

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE UNIVERSITE ABDERAHMAN MIRA DE BEJAÏA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# mémoire fin d'étude



**En vue d'obtention du diplôme de master**

**Filière : énergies renouvelables**

**Option: énergies renouvelables en électrotechnique**

**Comm** **Thème :** **cté au**  
**reseau**

**Réalisé par :**

- ❖ Mr. ALLOUACHE Adel
- ❖ Mr. GHOUAR Khaled

**Encadré par :**

Mm. RAHRAH  
Mr. TARAFT

**Promotion 2018/2019**

## *Remerciements*

*Tout d'abord nous tenons à remercier le bon dieu pour nous avoir guidés à bien mener ce travail.*

*Nous tenons à présenter nos plus vifs et chaleureux remerciements à notre promotrice Mme RAHRAH enseignante à l'université de Bejaia, pour son aide, sa disponibilité et son soutien.*

*A Mr TARAFT pour sa disponibilité ainsi que nous avoir fait bénéficier de sa compétence scientifique et nous avoir supporté pendant toute la durée de ce travail.*

*Nous adressons notre reconnaissance à Mr MEBARKI pour ces nombreux conseils judicieux*

*Nous remercions également les membres de jury qui ont bien voulu nous faire l'honneur d'évaluer notre travail.*

*A toute personne qui as contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce modeste travail*

## *Dédicaces*

*Au nom de Dieu le Miséricordieux*

*Je dédie ce travail à :*

*A mes parents :*

*Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.*

*Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.*

*Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.*

*A mon binôme Khaled qui a partagé ce travail avec moi.*

*A Mes deux frères : Rayane et Dhaia-eddine*

*A Mes deux sœurs : Chahinez et serine*

*Mes précieux amis (es) : Toufik , Walid , Farid , Lydia , Zina, Yacine ,Abdelhak*

*A toute la promotion génie électrique 2018/2019.*

*A.ADEL*

## *Dédicaces*

*Au nom de Dieu le Miséricordieux*

*Je dédie ce travail à :*

*A mes parents et ma grand-mère :*

*Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.*

*Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.*

*Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.*

*A mon binôme Adel qui a partagé ce travail avec moi.*

*A Mes deux frères : Chafaa et Mahdi*

*A Mes trois sœurs : Lylia et Anissa ,Fatma*

*Mes précieux amis (es) : Tayeb , Kamel , Yougou , Yacine , Thiziri, Siham, Lydia, Nassim, Balak, Yassine ,Abdou,Ouchene,*

*A toute la promotion génie électrique 2018/2019.*

*G.Khaled*

# Chapitre 1

<b>Figure I.1</b> : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie	5
<b>Figure I.2</b> : Conversion de l'énergie cinétique du vent	5
<b>Figure I.3</b> : Constitution d'une éolienne à axe horizontale	7
<b>Figure I.4</b> : Eolienne à axe vertical de type Savonnions	9
<b>Figure I.5</b> : Eolienne à axe vertical de type Darrieus	10
<b>Figure I.6</b> : les différentes éoliennes à axe horizontales	10
<b>Figure I.7</b> : Les éolienne On shore	11
<b>Figure I.8</b> : Les éoliennes Offshore	11
<b>Figure I.9</b> : Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur	13
<b>Figure I.10</b> : La puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différents vitesses de vent	14
<b>Figure. I.11</b> : Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage	14
<b>Figure I.12</b> : Système éolien basé sur la machine asynchrone à fréquence variable	16
<b>Figure I.13</b> : Système éolien basé sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné avec réglage électronique du glissement (fonctionnement à vitesse variable).	16
<b>Figure I.14</b> : système éolien basé sur une machine synchrone à rotor bobiné	17
<b>Figure I.15</b> : Système éolien basé sur une MSAP couplé au réseau	18
<b>Figure I.16</b> : GSAP à flux radial	19
<b>Figure I.17</b> : GSAP à flux axial	19
<b>Figure I.18</b> : GSAP à flux tangentiel	19

# Chapitre 2

<b>Figure II.1</b> Schéma de la turbine éolienne	20
<b>Figure II.2</b> : Schéma bloc de la simulation de la turbine éolienne avec asservissement de vitesse	22
<b>Figure II.3</b> : Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents dans le repère triphasé	24

## Liste des figures

---

<b>Figure II.4</b> Enroulements de la génératrice synchrone suivant le système d'axe (dq)	24
<b>Figure II.5</b> Schéma de Principe d'autopilotage d'une Machine Synchrone	26
<b>Figure II.6</b> Redresseur MLI et Onduleur MLI	27
<b>Figure II.7</b> Redresseur MLI	27
<b>Figure II.8</b> Onduleur MLI	29
<b>Figure II.9</b> Schéma de principe de MLI sinus_triangle.	30
<b>Figure II.10</b> Schéma électrique du bus continu	31
<b>Figure II.11</b> Schéma électrique du filtre	32
<b>Figure II.12</b> Circuits équivalents du filtre dans le repère de Park	34

## Chapitre 3

<b>Figure III.1</b> : Principe de la commande vectorielle	37
<b>Figure III.2</b> : Modèle de la MSAP quand id est nul	37
<b>Figure III.3</b> Description des couplages	38
<b>Figure III.4</b> Découplage par compensation	39
<b>Figure III.5</b> Commande découplée	39
<b>Figure III.6</b> Représentation de la commande par PI	40
<b>Figure III.7</b> commande des courants en deux boucles indépendantes	41
<b>Figure III.8</b> : Boucle de régulation de vitesse	44

## Chapitre 4

<b>Figure IV.1</b> Le schéma global de la commande vectorielle avec régulateur PI	46
<b>Figure IV.2</b> profil du vent	47
<b>Figure IV.3</b> $C_p$ en fonction du temps	47
<b>Figure IV.4</b> $\lambda_{opt}$ en fonction du temps	47
<b>Figure IV.5</b> $C_p$ en fonction de $\lambda_{opt}$	48
<b>Figure IV.6</b> Puissance de la turbine	48
<b>Figure IV.7</b> Couple électromagnétique	48

## Liste des figures

---

<i>Figure IV.8</i>	<i>Couple résistant</i>	49
<i>Figure IV.9</i>	<i>Vitesse de rotation de la MSAP et sa référence</i>	49
<i>Figure IV.10</i>	<i>Puissance électrique</i>	49
<i>Figure IV.11</i>	<i>Courant mesuré <math>i_d</math> et référence <math>i_{dref}</math></i>	50
<i>Figure IV.12</i>	<i>Courant mesuré <math>i_q</math> et référence <math>i_{qref}</math></i>	50
<i>Figure IV.13</i>	<i>Courant statorique et la tension de l'onduleur</i>	50

## INDEX DES NOTATIONS

$P_v$ :	La puissance du vent ou la puissance éolienne [W]
$\rho$ :	Densité de l'air [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]
$S$ :	surface circulaire balayée par la turbine [ $\text{m}^2$ ]
$V_v$ :	vitesse du vent [m/s]
$P_t$ :	La puissance aérodynamique [W]
$C_p$ :	Le coefficient de puissance
$\lambda$ :	Rapport de vitesse
$\beta$ :	L'angle de l'orientation des pales [rad]
$\Omega_{\text{turbine}}$ :	La vitesse de la turbine [rad/s]
$R$ :	Le rayon de la turbine [m]
$C_t$ :	Le couple de la turbine [N.m]
$J_{\text{turbine}}$ :	L'inertie de la turbine [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]
$J_g$ :	L'inertie de la génératrice [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]
$f$ :	Coefficient de frottements visqueux [ $\text{N.m} \cdot \text{s}/\text{rd}$ ]
$P_{\text{elec}}$ :	Puissance électrique [W]
$\lambda_{\text{opt}}$ :	La vitesse spécifique optimale
PI :	Correcteur Proportionnel intégrale
$V_a, V_b, V_c$ :	Tensions de phase statoriques dans l'axe (a, b, c) [V].
$i_a, i_b, i_c$ :	Courants de phase statoriques dans l'axe (a, b, c) [A].
$\phi_a, \phi_b, \phi_c$ :	Flux de phases statoriques dans l'axe (a, b, c) [Wb].



$\Omega$ :	La vitesse angulaire mécanique rotorique [rad/s].
$\theta$ :	Angle entre le stator et le rotor [rad].
$d, q$ :	Indices du repère Park biphasé.
$\phi_d, \phi_q$ :	Flux dans les axes (d, q)[Wb].
$\phi_{sf}$ :	Flux induction produit par aimant permanent [Wb].
$R_s$ :	Résistance de l'enroulement statorique [ $\Omega$ ].
$V_d, V_q$ :	Tensions de phase statoriques dans l'axe (d, q) [V].
$i_d, i_q$ :	Courants dans l'axe (d, q) [A].
$L_d$ :	Inductance statorique directe [H].
$L_q$ :	Inductance statorique quadrature [H].
$[P(\theta)]$ :	Matrice de la transformation de Park.
$[P(\theta)]^{-1}$ :	Matrice inverse de Park.
$C_{em}$ :	Couple électromagnétique produit par la génératrice [N.m].
$C_r$ :	Couple résistant [N.m].
$S_1, S_2, S_3$ :	Etat de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.
$S_7, S_8, S_9$ :	Etat de commutation des interrupteurs du l'onduleur MLI
$V_1, V_{2,3}$ :	Tensions d'entrée entre phases du redresseur [V]
$V_{1,2}, V_3$ :	Tensions d'entrée entre phases du l'onduleur [V]
$m$ :	Indice de modalisation
$f_m$ :	Fréquence de la référence [Hz]
$f_p$ :	Fréquence de la porteuse [Hz]
$P$ :	Nombre de paire de pole.

$i_{dc}$ :	Courant redressée [A]
$V_{dc}$ :	Tension redressé [V]
$K_t$ :	Une constante
$V_{dref}, V_{qref}$ :	Tensions de référence [V].
$i_{dref}, i_{qref}$ :	Courants de référence [A].
$\Omega_{mec}$ :	Vitesse de rotation de la machine [rad/s].
$\omega$ :	Pulsation de fréquence rotorique [rad/s].
$e_d, e_q$ :	Composantes de la force électromotrice de compensation.
$S$ :	Operateur de Laplace.
$K_i, K_p$ :	Actions proportionnelle et intégrale.
$T_d$ :	Constante de temps électrique relative à l'axe d.
$T_q$ :	Constante de temps électrique relative à l'axe q.
$\tau$ :	Constante du temps électrique.
$I_{red}$ :	Courant fourni par la génératrice et modulé par le convertisseur MLI <sub>1</sub> [A].
$I_{ond}$ :	Courant modulé par le convertisseur MLI <sub>2</sub> [A].
$u_{cap}$ :	Tension aux bornes du condensateur [V].
$u_{cap-ref}$ :	Tension de référence du condensateur [V].
$C$ :	Capacité totale du condensateur
$R_t$ :	Résistance du filtre[Ω].
$L_t$ :	Inductance du filtre [H]
FTBO :	Fonction de transfert en boucle ouverte.
FTBF :	Fonction de transfert en boucle fermée.
MCC :	Machine à courant continu.
IGBT:	Insulated Gate Bipolar Transistor.

MSAP :	Machine synchrone à aimants permanents.
GSAP :	Génératrice synchrone aimants permanents.
MAS :	Machine asynchrone.
MADA :	Machine asynchrone à double alimentation.
MLI :	Modulation de largeur d'impulsion.
MPPT:	Max Power Point Tracking.

# SOMMAIRE

---

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## **Chapitre I Généralités sur la production éolienne**

I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique .....	3
I.3. L'énergie éolienne en quelques chiffres.....	4
I.3.1. Gisement éolien en Algérie.....	4
I.3.2. Potentiel éolien en Algérie.....	4
I.4. Définition de l'énergie éolienne.....	5
I.5. Constitution d'une éolienne .....	6
I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	7
I.6.1. Avantages.....	7
I.6.2. Inconvénients .....	8
I.7. Les différents types d'éoliennes.....	8
I.7.1. Les éoliennes à axe vertical .....	8
I.7.2. Les Eoliennes à axe horizontale.....	10
I.7.2.1. Eolienne a vitesse constante.....	11
I.7.2.2. Eoliennes a vitesse variable .....	12
I.8. Principe de conversion d'énergie .....	12
I.8.1. Conversion en énergie mécanique.....	13
I.9. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens .....	14
I.9.1. Systèmes non couplés au réseau alternatif.....	14
I.9.2. Systèmes couplés au réseau alternatif .....	15
I.9.2.1. Machine asynchrone à cage .....	15
I.9.2.2. Machine asynchrone à double alimentation.....	16
I.9.2.3. Machines synchrones.....	17
I.10. Motif de choix de la génératrice (GSAP) pour une éolienne.....	18
I.11. Conclusion .....	19

## **Chapitre II Modélisation du système de conversion éolien étudié**

II.1. Introduction .....	20
II.2. Modélisation de la turbine .....	20
II.3. Technique d'extraction du maximum de la puissance .....	21
II.4. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse .....	22
II.5. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	23

# SOMMAIRE

---

II.6. Principe de l'autopilotage des machines synchrones .....	26
II.7. Modélisation d'interface d'électronique de puissance (redresseur, onduleur, bus continu) .....	27
II.7.1. Modélisation de redresseur .....	27
II.7.2. Modélisation de l'Onduleur .....	28
II.7.3. Commande par modulation sinus-triangle.....	30
II.8. Modélisation de la liaison au réseau .....	31
II.8.1. Modélisation du bus continu .....	31
II.8.2. Modélisation du filtre .....	32
II.8.2.1. Modélisation du filtre dans le repère naturel .....	32
II.8.2.2. Modélisation du filtre dans le repère de Park .....	33
II.9. Conclusion.....	34

## **Chapitre III Commande vectorielle de la MSAP**

III.1. Introduction .....	35
III.2. Principe de la commande vectorielle .....	35
III.3. Technique de découplage .....	36
III.4. Découplage par compensation.....	37
III.5. Avantages et inconvénients de la commande vectorielle.....	40
III.5.1. Avantages de la commande vectorielle.....	40
III.5.2. Inconvénients de la commande vectorielle.....	40
III.6. Régulation .....	40
III.6.1. Conception des Régulateurs .....	40
III.6.1.1. Action Proportionnelle(Kp).....	41
III.6.1.2. Action Intégrale (Ki) .....	41
III.6.2. Calcul des Régulateurs.....	41
III.6.2.1. Régulateur des Courants.....	41
III.6.2.2. Calcul du Régulateur de vitesse.....	43
III.7. Conclusion.....	45

## **Chapitre IV Résultats de simulation et interprétations**

IV.1. Introduction.....	46
IV.2. Simulation du système global étudié.....	46
IV.3. Résultats de simulation et interprétations .....	46

## SOMMAIRE

---

IV.4. Conclusion .....	51
Conclusion générale .....	52
Références bibliographiques.....	53
Annexes .....	57

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

Actuellement, l'énergie que nous consommons, pour nous chauffer, nous déplacer, provient principalement du combustible fossile et du nucléaire [1]. Or, outre le fait que ces combustibles fossiles s'épuisent et que les déchets nucléaires posent problème, une grande partie des gaz à effets de serre sont constituées de  $CO_2$  et d'origine énergétique.

Pour répondre aux questions de sécurité d'approvisionnement énergétique, d'émissions atmosphériques polluantes mais aussi de valorisation des ressources locales et de création d'emploi, les énergies renouvelables présentent une grande opportunité, elles sont inépuisables dont nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement. Même si certaines technologies restent coûteuses et des questions comme le raccordement au réseau et le stockage d'énergie ne sont pas entièrement résolues, les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches et développements plus approfondis visant à viabiliser ; baisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et d'augmenter l'efficacité énergétique [2].

Étant donné un aperçu général sur les énergies renouvelables, notre étude sera dédiée à l'énergie éolienne qui semble l'une des plus prometteuses avec un taux de croissance européen et mondial très élevé, alors qu'elle fut complètement négligée pendant l'ère industrielle, au profit quasi exclusif, si l'on excepte l'hydro-électricité et des énergies fossiles.

Parmi les applications potentielles de l'éolienne, on peut citer le domaine de l'électrification rurale pour une consommation locale d'électricité ou pour sa transformation vers d'autres vecteurs énergétiques [3] : pompage, traitement de l'eau, l'électrolyse de l'eau et stockage d'hydrogène à plus long terme. Au-delà de ces réseaux isolés, on parle aussi aujourd'hui d'intégration des énergies renouvelables en site urbain.

Tout convertisseur électromécanique peut être utilisé pour produire de l'énergie. En règle générale, pour les éoliennes de forte puissance, il s'agit d'une génératrice synchrone ou asynchrone [4]. Mais pour un aérogénérateur, servant à la charge de batteries par exemple, on peut utiliser une génératrice à courant continu [5].

Les générateurs synchrones sont de type des machines qui sont utilisés dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrale thermique, hydraulique ou nucléaire). Lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau [5]. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les

## Introduction Générale

---

fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance [1]. Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faible vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine.

Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance.

Ce mémoire présente l'étude d'une chaîne de conversion électrique par énergie éolienne. Cette chaîne sera connectée au réseau à travers un dispositif électrique.

Pour réaliser ce travail, notre mémoire sera structuré en quatre chapitres comme suit:

Dans le premier chapitre, on présente quelques généralités sur la production éolienne.

Le deuxième chapitre porte sur la modélisation du système de conversion éolien étudié constitué d'une turbine éolienne, machine synchrone à aimants permanents, les convertisseurs associés «onduleur MLI, redresseur MLI », bus contenu et le filtre.

Le troisième chapitre est consacré à la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents.

Le quatrième chapitre présentera les résultats de simulation et les interprétations sous Matlab. Finalement, ce travail est clôturé par une conclusion générale et quelques perspectives.



## I.1 Introduction

L'objectif principal des systèmes éoliens est la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'énergie éolienne, non polluante et économique a suscité un très grand intérêt et a exigé aux constructeurs de réfléchir toujours à des nouvelles solutions robustes, permettant l'extraction du maximum d'énergie et l'étude des différents systèmes réalisables.

Ce premier chapitre présente un état d'art sur l'énergie éolienne et son historique et la croissance de l'exploitation de cette énergie en présentant les différents types des éoliennes.

## I.2 Historique

Le vent considéré comme une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable. Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que Danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité. Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale. C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui oblige plusieurs pays de commencer à investir pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, on cite le premier marché important de la Californie entre 1980 et 1986, notamment au début avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985.

Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui permet un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une contribution importante au marché mondial qui atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW. [6]

## I.3. L'énergie éolienne en quelques chiffres

### I.3.1 Gisement éolien en Algérie

Selon quelques évaluations, plus de cinq millions d'Algériens ne sont pas raccordés au réseau d'électricité, alors que beaucoup de communautés rurales ont besoins d'eau pour irrigation. Ces besoins ruraux représentent un marché potentiel pour des technologies d'énergie renouvelable.

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile. Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production national d'électricité. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030. [7]

Actuellement, l'intérêt sur l'énergie éolienne en Algérie a connu une certaine croissance et de nombreuses études ont été réalisées sur le potentiel éolien depuis 1984 avec les travaux de Saïd et al[8]. Suivis par les travaux de Ben Saad ,1985 [9], Hammouche, 1990[10], Kasbadji Marzouk, 2000 et 2006, [11,12], Youcef Ettoumi, 2002[13], et Chellali, 2011[14].

### I.3.2 Potentiel éolien en Algérie

L'Algérie dispose d'un potentiel éolien très important qui peut être exploité pour la production d'électricité. Les vitesses de vents moyennes dépassent pour leur majorité les 4m/s à travers tout le territoire du pays. Le sud se distingue par des vitesses de vent élevées surtout dans la Wilaya de Tindouf ou encore à Adrar où la vitesse du vent atteint jusqu'à 7.5m/s.

La figure suivante (figure I.1) présente la carte des vents en Algérie établie par le centre de développement des énergies renouvelable CDER laboratoire de l'énergie éolienne.

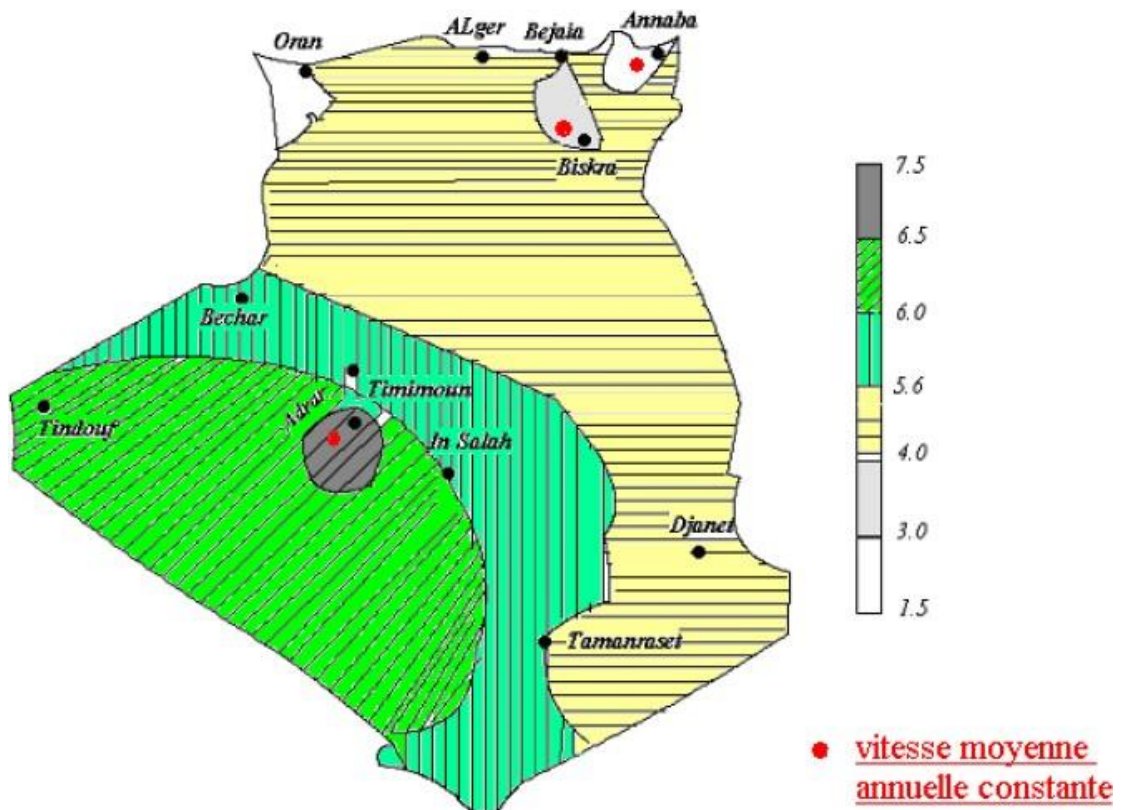


Figure I.1 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie.[15]

### I.4 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice figure I.2. [11]

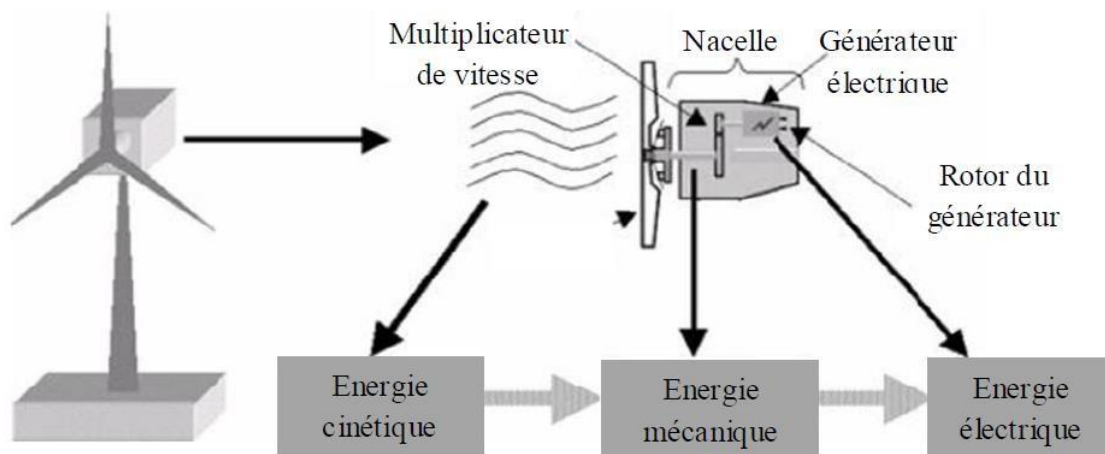


Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [16]

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif ; elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mats et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 180m pour des éoliennes des plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement de turbulences. [16]

### I.5 Constitution d'une éolienne

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

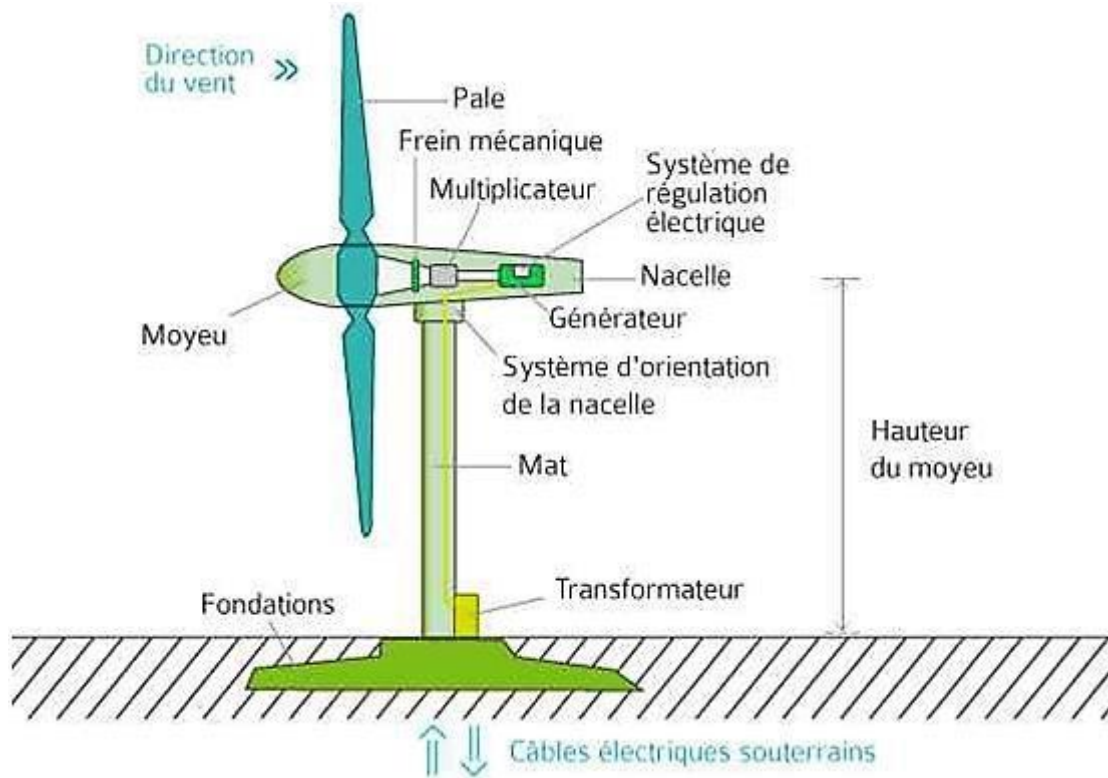
- **Mât** : généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Les éoliennes sont-elles si haut perchées c'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons... Et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

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

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

- **Nacelle** : montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine.

Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.[17]



*Figure I.3 : Constitution d'une éolienne à axe horizontale*

## I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

### I.6.1 Avantages

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux autres énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier, l'exploitation de cette énergie éolienne ne produit pas de CO<sub>2</sub>, ni d'autres gaz.

- Elle a permis d'éviter l'émission de 6.3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, 21 milles tonnes de SO<sub>2</sub> et 17.5 milles de tonnes de NO<sub>x</sub>. Ces émissions sont les responsables des pluies acides. [6]

- Elle ne nécessite aucun carburant l'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie risqué comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu, on peut facilement l'arrêter, contrairement aux autres procédés continus thermiques ou nucléaires.
- C'est une source d'énergie locale, permettant de minimiser les pertes en lignes transporteuses vers les lieux généralement très proches.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [18] après l'hydraulique.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite.
- Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et ils se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- La période de haute productivité se situe en hiver, ce qui correspond à la période de l'année où la demande en électricité est plus forte.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- Enfin ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

### I.6.2 Inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi les inconvénients qu'il faut citer :

- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor.
- L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel.
- La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production.
- La perturbation de la réception des ondes hertziennes, ce qui provoque la distorsion des images télévisées, c'est une source coûteuse à rendement faible dans les sites moins ventés. [19]

## I.7 Les différents types d'éoliennes

### I.7.1 Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe

horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation :

- Le rotor de **Savonius** dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur. [19]



*Figure I.4 : Eolienne à axe vertical de type Savonnions*

- Le rotor de **Darrieus**, du nom de l'ingénieur français Georges Darrieus qui breveta sa conception en 1931, est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Il se présente sous deux formes principales (Figure I.5), qui fonctionne selon le principe de la différence des forces de portance produites par les efforts aérodynamiques agissant sur les aubes. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer qu'à vitesse du vent assez grande. Lorsqu'elle démarre sa vitesse de rotation peut être importante puisque la vitesse du vent apparent s'ajoute à la vitesse de bout de pale pour des configurations déterminées. [20]



*Figure I.5 : Eolienne à axe vertical de type Darrieus*

## I.7.2 Les Eoliennes à axe horizontale

Les éoliennes à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales. [2] (Figure I.6) Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent [21] Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol. [16]



*Figure I.6 : Différentes éoliennes à axe horizontales*



On distingue aussi :

- Les éoliennes terrestres dites On shore installées sur la terre.
- Les éoliennes marines dites Off shore installées au large des côtes.



*Figure I.7 : Les éoliennes On shore*



*Figure I.8 : Les éoliennes Offshore*

## I.7.2.1 Eolienne a vitesse constante

Sont souvent munies d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. [16]

### A) Avantages

- Système électrique simple
- Grand fiabilité
- Non nécessité de systèmes électrique de commande
- Moins cher

### B) Inconvénients

- Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre Quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur Asynchrone : La connexion directe au réseau d'une génératrice Asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter La puissance réactive appelée à ce réseau. [22]

## I.7.2.2 Eoliennes a vitesse variable

Sont souvent moins coûteuse car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique). [16]

### A) Avantages

- Une meilleure extraction de l'énergie du vent [23]
- Augmentation du rendement énergétique
- Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance
- Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres

Parties mécaniques.

### B) Inconvénients

L'utilisation de convertisseurs de puissance « complexes » demeure son principal Inconvénient. [22]

## I.8 Principe de conversion d'énergie

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 passent par la surface active  $S$  de la voilure. [24]

Les aérogénérateurs permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine, qui extrait, à l'aide des pales, une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique disponible sur le rotor ;
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique du rotor de la turbine et la convertie en énergie électrique, transmise par la suite au réseau électrique ou à une charge isolée.

La figure I.9 représente la chaîne de conversion d'énergie au niveau de l'aérogénérateur.

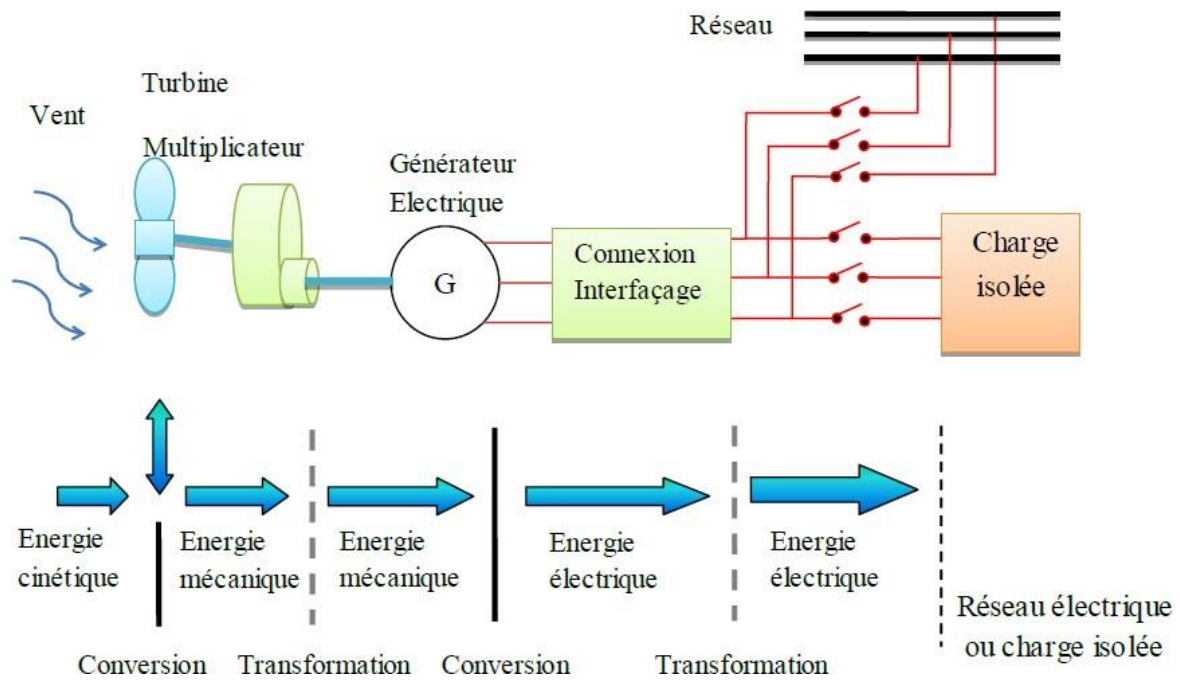


Figure I.9: Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur

### I.8.1 Conversion en énergie mécanique

La puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot s \cdot V_v^3 \tag{I.1}$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_v} \tag{I.2}$$

Appelée vitesse spécifique ou (Tip-speed-ratio).

Avec  $\Omega R$  vitesse linéaire au bout des pales.

La puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre est :

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot C_p \left( \frac{\Omega R}{V_v} \right) \cdot \rho \cdot s \cdot V_v^3 \tag{I.3}$$

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différents vitesses de vent (figure I.10).

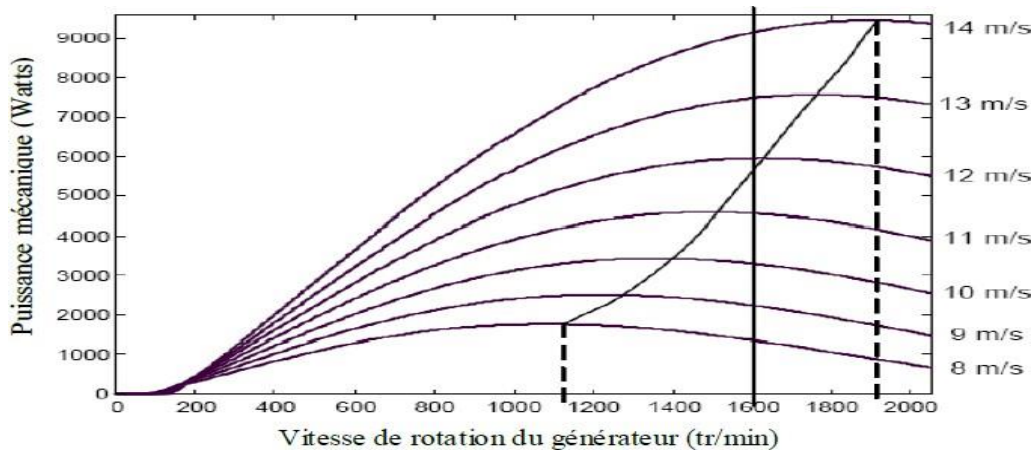


Figure I.10: La puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différents vitesses de vent [24]

### I.9 Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens

Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir :

- Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge.
- L'implantation sur terre ferme (On shore) ou en mer (Off shore).
- Et principalement la conversion au réseau électrique ou non (mode autonome).

#### I.9.1 Systèmes non couplés au réseau alternatif

Pour les réseaux de petite puissance en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes, souvent de diesel.

Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage et auto amorcée par condensateurs (Figure. I.11). [6]

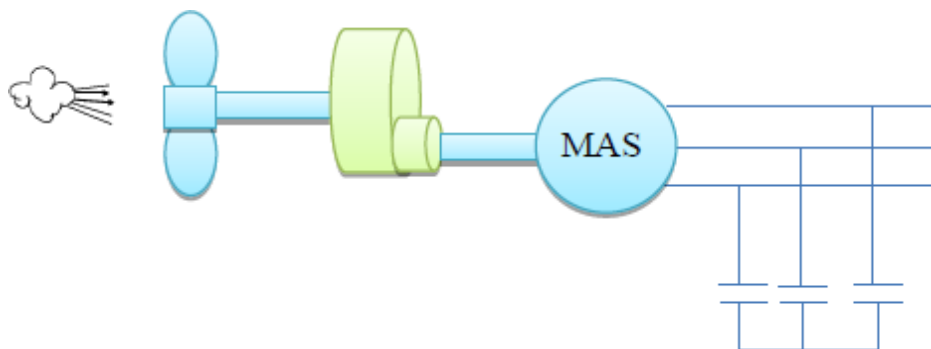


Figure. I.11 : Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage

## I.9.2 Systèmes couplés au réseau alternatif

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans ces systèmes sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [25].

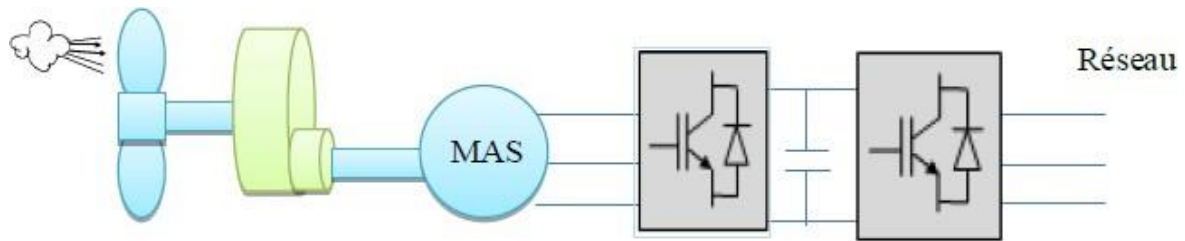
Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du coup le. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur de vitesse qui demande un travail auxiliaire de maintenance.

### I.9.2.1 Machine asynchrone à cage

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction. [6]

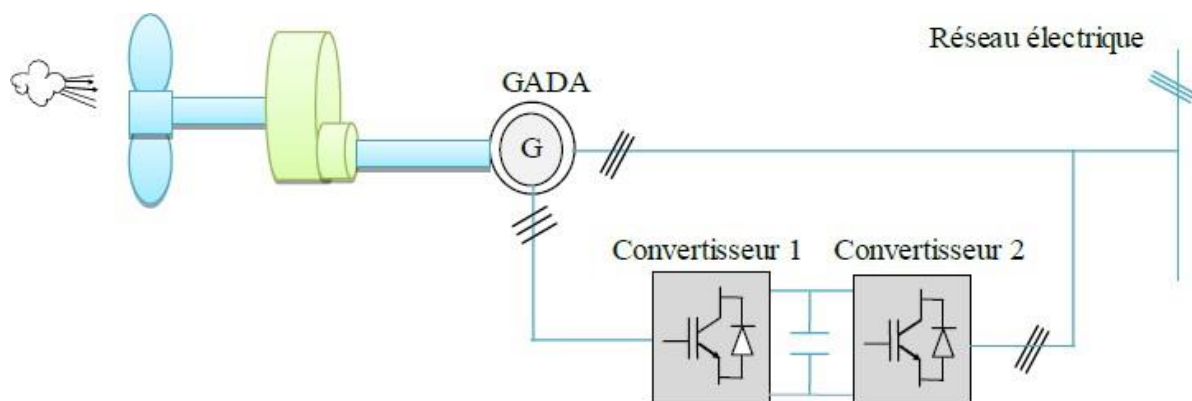
Dans les années 90, les danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. L'introduction d'un convertisseur de puissance entre la machine et le réseau, malgré son prix élevé, permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence de réseau et la vitesse de rotation de la machine, et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant voir la figure I.12. [6]



**Figure I.12 :** Système éolien basé sur la machine asynchrone à fréquence variable.

### I.9.2.2 Machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator est connecté au réseau possédant une tension et une fréquence fixes, alors que le rotor est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence. Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse, et leur robustesse est légèrement diminuée par la présence du système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un grand avantage (figure I.13).



**Figure I.13:** Système éolien basé sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné avec réglage électronique du glissement (fonctionnement à vitesse variable).

Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison

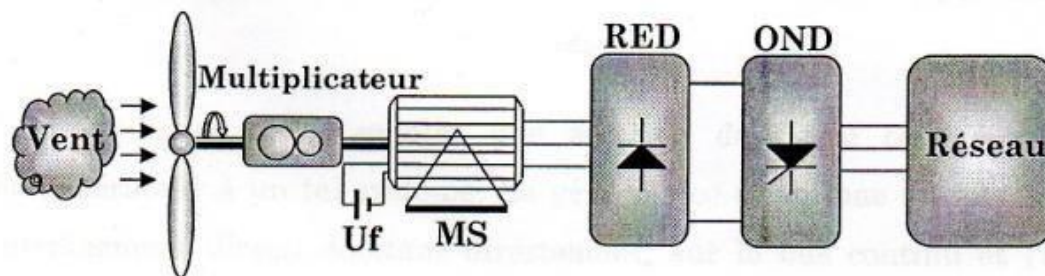
est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice.

[6]

### I.9.2.3 Machines synchrones

#### A) Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machine (synchrones à rotor bobiné) possède l'inconvénient de la nécessité d'une source d'alimentation indépendante de l'inducteur en puissance. Un autre inconvénient est la nécessité d'un entretien régulier du collecteur (système bagues-balais).



*Figure I.14 : Système éolien basé sur une machine synchrone à rotor bobiné*

#### B) Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Les systèmes de conversion basés sur des machines synchrones à aimants permanents à grand nombre de pôles, sont caractérisés par l'absence du multiplicateur de vitesse. Ce mode de transformation de puissance (transmission direct) offre un couple massif suffisant pour garantir l'entraînement de la machine. La machine synchrone à aimants permanents est la plus performante de toutes les machines existantes. De part son aimantation permanente à plusieurs pôles lui permet d'éliminer plusieurs sièges de pertes de puissance et de bruit, notamment le système bagues balais et le multiplicateur de vitesse. Cependant, le contrôle de l'excitation rotorique devient impossible.

Les éoliennes à base de MSAP présentent un bon rendement, un facteur de puissance élevé et un taux de défaillance minime par rapport aux autres machines, elles ne nécessitent presque aucun entretien puisque il n'y a que des hélices qui sont en mouvement. [2]

L'inconvénient unique de ces machines est la matière rare de l'aimant et son coût élevé. Une association de ces éoliennes à une électronique de puissance garantit les performances énergétiques en terme de signal induit, et encore le moindre coût de ces



installations c'est ce qui fait d'ailleurs en ces éoliennes le premier rival des éoliennes à base de MAS et MADA. [26]

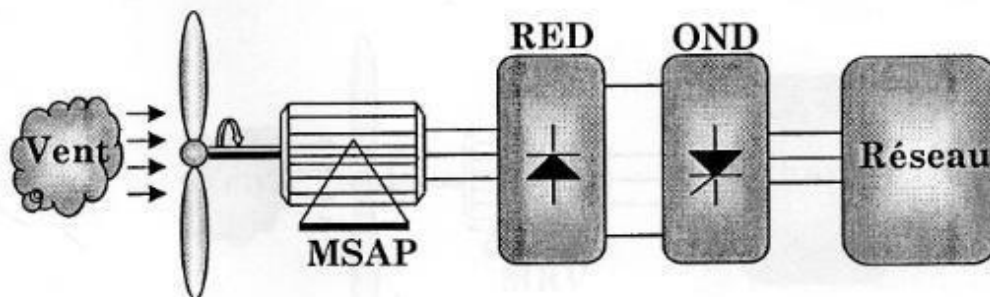


Figure I.15 : Système éolien basé sur une MSAP couplé au réseau

### I.10 Motif de choix de la génératrice (GSAP) pour une éolienne

La plupart des éoliennes urbaines sont basées sur des machines synchrones à aimants permanents [27]. Par rapport aux autres éoliennes, l'éolienne à base d'une GSAP a un meilleur rendement, en vue de l'absence de divers facteurs embêtants, notamment :

- Le multiplicateur de vitesse qui est toujours le siège de pertes de puissance dues à la transmission mécanique du mouvement ainsi qu'un émetteur de bruit important.
- Le système bagues-balais qui nécessite une source d'alimentation indépendante et un entretien régulier. Cependant, il existe trois structures principales de GSAP destinées à l'éolien de petite puissance soit à rotor externe, interne, sans pièce polaire ou avec pièce polaire :

- **GSAP à flux radial**

Elle permet d'avoir de bonnes performances sur une grande plage de variation de la vitesse de rotation. [28]

- **GSAP à flux axial**

Le couple produit est beaucoup plus important que celui de la machine précédente et alors la possibilité d'assembler plusieurs machines sur son axe afin d'accroître ce couple. [27]

- **GSAP à flux transverse (ou tangentiel)**

C'est une nouvelle technologie présentant un couple massique important et la possibilité d'avoir un très grand nombre de pôles. Cependant, ces atouts sont contrebalancés de conception et encore une réactance synchrone importante qui dégrade son facteur de puissance. [28]



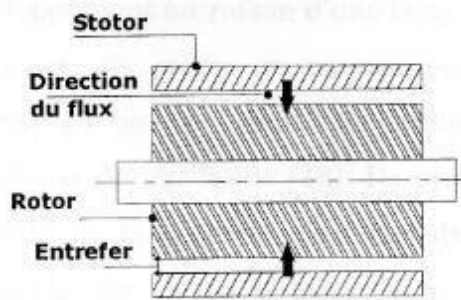


Figure I.16 : GSAP à flux radial

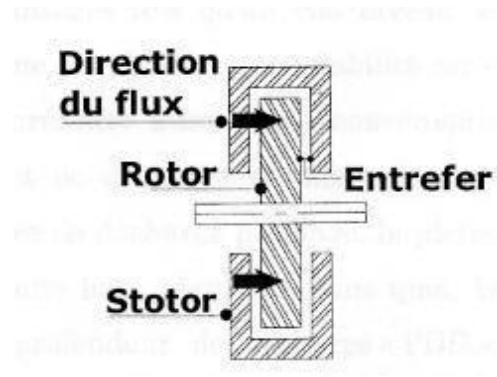


Figure I.17 : GSAP à flux axial

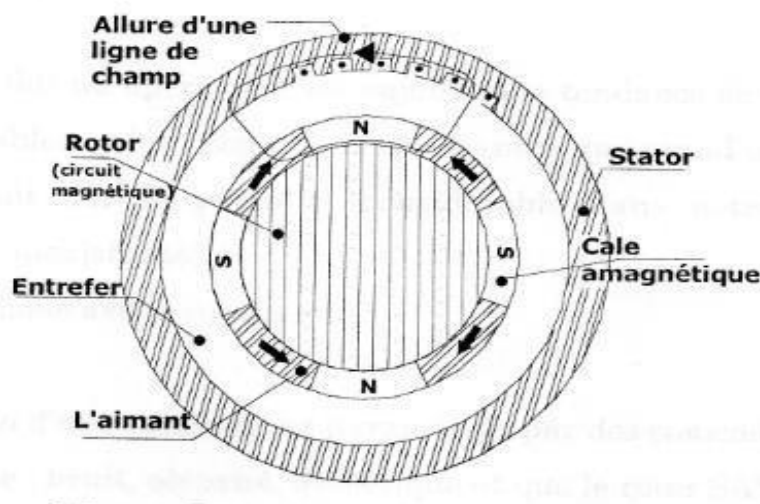


Figure I.18 : GSAP à flux tangentiel

### I.11 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté des généralités sur la chaîne de production de l'énergie éolienne, en commençant par le principe de fonctionnement de la turbine et sa constitution, puis un bref aperçu des différents types de machines électriques utilisés dans les systèmes éoliens.

La modélisation des éléments de la chaîne de conversion choisie sera présentée en détail dans le chapitre suivant.

# Chapitre II Modélisation du système de conversion éolien étudié

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation de la chaîne de conversion, dont est composée d'une turbine éolienne associée à une génératrice synchrone à aimant permanent connectée au réseau à travers des convertisseurs statiques (onduleur MLI, redresseur MLI) et le bus continu.

## II.2 Modélisation de la turbine

Le dispositif étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice (figure II.1)

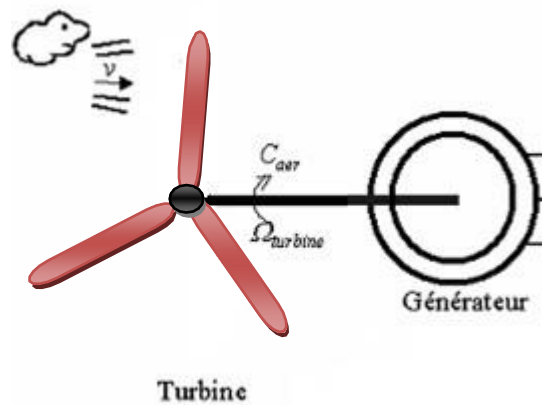


Figure II.1 Schéma de la turbine éolienne

La puissance du vent est définie de la manière suivante [29] :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_v^3}{2} \quad (\text{II.1})$$

avec :

- $\rho$  : densité de l'air (approxim.  $1,22 \text{ kg} / \text{m}^3$  à la pression atmosphérique à  $15^\circ\text{C}$ )
- $S$  : surface circulaire balayée par la turbine (le rayon du cercle est déterminé par la longueur de pale).
- $V_v$  : vitesse du vent.

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

## Chapitre II Modélisation du système de conversion éolien étudié

$$P_t = C_p P_v = C_p (\lambda, \beta) \frac{\rho \cdot S \cdot V_v^3}{2} \quad (\text{II.2})$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne.

Il dépend de la caractéristique de la turbine [29], [30].

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

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V_v} \quad (\text{II.3})$$

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

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

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II.4})$$

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble Turbine-Génératrice est donnée par :

$$(J_{turbine} + J_g) \frac{d\Omega}{dt} = C_g - (f) * \Omega \quad (\text{II.5})$$

### II.3 Technique d'extraction du maximum de la puissance

L'équation II.2 qualifie la puissance capturée par la turbine éolienne. Cette puissance peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient  $C_p$ . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice (ou encore du ratio de vitesse), l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. En régime permanent, la puissance aérodynamique  $P_t$  diminuée des pertes (représentées par les frottements visqueux) est convertie directement en puissance électrique.

$$P_{elec} = P_t - P_{ertes} \quad (\text{II.6})$$

La puissance mécanique ( $P_{mec}$ ) est exprimée comme étant le produit entre le couple Mécanique ( $C_{mec}$ ) et la vitesse mécanique ( $\Omega_t$ )



## Chapitre II Modélisation du système de conversion éolien étudié

### II.5 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (robustesse, maintenance, prix), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne. Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices [31] :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de le *FMM* créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température

Les équations électriques des machines électriques dans un repère a,b,c :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

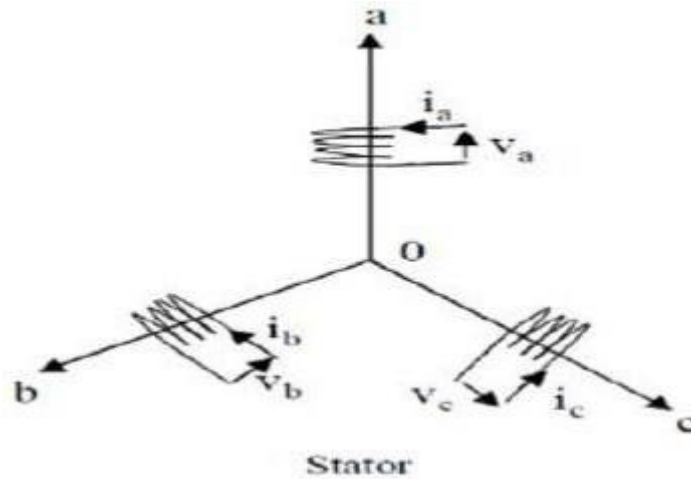
$R_s$  : La résistance des phases statorique.

$[V_a \ V_b \ V_c]^t$  : Vecteur tensions des phases statoriques.

$[i_a \ i_b \ i_c]^t$  : Vecteur courants des phases statoriques.

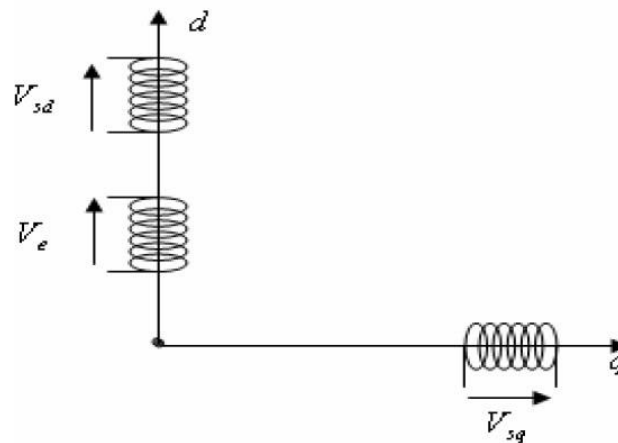
$[\phi_a \ \phi_b \ \phi_c]^t$  : Vecteur flux des phases statoriques.

Comme les enroulements statoriques sont montés en étoile à neutre isolé, la somme instantanée des courants statoriques est nulle, de sorte qu'il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou de flux, elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.



**Figure II.3** Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents dans le repère triphasé

Pour simplifier le système d'équations à coefficients variables, un modèle dans le repère de park de cette machine sera utilisé  $V_d, V_q$  et  $i_d, i_q$ . Le repère de Park est en fait un repère diphasé, équivalent du repère triphasé, plus simple à manipuler car les grandeurs électriques évoluent comme des grandeurs continues. On peut passer de l'un à l'autre repère à l'aide de matrices de passage (Figure II.4) [32].



**Figure II.4** : Enroulements de la génératrice synchrone suivant le système d'axe (dq).

$$[V_{dq}] = [(\theta)][V_{abc}] \tag{II.10}$$

$$[i_{dq}] = [(\theta)][i_{abc}] \tag{II.11}$$

Avec  $(\theta)$  Transformation de Park est donnée par:

## Chapitre II Modélisation du système de conversion éolien étudié

$$[P(\theta)] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Après développement des équations ci-dessus, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - p\omega_r \phi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + p\omega_r \phi_d \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs,  $\phi_q$  et  $\phi_d$  sont fonctions linéaires des courants  $i_d$  et  $i_q$  :

$$\phi_d = L_d i_d + \phi_{sf} \quad (\text{II.14})$$

$\phi_d$  : Constante indiquant le champ dû à l'aimantation permanente du rotor:

Sur l'axe  $q$ :

$$\phi_q = L_q i_q \quad (\text{II.15})$$

Le modèle de la (MSAP) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - p\omega_r L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + p\omega_r (L_d i_q + \phi_{sf}) \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

$$P\Omega = P\omega_r = \omega$$

Avec :

$i_d, i_q$  : Courants statoriques dans le repère de Park [A].

$V_d, V_q$  : Tensions statoriques dans le repère de Park [V].

$R_s$  : Résistance statoriques [ $\Omega$ ].

$L_s$  : Inductance cyclique statorique [H].

$P$  : Nombre de paire de pôles de la machine synchrone.

$\omega$  : Pulsation des tensions [rad/s].

$\omega_r$  : La vitesse de rotation de la machine (rotor).

Les tensions étant les grandeurs d'entrée, on peut exprimer les grandeurs de sortie (les courants) en fonction de celles-ci. On obtient alors

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = -\frac{R_s}{L_d} i_d + p\omega_r \frac{L_q}{L_d} i_q + \frac{V_d}{L_d} \\ \frac{d}{dt} i_q = -\frac{R_s}{L_q} i_q - p\omega_r \frac{L_d}{L_q} i_d - \frac{1}{L_q} \phi_{sf} p\omega_r + \frac{V_q}{L_q} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

## Chapitre II Modélisation du système de conversion éolien étudié

Le couple électromécanique développé par les machines synchrones à f.é.m. sinusoïdale peut être donné par la relation suivante:

$$C_{em} = \frac{3}{2} [\phi_{d q} i_{d q} - \phi_{q d} i_{q d}] \quad (\text{II.18})$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} [(L_d - L_q) i_d i_q + i_q \phi_{sf}] \quad (\text{II.19})$$

Si le rotor est lisse ( $L_d=L_q$ ), cette équation se simplifie en:

$$C_{em} = \frac{3}{2} P i_q \phi_{sf} \quad (\text{II.20})$$

La dynamique de la machine est donnée par l'équation du mouvement suivante:[33] [34]

$$C_{em} - C_r - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.21})$$

### II.6 Principe de l'autopilotage des machines synchrones

Autopilotage d'une machine synchrone consiste à maintenir constant ou peu variable le décalage angulaire entre les f.é.m. de celle-ci et les courants statoriques. Avec cette condition le couple électromagnétique développé par la machine peut être contrôlé et une boucle d'asservissement de position ou de vitesse peut être réalisée autour de la boucle de commande du couple de la machine. Pour réaliser cette tâche, le synchronisme de la machine doit être contrôlé par un capteur de position lié au rotor. Cela permet d'imposer le courant ou la tension qu'il faut afin d'assurer le contrôle du couple de la machine. Avec l'utilisation de ce principe, plusieurs variantes existent, dans les quelles le type de la machine et du convertisseur sont pris en compte [35].

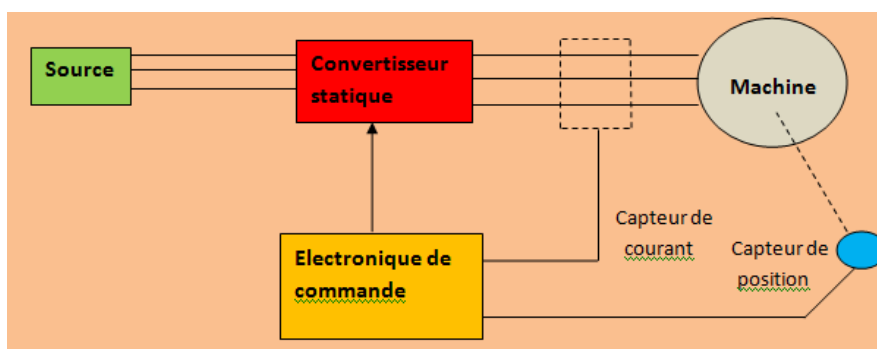


Figure II.5 Schéma de Principe d'autopilotage d'une Machine Synchrone



## Chapitre II Modélisation du système de conversion éolien étudié

### II.7 Modélisation d'interface d'électronique de puissance (redresseur, onduleur, bus continu)

Dans cette partie, on étudiera les convertisseurs qui interviennent dans la chaîne de conversion éolienne (le redresseur et l'onduleur MLI) [26].

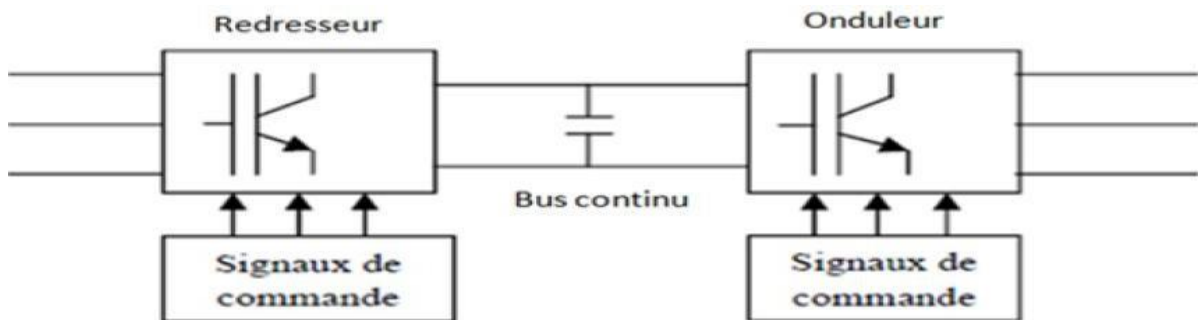


Figure II.6 Redresseur MLI et Onduleur MLI

#### II.7.1 Modélisation de redresseur

Le redresseur joue un rôle très important dans la chaîne de conversion, ou il transforme les tensions alternatives  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  générées par les générateurs éoliens en une tension continue  $V_{dc}$  appliqués aux bornes du bus continu. Les interrupteurs utilisés sont des transistors IGBT avec diodes antiparallèles, ces interrupteurs sont bidirectionnels, qui permet le transite de puissance dans les deux sens du système. Les signaux de commande de l'ouverture et de la fermeture des interrupteurs sont générés par des comparateurs à hystérésis (Figure II.7).

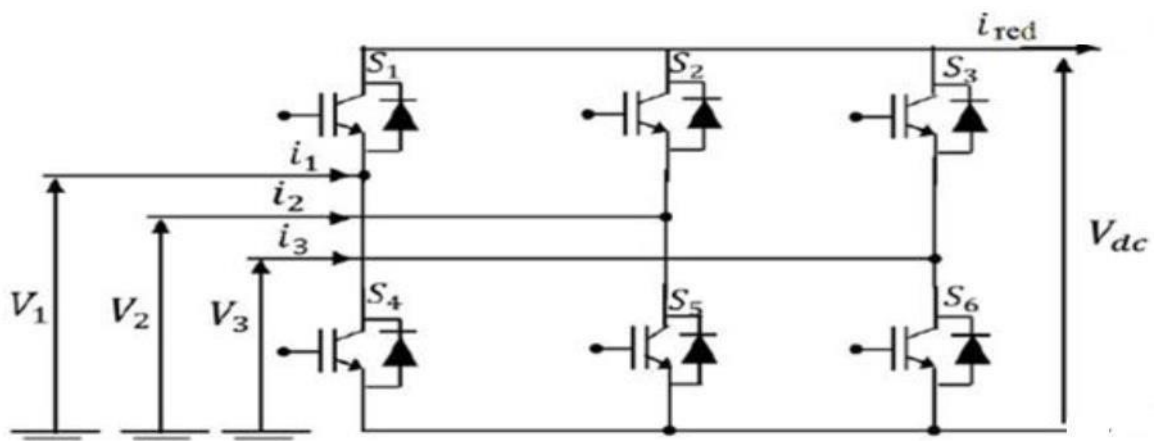


Figure II.7 Redresseur MLI

## Chapitre II Modélisation du système de conversion éolien étudié

En utilisant les fonctions de connexion  $S_i$ ,  $i=1\text{à}6$ , pour chaque interrupteur on définit la matrice de transfert du redresseur comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

$$i_{red} = S_1 i_1 + S_2 i_2 + S_3 i_3 \quad (\text{II.23})$$

Avec :

$V_{dc}$  : Tensions redressée ;

$i_{re}$  : Courant redressée ;

$S_1, S_2, S_3$ : Fonction logique correspondant à l'état de l'interrupteur. (Egal à un (1) si l'interrupteur est fermé et zéro (0) s'il est ouvert) [36].

### II.7.2 Modélisation de l'Onduleur :

Les convertisseurs utilisés sont de type parallèle double PD3 et constitués d'IGBT et de diode antiparallèles commandés par modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour deux raisons principales [37]:

- Réduire les perturbations sur le réseau électrique.

L'onduleur de tension réalise l'interface entre la source de courant et la source de tension, ce qui impose le respect des règles de fonctionnement suivantes:

- La source de tension aux bornes de l'onduleur ne doit jamais être court-circuitée ;

- La source de courant, ne doit jamais être en circuit ouvert. Le courant circulant doit toujours trouver un chemin libre ou la connexion en antiparallèle d'une diode avec les interrupteurs.

L'onduleur de tension utilisé, est composé de six interrupteurs, répartis d'une façon symétrique sur trois bras commandés à la fermeture et à l'ouverture, avec des diodes en antiparallèle comme le montre la (figure II.8).

## Chapitre II Modélisation du système de conversion éolien étudié

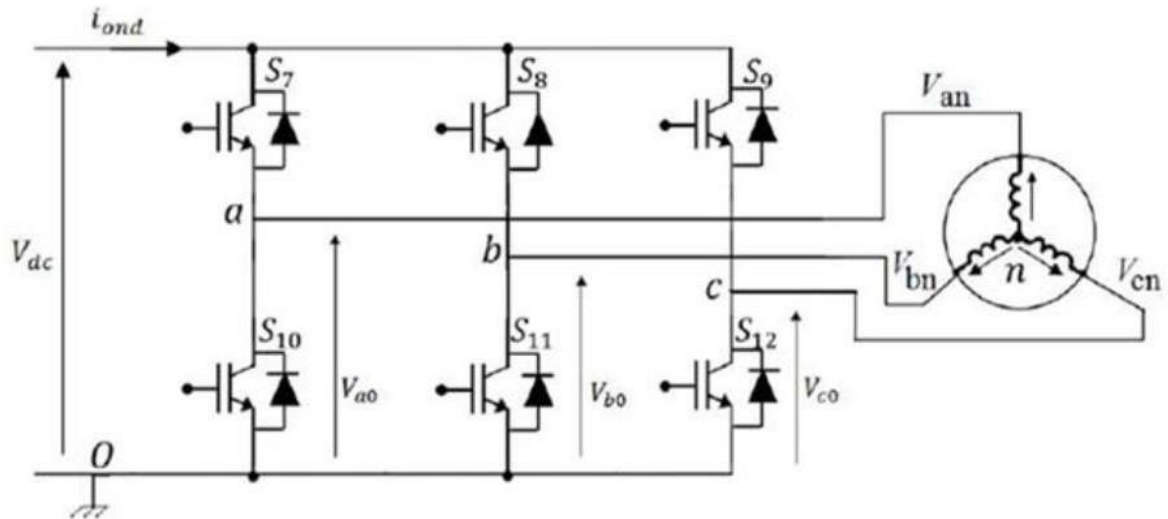


Figure II.8 Onduleur MLI

La loi des mailles donne :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Pour une charge équilibrée :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.25})$$

La substitution des équations précédentes on aboutit à :

$$V_{n0} = \frac{1}{3} (V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (\text{II.26})$$

En remplaçant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3} V_{a0} - \frac{1}{3} V_{b0} - \frac{1}{3} V_{c0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3} V_{a0} + \frac{2}{3} V_{b0} - \frac{1}{3} V_{c0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3} V_{a0} - \frac{1}{3} V_{b0} + \frac{2}{3} V_{c0} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Nous déduisant le modèle de l'onduleur sous forme matricielle en fonction des états logiques des interrupteurs :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_7 \\ S_8 \\ S_9 \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

## Chapitre II Modélisation du système de conversion éolien étudié

On peut exprimer le courant  $i_{ond}$  en fonction des courants alternatifs  $i_a, i_b, i_c$  par l'équation suivante :

$$i_{ond} = S_7 i_a + S_8 i_b + S_9 i_c \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$S_7, S_8, S_9$  ; Fonction logique correspondant à l'état de l'interrupteur (égal à 1 si l'interrupteur est fermé et zéro s'il est ouvert). [38]

### II.7.3 Commande par modulation sinus-triangle :

La M.L.I sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante.

Le schéma de principe de cette technique est donné par la figure II.9

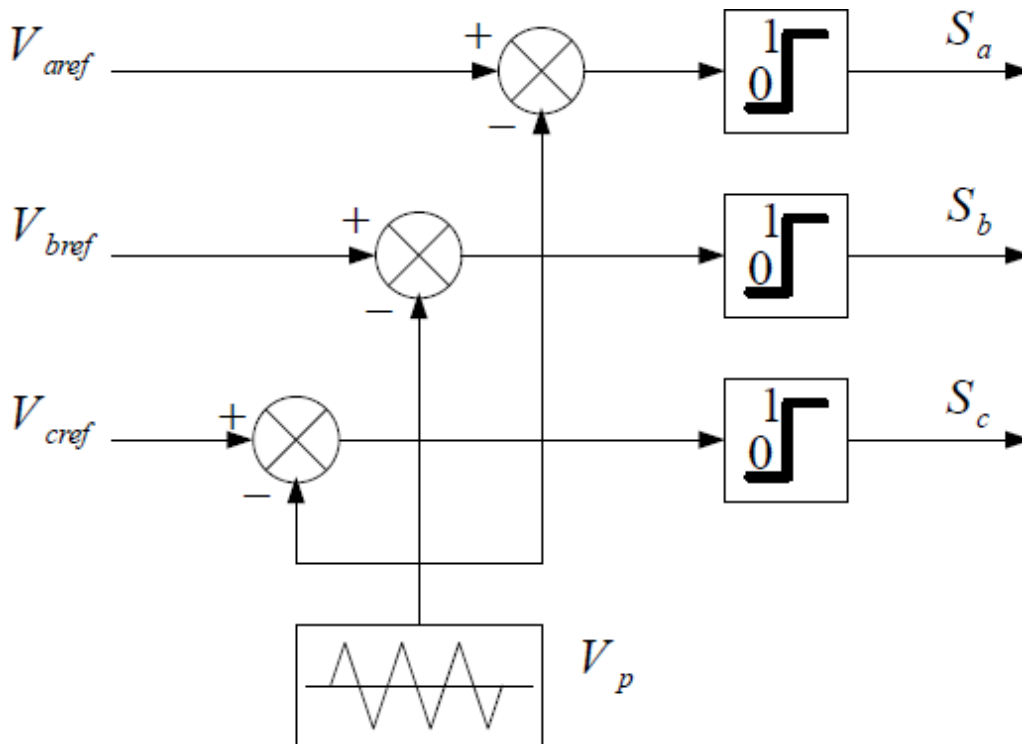


Figure II.9 Schéma de principe de MLI sinus\_triangle.

Donc le principe de cette stratégie peut être résumé par l'algorithme suivant :

## Chapitre II Modélisation du système de conversion éolien étudié

Si  $V_{iref} \geq V_P \Rightarrow S_i = 1$  Sinon  $S_i = 0, i = a, b, c$

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$\begin{cases} V_{aref} = V_m \sin(\omega t) \\ V_{bref} = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{cref} = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (II.30)$$

L'équation de la porteuse triangulaire est exprimée par :

$$\begin{cases} V_{pm} (4 \frac{t}{T_p} - 1) \text{ si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_{pm} (-4 \frac{t}{T_p} + 3) \text{ si } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (II.31)$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

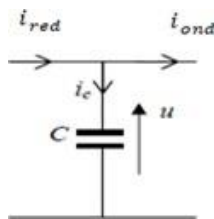
- L'indice de modulation  $m$  égal au rapport de la fréquence de modulation  $f_p$  sur la fréquence de référence  $f$ , ( $m = \frac{f_p}{f}$ ).
- Le coefficient de réglage en tension  $r$  égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence  $V_m$  à la valeur crête de l'onde de modulation  $V_{pm}$  ( $r = \frac{V_m}{V_{pm}}$ ) [39]

### II.8 Modélisation de la liaison au réseau

#### II.8.1 Modélisation du bus continu

Le schéma électrique du bus continu représenté sur la figure (II.10) nous montre que le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur :

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (II.32)$$



**Figure II.10** Schéma électrique du bus continu

## Chapitre II Modélisation du système de conversion éolien étudié

Le bus continu est modélisé par la connaissance de la tension aux bornes du condensateur obtenue en intégrant l'équation différentielle suivante :

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{c} \cdot i_c \quad (\text{II.33})$$

D' où :

$$u = \int \frac{du}{dt} + u(t_0) \quad (\text{II.34})$$

$u(t_0)$  est la valeur de la tension à l'instant initial  $t_0$

### II.8.2 Modélisation du filtre

#### II.8.2.1 Modélisation du filtre dans le repère naturel

Il s'agit d'un filtre passif série ( $R_t, L_t$ ) raccordé entre le convertisseur de puissance et le réseau (Figure II.11) pour réduire la propagation des harmoniques dans le réseau électrique.

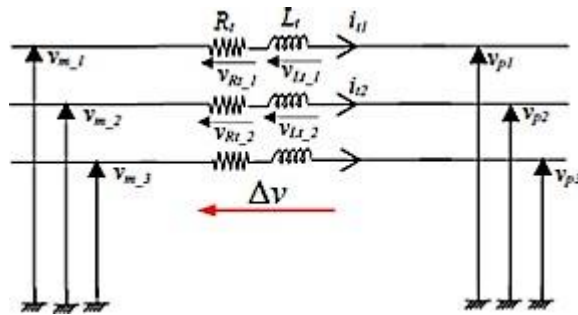


Figure II.11 Schéma électrique du filtre [40]

Les courants traversant le filtre sont obtenus par intégration des tensions aux bornes des bobines :

$$\begin{cases} i_{t1}(t) = \int_{t_0}^t \frac{1}{L_t} \cdot v_{LL1} + i_{t1}(t_0) \\ i_{t2}(t) = \int_{t_0}^t \frac{1}{L_t} \cdot v_{LL2} + i_{t2}(t_0) \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

$i_{t1}(t_0)$  et  $i_{t2}(t_0)$  sont respectivement les courants  $i_1$  et  $i_2$  l'instant initial.

Le courant dans la troisième phase est déduit à partir des deux premiers :

$$i_{t3} = -(i_{t1} + i_{t2}) \quad (\text{II.36})$$

## Chapitre II Modélisation du système de conversion éolien étudié

Les tensions aux bornes des résistances sont données par :

$$v_{Rt1} = R_t \cdot i_{t1} \quad (\text{II.37})$$

$$v_{Rt2} = R_t \cdot i_{t2} \quad (\text{II.38})$$

Les tensions aux bornes des inductances sont données par :

$$v_{Lt1} = \Delta v_1 - v_{Rt1} \quad (\text{II.39})$$

$$v_{Lt2} = \Delta v_2 - v_{Rt2} \quad (\text{II.40})$$

Les tensions aux bornes des bobines peuvent se donner en appliquant la loi des mailles :

$$\Delta v_1 = v_{m-1} - v_{p1} \quad (\text{II.41})$$

$$\Delta v_2 = v_{m-2} - v_{p2} \quad (\text{II.42})$$

### II.8.2.2 Modélisation du filtre dans le repère de Park

Les équations différentielles définissant le filtre peuvent être obtenues en regroupant les équations précédentes :

$$\begin{matrix} v_{m-1} \\ (v_{m-2}) \\ v_{m-3} \end{matrix} = R \cdot \begin{pmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \\ i_{t3} \end{pmatrix} + L \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \\ i_{t3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{p1} \\ v_{p2} \\ v_{p3} \end{pmatrix} \quad (\text{II.43})$$

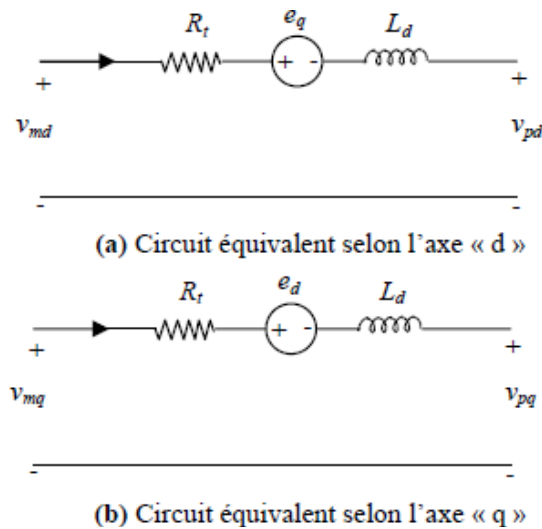
L'application de la transformation de Park sur le système d'équations (II.42) nous donne :

$$v_{md} = R \cdot i_{td} + L \cdot \frac{di_{td}}{dt} - L \cdot \omega \cdot i_{tq} + v_{pd} \quad (\text{II.44})$$

$$v_{mq} = R \cdot i_{tq} + L \cdot \frac{di_{tq}}{dt} - \omega \cdot i_{td} + v_{pq} \quad (\text{II.45})$$

Les circuits équivalents correspondant aux équations (II.44 et II.45) sont illustrés sur la figure (II.12).

## Chapitre II Modélisation du système de conversion éolien étudié



**Figure II.12** Circuits équivalents du filtre dans le repère de Park

$e_d$  et  $e_q$  sont les tensions de couplage et sont données par : [41]

$$e_d = L_t \cdot \omega_s \cdot i_{td} \quad (\text{II.46})$$

$$e_q = L_t \cdot \omega_s \cdot i_{tq} \quad (\text{II.47})$$

### II.9 Conclusion :

Ce chapitre a fait l'objet de la modélisation des différentes parties de la chaîne de conversion éolienne.

Afin de pouvoir représenter le modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère (d-q), nous avons fait appel à la transformation de PARK qui nous a simplifié notre système tout en tenant des hypothèses simplificatrices.

Le chapitre suivant sera dédié à la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimant permanent.



### III.1 Introduction :

La commande des machines à courant alternatif est difficile du fait qu'il existe un couplage complexe entre le flux et le couple. Cette difficulté a encouragé le développement de plusieurs techniques de commande afin que ces machines se comportent comme des machines à courant continu, caractérisées par un découplage naturel du flux et du couple. Parmi ces techniques de commande, la commande vectorielle est la plus connue [42].

Ce chapitre présente la commande vectorielle appliquée à la MSAP. La boucle de courant et la boucle de vitesse sont régulées à l'aide de correcteurs PI.

### III.2 Principe de la commande vectorielle

L'idée fondamentale de cette stratégie est d'assimiler le comportement de la machine synchrone à celui d'une machine à courant continu, c'est-à-dire un modèle linéaire et découplé ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique [43] [44].

L'équation (III.1), donnant le couple, montre que celui-ci dépend de deux variables  $i_d, i_q$

$$C_{em} = \frac{3}{2}P ((L_d - L_q)i_d i_q + i_q \Phi_{sf}) \quad (III.1)$$

Parmi les stratégies de commande, on utilise souvent celle qui consiste à maintenir la composante  $i_d$  nulle. Cette stratégie permet de l'obtention d'une loi de commande simplifiée avec une relation linéaire entre le couple et le courant. On retrouve alors une caractéristique similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée [45].

L'expression du couple devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p\phi_{sf}i_q \quad (III.2)$$

Comme le flux  $\phi_{sf}$  est constant, le couple est directement proportionnel à  $i_q$

Donc :

$$C_{em} = k_t i_q \quad (III.3)$$

Avec :

$$k_t = \frac{3}{2}p\phi_{sf} \quad (III.4)$$

La commande vectorielle sert alors à contrôler les deux composantes  $i_d$  et  $i_q$  du courants statorique en imposant les tensions  $V_d$  et  $V_q$  qui conviennent pour imposer ces tensions il suffit d'imposer les tensions de référence  $V_{dref}$  et  $V_{dref}$  à l'entrée de l'onduleur [46]. A l'aide des

régulateurs, Nous allons obtenir le courants référence  $V_{qref}$ ; en imposant le courant  $i_d$  à zéro comme référence.

### III.3 Technique de découplage

Les lois de commande vectorielle des machines alimentée en tensions présente des couplages entre les actions sur les axes (d) et (q) .dans un repère (d) et (q) avec l'axe (d) aligné sur l'axe du flux rotorique, on a les équations suivantes [47].

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{d i_d}{dt} - L_q i_q \omega \\ V_q = R_q i_q + L_q \frac{d i_q}{dt} + L_d \omega i_d + \phi_{sf} \omega \end{cases} \quad (III.5)$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f \omega_r \quad (III.6)$$

Avec

$$\omega = p. \omega_r \quad (III.7)$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} [(L_d - L_q) i_d i_q + \phi_{sf} i_q] \quad (III.8)$$

Le modèle décrit par les équations précédentes montre que la MSAP est un système multi variable, non linéaire et fortement couplé.

Le but principal de la commande vectorielle des machines à courants alternatifs est d'améliorer leurs comportements statiques et dynamiques grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu.

La machine étudiée est de couple électromagnétique est maximal lorsque le courant statorique dans le référentiel de *Park* est maintenu calé sur l'axe  $q$  ( $i_s = i_q$ ). Ceci revient à imposer la composante directe du courant nulle qui a pour effet la diminution des pertes joules. Le système d'équations devient:

$$\begin{cases} V_d = -L_q \omega i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{d i_q}{dt} + \phi_{sf} \omega \end{cases} \quad (III.8)$$

Et le couple devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p. \phi_{sf}. i_q \quad (III.9)$$

La figure (III.1) représente le Principe de la commande vectorielle :

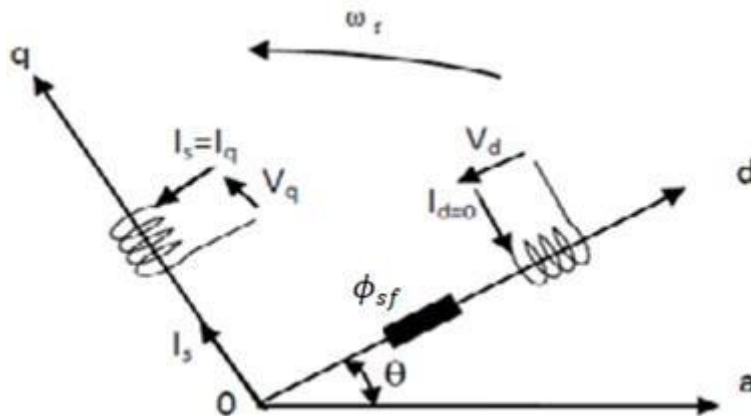


Figure III.1 Principe de la commande vectorielle

On remarque que cette stratégie permet d'éliminer le problème de couplage entre les axes ( $d$ ) et ( $q$ ). Le modèle (III.8), (III.9) et l'équation mécanique peuvent être représentés par le schéma fonctionnel (figure III.2) qui ressemble à celui de la machine à courant continu.

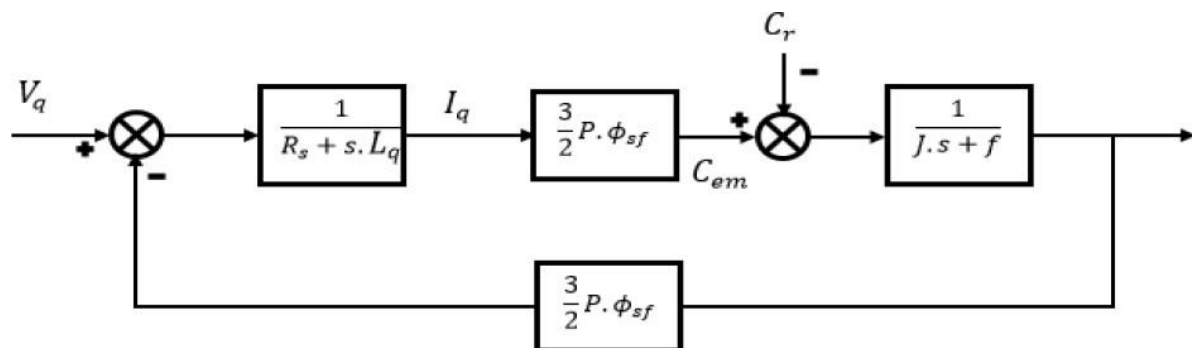


Figure III.2 Modèle de la MSAP quand  $i_d$  est nul

### III.4 Découplage par compensation

L'alimentation en tension est obtenue en imposant les tensions de référence à l'entrée de la commande de l'onduleur. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques sur les bras de l'onduleur de manière à ce que les tensions délivrées par cet onduleur aux bornes du stator de la machine soient les plus proches possible des tensions de référence.

Mais, il faut définir des termes de compensation, car, dans les équations statoriques, il y a des termes de couplage entre les axes  $d$  et  $q$  [48].

Les tensions suivant les axes ( $d, q$ ) peuvent être écrites sous les formes suivantes:

$$\begin{cases} V_d = (R_s L_q i_d + L_d \frac{di_d}{dt}) - \omega L_q i_q \\ V_q = (R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt}) + \omega (L_d i_d + \phi_{sf}) \end{cases} \quad (III.10)$$

$$\omega = p\omega_r$$

$$\begin{cases} V_d = (R_s + L_d s) i_d - \omega L_q i_q \\ V_q = (R_s + L_q s) i_q + \omega (L_d i_d + \phi_{sf}) \end{cases} \quad (III.11)$$

$$\omega = p\omega_r$$

La figure (III.4) représente le couple entre les axes  $d$  et  $q$  :

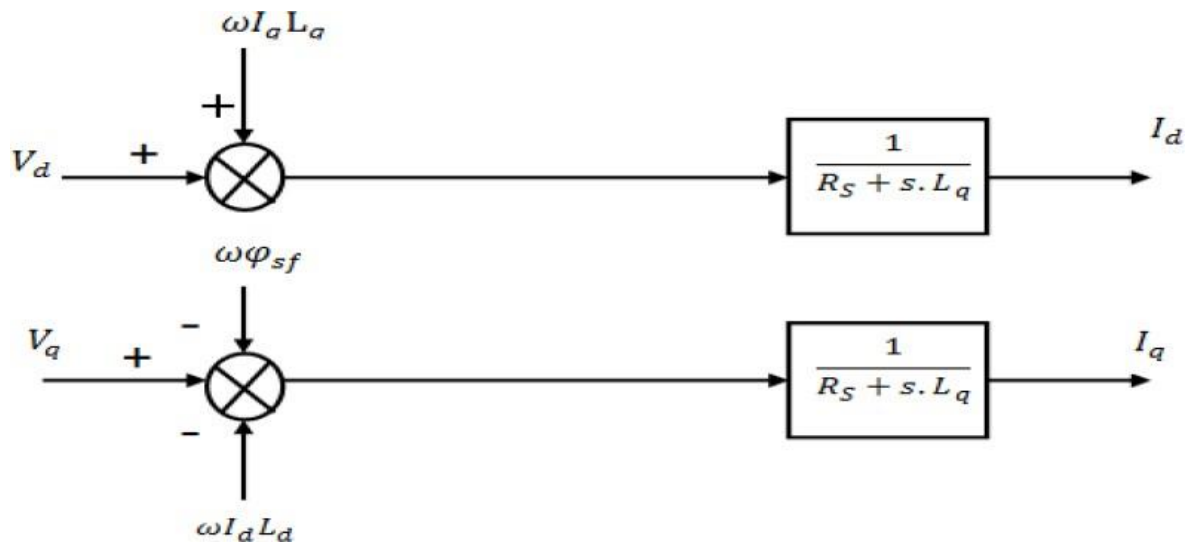


Figure III.3 Description des couplages

A partir de l'équation (III.11), il est possible de définir les termes de découplage qui sont considérés, dans la suite, comme des perturbations vis-à-vis des régulations. Pour ne pas compliquer cette étude, nous considérons le cas de décomposition des tensions (figure III.5). Dans la première équation, on sépare la tension selon l'axe  $d$  en deux parties :

Alors :

$$\begin{cases} V_d = V'_d + e_d \\ e_d = -\omega L_q i_q \end{cases} \quad (III.12)$$

$$\frac{i_q}{V'_d} = \frac{1}{R_s + sL_d} \tag{III.13}$$

La deuxième équation est définie :

$$\begin{cases} V_q = V'_q + e_q \\ e_q = -\omega L_d \dot{i}_d + \omega \phi_{sf} \end{cases} \tag{III.14}$$

De la même façon, le terme  $e_q$  est ajouté de manière à obtenir la fonction de transfert suivante:

$$\frac{i_q}{V'_q} = \frac{1}{R_s + sL_q} \tag{III.15}$$

$s$ : Opérateur de Laplace.

Le principe de régulation consiste à réguler les courants statoriques à partir des grandeurs de référence (désirées) par les régulateurs classiques.

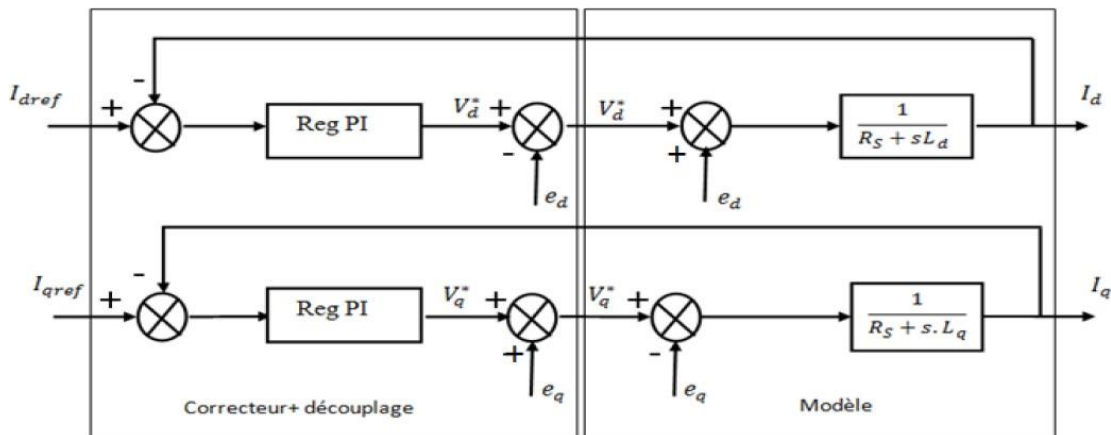


Figure III.4 Découplage par compensation

Les actions sur les axes d et q sont donc découplées.

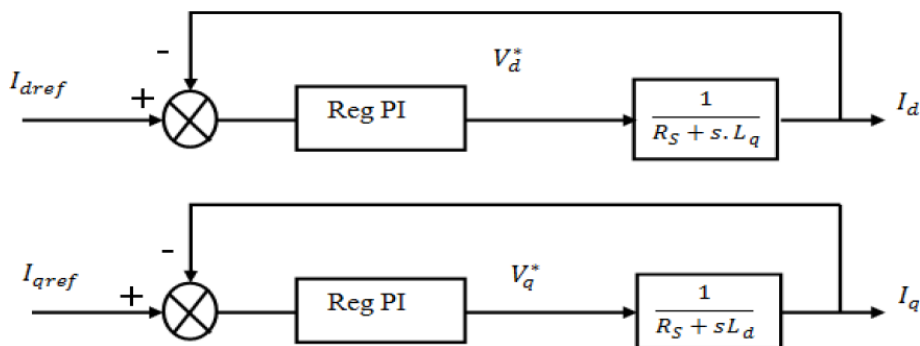


Figure III.5 Commande découplée

### III.5 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle

#### III.5.1 Avantages de la commande vectorielle

- Elle est basée sur le modèle transitoire (traiter les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire le variateur classique)
- Elle est précise et rapide.
- Il y a un contrôle du couple à l'arrêt.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase.

#### III.5.2 Inconvénients de la commande vectorielle

Le contrôle vectoriel par orientation du flux rotorique présente un certain nombre d'inconvénients :

- Très chère (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse, DSP).
- Nécessité d'un modulateur pour la commande rapprochée de l'onduleur qui provoque des retards, surtout à basse fréquence de modulation (grande puissance). Ces retards sont responsables d'une augmentation du temps de réponse en couple, ce qui pénalise les variateurs utilisés en traction.
- Présence de transformations de coordonnées dépendant d'un angle  $\theta_s$  estimé.

### III.6 Régulation

Les régulateurs ont, d'une part, la tâche de stabiliser le circuit de réglage, et d'autre part, ils viennent pour assurer une meilleure précision et un temps de réponse meilleur. Les régulateurs standards de type *PI* ou *PID* sont les plus utilisés dans le domaine des réglages industriels [49].

#### III.6.1 Conception des Régulateurs

Soit  $Y^*(t)$  le signal à poursuivre, et  $Y(t)$  le signal de sortie du système à contrôler [50].

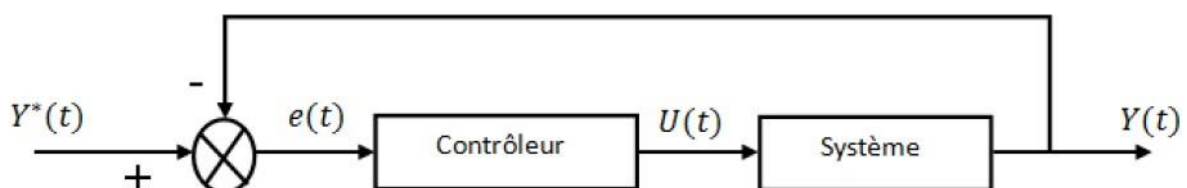


Figure III.6 Représentation de la commande par PI

La loi de commande est :

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \tag{III.16}$$

### III.6.1.1 Action Proportionnelle (Kp)

- Si  $K_p$  est grand, la correction est rapide. Le risque de dépassement et d'oscillation dans la sortie s'accroît, autrement la correction est lente, il y a moins de risque d'oscillations.

### III.6.1.2 Action Intégrale (Ki)

L'action intégrale régit lentement à la variation de l'erreur et assure un rattrapage progressif de la consigne.

Tant que l'erreur positive (ou négative) subsiste, l'action  $U(t)$  augmente (ou diminue) jusqu'à ce que l'erreur s'annule

## III.6.2 Calcul des Régulateurs

### III.6.2.1 Régulateur des Courants

Le schéma du contrôle des courants de la commande vectorielle se réduit à deux boucles distinctes comme l'indique la figure suivante [51]:

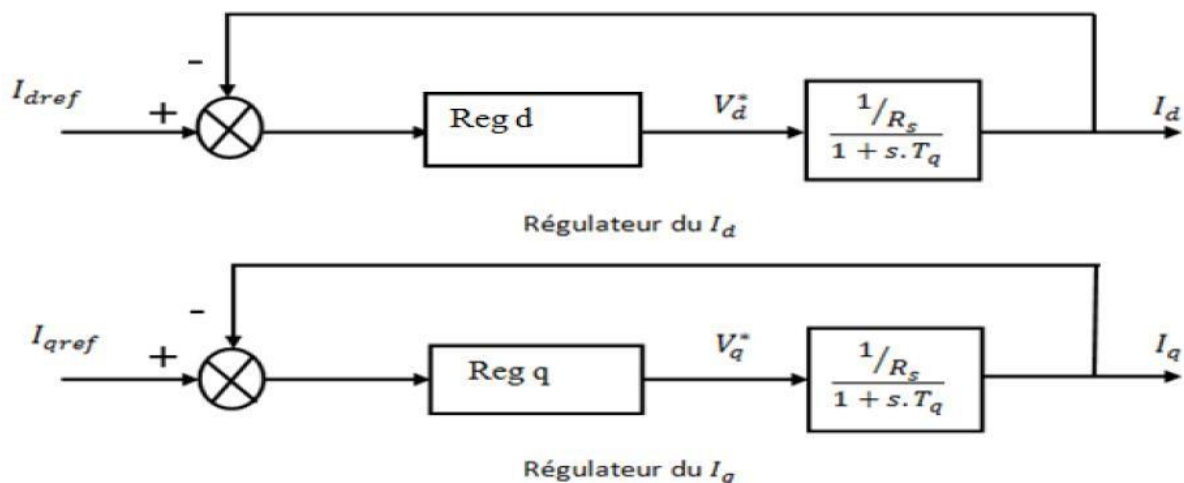


Figure III.7 Commande des courants en deux boucles indépendantes

A partir des équations (III.11), (III.12) et (III.14), on peut écrire les fonctions de transfert suivantes:

$$F_d(s) = \frac{\frac{1}{R_s}}{1+T_d s} = \frac{i_d}{V_{d1}} \quad (III.17)$$

$$F_q(s) = \frac{\frac{1}{R_s}}{1+T_q s} = \frac{i_q}{V_{q1}} \quad (III.18)$$

Avec :

$$T_d = \frac{L_d}{R_s} \quad (III.19)$$

et

$$T_q = \frac{L_q}{R_s} \quad (III.20)$$

$T_d$ : est la constante de temps électrique relative à l'axe  $d$ .

$T_q$ : est la constante de temps électrique relative à l'axe  $q$ .

Les régulateurs ( $Reg_d$ ) et ( $Reg_q$ ) sont choisis comme étant des régulateurs proportionnels et intégraux, avec des fonctions de transfert de la forme suivante :

$$Reg_d = \frac{k_{id}}{s} \left( 1 + \frac{k_{pd}}{k_{id}} s \right) \quad (III.21)$$

$$Reg_q = \frac{k_{iq}}{s} \left( 1 + \frac{k_{pq}}{k_{iq}} s \right) \quad (III.22)$$

$k_{pd}k_{pq}$  : est le gain de l'action proportionnelle du correcteur de courant  $i$ .

$k_{id}k_{iq}$  : est le gain de l'action intégrale.

$T_d T_{iq}$  : est la constante du temps d'intégration.

Les fonctions de transfert en boucle ouverte sont donnée par :

$$FTBO_d = \frac{k_{id}}{s} \left( 1 + \frac{k_{pd}}{k_{id}} s \right) \frac{1}{1+T_d s} \quad (III.23)$$

$$FTBO_q = \frac{k_{iq}}{s} \left( 1 + \frac{k_{pq}}{k_{iq}} s \right) \frac{1}{1+T_q s} \quad (III.24)$$

La démarche à suivre consiste à procéder à la compensation de la constante de temps du système, en posant :

$$\frac{k_{pd}}{k_{id}} = T_d \quad (III.25)$$

$$\frac{k_{pq}}{k_{iq}} = T_q \quad (III.26)$$



Ce qui ramène les fonctions de transfert des courants en boucle fermée aux expressions suivantes :

$$FTBF_d = \frac{1}{1+\tau_d.s} = \frac{i_d}{i_{d.ref}} \quad (III.27)$$

$$FTBF_q = \frac{1}{1+\tau_q.s} = \frac{i_q}{i_{q.ref}} \quad (III.28)$$

Avec :

$$\tau_d = \frac{R_s}{k_{id}} \quad (III.29)$$

$$\tau_d = \frac{R_s}{k_{id}} \quad (III.30)$$

$\tau$  : Le constant du temps en boucle fermée

Les boucles de courants correspondent donc à un premier ordre, il suffit de fixer la dynamique du système à travers un choix approprié de  $\tau_d$  et  $\tau_q$ . Celles-ci sont choisies de manière à ce que la constante de temps du système en boucle fermée régulé soit inférieure à la constante de temps en boucle ouverte.

On imposant le temps de réponse:  $T_r = 3\tau$

$$T_r = 3 \frac{R_s}{k_{id}} \quad (III.31)$$

\* Pour le courant  $i_d$  :

$$k_{id} = \frac{3R_s}{T_r} \quad (III.32)$$

$$\frac{L_d}{R_s} = \frac{k_{pd}}{k_{id}} \quad (III.33)$$

$$k_{pd} = \frac{L_d k_{id}}{R_s} = \frac{3L_d}{T_r} \quad (III.34)$$

\* Pour le courant  $i_q$  :

$$k_{iq} = \frac{3R_s}{T_r} \quad (III.35)$$

$$k_{pq} = \frac{L_q k_{iq}}{R_s} = \frac{3L_q}{T_r} \quad (III.36)$$

### III.6.2.2 Calcul du Régulateur de vitesse

Le régulateur de vitesse permet la détermination du couple de référence afin de maintenir la vitesse correspondante.

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f_r = C_e - C_r \Rightarrow \Omega = \frac{C_e - C_r}{Js + f_r} \quad (\text{III.37})$$

Le schéma fonctionnel du contrôle de vitesse est donné par:

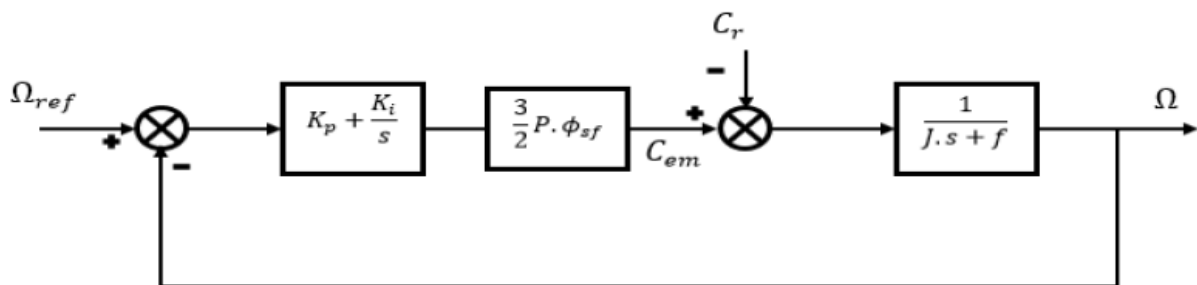


Figure III.8 Boucle de régulation de vitesse

La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par :

$$k_{p\Omega} + \frac{k_{i\Omega}}{s} = \frac{k_{p\Omega}}{s} \left( s + \frac{k_{i\Omega}}{k_{p\Omega}} \right) \quad (\text{III.38})$$

La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte est donnée par ( $C_r=0$ )

$$FTBF_{\Omega} = \frac{k_{p\Omega}}{s} \left( s + \frac{k_{i\Omega}}{k_{p\Omega}} \right) \frac{3p\phi_{sf}}{2} \frac{1}{Js + f_r} \quad (\text{III.39})$$

En adoptant la méthode de placement de pôle et la fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée est donnée par:

$$FTBF_{\Omega} = \frac{3p\phi_{sf} \cdot k_{p\Omega} \left( s + \frac{k_{i\Omega}}{k_{p\Omega}} \right)}{2J \cdot s^2 + (2f_r + 3p\phi_{sf} \cdot k_{p\Omega})s + 3p\phi_{sf} \cdot k_{i\Omega}} \quad (\text{III.40})$$

Après le calcul on trouve :

La  $FTBF_{\Omega}$  possède une dynamique de 2ème ordre, par identification à la forme canonique du 2ème ordre dont l'équation caractéristique est représentée comme suit :

$$FTBF_{\Omega} = \frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \left( \frac{2\xi}{\omega_0} \right) s + 1 \quad (\text{III.41})$$

Avec:

$\omega_0$ : Pulsation propre du système.

$\xi$ : Coefficient d'amortissement.

Et  $\xi$  représente le coefficient d'amortissement et  $\omega_0$  représente la pulsation naturelle. Par identification des équations (III.40) et (III.41) on obtient :

$$\frac{2J}{3p\phi_{sf}.k_{i\Omega}} = \frac{1}{\omega_0} \quad (\text{III.42})$$

$$\frac{3p\phi_{sf}.k_{p\Omega}+2f_r}{3p\phi_{sf}.k_{i\Omega}} = \frac{2\xi}{\omega_0} \quad (\text{III.43})$$

On déduit  $k_i$  et  $k_p$   $k_i$  :

$$k_i = \frac{2J.\omega_0^2}{3p\phi_{sf}} \quad (\text{III.44})$$

$$k_{p\Omega} = \frac{4.\xi.J.\omega_0+2.f_r}{3p\phi_{sf}} \quad (\text{III.45})$$

### III.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation de la commande vectorielle. Cette dernière permet d'atteindre un découplage entre les axes d et q, ce qui rend la MSAP similaire à la machine à courant continu. Cette méthode nous permet d'améliorer le comportement dynamique du système étudié.

Les résultats de la simulation de système étudié fera l'objet de notre prochain chapitre.

IV.1 Introduction

Les modèles établis dans les chapitres précédents seront implémentés sous l’environnement Matlab\simulink. Les résultats de simulation obtenus seront présentés et interprétés.

IV.2 Simulation du système global étudié

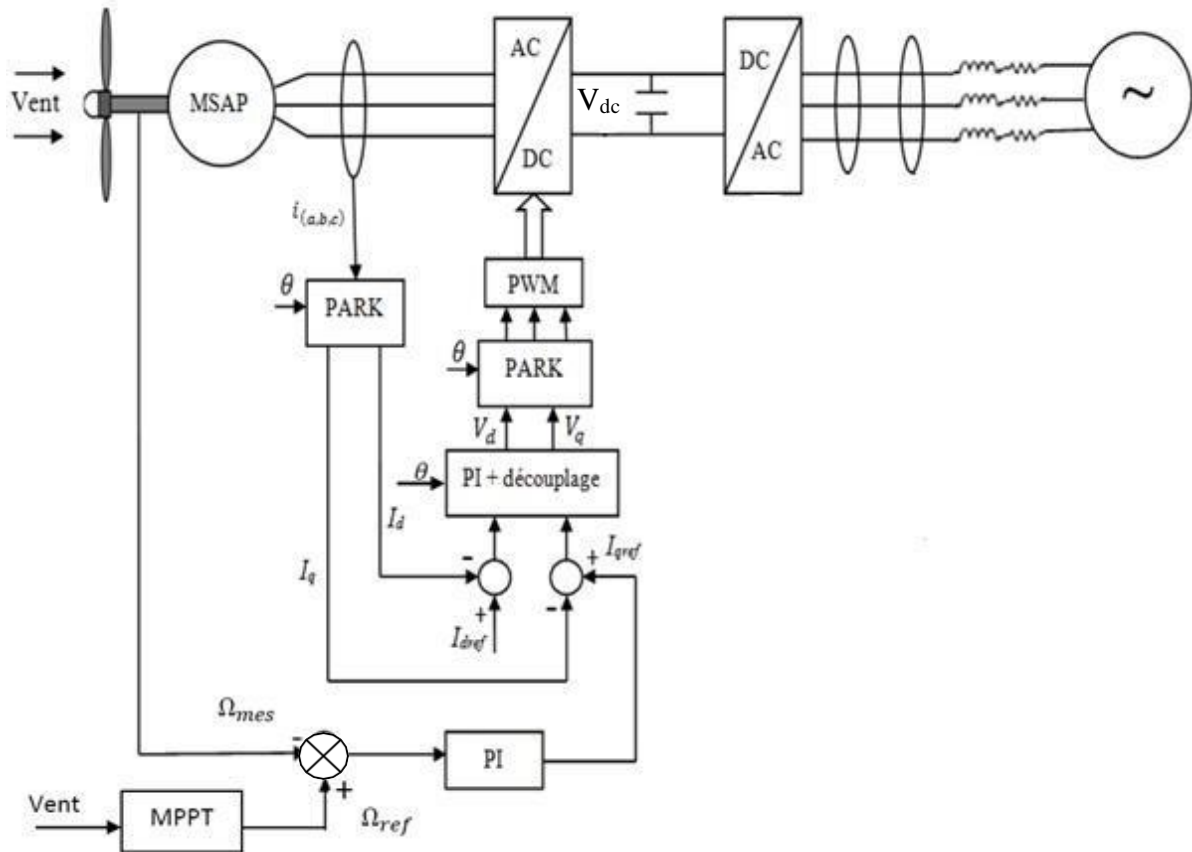


Figure IV.1 Le schéma global de la commande vectorielle avec régulateur PI.

IV.3 Résultats de simulation et interprétations

Une simulation de la chaîne complète sous matlab\simulink est effectuée, les résultats de simulation obtenus sont représentés par les figures (IV.2)-(IV.13). Les paramètres de toute la chaîne sont donnés en annexe.

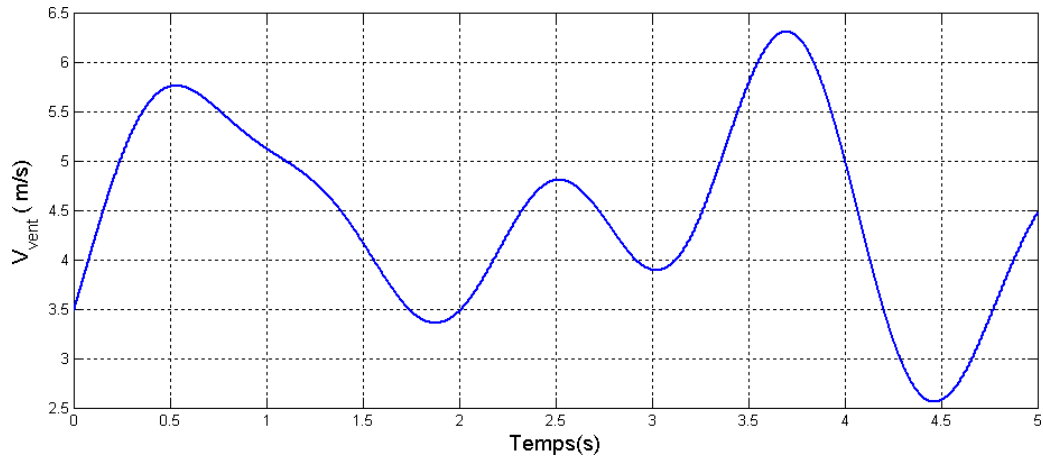


Figure IV.2 Profil du vent

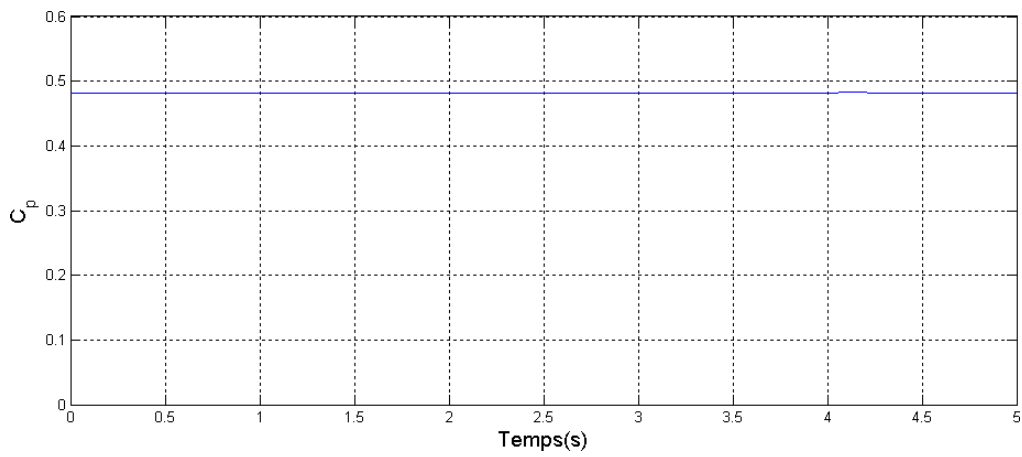


Figure IV.3  $C_p$  en fonction du temps

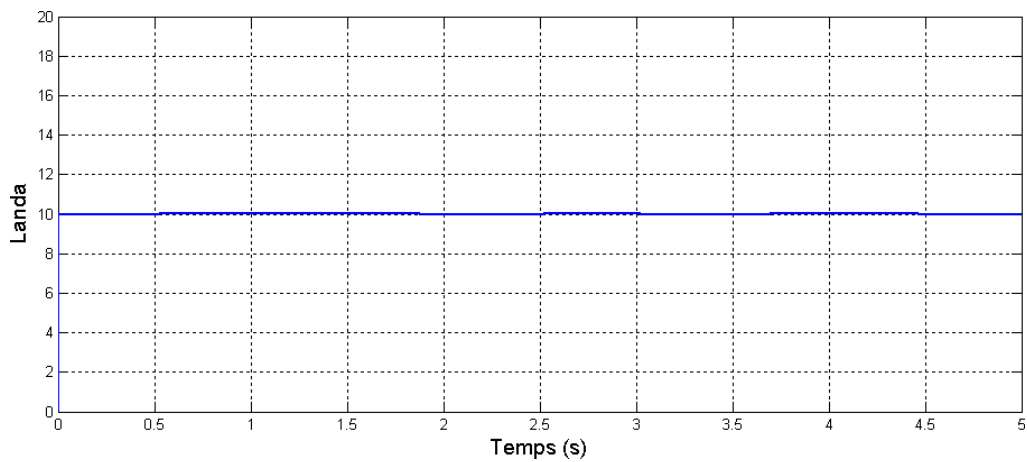


Figure IV.4  $\lambda$  en fonction du temps

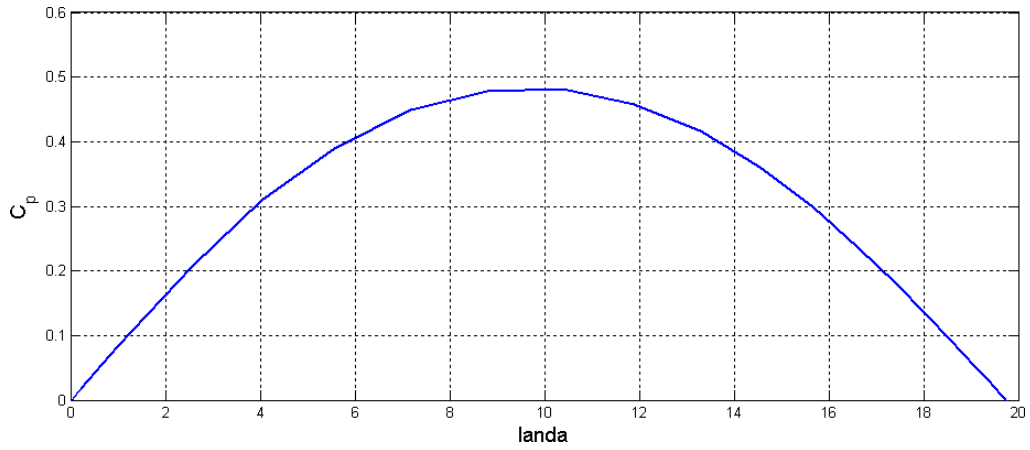


Figure IV.5  $C_p$  en fonction de  $\lambda$

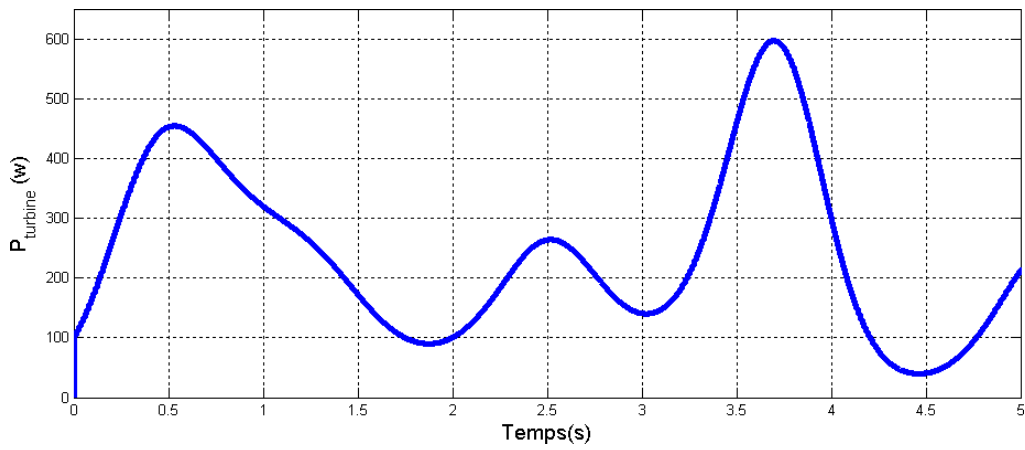


Figure IV.6 Puissance de la turbine

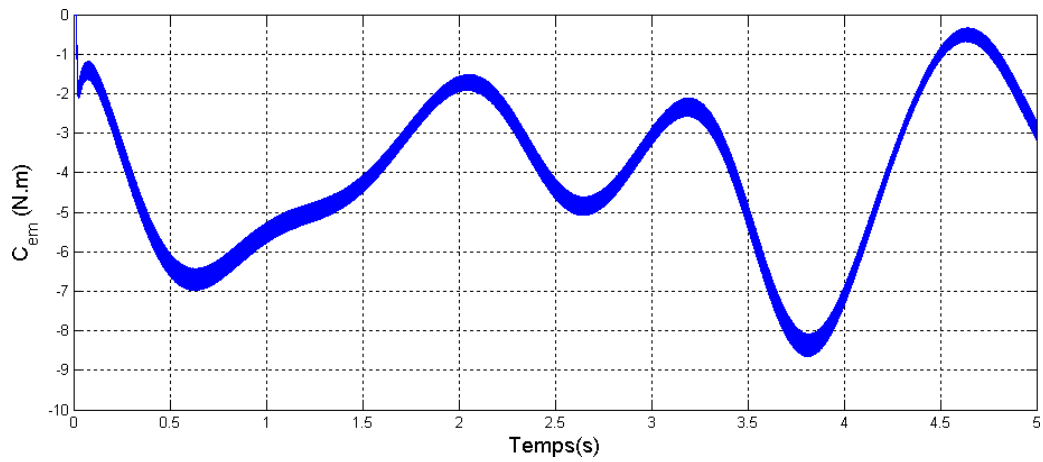


Figure IV.7 Couple électromagnétique.

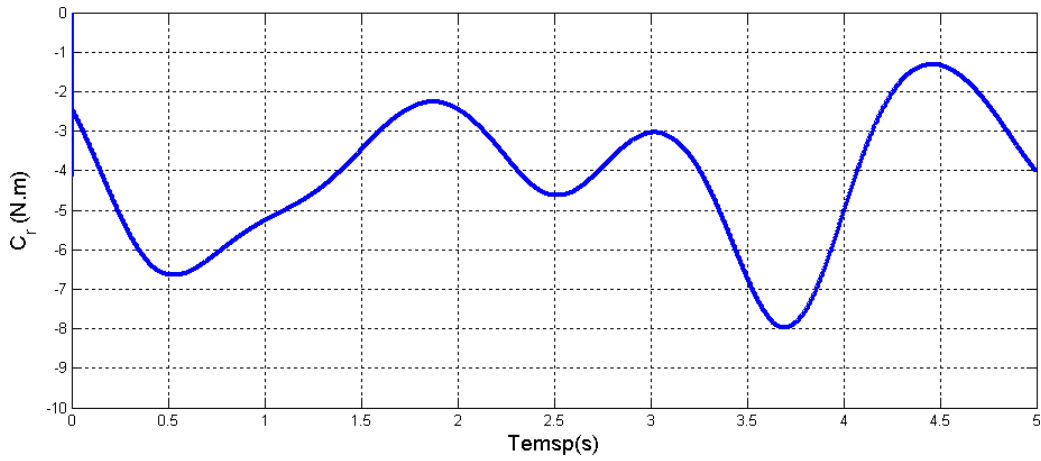


Figure IV.8 Couple résistant

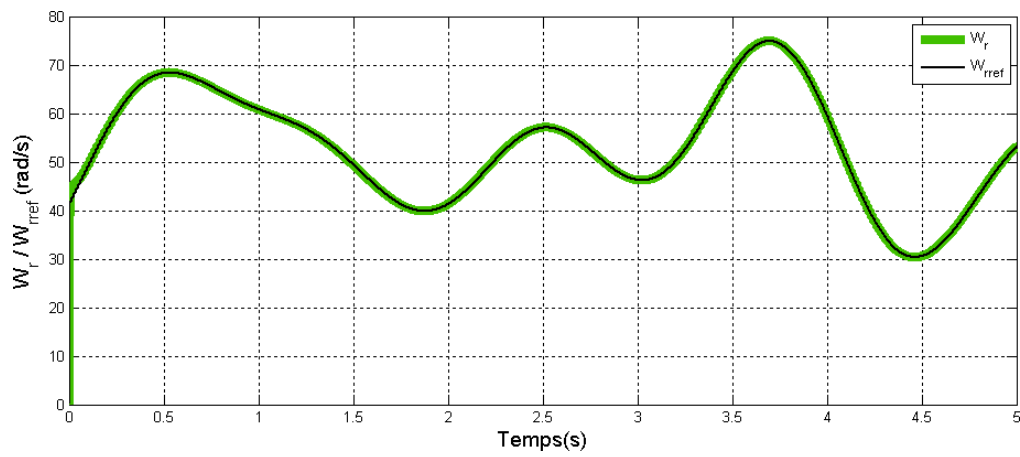


Figure IV.9 Vitesse de rotation de la MSAP et sa référence

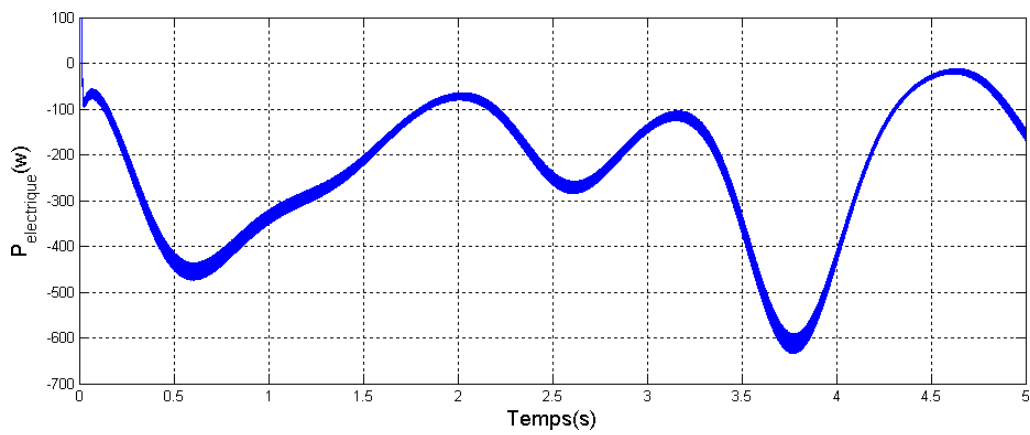


Figure IV.10 Puissance électrique

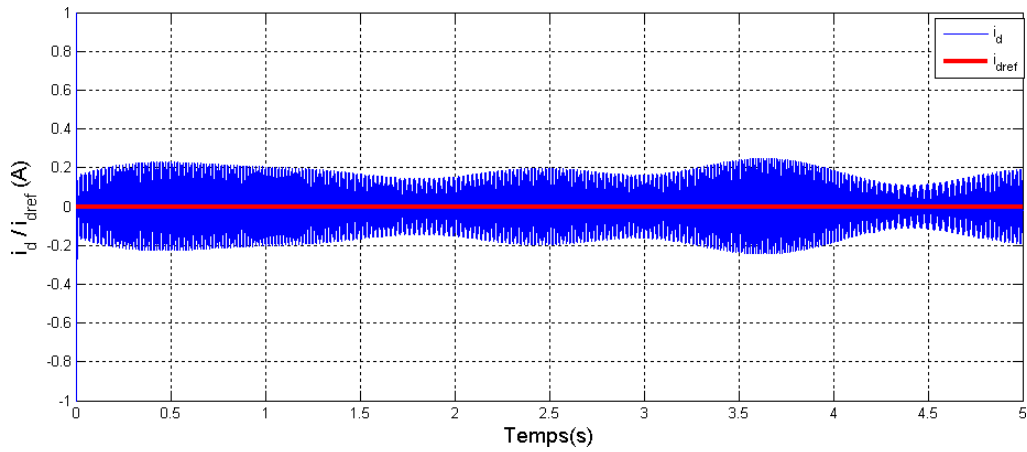


Figure IV.11 Courant mesuré  $i_d$  et référence  $i_{dref}$

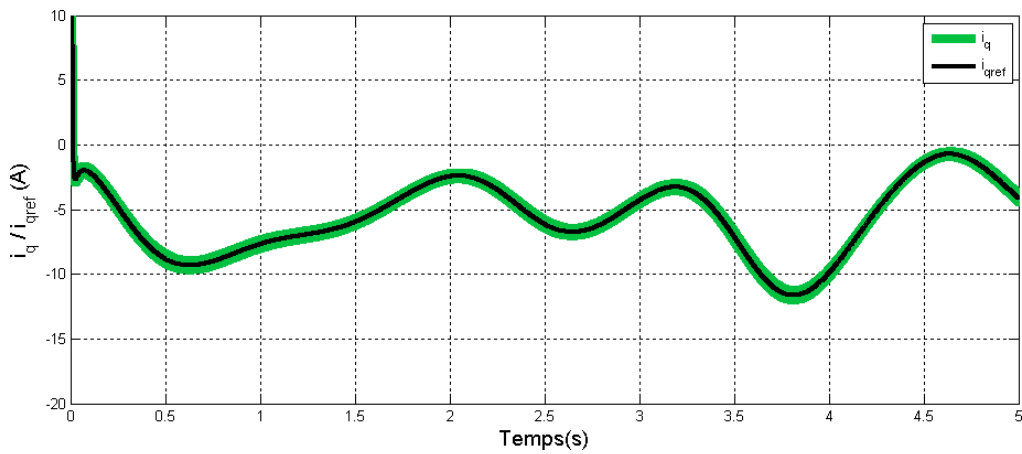


Figure IV.12 Courant mesuré  $i_q$  et référence  $i_{qref}$

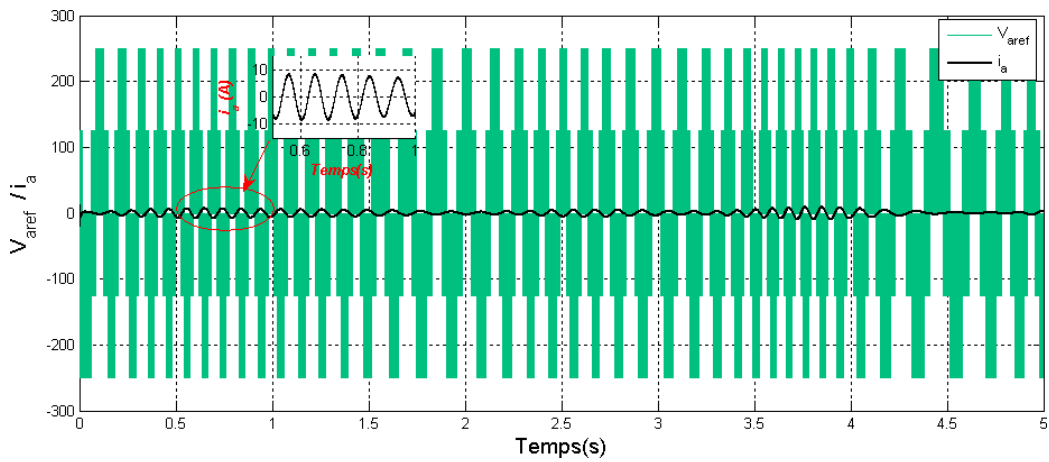


Figure IV.13 Courant statorique et la tension de l'onduleur



- La figure (IV.2) représente le profil de vent qui varie entre (2.6m/s) à (6.4 m/s)
- La figure (IV.3) représente le coefficient de la turbine max ( $C_{pmax}$ ), sa valeur est (0.48)
- La figure (IV.4) représente le ratio de la vitesse optimale  $\lambda$  (*landa*).ça valeur est (10)
- La figure (IV.5) représente le coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de ratio de la vitesse  $\lambda$  (*landa*).  $C_{pmax} = 0.48, opt = 10$
- La figure (IV.6) représente la puissance mécanique, issue de la turbine
- La figure (IV.7) montre le couple électromagnétique qui suit le couple résistant délivré par la turbine représenté dans la figure (IV.8) avec un signe négative, cela justifie que notre machine est en mode génératrice. Leur valeur nominale est (8 N.m).
- La figure (IV.9) montre la vitesse de rotation de la MSAP qui suit parfaitement ça référence. Leur valeur varie entre (30 rad /s) à (76 rad/s).
- La figure (IV.10) montre que la puissance électrique issue du générateur avec un signe (-) cela signifie que la puissance électrique injecté au réseau
- La figure (IV.11) représente respectivement le courant  $i_d$  qu'on à imposé égal zéro, On remarque que  $i_{dref}$  suit bien ça consigne
- La figure (IV.12) représente  $i_q$  qu'on à obtenus grâce au régulateur PI. Qui Suit parfaitement le  $i_{qref}$
- La figure (IV.13) représentent l'onde du courant d'une phase statorique, et la tension d'une phase de l'onduleur. On remarque que le courant est on opposition de phase avec la tension de l'onduleur

#### IV.4 Conclusion

Les résultats de simulation obtenus montrent le bon fonctionnement de l'aérogénérateur et la fiabilité de la commande vectorielle appliquée au système.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

Dans ce travail, nous avons étudié le fonctionnement d'un aérogénérateur basé sur une MSAP, un état de l'art de l'éolien et des différents type d'aérogénérateur est présenté dans le premier chapitre. La production d'électricité d'origine éolienne est de plus en plus importante et les performances des aérogénérateurs sont en évolution permanente afin d'améliorer le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques, d'améliorer la qualité de l'énergie produite et de diminuer le coût d'exploitation.

Une modélisation des différents éléments de la chaîne éolienne a été élaborée selon une structure de conversion d'énergie choisie constituée d'une machine synchrone à aimants permanents, pilotée par le stator par un convertisseur contrôlé par MLI, un bus continu placé en aval de ce convertisseur, garde par un control adéquat une tension constante. La liaison au réseau est ensuite réalisée par un autre convertisseur contrôlé par MLI, un filtre de lissage, Un modèle continu équivalent du système complet, a été développé dans le but d'analyser son comportement dynamique. Compte tenu de la complexité du système étudié, un dispositif de commande a été développé dont est basé sur la commande vectorielle de la génératrice.

Les résultats de simulations obtenus d'après le travail nous a permet de conclure la fiabilité de la commande vectorielle utilisée.

On peut proposer quelques perspectives qui peuvent améliorer les performances de la chaîne de conversion proposée :

- Utilisation des commandes non linéaires (mode glissant, logique floue,...)
- Remplacer les convertisseurs à deux niveaux par des convertisseurs multi niveaux
- Remplacer des convertisseurs pour pouvoir connecter la génératrice au réseau

## Références bibliographiques

---

- [1] Boumezouer Faouzi, « Modélisation et commande d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », mémoire d'ingénieur de l'université de Bejaia.
- [2] Mirecki A., « Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance », Thèse de Doctorat, INPT, France, Avril 2005.
- [3] A. Tounsi «Utilisation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité», Journées du club EEA, 28-29 Janvier, 1999, Paris, France, pp. 1-14.
- [4] L Change « système de conversion d'énergie éolienne », IEEE Canadian Reviewsummer /Eté2002.
- [5] H. Camblong, "Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable", Thèse de Doctorat en Automatique, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.
- [6] Toual Belkacem « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable », thèse de doctorat de Université de Batna, 2010.
- [7] Y.Himri.,A. boudghene Stambouli,B.Draoui,S.Himri "Rrview of wind energy use in Algeria" Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 910-914.
- [8] Said M.A. Ibrahim, 'Energy in the Arab Woeld', Energy,Vol. 9, N°3,pp. 217-238, 1984.
- [9] F.H.Bensaad,'The Algerian Programme on Wind Energy', Proceedings of WEAC, pp. 21-27, Oxford,1985.
- [10] R.hammouche, 'Atlas Vens de L'Algérie', office des publication Universitaires (OPU), alger, 1990.
- [11] N.kasbadji-merzouk, 'Wind Energy Potential of Algeria', Renewable Energy,vol.21, N°3-4,pp.553-562,2000.
- [12] N.Kasbadji-merzouk, "Evaluation du Gisement Energétique Eolien. Contribution à la Détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie", Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2006.
- [13] F. Youcef Ettoumi, 'Ressources Énergétiques Renouvelables en Algérie',Thèse de doctorat d'tat , USTHB, Alger, 2002.

## Références bibliographiques

---

- [14] F.Chellali, A. Khellaf ,A.Belouchrani,A. Reciouï, ‘A Contribution in the Actualization of Wind Map of Algeria’ *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ,Vol. 15,N°2,pp.993.
- [15] Publications du Centre de Développement des Energies Renouvelables [www.cder.dz](http://www.cder.dz)
- [16] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne », thèse de doctorat de l’université de Nantes, 2003.
- [17] R.REDJEM << Étude d’une chaîne de conversion d’énergie éolienne>> Thèse Magister Université Mentouri de Constantine, 2009
- [18] C. Bourillon, "Wind Energy – Clean Power for Generations", *Renewable Energy*, Vol. 16, pp. 948-953, 1999.
- [19] L. Khettaïche, "Étude et Commande d’un Système Eolien à Base d’une Machine Electrique Double Alimentée", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2007.
- [20] D.DJEMAA << Etude de l’écoulement autour d’une éolienne de type Savonius. Simulation des performances de l’éolienne>> Thèse Magister Université El-hadj lakhdhar Batna, 2010
- [21] 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.
- [22] 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
- [23] H.ARANTZMENDI «Etude de structure d’intégration des systèmes de génération Décentralisés», Thèse de doctorat de l’institut national polytechnique de Grenoble, France, 2006.
- [24] Hamrouni N. and all, « New Control Strategy for 2-Stage Grid-Connected Photovoltaic System», *Science Direct, Renewable Energy Journal*, Vol. 33, pp. 2212-2221, 2008.
- [25] H. Camblong, "Minimisation de l’Impact des Perturbations d’Origine Eolienne Dans la Génération d’Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable", Thèse de Doctorat en Automatique, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.

## Références bibliographiques

---

- [26] Abdenour Abdelli, optimisation multicritère d'une chaîne d'éolienne passive thèse Doctorat, INP de TOULOUSE, 2004
- [27] Luc MOREAU, modélisation, conception et commande de la génératrice à Reluctance variable basse vitesse, thèse doctorat, université de Nantes, 2005
- [28] Houari Azzedine « Etude et simulation d'une petite éolienne à base d'une Génératrice synchrone à aimant permanent », mémoire d'Ingénieur, Université de Bejaia, 2008.
- [29] L. Xu & W. Cheng "Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme", IEEE Tran. On Industry Application 31 (1995), no. 3, p. 636-642, mai/juin 1995.
- [30] R. Mukand Patel, « Wind and Solar Power Systems » CRC Press, 1999.
- [31] F. MEIBODY-TABAR, « Machines synchrones à aimants permanents alimentées par onduleurs de tension ; Modélisation, Commande et Segmentation de puissance », habilitation à diriger des recherches, Nancy, France, 2000.
- [32] S. ALLOUNE, K. IDJDARENE, « Etude de la commande vectorielle de la machine synchrone double étoile », mémoire d'Ingénieur, université A. Mira Bejaia, 2002.
- [33] R. Abdessemed, M. Kadjouj "Modélisation des machines électriques". Presse de l'université de Batna 1997.
- [34] G. Lacroux "Actionneurs électriques pour la robotique et les asservissements" Lavoisier, 1995
- [35] B. Hacène "Contribution à la Commande des Machines Synchrones à aimants Permanents" Thèse de Doctorat, L'institut National Polytechnique de Lorraine .juin 1995.
- [36] Menasri Idir et Menasri Loucif « Commande d'un système éolien autonome basée sur une génératrice asynchrone avec stockage », Mémoire de fin d'étude, université A. Mira de Bejaia, 2008.
- [37] K. Ouari « Commande des machines électriques alimentées par onduleur de tension », thèse doctorat université Bejaia, 2013.
- [38] H. Bulher, « Convertisseur statiques », Presse Polytechniques et Universitaires Ramandes, Edite, 1991.
- [39] M. Keita, « Techniques de commande des convertisseurs », Maîtrise en Technologie des Systèmes, Ecole de Technologie Supérieure, Montréal, Canada, Aout 1999.

## Références bibliographiques

---

- [40] S. El Aïmani, B. François, B. Robyns, « Modélisation de générateurs éoliens à vitesse variable Connectés à un bus continu commun, Forum International sur les Energies Renouvelables, FIER 2002, Tétouan, Maroc, 8-10 mai 2002.
- [41] J.T.G. Pierik, J. Morren, E.J. Wiggelinkhuizen, S.W.H. de Haan, T.G. van Engelen, J. Bozelie, « Electrical and Control Aspects of Offshore Wind Farms II (Erao II), Volume1: « Dynamic models of wind farms », Juin 2004
- [42] R. Sadouni, « Commande par mode glissant flou d'une machine asynchrone à double étoile », Thèse de Magister, Université de Sidi Bel Abbès, 2010.
- [43] K. Nabti, « Stratégies de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [44]. G. Grellet, and G. Clerc, « Actionneur électriques, principes, modèles, commande » Eyrolles, 1997.
- [45]. H. Amrous, « Commandes adaptatives d'une machine synchrone à aimants permanents », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2009.
- [46] M. Sebba, A. Chaker, Y. Meslem, S. Hassaine « Commande en Vitesse du Moteur Synchrone à Aimants Permanents Doté d'un Observateur de Luenberger », 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing, CIP'2007, Tiaret, 03-04 Nov. 2007.
- [47] J.M. RETIF « Commande Vectorielle des Machines Asynchrones et Synchrones », Notes de Cours, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA), 2008.
- [48] C. Bouchereb « Contrôle direct du couple des machines synchrones », mémoire de magister en électrotechnique, université de Batna, 2005.
- [49] N. Benyahia, K. Srairi, S. M. Mimoune, « Commande de la machine asynchrone par orientation du flux rotorique », pp.147-150, N°06, Juin 2005.
- [50] A. Aoufi, « Utilisation d'observateurs à modes glissants pour le contrôle direct de couple et le contrôle vectoriel d'une machine asynchrone à cage », Thèse de magistère, Université de Biskra, 2011.
- [51] Annane Adel, « Analyse du comportement du moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable ». Mémoire de magister, option ELECTROMECHANIQUE, Université d'Annaba, 2009.

## 1. Paramètres de la turbine éolienne

$$R = 1.6(\text{m})$$

$$J = 0.0004(\text{kg}/\text{m}^2)$$

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

$$G = 1.9$$

$$\lambda_{\text{opt}} = 10$$

$$C_{p-\text{max}} = 0.527$$

## 2. Paramètres de MSAP

$$R_s = 0.1738(\Omega)$$

$$L_d = 8.524e^{-4}(\text{H})$$

$$L_q = 9.515e^{-4}(\text{H})$$

$$J = 0.1(\text{kg}/\text{m}^2)$$

$$f = 0.0085(\text{N.m.s}/\text{rad})$$

$$p = 4$$

$$\phi_{\text{sf}} = 0.12(\text{Wb})$$

## 3. Régulateurs de vitesse de la turbine :

$$K_i = 1510.3$$

$$K_p = 121730$$

## 4. Régulateurs PI des courants :

$$K_{id} = 2453.88102643126$$

$$K_{pd} = 2.04182630674013$$

$$K_{iq} = 2453.88102643126$$

$$K_{pq} = 2.041826306740135$$

## Régulateur PI de vitesse :

$$K_{i\Omega} = 297.220617546543$$

$$K_{p\Omega} = 11.5739771516784$$

# Annexes

---