représentation de la GADA dans un repère triphasé (abc) .....	25
2.4.3	Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park) .....	26
2.4.4	Application de la GADA dans repère biphasé (dq).....	26
2.4.5	Expression de la puissance active .....	28
2.4.6	Expression du couple électromagnétique.....	28
2.5	Conclusion .....	29

## 2.1 Introduction

Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les éléments les plus importants, puisque la turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de faire tourner le rotor de la génératrice et cette dernière est la composante qui assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Ce chapitre se compose de deux parties :

- ✓ Une première partie est consacrée à la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne. Par la suite on calculera la puissance maximale pouvant extraite.
- ✓ La deuxième partie est consacrée à la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation.

## 2.2 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

La partie mécanique de la turbine étudiée comprend trois pales de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entrainement, tournant à une vitesse  $\Omega_{turbine}$ , relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique[15] comme le montre la figure 2.1

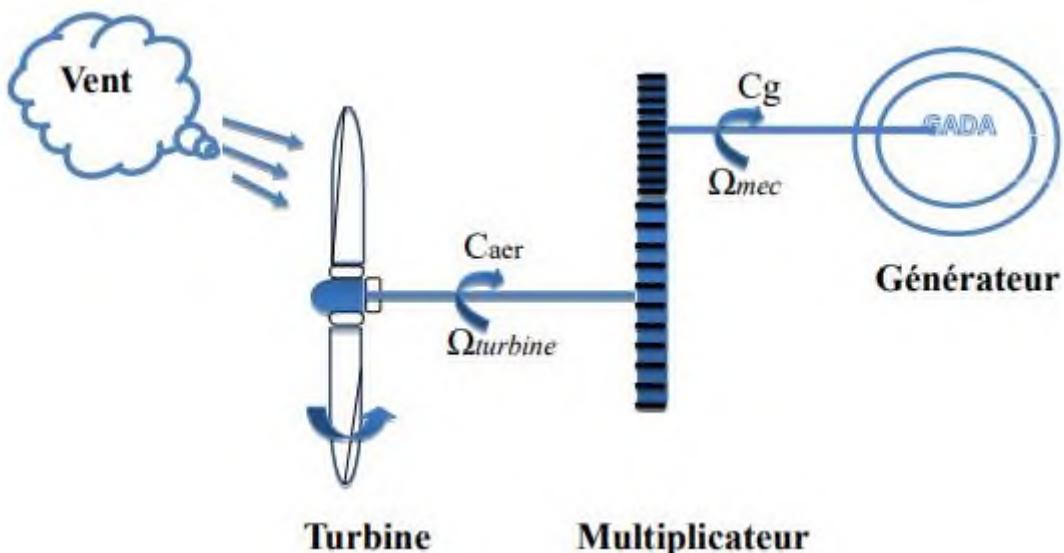


Figure 2.1: Schéma de la turbine éolienne

## 2.2.1 Modélisation de la turbine

La puissance à l'entrée de l'éolienne à travers la surface  $S$  correspondant à la vitesse  $V$  est définie de la manière suivante [15] :

$$P_V = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (2.1)$$

Avec :

-  $P_V$  est la puissance totale théoriquement disponible.

-  $\rho$  est la densité de l'air

-  $S$  est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

-  $V$  est la vitesse du vent.

Le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance aérodynamique  $P_{ear}$  inférieure à la puissance disponible  $P_V$ .

$$P_{ear} = C_p \cdot P_V = C_p (\beta, \lambda) \cdot \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (2.2)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne  $\left(\frac{P_{ear}}{P_V}\right)$  dépend de la caractéristique de la turbine[15]. Ce coefficient varie avec l'angle d'orientation des pales ( $\beta$ ) et le ratio de vitesse ( $\lambda$ ).

Le ratio de vitesse ( $\lambda$ ) est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \Omega_{turbine}}{V} \quad (2.3)$$

Où

$\Omega_{turbine}$  est la vitesse de la turbine.

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{1}{2} \rho S V^3 \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (2.4)$$

## ✓ Coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$

La turbine éolienne peut seulement convertir certain pourcentage de la puissance capturée du vent. On présente ce pourcentage par  $C_p(\lambda, \beta)$  qui est en fonction de ratio de vitesse  $\lambda$  et l'angle d'orientation de pale  $\beta$ [10].

Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 1MW pour notre simulation. C'est un modèle tripale dont la longueur d'une pale est de 3m. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne, il dépend de la vitesse spécifique  $\lambda$  (fonction de la vitesse du vent) et de l'angle d'orientation des pales  $\beta$ . A titre d'exemple, l'expression du coefficient de puissance d'une turbine éolienne de 1.5 MW est approximé par l'équation[12].

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167 \cdot (\beta-2)) \cdot \sin\left[\frac{(\pi+0.1)}{18.5-0.3(\beta-2)}\right] - 0.00184 \cdot (\lambda-3) \cdot (\beta-2) \quad (2.5)$$

De la figure 2.2 [9] , on constate que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, son maximum ( $C_p= 0.5$ ) est atteint pour une  $\lambda = 9$  et  $\beta = 2$  ( $\beta$  l'angle d'orientation des pales), avec cette valeur la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Cette figure 2.2, montre aussi que la valeur maximale de la courbe ne dépassera jamais la limite théorique de BETZ (0,59).

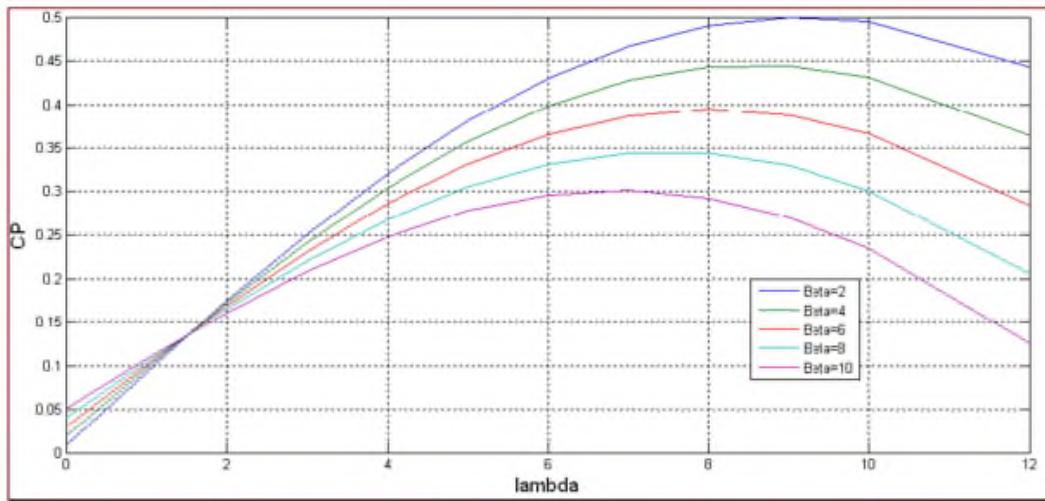


Figure 2.2 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine

## 2.2.2 Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse, figure 2.3, est la liaison entre la turbine et le générateur. Il a pour but d'adapter la vitesse de la turbine  $\Omega_{turbine}$ , assez lente à celle que nécessite la génératrice  $\Omega_g$ .



Figure 2.3 : Modèle mécanique du multiplicateur

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes[15] :

$$C_g = \frac{c_{aer}}{G} \quad (2.6)$$

$$\Omega_{(turbine)} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.7)$$

## 2.2.3 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_{turbine}$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (2.8)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée sur cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique comme le montre équation (2.9) ; qui donne la relation entre du couple mécanique ( $C_{mec}$ ) est la vitesse:

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2.9)$$

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

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f$  d'où on a :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.10)$$

En prenant en compte l'inertie et les frottements de paliers le modèle simplifié de l'évolution du couple mécanique est donné par la figure 2.4.

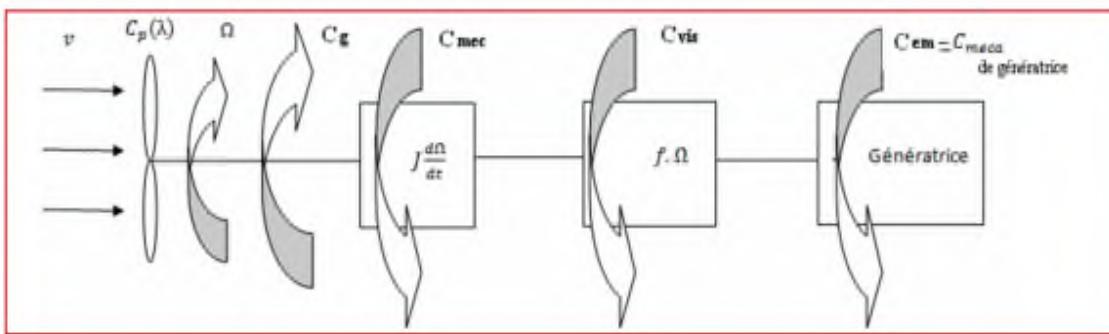


Figure 2.4 : Modèle simplifié de l'évolution du couple mécanique d'une turbine éolienne

L'équation mécanique de l'ensemble est donnée par :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.11)$$

$$C_g - C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.12)$$

$$\Omega_{mec} = \frac{1}{J_s + f} (C_g - C_{em}) \quad (2.13)$$

En se basant sur les équations ci-dessus, on déduit le schéma bloc de la figure 2.5, qui représente la modélisation de la turbine. Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent  $V$ , l'angle d'orientation des pales  $\beta$ , et la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_{turbine}$ . Le multiplicateur permet de passer de la vitesse mécanique  $\Omega_{mec}$  et le couple aérodynamique  $C_{aér}$  respectivement en vitesse de la turbine  $\Omega_{turbine}$  et en couple de multiplicateur  $C_g$ . Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique  $\Omega_{mec}$ , il dépend du couple  $C_g$  à la sortie du multiplicateur et du couple électromagnétique  $C_{em}$  fourni par la génératrice. La vitesse de la turbine  $\Omega_{turbine}$  peut être contrôlée par action sur l'angle de la pale  $\beta$  et sur le

couple électromagnétique de la génératrice  $C_g$ . La vitesse du vent  $V$  est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

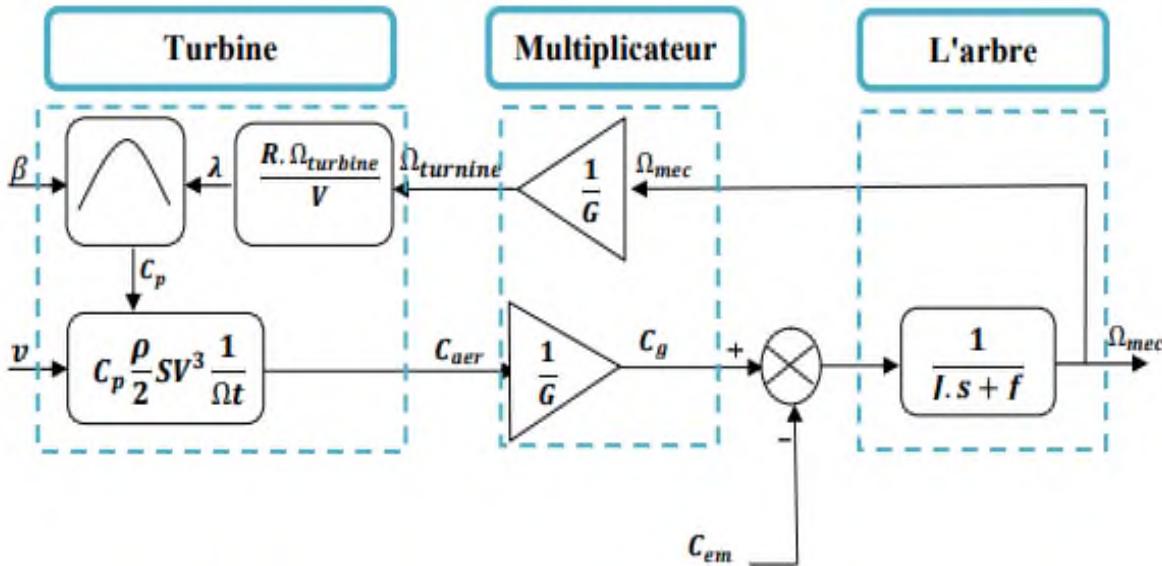


Figure 2.5 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

### 2.3 Stratégie de commande de la turbine

La courbe de la caractéristique de puissance d'une éolienne donne la variation de la puissance électrique en fonction de la vitesse, cette courbe est illustrée par La figure. 2.6. Elle contient quatre (04) zones principales de fonctionnement [16] , qui sont :

- Zone1 : Cette zone concerne la période de démarrage à partir d'une certaine vitesse minimale nécessaire à l'entraînement de l'aérogénérateur l'éolienne commence à tourner.
- Zone2 : A partir d'une certaine vitesse seuil de la génératrice (correspondant à un glissement de 30%), un algorithme de commande permettant l'extraction du maximum de puissance du vent (MPPT) est appliqué.
- Zone3 : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone la puissance atteint jusqu'à 90% de sa valeur nominale.
- Zone4 : arrivée à la puissance nominale, la vitesse doit être limitée, c'est la phase où intervient la limitation de vitesse par orientation des pales (angle de calage).

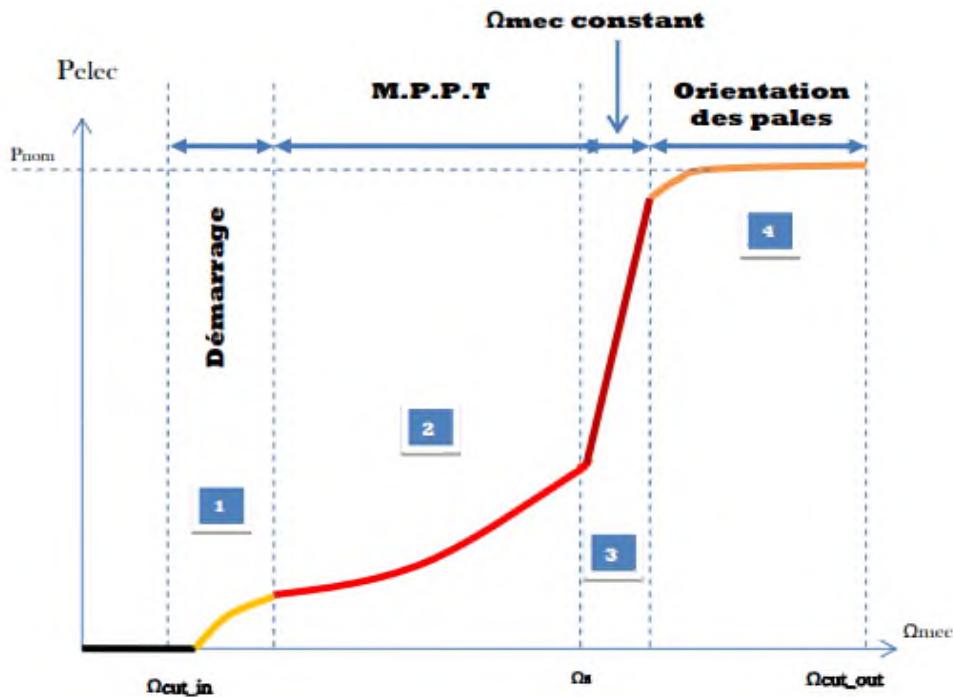


Figure 2.6 : Caractéristique Puissance - Vitesse d'une éolienne [15]

### 2.3.1 Techniques d'extraction du maximum de la puissance

Afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. On distingue deux familles de structures de commande[16] , comme le montre la figure, 2.7.

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

D'après les travaux effectués dans la littérature, la vitesse du vent conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction avec asservissement de la vitesse, parce que l'anémomètre situé derrière le rotor de la turbine rend la lecture de la vitesse du vent erronée. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [16]. La suite de ce travail repose sur cette stratégie de commande.

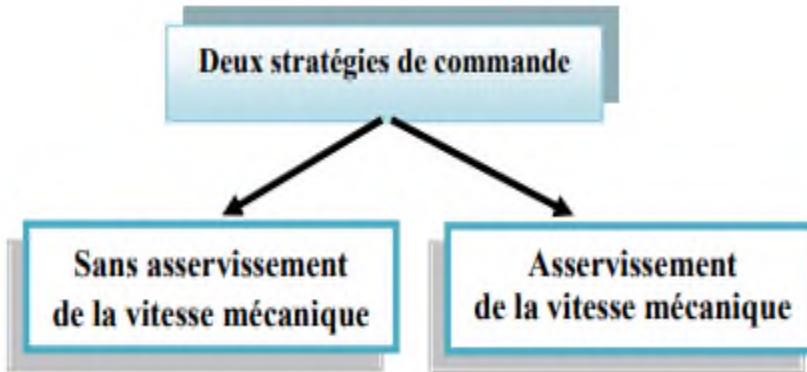


Figure 2.7 : Stratégies de commande de la turbine

### 2.3.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

La structure de la commande sans asservissement, donnée par figure 2.7, repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent comme le montre la figure 2.8.

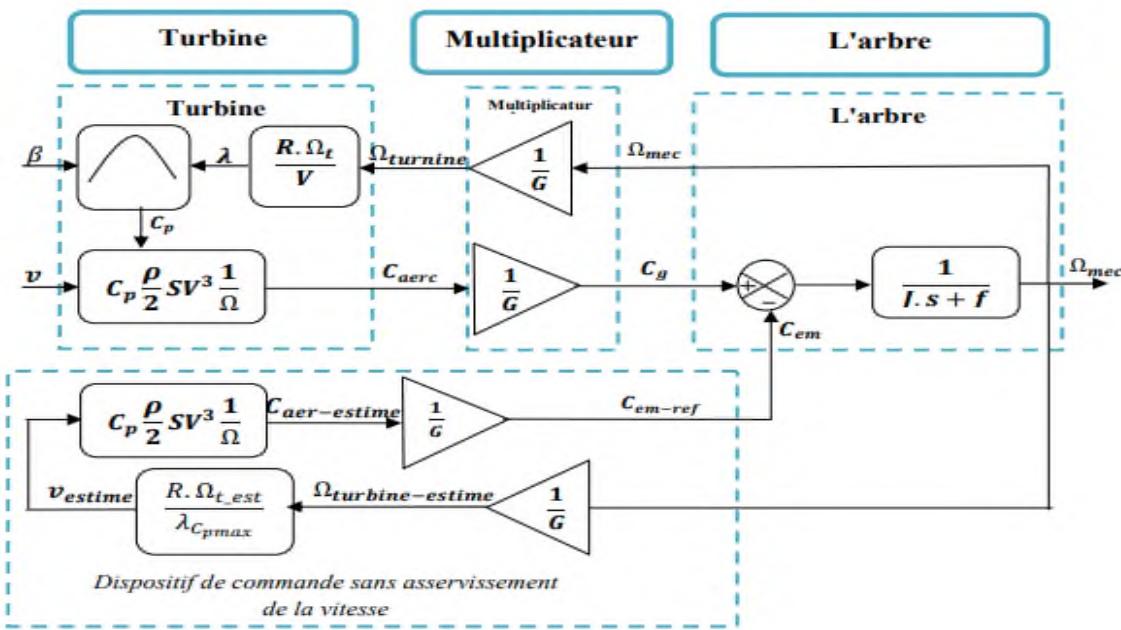


Figure 2.8 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine :

$$C_{mec} = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.14)$$

Dans ce cas, le couple mécanique  $C_{mec}$  développé est nul, et on néglige l'effet du couple des frottements visqueux  $C_{vis}$  : on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (2.15)$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien :

$$C_{em-re} = \frac{C_{aer-estime}}{G} \quad (2.16)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équation (2.4).

$$C_{aer-estime} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot s}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-estime}} \cdot V_{estime}^3 \quad (2.17)$$

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

$$\Omega_{turbine-estime} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.18)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation (2.19), d'où on a :

$$V_{estime} = \frac{\Omega_{turbine-estime} \cdot R}{\lambda} \quad (2.19)$$

En regroupant ces quatre équations (2.16), (2.17), (2.18) et (2.19), on obtient une relation globale de contrôle :

$$C_{em-r} = \frac{C_p}{\lambda_{CP}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (2.20)$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur  $\lambda_{cpmax}$  qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{pmax}$  (figure. 2.8). Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em-re} = \frac{C_p}{\lambda_{CPmax}^3} \cdot \frac{\rho \pi R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (2.21)$$

L'expression du couple de référence devient alors proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice,

$$C_{em-r} = A \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (2.22)$$

Avec :

$$A = \frac{C_p}{\lambda_{CPmax}^3} \cdot \frac{\rho \pi R^5}{2} \cdot \frac{1}{G^3} \quad (2.23)$$

## **2.4 Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation**

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne. La modélisation d'une génératrice asynchrone est basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage, en assimilant la cage d'écureuil à un bobinage triphasé.

### **2.4.1 Hypothèses simplificatrices**

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

\*Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.

\*Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdale d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, et que les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques.

\*Les pertes par hystérésis et courant de Foucault sont négligées.

\*Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé.

## 2.4.2 Représentation de la GADA dans un repère triphasé (abc)

Les équations générales de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé [17] sont:

### ✓ Equations électriques

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \end{cases} \quad (2.24)$$

Avec :

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{rA} \\ I_{rB} \\ I_{rC} \end{bmatrix}; [V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{rA} \\ V_{rB} \\ V_{rC} \end{bmatrix}; [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix}; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{rA} \\ \varphi_{rB} \\ \varphi_{rC} \end{bmatrix}$$

Les matrice des résistances statorique et rotorique de la GADA sont données par:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

### ✓ Equations magnétiques

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre le flux et les courants. Elles sont exprimées sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [M_{sr}][I_s] + [L_{rr}][I_r] \end{cases} \quad (2.25)$$

Les quatre matrices d'inductance s'écrivent :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

### 2.4.3 Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park)

La transformation de Park permet de passer du repère (abc) vers le repère ( $\alpha\beta$ ), puis vers le repère (dq). Le repère ( $\alpha\beta$ ) est toujours fixe par rapport au repère (abc); par contre le repère (dq) est mobile; il forme avec le repère fixe ( $\alpha\beta$ ) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park [18], comme on peut passer directement du repère (abc) vers le repère (dq).

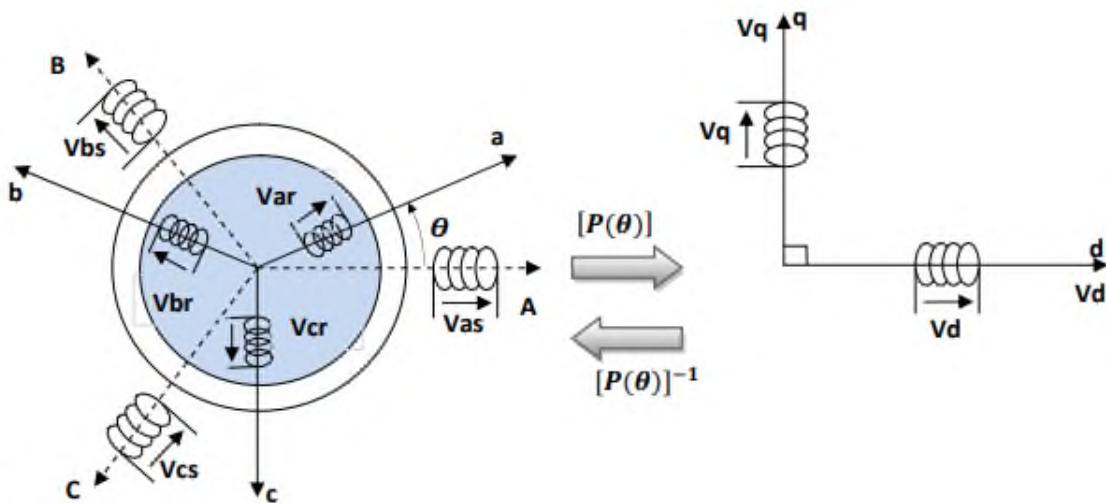


Figure 2.9 : Passage du triphasé au biphasé et l'inverse

La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & C(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Cette matrice permet le passage des composantes  $X_{abc}$  du système triphasé aux composantes biphasées; avec  $X_{abc}$  peut être : un vecteur de tension, courant ou flux.

### 2.4.4 Application de la GADA dans repère biphasé (dq)

#### ✓ Equations électriques

En multipliant les systèmes des équations (2.24) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (2.28)$$

### ✓ Equations magnétiques

En multipliant les systèmes des équations (2.25) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (2.29)$$

Des deux systèmes des équations (2.28) et (2.29) on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + M \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_s L_s I_{qs} - \omega_s M I_{qr} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + M \frac{dI_{dr}}{dt} + \omega_s L_s I_{ds} + \omega_s M I_{dr} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_s L_r I_{qr} - \omega_s M I_{qs} + \omega L_r I_{qr} + \omega M I_{qs} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} + \omega_s L_r I_{dr} + \omega_s M I_{ds} - \omega L_r I_{dr} + \omega M I_{ds} \end{cases} \quad (2.30)$$

Ce système d'équation (2.30) se traduit sous la forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qr} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

## 2.4.5 Expression de la puissance active et réactive

Connaissant les tensions  $V_s$  et  $V_r$ , la puissance active et réactive au stator est définie par :

$$\begin{cases} V_s = V_{ds} + jV_{qs} \\ V_r = V_{dr} + jV_{qr} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} P_s = R_e([V_s][I_s]) \\ Q_s = I_m([V_s][I_s]) \end{cases} \quad (2.32)$$

Du système de l'équation (2.30) on obtient :

- Stator

$$\begin{cases} P_s = V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs} \\ Q_s = V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs} \end{cases} \quad (2.33)$$

- Rotor

$$\begin{cases} P_r = V_{dr}I_{dr} + V_{qr}I_{qr} \\ Q_r = V_{qr}I_{dr} - V_{dr}I_{qr} \end{cases} \quad (2.34)$$

La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques (équation 2.33) en fonction des grandeurs d'axes (dq) est donnée par l'expression suivante :

$$P_s = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \quad (2.35)$$

$$P_s = \left( R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \right) I_{ds} + \left( R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \right) I_{qs} \quad (2.36)$$

$$P_s = R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + \left( \frac{d\varphi_{ds}}{dt} I_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} I_{qs} \right) + \omega_s (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (2.37)$$

Cette puissance se décompose en trois termes :

1) Puissance dissipée en pertes joules :

$$P_j = R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) \quad (2.38)$$

2) Puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source :

$$P_s = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} I_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} I_{qs} \quad (2.39)$$

3) Puissance mécanique :

$$P_m = \omega_s (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (2.40)$$

### 2.4.6 Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = \frac{P_m}{\Omega_s}; \quad \Omega_s = \frac{\omega_s}{p}; \quad C_{em} = p \frac{P_m}{\omega_s}$$

$$C_{em} = p (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (2.41)$$

$$C_{em} = pM(I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) \quad (2.42)$$

La fréquence de la tension statorique étant imposée par le réseau électrique, la pulsation des courants rotériques est donnée par :

$$\omega_r = \omega_s - p\Omega \quad (2.43)$$

$\omega_s$  et  $\omega_r$  représentent respectivement les pulsations des tensions statoriques et rotoriques en rad/s.

### 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les deux parties essentielles qui constituent le système de conversion de l'éolienne. La première partie mécanique, qui se compose de la turbine, du multiplicateur et de l'arbre de la GADA. La deuxième partie électrique, où nous nous sommes intéressés à la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation.

## Commande vectorielle de la GADA

---

---

3.1	Introduction.....	31
3.2	Stratégie de commande de la GADA .....	31
3.3	Commande vectorielle de la GADA.....	34
3.3.1	Commande directe.....	34
3.3.2	Modélisation de l'onduleur à commande MLI.....	35
3.4	Résultat de simulation.....	41
3.5	Conclusion.....	50

### 3.1 Introduction

L'intérêt de l'utilisation de la MADA, outre la taille du convertisseur, est de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique de puissance optimale de l'éolienne. Les études effectuées [5] montrent que pour chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de rotation optimale (correspondant à la valeur maximale du coefficient de puissance) permettant à l'éolienne d'avoir le meilleur rendement possible. Donc, pour pouvoir tourner à cette vitesse optimale, à vitesse de vent donné, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné, c'est à dire une puissance active débitée par la MADA. C'est en utilisant cette référence de puissance que la machine peut être commandée. Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour la GADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. L'objectif principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatif est d'améliorer leur comportement statique et dynamique, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu.

### 3.2 Stratégie de commande de la GADA

L'objectif de notre travail est de contrôler indépendamment les puissances active et réactive en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions et des courants rotoriques générées par un onduleur, aux puissances active et réactive statoriques. En choisissant un référentiel diphasé d-q lié au champ tournant statorique, et en alignant le vecteur flux statorique  $\varphi_s$  avec l'axe d, comme il est illustré sur la figure 3.1, l'orientation du flux statorique, d'où nous pouvons écrire :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \quad \text{Et} \quad \varphi_{qs} = 0 \quad (3.1)$$

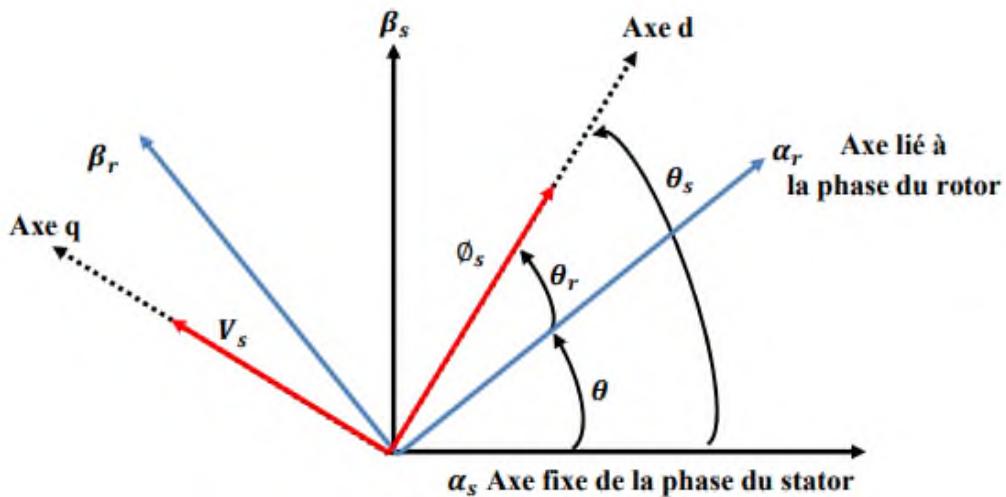


Figure 3.1 : L'orientation du flux statorique

Prenons l'une des quatre expressions du couple électromagnétique trouvées dans le chapitre précédent, par exemple l'équation suivante:

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (I_{qr}\varphi_{ds} - I_{dr}\varphi_{qs}) \quad (3.2)$$

Le couple électromagnétique de l'équation (3.2) s'écrit alors:

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} I_{qr}\varphi_{ds} \quad (3.3)$$

Et l'équation (3.1) des flux devient:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (3.4)$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple  $V_s$ , cela conduit à un flux statorique  $\varphi_s$  constant. Cette considération associée à l'équation (3.3) montre que le couple électromagnétique  $C_{em}$  est directement proportionnel au courant rotorique en quadrature  $I_{qr}$ . On peut écrire aussi :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (3.5)$$

Avec  $\omega_s$  est la pulsation électrique des grandeurs statoriques.

Si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient:

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (3.6)$$

A l'aide de l'équation (3.4), les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques peuvent s'écrire par :

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (3.7)$$

A partir des équations (3.6) et (3.7), nous obtenons, pour le flux statorique, l'expression suivante:

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (3.8)$$

D'après l'équation (3.8) les puissances actives et réactives statoriques sont données par:

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (3.9)$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace dans l'équation 3.9 les courants par leurs expressions donnés par l'équation (3.7), d'où on obtient :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (3.10)$$

Si l'on considère l'inductance magnétisante M constante, on remarque que l'équation (3.10) fait apparaître que la puissance active  $P_s$  statorique est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature  $I_{qr}$ . De plus, la puissance réactive  $Q_s$  est proportionnelle au courant rotorique direct  $I_{dr}$ , à une constante près  $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$ .

En remplaçant dans l'équation des flux (2 .29) les courants statoriques par l'expression (3.7), on obtient :

$$\begin{aligned} \varphi_{dr} &= \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} \frac{MV_s}{L_s \omega_s} \\ \varphi_{dr} &= \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} \end{aligned} \quad (3.11)$$

En introduisant les expressions des flux rotoriques de l'équation (3.11) dans les équations des tensions rotoriques du système (3.5), on trouve :

$$\begin{aligned} V_{dr} &= R_r I_{dr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} &= R_r I_{qr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{MV_s}{L_s} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Où  $g$  correspond au glissement de la machine asynchrone.

Les équations (3.10), (3.12) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler donné par figure 3.2. Ce schéma, fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques.

Nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné que chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur.

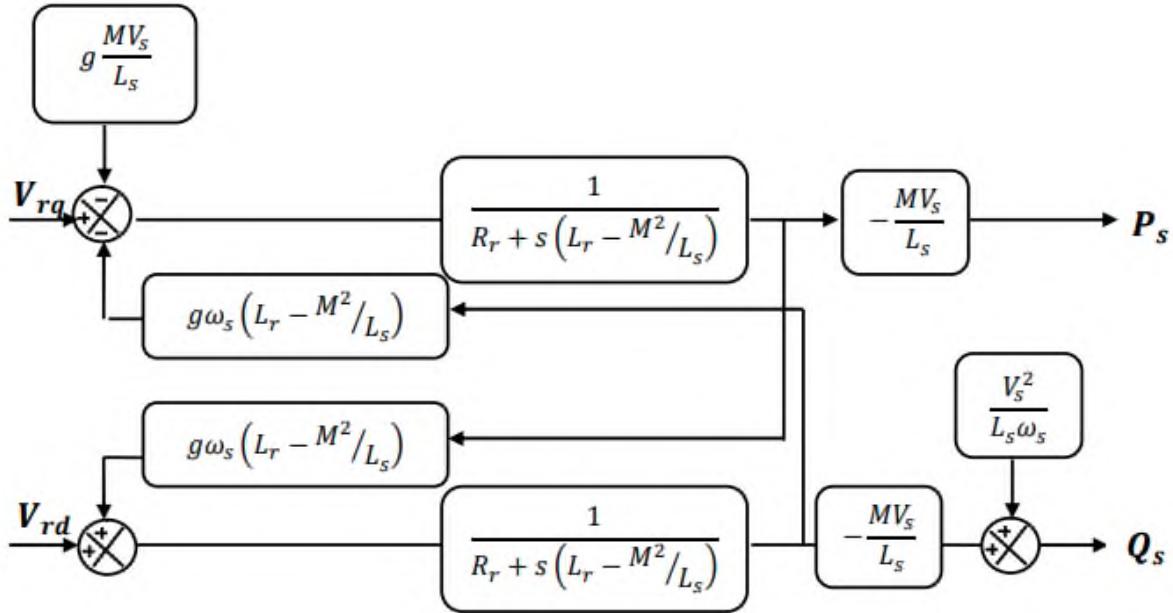


Figure 3.2 : Schéma bloc de la GADA

### 3.3 Commande vectorielle de la GADA

#### 3.3.1 Commande directe

Le principe général de la commande vectorielle en puissances active et réactive est donné par la figure 3.3. La méthode directe consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactive.

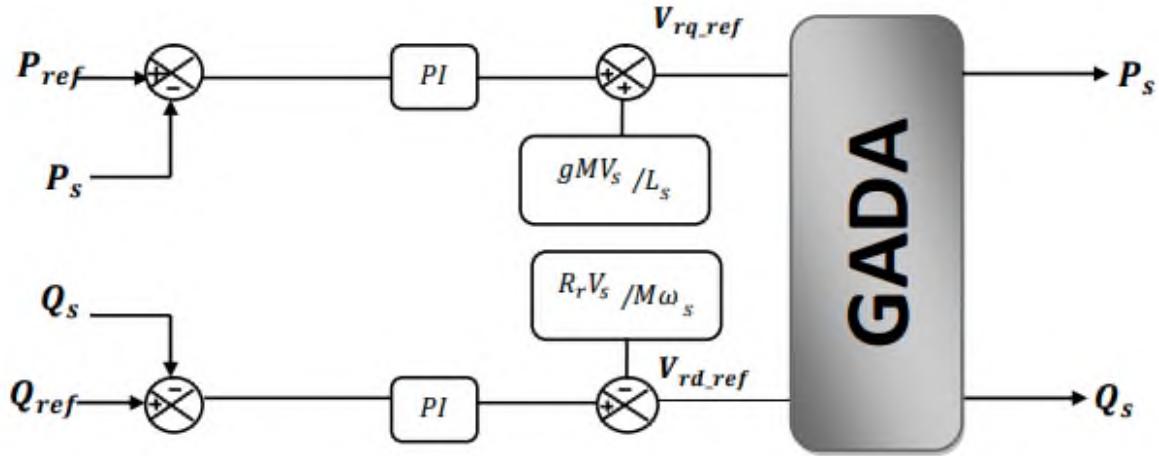


Figure 3.3: Schéma bloc de la commande directe.

Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (3.13)$$

$V_{dr}$  et  $V_{qr}$  Sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la génératrice pour obtenir les courants rotoriques voulus.

Si l'on observe les équations (3.11), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme  $\frac{M V_s}{L_s}$ . L'effet du terme de couplage  $g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$  est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande.

### 3.3.2 Modélisation de l'onduleur à commande MLI

Le but de la commande de l'éolienne est le contrôle des puissances afin qu'elles suivent bien leurs références. Le principe est basé sur la comparaison entre la puissance générée par l'éolienne et la puissance de référence. Il existe deux grandes familles de contrôle :

- Contrôle par modulation de la largeur d'impulsion (MLI).
- Contrôle par hystérésis

Dans ce travail, on a opté pour la commande à MLI. Dans ce cas, l'onduleur est composé de trois bras dont deux interrupteurs par bras chacun comporte un transistor avec une diode antiparallèle, lorsque l'un deux est ouvert l'autre est fermé et inversement, alimentés par une source de tension continue, figure 3.4.

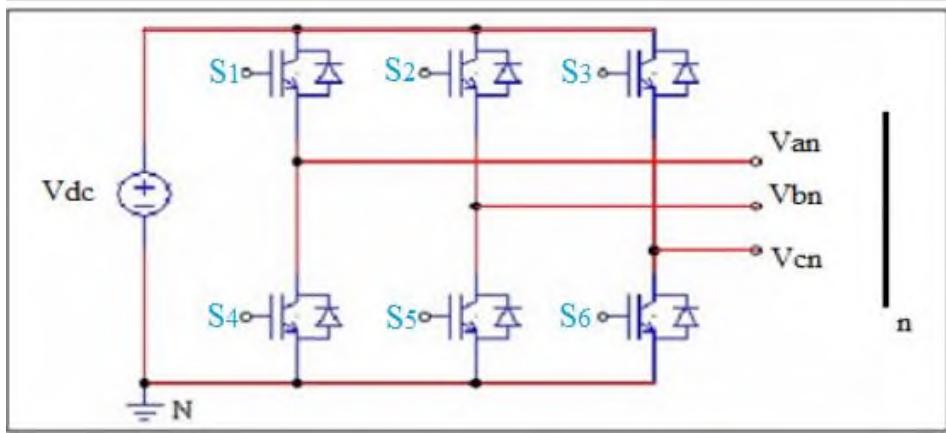


Figure 3.4: Structure d'onduleur de tension triphasée

Les interrupteurs  $S_1$  et  $S_4$ ,  $S_2$  et  $S_5$ ,  $S_3$  et  $S_6$  doivent être complémentaires deux à deux, quel que soit la loi de commande à adopter, il est possible d'établir des relations générales que nous utiliserons pour la commande MLI, quels que soient les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie, cela implique que :

$$1^{er} \text{ bras} \quad \begin{cases} S_1 \rightarrow \text{fermé et } S_4 \rightarrow \text{ouvert} = 1 \\ S_1 \rightarrow \text{ouvert et } S_4 \rightarrow \text{fermé} = 0 \end{cases} \quad S_1 = \bar{S}_4$$

$$2^{eme} \text{ bras} \quad \begin{cases} S_2 \rightarrow \text{fermé et } S_5 \rightarrow \text{ouvert} = 1 \\ S_2 \rightarrow \text{ouvert et } S_5 \rightarrow \text{fermé} = 0 \end{cases} \quad S_2 = \bar{S}_5$$

$$3^{eme} \text{ bras} \quad \begin{cases} S_3 \rightarrow \text{fermé et } S_6 \rightarrow \text{ouvert} = 1 \\ S_3 \rightarrow \text{ouvert et } S_6 \rightarrow \text{fermé} = 0 \end{cases} \quad S_3 = \bar{S}_6$$

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{ds}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{ds}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{ds}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (3.14)$$

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

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (3.15)$$

Ainsi l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulaire sinusoïdale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie.

- Principe de la commande MLI**

Cette technique consiste à imposer aux bornes de la génératrice des créneaux de tensions de manière à ce que la puissance à la sortie de la génératrice soit le plus proche possible de la puissance de référence. Le principe de fonctionnement d'une telle commande est illustré par la figure 3.5.

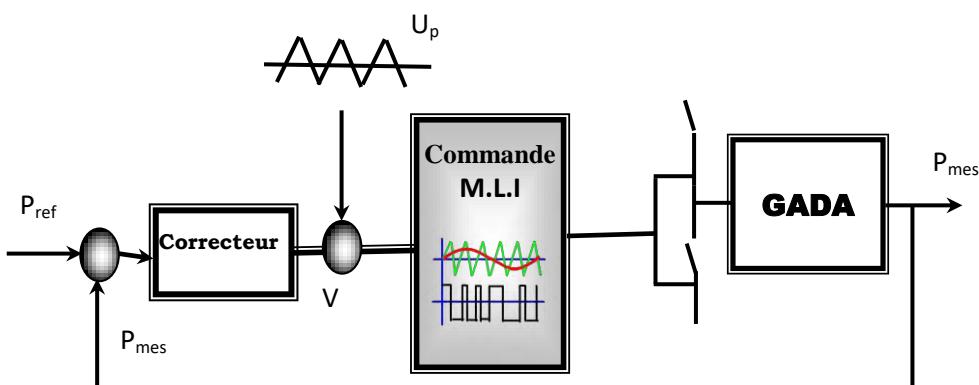


Figure 3.5 : Principe de la commande par MLI

Dans le cas d'une MLI à échantillonnage naturel la modulatrice V issue du régulateur est comparée directement avec le signal triangulaire  $U_p$  de fréquence  $f_p$ , que nous appellerons porteuse. Les trois signaux de commande, sont les images des tensions que l'on souhaite appliquer sur chaque phase. Les signaux logiques C qui en résulte donnent l'ordre de commutation des interrupteurs figure 3.6.

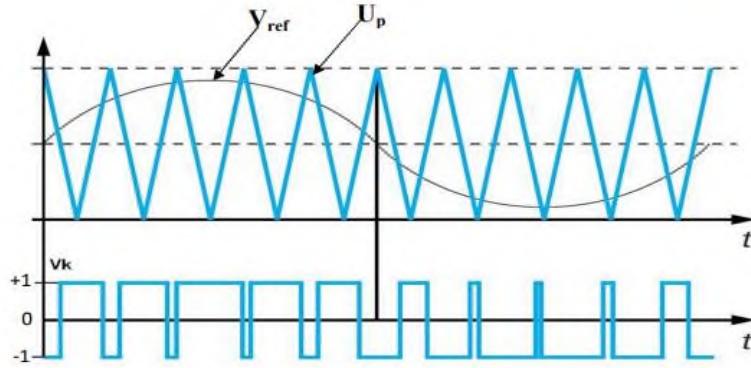


Figure 3.6: Commande des interrupteurs par MLI.

- Les commutations des interrupteurs ont lieu quand on a une égalité du type [18] :

$$V_{ref} = U_p \quad (3.17)$$

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse  $f_p$  sur la fréquence de la tension de référence [19]:

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (3.18)$$

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

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (3.19)$$

## B. Calcul de régulateur

Les régulateurs PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive. Nous allons faire un certain nombre d'hypothèses afin de simplifier le modèle de la machine tel qu'il est représenté sur la figure 3.7, et le modèle simplifié est donné par la figure 3.2.

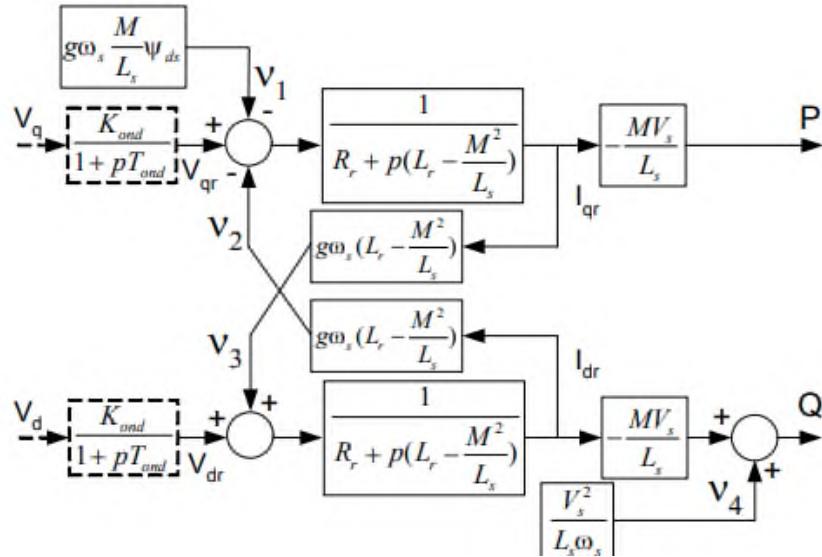


Figure 3.7 : Modèle de la machine avec prise en compte de l'onduleur

La dynamique de l'onduleur est très rapide par rapport à celle de la machine, d'où le modèle de l'onduleur est réduit à son gain statique  $K_{ond}$  ce qui permet de réduire l'ordre du système :

$$\begin{cases} V_{dr} = K_{ond} V_d \\ V_{qr} = K_{ond} V_q \end{cases} \quad (3.20)$$

On introduit deux nouvelles perturbations sur les grandeurs de commande ( $\varepsilon_d \varepsilon_q$ ) qui représentent les résidus de découplage et les perturbations.

Le terme constant  $V_4$  est considéré comme une perturbation qui devra être rejetée par la loi de commande.

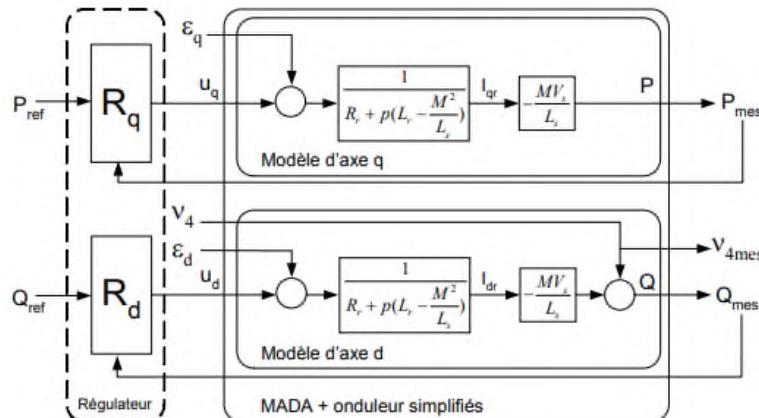


Figure 3.8 : Problème de commande simplifié (contrôle direct)

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (3.21)$$

Dans ce cas, le schéma simplifié de la régulation est représenté à la figure 3.9, en utilisant un régulateur PI.

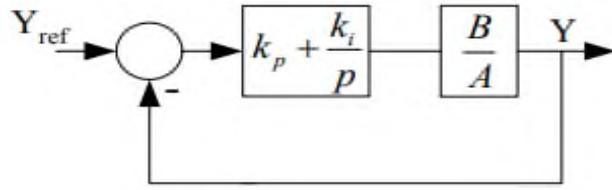


Figure 3.9 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI

La fonction de transfert  $K_p + \frac{K_i}{P}$  correspond aux régulateurs  $R_q$  et  $R_d$  de la figure 3.9. Les valeurs de A et B sont :

$$A = L_s R_r + P L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \text{ Et } B = M V_s \quad (3.22)$$

Pour les axes d et q, la fonction de transfert en boucle ouverte intégrant les régulateurs est :

$$FTBO = \frac{\frac{p+K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{M V_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (3.23)$$

Afin d'éliminer le zéro présente sur la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (3.24)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$FTBO = \frac{\frac{K_p \frac{M V_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{P}}{P} \quad (3.25)$$

Les termes  $K_p$  et  $K_i$  sont alors exprimés en fonction de ce temps de réponse et des paramètres de la machine :

$$K_p = \frac{1}{5.10^{-3}} \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M V_s} \quad (3.26)$$

$$K_i = \frac{1}{5.10^{-3}} \frac{L_s^2 R_r (L_r - \frac{M^2}{L_s})}{M V_s L_s (L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (3.27)$$

### 3.4 Résultat de simulation

Dans cette partie, nous avons simulé la chaîne de conversion de l'énergie électrique produite par l'éolienne en utilisant le logiciel MATLAB/ SIMULINK. Les résultats de simulation présenter sur les figures ci-dessous, nous permet de présenter les performances de la conduite de la GADA alimentée par un onduleur à deux niveaux commandée par la stratégie triangulo-sinusoïdale. Comme le montre la figure 3.10.

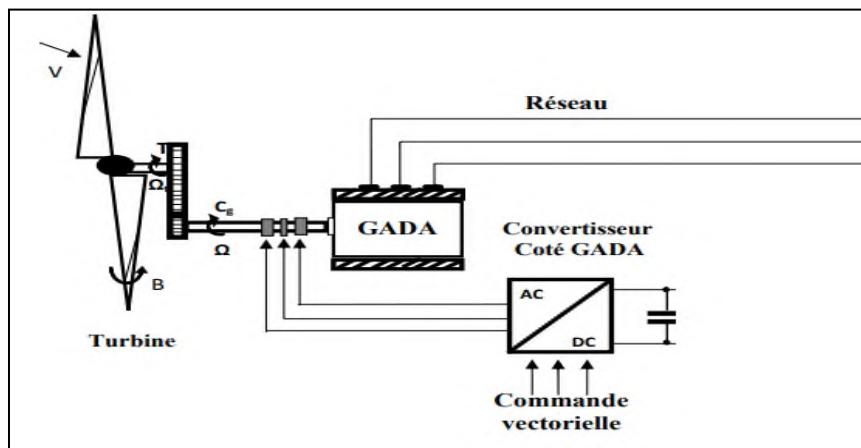


Figure 3.10 : Chaîne de conversion de l'énergie éolienne

Les résultats obtenus montrent que la commande vectorielle permet de découpler les expressions de la puissance actives et réactives du générateur. Dans ce cadre, plusieurs 3 cas de simulation sont considérés.

#### - Cas 1 : Profile de vitesse du vent constant

Nous avons simulé notre système pour profil de vent constant donné par la figure 3.10. La figure 3.11 représente la vitesse du rotor. Les figures 3.12 et 3.13 montrent respectivement la puissance active et puissance réactive délivrées par la GADA. Ces puissances suivent bien leurs références. Ceci est dû au contrôle des composantes en quadrature et directe du courant de la GADA. À la différence de la commande vectorielle, le courant du stator n'est pas régulé.

Les Figures 3.14 et 3.15 représentent les courants statorique débités par GADA et qui sont sinusoïdaux avec une fréquence de 50Hz.

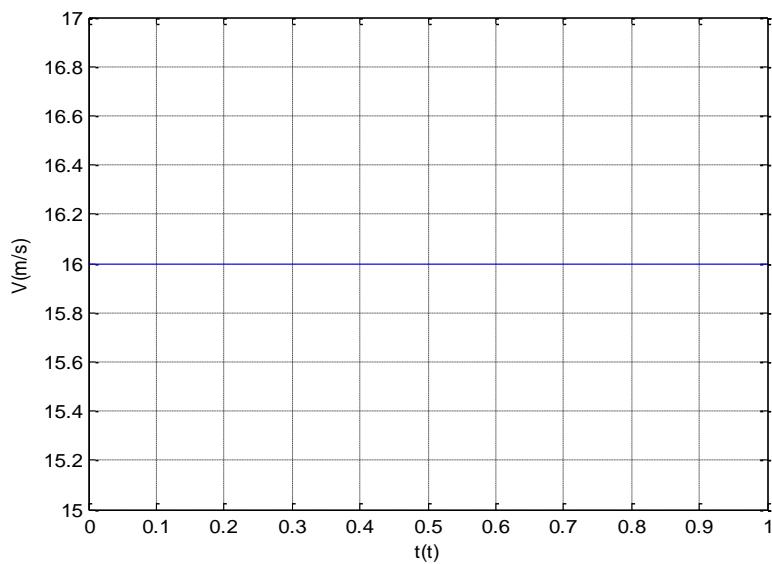


Figure 3.10 : Vitesse du Vent

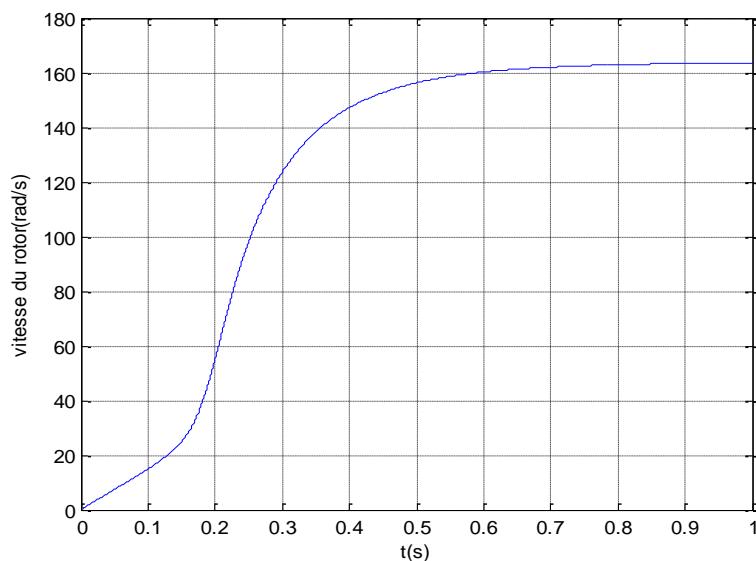


Figure 3.11 : Vitesse du rotor (générateur)

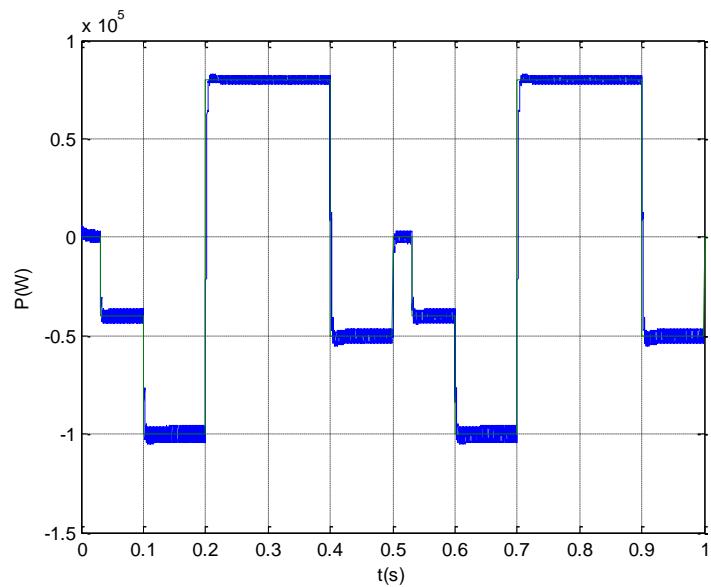


Figure 3.12 : Puissance active statorique

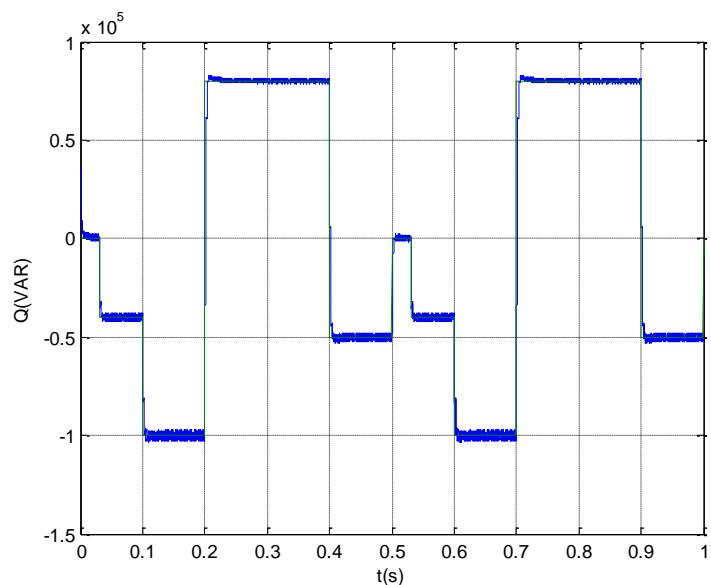


Figure 3.13 : Puissance réactive statorique

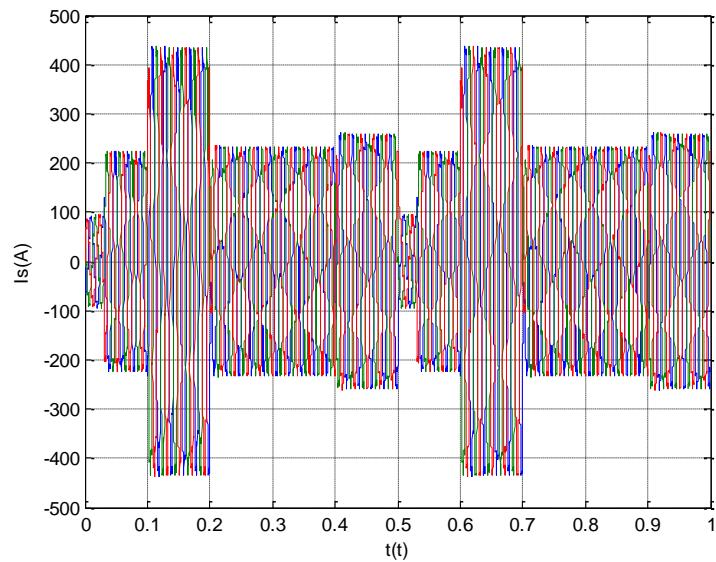


Figure 3.14 : Courants statoriques débités par GADA

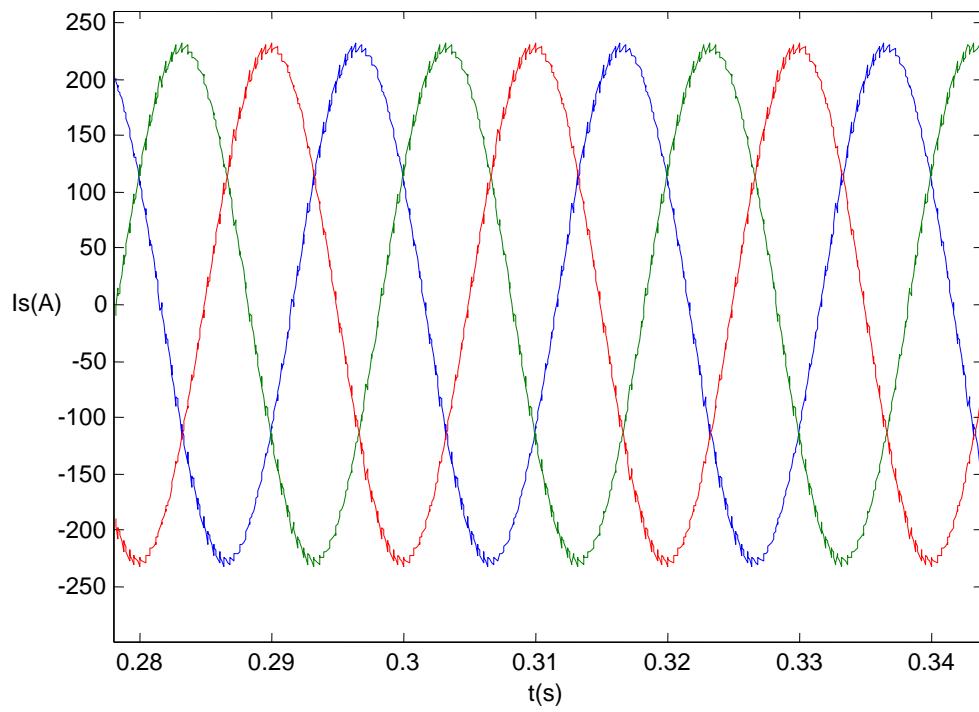


Figure 3.15 : Courants statoriques avec un zoom entre 0.28 ms et 0.34ms

**- Cas 2 : Profil de vent à vitesse variable**

Nous avons simulé notre système pour profil de vent variable donné par la figure 3.16 et la figure 3.17 représente la vitesse mécanique. Les figures 3.18 et 3.20 montrent respectivement la puissance active et puissance réactive délivrées par la GADA. Dans ce cas aussi, les puissances suivent bien leurs références correspondantes, comme le confirme la figure 3.19. Ceci est dû au contrôle des composantes en quadrature et directe du courant de la GADA. Les Figures 3.21 et 3.22 représentent les courants statorique.

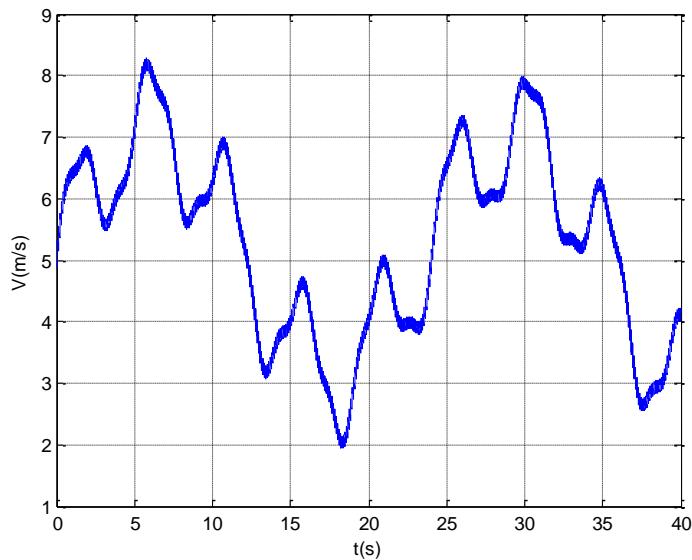


Figure 3.16 : Profil du vent appliqué

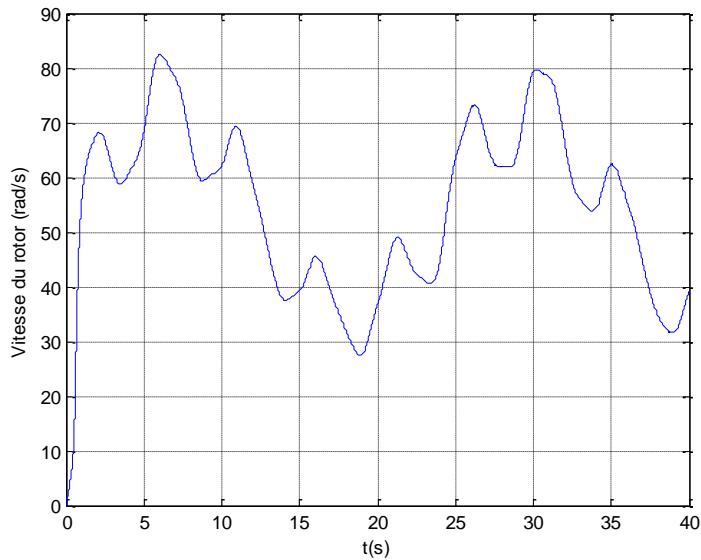


Figure 3.17 : Vitesse mécanique

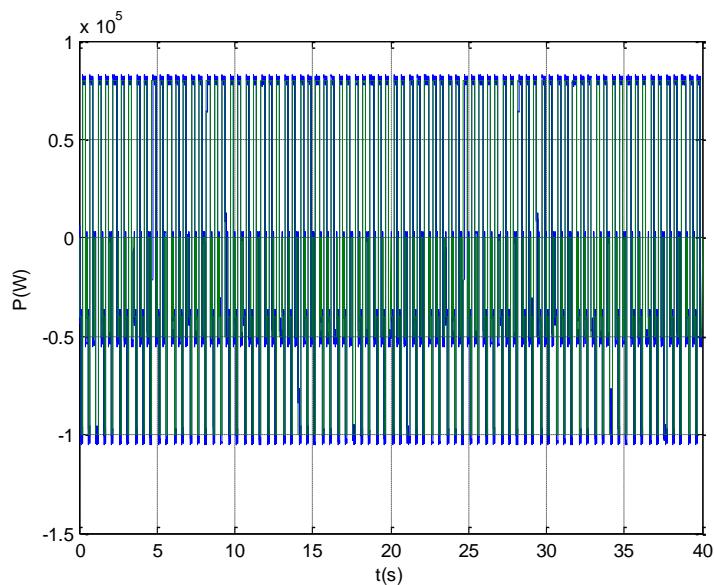


Figure 3.18 : Puissance active au niveau du stator

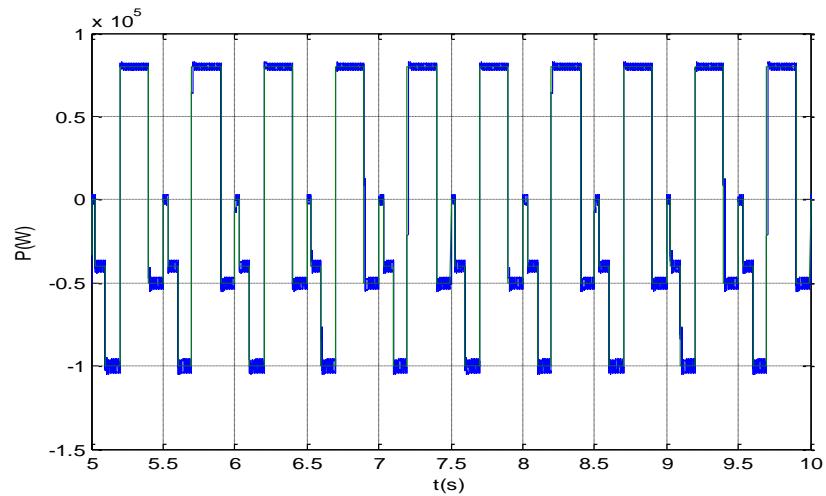


Figure 3.19 : Puissance active avec un zoom

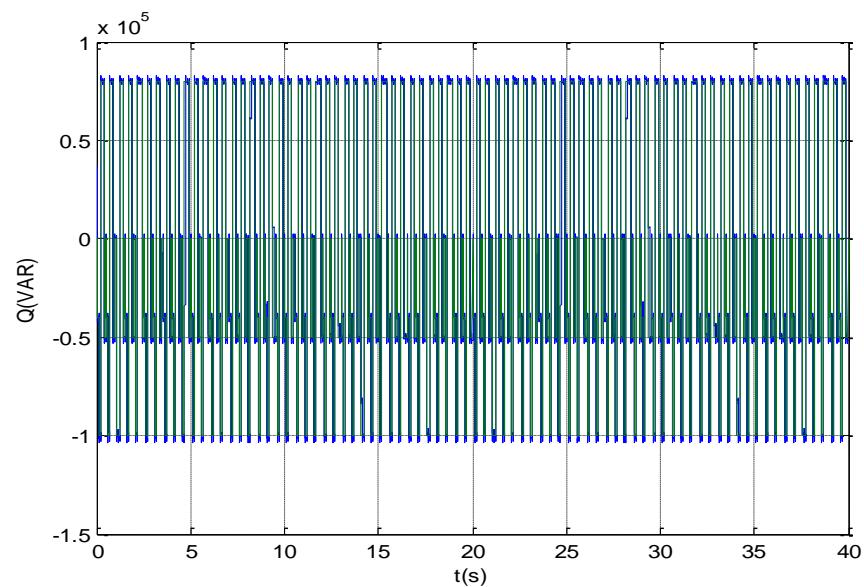


Figure 3.20 : Puissance réactive au niveau du stator

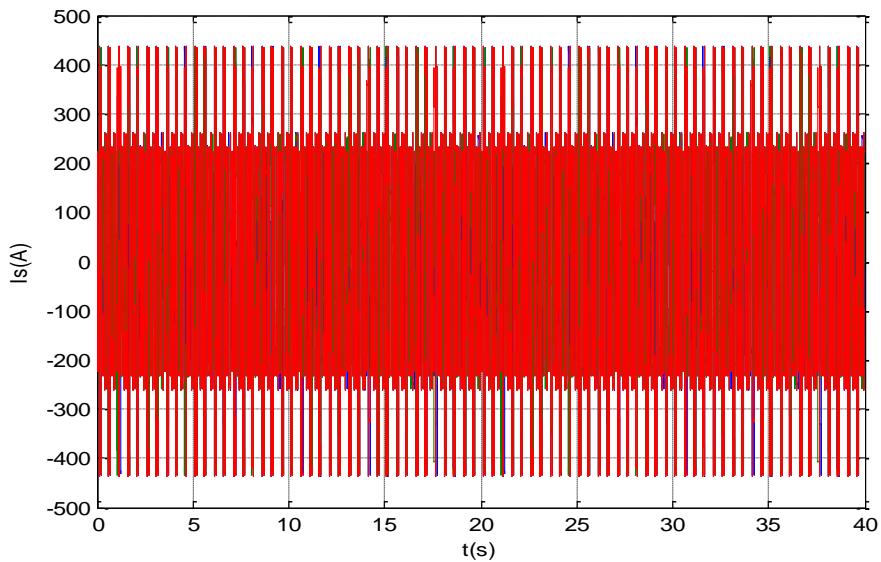


Figure 3.21 : Courants statoriques

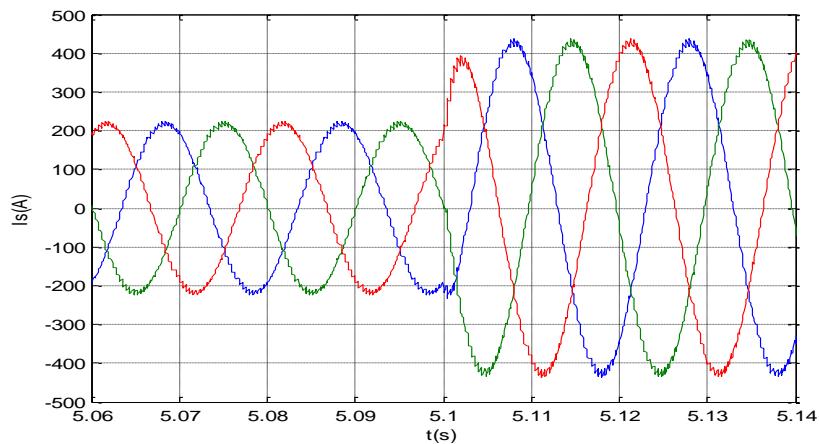


Figure 3.22 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom

- **Cas 3: Profil de vent à vitesse variable avec une référence puissance réactive nulle.**

Nous avons simulé notre système pour profil de vent variable donné par la figure 3.23 en imposant la référence de la puissance réactive que la génératrice doit fournir égale à zéro comme le montre la figure 3.25 et une puissance active qui passe de  $-10\text{KW}$  à  $-50\text{KW}$  à  $t=6\text{s}$ , comme illustré par la figure 3.24. Dans ce cas aussi, les puissances délivrées par la GADA suivent leurs références.

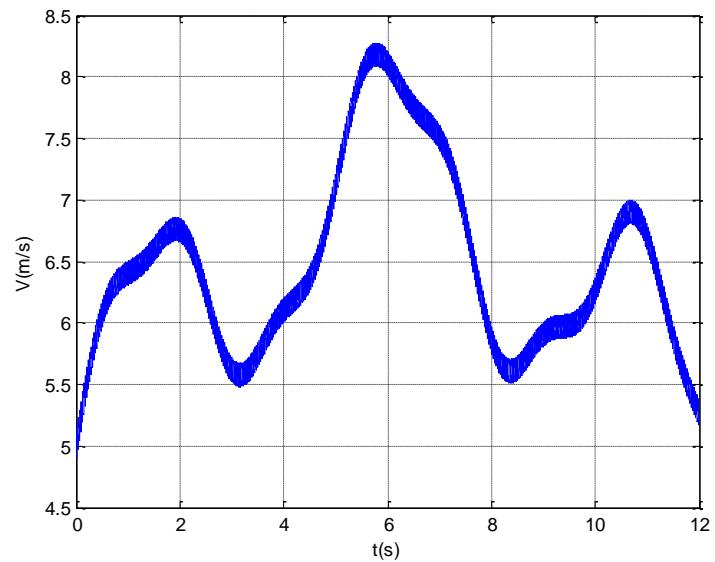


Figure 3.23 : Profile de vent variable

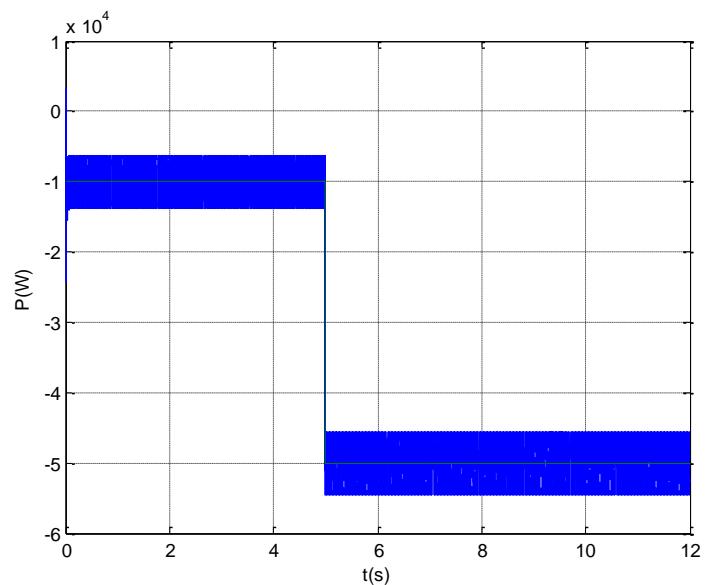


Figure 3.24 : Puissance active délivrée par GADA

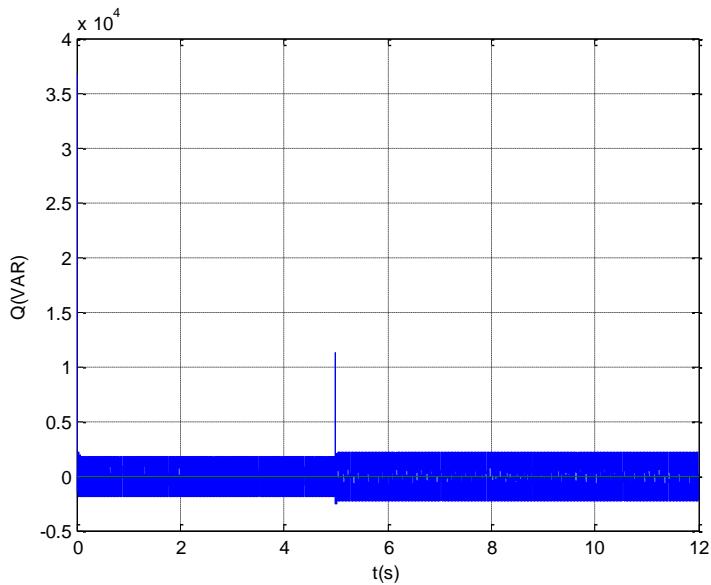


Figure 3.25 : Puissance réactive délivrée par GADA

### 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation et la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne basé sur la machine asynchrone à double alimentation (GADA) en mode générateur. Ainsi, on a représenté une méthode de contrôle vectoriel de la génératrice asynchrone double alimentation GADA, la commande directe.

A partir de la simulation, on a constaté que la commande découplée des puissances active et réactive permet de réguler les puissances active et réactive fournies au réseau selon des consignes de référence bien définies.

# Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire est la modélisation et la simulation d'un système éolien à vitesse variable à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation GADA.

Le premier chapitre rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique, puis différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits. Puis, nous sommes intéressés à la partie commande de l'éolienne. Pour ce faire, la modélisation de la partie mécanique et électrique du system éolien a été établie.

La génératrice asynchrone (GADA), dans notre étude, est destinée pour la production d'énergie électrique, donc il est utile de raisonner en termes de puissances. Pour cela, la commande vectorielle élaborée est à base des puissances active et réactive statoriques. Dans cette optique, nous avons fait l'étude théorique de la commande vectorielle, ou nous avons exprimé les grandeurs statoriques de la GADA en fonction des grandeurs rotoriques ayant pour but le pilotage de la GADA par le rotor. Nous avons établi le modèle de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, qui a été simulé sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats de simulation obtenus montrent le bon suivi des consignes des puissances statoriques "active et réactive", pour deux profils de vent (constant et variable). Ces résultats montrent l'efficacité et les bonnes performances de la commande appliquée.

## Références Bibliographiques

- [1] T.Ackermann, "Wind power in power systems", Wiley, 2005, ISBN 0-470-85508-8
- [2] B.Francois, B.Robyns, E.De Jaeger, F.Mine, "Technologies d'éolienne de forte puissance connectée au réseau de moyenne tension", REF, n°5, mai 2005, pp 65-74.
- [3] Siegfried Heier, "Wind Energy Conversion Systems", Wiley 2006, ISBN 0-470-86899-6.
- [4] A. Davigny, "Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie ", Thèse de doctorat, université de Lille, 2007.
- [5] F.Potier, "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 réseaux", Thèse de doctorat, à l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes. 2003.
- [6] A. BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 2006
- [7] N. KHEZAMI, "Commande multi modèle optimale des éoliennes : Application à la participation des éoliennes au réglage de la fréquence", Thèse de Doctorat, école centrale de Lille, école supérieure des sciences et techniques de Tunis, 2011.
- [8] F. BOUMARAF, "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", thèse de doctorat, université de Batna, 2014.
- [9] A. Ben Amar, "Etude de la commande d'un système éolien base sur une GADA", Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université El-Oued, 2016.
- [10] Y. BEKAKRA, "Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.
- [11] A. BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy. 11/12/2006.
- [12] Rabah Rouas, " Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque ", Thèse De doctorat en génie Electrique, Université Mouloud Mammeri, TIZI-OUZOU 2018.
- [13] L.Van der Hoven, "Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 Cycle per Hour", Journal of Meteorology, 1957, Vol. 14, pp 160-164.

- [14] Henk Polinder,Sjoerd W.H de Haan ,Maxime R.Dubois,Johannes G.(Han) Slootwg, "Basic Operation Principales and Electrical Conversion Systems of Wind Turbines",EPE Journal,Vol.15,n°4, December 2005,pp.43-50.
- [15] S. AIMANI, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de Doctorat, université des sciences et technologies de Lille, 2004.
- [16] Z. TIR, "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [17] H. TAMRABET, "Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d'une Machine Asynchrone", Mémoire de magister, université de Batna, 2006.
- [18] F.Z. TRIA, "Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques", Mémoire de magister, Université d'El- oued, 2013.
- [19] A. BOULAHIA, "Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique", Mémoire de magister, université de Constantine, 2009.

## Annexe 1

**Tableau 1 : Paramètres de la turbine éolienne**

Paramètre	Valeur numérique
Nombre de pales	3
Rayon de l'éolienne	$R = 35.25 \text{ m}$
Densité de l'air	$\rho = 1.22 K_g/m^3$
Gain du multiplicateur de vitesse	$G = 90$
Moment d'inertie de la turbine	$J = 1000 K_g m^{-2}$

**Tableau 2 : Paramètres de la GADA**

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale $P_n$	1.5 MW
Tension nominale statorique $V_s$	398/690 V
Fréquence nominale statorique $F_s$	50 Hz
Resistance statorique $R_s$	0.012 $\Omega$
Resistance rotorique $R_r$	0.021 $\Omega$
Inductance statorique $L_s$	0.0137 H
Inductance rotorique $L_r$	0.0136 H
Inductance mutuelle $M$	0.0135 H
Nombre de pairs de pôles $P$	2
Coefficient de frottement $f$	0.0024 N.m.s <sup>-1</sup>

## Annexe 2

### Synthèse du régulateur PI

Pour réaliser la commande bouclée, on utilise des régulateurs classiques de type PI. Ce type de régulateur résulte de la combinaison harmonieuse de deux actions :

- une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité de la dynamique du système.
- une action intégrale qui permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir (erreur statique).

Le schéma de la figure A montre une partie de notre système bouclé par un régulateur *PI* dont la fonction de transfert est de la forme  $K_p + \frac{K_i}{s}$ . Correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure A.

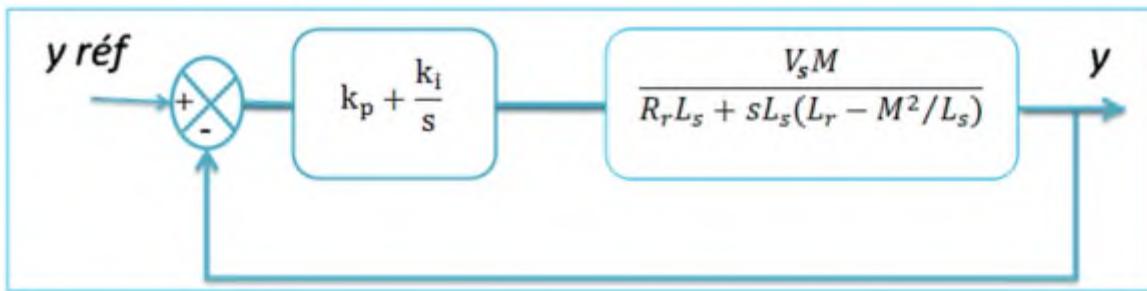


Figure A: Schéma bloc d'un système régulé par un *PI*

La fonction de transfert en boucle ouverte(FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{s}{K_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{s + \frac{(R_r)}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}}$$

Afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}$$

## Annexe

Fonction de transfert en boucle ouverte devient alors

$$FTBO = F_0(t) = \frac{V_s M}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \cdot \frac{\frac{S}{K_p}}{}$$

En boucle fermée, on obtient la fonction de transfert suivante :

$$FTBF = \frac{F_0(t)}{1 + F_0(t)} = \frac{1}{1 + \tau_r S} \quad \text{avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{V_s M}$$

$\tau_r$  est le temps de réponse du système.

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{V_s M} \quad ; \quad K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{V_s M}$$

## **Résumé**

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à la commande de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) introduite dans un système éolien. Le premier chapitre présente l'état de l'art sur les éoliennes, les différentes structures d'alimentation et le type de génératrice utilisée, nous avons opté pour la machine asynchrone à double alimentation pilotée à travers les variables rotoriques. La modélisation de la partie mécanique de l'éolienne et de la machine asynchrone à double alimentation est détaillée dans le deuxième chapitre. Dans le troisième chapitre nous nous sommes concentrés sur le contrôle vectoriel de la génératrice asynchrone à double alimentation GADA. Pour évaluer les performances de la commande étudiée, nous avons effectué plusieurs simulations, qui ont montré l'importance et l'efficacité de la commande proposée.