## <u>République Algérienne Démocratique et Populaire</u> <u>Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche</u> <u>Scientifique</u> <u>Université Ahmed Draia Adrar</u> Faculté Des Sciences et de Technologies Département Des Sciences et Technologie



Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme : Master En Electrotechnique Option : Commande Electrique

# THEME

# Modélisation et contrôle d'un système de pompage d'eau connecté à l'éolienne

## Présenté Par :

- Guerida Siham
- Ouafi Othmane

Soutenu Le 23/06/2019 Devant un membre de jury composé de :

Dr. Makhlofi SalimMr. Belbakri TaharDr. Harrouz Abdelkader

Président

Examinateur

Encadreur

## Année Universitaire2018-2019

# REMERCIEMENT

Au terme de ce modeste travaíl, nous tenons à remercíer **Allah** le tout puíssant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patíence pour achever cetravaíl.

Nous exprimons nos vifs remerciements en particulier note promotrices **Dr. Abdelkader harrouz** qui a accepté de nous encadrer et pour ces orientations et soutiens.

En tiens a remercier tous les enseignants du département électrotechnique, qui nous ont donné de leurs savoir et nous ont soutenu tout au long de notre cursus, ainsi les membres de jury, qui ont bien voulu nous faire l'honneur de juger notre travail.

Nous remercions aussi tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

*Toute la promotion MASTER commande électrique 2018/2019* 

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma très chère Mère **o. zaíneb,** et mon très cher Père**G .Mohamed,** Tata Halíma

A ceux quí ont veillé pour mon bien être

A ceux qui m'ont toujours encouragé pour que je réussisse dans mes

études

A tout ce qui est m'encouragé dans la réalisation de ce modeste travail

A mon fiançaille**B. Mohamed** 

A tout la famílle

Sans oublier tous mes amies.

SIHAM

# Dédicaces

## Je dédie ce modeste travail

## A ma très chère Mère **Abderrahmane Zohra** et mon très cher Père **Mabrouk Ouafí**

A ceux quí ont veillé pour mon bien être

A ceux quí m'ont toujours encouragé pour que je réussisse dans mes

études

A tout ceux quí m'ont encouragé dans la réalisation de ce modeste travail

A mes très chers frères,

A mes très chères sœurs

A tout la famílle

Sans oublier tous mes amí.

OTHMANE

## Sommaire

Introduction générale	1
I.1 Introduction	4
I.2 Définition d'énergie éolienne	4
I.3 énergie éolien en quelque chiffre:	5
I.3.1 la capaité mondial installeé de l'énergie éolienne	5
I.4 les régions ventées en Algérie	6
I.5 l'Atlas de la puissance en sud	6
I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	8
I.6.1 Avantages	8
I.6.2 Inconvénient	9
I.7 Les différents types d'éoliennes	9
I.7.1. Eoliennes à axe vertical	9
a. Savonius	9
b. Darrieus	10
I.7.2. Eoliennes à axe horizontal	10
I.7.3. Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes	11
I.8 Constituants d'un aérogénérateur	12
I.9 Zone de fonctionnement de l'éolienne	14
I.11 Applications de l'énergie éolienne	15
I.12 Description d'un système de pompage	16
I.12.1 Le pompage éolien	16
I.12.2 Les différents systèmes de pompages d'eau	17
a_ Eolienne de pompage d'eau mécanique	17
b_ Eolienne de pompage d'eau électrique	18
I.13 les différents types de machines électriques utilisées	18
I.13.1 Les machines synchrones	18
I.13.3 Les machines à courant continu	19
I.13.4Les générateurs à réluctances variables	19
I.14 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne	19
I.14.1 Générateur Asynchrone	19
I.14.1.1 Génératrices asynchrones à cage	19
I.14.1.2 Génératrices asynchrones à double alimentation (GADA)	20
I.14.2 Génératrices synchrones	21
I.14.2.1 Générateur Synchrone à Aimants Permanents	21
I.14.2.2 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné	22
I.15 Structure des systèmes pompage éolien	22

I.17 Conclusion	25
II.1Introduction	27
II.2 Machine synchrone à aimants permanents(MSAP)	
II.2.1 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents	
II.2.2 Principe de fonctionnement de la MSAP	
II.2.3 Structure d'une MSAP	
II.3 Les aimants permanents	32
II.3.1 Description	32
II.3.2 Propriété des aimants permanents	
II.4 Les avantage des machines synchrones à aimants permanentes	34
II.5 Inconvénients des machines synchrones à aimants permanents	34
II.6 Générateur Synchrone à Aimants Permanents	35
II.7 Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur	35
II.8 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents	
II.8.1 Hypothèses simplificatrices	
II.8.2 Les équations de tension et flux	36
II.8.3Equationmécanique	
II.8.4 La transformation de park	
II.9 Modélisation de la MSAP dans le repère de Park	
II.9.1 Equation éléctrique	
II.9.2 Calcul de puissance	
II.9.3 Couple électromagnétique	
II.10 Simulation et interprétation	
II.10.1Fonctionnement à vide	40
II.10.2 Fonctionnement en charge (R <sub>ch</sub> , L <sub>ch</sub> )	41
Interprétation des résultats	45
II.11 Conclusion	45
III. 1 Introduction	47
III .2 Contrôle PID	47
III.2.1Principe de la commande PID	48
III.2.2 Structure d'un PID	48
III.3 Stratège du commande <i>MLI</i>	50
III.3.1 Description	50
III.3.2 Les techniques de commande MLI	50
III.3.2.1 MLI à Bande d'hystérésis	50
III.3.2.2 MLI vectorielle	
III.3.2.3 MLI à échantillonnage périodique	51

III.3.2.4 MLI à porteuse triangulaire	.52
III.4 Structure de la commande	53
III.5 Modélisation de la chaine de production d'énergie éolienne	53
III .5.1 Modélisation du vent	53
III .5.2 Modélisation de la turbine éolienne	54
III .5.3 Modélisation mécanique du couplage turbine – génératrice	57
III .5.4 Modèle de la GSAP	58
III .6 Simulation	59
III.7 Redresseur à commande MLI	61
III.7.1 Le principe de fonctionnement	61
III.7.2 Modélisation d'un redresseur	62
III.8Modélisation de système de pompage avec l'éolien	63
III.8.1 Model d'un motor DC	63
III.8.2 Modélisation de la pompe hydraulique	64
III.9 Conclusion	65
Conclusion général	66
Références bibliographiques	67

#### Modélisation et contrôle d'un système de pompage d'eau connecté à l'éolienne

## Résumé

L'objective de ce travail est de commander une éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) utilisé pour le pompage d'eau. Dans un premier temps, un état de l'art sur les éoliennes, les différentes structures d'alimentation et le type de génératrices utilisées. Les modélisations de la GSAP seront présentées. Ensuite, nous utilisons les régulateurs Proportionnel Intégral (P-I-D) en premier lieu, puis un contrôle MLI dans le but d'augmenter le degré d'efficacité et d'améliorer les performances de notre système. **Mots clés** : Eolienne, GSAP, Turbine, modèle PID , MLI.

## Abstract:

The objective of this work is to order a wind turbine based on a synchronous generator to permanent magnets (GSAP) used for pumping water. At first, a state of art on wind turbines, different power structures and the type of generators used. The modelizations of the GSAP will be presented. Next, we use Proportional Integral (P-I-D) controllers first, then a PWM control to increase the efficiency and improve the performance of our system. **Key words**: Wind turbine, GSAP, Turbine, PID model, MLI.

## ملخص:

الهدف من هذا العمل هو التحكم في توربينات الرياح على أساس مولد متزامن لمغناطيس دائم GSAP يستخدم لضخ المياه. في البداية تقديم عام لتوربينات الرياح، هياكل الطاقة المختلفة ونوع المولدات المستخدمة، سيتم تقديم نماذج من GSAP بعد ذلك، نستخدم أولا أدوات التحكم في التناسب المتكامل PID ثم فحص MLI من أجل زيادة الكفاءة وتحسين اداء نظامنا.

الكلمات المفتاحية: توربينات الرياح ، GSAP ، التوربينات ، نموذج MLI ، PID.

## La liste des figures et des Tableaux

## La liste des figures

## Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens et pompage

Fig.I. 1 Conversion de l'énergie cinétique du vent4
Fig.I. 2 capacité mondiale installé en MW5
Fig.I.3 la premier éolienne de pompage installée en 1953 à Adrar5
Fig.I. 4 comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés
Fig.I. 5 Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10m du sol7
Fig.I.6 .Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol
Fig.I .7 Eolienne à axe vertical la Savonius10
Fig.I. 8 Eolienne à axe vertical la Darrieus10
Fig.I. 9 Eolienne à axe horizontal11
Fig.I. 10 Différentes parties de l'éolienne
Fig.I. 11 Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent14
Fig.I. 12 système de pompage éolienns16
Fig.I. 13 Schéma d'une éolienne de pompage d'eau mécanique17
Fig.I. 14 Eolienne de pompage d'eau électrique18
Fig.I. 15 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)20
Fig.I.16 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable20
Fig.I. 17 Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation21
Fig.I. 18 Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents21
Fig.I. 19 Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné
Fig.I. 20 Structure des système pompage éolienne
Fig.I. 21 Variation de la hauteur de pompage avec le débit moyen fourni, pour différentes
vitesses du vent (données constructeur)
Fig.I. 22 Le système de pompage d'eau dans la région d'ADRAR

## Chapitre II : Présentation et simulation d'un GSAP

Fig.II. 1 Types de rotor	27
Fig.II. 2 Photographie de moteur à aimants en géométries cylidriques	28
Fig.II. 3 Différents types de rotors d'une MSAP	29
Fig.II. 4 Machines à aimants superficiels	30
Fig.II. 5 Machines à aimants enterrés	31

Fig.II. 6 MSAP avec pièces polaires	32
Fig.II. 7 cycle d'hystérésis	33
Fig.II. 8 courbe de désaimantation	33
Fig.II. 9 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique	35
Fig.II. 10 Modèle de PARK pour la GSAP	38
Fig.II. 11 Simulation de la GSAP à vide	41
Fig.II. 12 Bloc de la simulation de la GSAP en charge	42
Fig.II. 13 Simulation de la GSAP en charge	44

## Chapitre III : Modélisation et contrôle de système étudié

Fig.III. 1Structure d'un correcteur PID	48
Fig.III. 2 Régulateur PID à structure parallèle	49
Fig.III. 3 Régulateur PID à structure série	49
Fig.III. 4 Régulateur PID à structure mixte	50
Fig.III. 5 Modulateur MLI à bande d'hystérésis	51
Fig.III. 6 Modulateur MLI à échantillonnage périodique	52
Fig.III. 7 Modulateur MLI à porteuse triangulaire	52
Fig.III. 8 Structure du système éolien étudiée	53
Fig.III. 9 Voilure à axe vertical de type Savonius	54
Fig.III. 10 Modèle du couple éolien sous Simulink	56
Fig.III. 11 Modèle du couple de la turbine éolienne	57
Fig.III. 12 Schéma bloc de la turbine éolienne	58
Fig.III. 13 les résultats de la simulation de système éolien	60
Fig.III. 14 topologies de base d`un redresseur de tension	61
Fig.III. 15 modèle d'un redresseur a base d'un IGBT	62
Fig.III. 16 Structeur de système de pompage avec l'éolien	63
Fig.III. 17 Simulation de système de pompage	65

### Liste des Tableaux

### Chapitre I:Généralités sur les systèmes éoliens et pompage

MS	Machine synchrone
MSAP	Machine synchrone à aimants permanents
GSAP	Génératrice synchrone à aimants permanents
(d, q)	Indice du repère de Park lié au rotor
$R_s$	Résistance statorique
$L_d$	Inductance statorique directe
$(v_{sd}, v_{sq})$	Composantes de la tension au stator dans le repère de Park
$L_q$	Inductance statorique quadratique
$ ot \psi_f $	Flux d'excitation des aimants permanents
$(\Psi_{sd} \Psi_{sa})$	Composantes du flux statorique dans le repère de Park
(Isd. Isa)	Composantes du courant statorique
C <sub>am</sub>	Couple électromagnétique
Cr.	Couple résistant
P	Nombre de paire de pôles
J	Moment d'inertie totale de la machine
f	Coefficient de frottement visqueux
ω	Pulsation électrique statorique
Ω	Vitesse de rotation mécanique du rotor
F	Vecteur force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable
$V_1, V_2$	Vitesses du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
0	Masse volumique de l'air en température ambiante (15°C)
ρ G	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
3	Masse d'air traversant le rotor éolien en une(1) seconde
т	Puissance extraite par le rotor éolien
$P_m$	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
$P_{mt}$	Coefficient de puissance de l'éolienne
$C_p$	Vitesse spécifique ou ration de vitesse, Tip-Speed-Ratio
$\lambda$ , TSR	
$\Omega_1, \Omega_2$	vitesse de rotation de l'éclienne respectivement avant et après le
$P(\Theta)$	Transformation de Park
$P(\Theta)-1$	Transformation inverse de Park
ia,b,c	Courants des phases statoriques
$\vec{W}t$	Vitesse de la turbine

Va,b,c	Tensions des phases statoriques
rd,q	Tension statorique sur les axes d et q
id,q	Courant statorique sur les axes d et q
fp	Fréquence de la porteuse
ia,b,c	courants d'entrée
Udc	Tension redressée
idc	Courant du bus continu
MLI	Modulation de largeur d'impulsions
PID	proportionnelle intégrale derive



#### Introduction générale

Les avancées technologiques obtenues ces dernières années dans le domaine des composants de l'électronique de puissance ont favorisé une croissance du marché des convertisseurs de puissance ; les onduleurs de tension figurent parmi les plus importants. Ils sont présents dans les domaines d'application les plus variés notamment celui de la variation de vitesse de machines à courant alternatif.

Le développement des semi-conducteurs commandables, ainsi que la méthode dite Modulation de la largeur d'impulsion (MLI) ont apporté une plus grande souplesse dans le contrôle des convertisseurs autorisant une meilleur dynamique, une précision plus grande dans la régulation des machines.

Ces dernières années, de nombreuses recherches se sont intéressées à l'utilisation des énergies renouvelables notamment l'énergie éolienne.

Une éolienne est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire l'énergie électrique. Le vent est une ressource propre, abondante et inépuisable qui peut produire l'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluant. Sachant que nous nous intéressons a un système de pompage éolien, nous devons nous familiarisé avec tous les éléments le constituant [1].

Les éoliennes de pompage ont pour fonction l'exhaure d'eau. Elles sont très compétitives dans le contexte des sites isolés par rapport aux motopompes, très gourmandes en carburant.

Le travail réalisé dans ce mémoire, est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre comprend, en première partie, les généralités sur les énergies renouvelables avec les principes fondamentaux et un aperçu des différents types d'éoliennes. Nous aborderons leurs caractéristiques technologiques, leurs systèmes de régulation et de protection. La deuxième partie de ce chapitre concerne les différentes configurations de chaines de conversion dédiées au petit éolien.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents. Nous donnons un bref aperçu sur la machine synchrone, son principe de fonctionnement ainsi que les différentes structures des machines MSAP dans l'industrie.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation de la chaine de conversion éolienne basée sur la (MSAP).Une stratégie de commande MLI avec PID a été étudié pour commander notre machine en tension.

Enfin une conclusion générale résume les principaux résultats auxquels nous avons abouti.



# Chapitre I

# Généralités sur les systèmes éoliens et de pompage

## **I.1 Introduction**

La conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique connait un essor considérable depuis ces dernières décennies. Cela est dû d'une part, a des contrainte d'ordre environnementales mais également à une maitrise de plus en plus grande des technologies mises en ouvres pour assurer cette conversion.

Pour ce, le grand éolien devient compétitif en termes de coût de production. Il est entrain de contribuer à la réduction des rejets de gaz à effet de serre.

Dans ce premier chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et les déférents types de génératrices.

A la fin de chapitre on présent la description de système de pompage, Les différents systèmes de pompages.

### I.2 Définition d'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'un générateur [1].



Fig.I. 1 Conversion de l'énergie cinétique du vent [1]

## I.3 énergie éolien en quelque chiffre:

### I.3.1 la capaité mondial installeé de l'énergie éolienne



Fig.I. 2 capacité mondiale installé en MW[2]

#### I.3.2 L'énergie éoliennes en Algérie

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 KW sur le site des grands vent (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce pipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par électricité et gaz d'Algérie puis démentée et installée en Algérie.



Fig.I.3 la premier éolienne de pompage installée en 1953 à Adrar

Le plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique. Montée sur un mat de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15 mètres de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans [3].

### I.4 les régions ventées en Algérie

D'après les données du CDER, indique les vitesses des vents pour différents sites situés en Algérie.



Fig.I. 4 comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés[4]

#### I.5 l'Atlas de la puissance en sud

Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieur à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesses moyenne est peut élevée [4].



Fig.I. 5 Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10m du sol[4]

Toutefois, la vitesse du vent subit des variation en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en figure I.4 (Eté et Printemps, Hiver et Automne). On Remarque qu' en général, les périodes estivales et printaniéres sont plus ventées que le Reste de l'année .



## Fig.I.6 Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol.

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

## I.6.1 Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux autres énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.

-C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.

- 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.

### **Chapitre I**

-L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple .ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

-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

#### I.6.2 Inconvénient

- 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 couteuse à rendement faible dans les sites moins ventés[5].

#### I.7 Les différents types d'éoliennes

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, les éoliennes sont classées en deux catégories :

• Eoliennes à axe vertical.

• Eoliennes à axe horizontal.

#### I.7.1. Eoliennes 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.

#### a. Savonius

Du nom de son inventeur, breveté en 1925. Son fonctionnement repose sur le principe de la trainée différentielle exercée par le vent sur ses godets comme montré sur la figure (I.7). Elle présente un grand nombre d'avantages à savoir un couple moteur important.

Outre son faible encombrement, qui permet d'intégrer cette éolienne aux bâtiments sans en dénaturer l'esthétique.



Fig.I.7 Eolienne à axe vertical la Savonius [6]

#### **b.** Darrieus

Du nom de l'ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30. Ce type du rotor est généralement sous forme parabolique comme montré sur la figure (I.8). Son fonctionnement est basé sur la variation cyclique d'incidence ce qui fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles soit soumis à des forces d'intensités et de directions variables [4].



Fig.I. 8 Eolienne à axe vertical la Darrieus [6]

### I.7.2. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent comme montré sur la figure (I.9). Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie son efficacité [7]



Fig.I. 9 Eolienne à axe horizontal [8]

## I.7.3. Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes

Ce tableau représente les avantages et les inconvénients des différents type d'éoliennes

Туре	Avantages	Inconvénients
Eolienne à axe Horizontal	<ul> <li>Choix plus large</li> <li>Installateurs compétents</li> <li>Technologie éprouvée</li> <li>Le prix</li> <li>Un bon rendement</li> </ul>	<ul> <li>-Fonctionnement par intermittence</li> <li>-Doit être orienté selon les vents</li> <li>-Mauvais rendement avec des ventsturbulents</li> <li>-Emprise au sol du mat si haubanage</li> </ul>
		-Nuisances sonoreséventuelles
Eolienne à axe vertical (savonius)	-Faible encombrement (selonles modèles) -Peut être intégrée aux	-Faible rendement -Poids peut être important -Le prix

	bâtiments	
	-Démarre avec des vents faibles	
	-Peut bruyants	
	- Ne nécessite pas de systèmed'orientation	
	-Bon comportement aux ventsTurbulent	
Eolienne à axe vertical	-Peut être installée au sol	-Démarrage difficile
(Darrieus)	Faible encombrement	-Faible rendement
	-Peut être intégrée aux	-Le prix
	bâtiments	
	-Pas de contrainte selon la	
	direction du vent	
	-Bon comportement aux ventsforts	
	-peutbruyantes	

### Tableau1 Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes [12]

## I.8 Constituants d'un aérogénérateur

L'aérogénérateur récupère l'énergie cinétique du vent pour entrainer l'arbre de son rotor, cette énergie est convertie en énergie mécanique, qui est à son tour transformer en énergie électrique à l'aide d'une génératrice électromagnétique solidaire au rotor, cette dernière peut être envoyée au réseau, stockée dans des accumulateurs, ou bien utilisée par des charges isolées[42].



#### Fig.I. 10 Différentes parties de l'éolienne[9]

La tour généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, elle doit etre le plus haut possible pour éviter les perturbations prés du sol. Toutefois, la quantité de matiére mise en oeuvre représente un cout non négligeable et le poids doit et relimit .

La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique: arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, le frein a disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge ainsi que le générateur et les Systems électriques d'orientation des pales.

Le rotor formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées a la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 a 3.

**Une armoire de commande** comportant touts les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les Systems de regulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle.

Un multiplicateur de vitesse l'objective augmente ou diminuant la vitesse.[3]

#### **Chapitre I**

#### I.9 Zone de fonctionnement de l'éolienne

La courbe de puissance d'un aérogénérateur qui est généralement fournie par le constructeurm et en évidence les différentes phases de fonctionnement d'une éolienne suivant la vitesse du vent comme le montre la figure (I.11) [10].

- Zone I : V <Vd : la vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.
- Zone II : Vd <V<Vn : La puissance capté en cette zone est proportionnelle au carré de la vitesse du vent.
- Zone III : Vn<V<Vm : la puissance est maintenant plus importante et constante tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale (P=Pn) quelque soit la vitesse du vent. Cette zone correspond au fonctionnement en pleine charge.
- Zone IV : cette zone est dans laquelle le système de sureté de fonctionnement arrête le transfert d'énergie.



## Fig.I. 3 Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent[11] Avec :

**Vd** la vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Elle varie de 2.5m/s à 4m/s pour les éoliennes de forte puissance selon le constructeur.

Vn la vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale

de la génératrice. Celle-ci varie de 11.5m/s à 15m/s suivant les constructeurs et en fonction de la technologie.

**Vm** vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Vm vaut 25m/s

## I.10 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Un aérogénérateur est un système qui capte l'énergie éolienne (énergie cinétique du vent) et la convertie en énergie électrique. D'une manière générale, un tel système de conversion est constitué d'une turbine, d'un multiplicateur de vitesse, d'une génératrice, généralement triphasé, et d'un circuit d'électronique de puissance. Suivant l'utilisation visée, l'éolienne est alors connectée au réseau électrique ou alimente une charge autonome **[13].** 

## I.11 Applications de l'énergie éolienne

La technologie des systèmes éoliens est très ancienne, elle est utilisée depuis des millénaires pour plusieurs fonctions :

-La signalisation maritime

-La télécommunication

-La radio diffusion

- Les communautés éloignées

-Le pompage de l'eau, qui est la plus ancienne application et la plus répondu jusqu'à présent, car elle utilise une énergie propre qui ne dégage pas de polluants de plus, c'est une solution pour les régions isolées qui s'adapte parfaitement aux conditions naturelles et sociales tout en améliorant la technicité et l'environnement sanitaire des populations [42].

## I.12 Description d'un système de pompage

Le système qu'on va étudier est résumé dans la figure (I-12)

#### Eolienne de pompage



Fig.I. 4 système de pompage éolienns [14]

Il est constitué principalement :

-D'un générateur éolien ;

-De convertisseurs statiques ; « un redresseur » ;

-D'un groupe motopompe qui comprend un moteur et une pompe ;

-D'un réservoir de stockage

Les avantages de choix de système sont :

-Production 100%

-Par de souci d'environnement, n'émet pas des gaz à effet de serre [14]

### I.12.1 Le pompage éolien

Les éoliennes de pompage sont utilisées depuis l'antiquité pour pomper de l'eau dans des puits. Cette utilisation revient à la mode chez les particuliers notamment dans le milieu rural, dans l'optique d'une économie d'énergie et d'un pompage d'eau efficace à moindre coût .

Aussi un tel système présente des avantages, du fait qu'il est souple d'installation, bonne régulation et une maintenance réduite, également il représente des inconvénients comme le cout élevé, rendement que pour des vent élevés (4 à 12 m/s) et son exigence de stockage afin de subvenir aux besoins pour les jours peut venté [12].

Deux types de pompage existent :

- Le système mécanique
- Le système électrique

#### I.12.2 Les différents systèmes de pompages d'eau

#### a\_ Eolienne de pompage d'eau mécanique

Son principe de fonctionnement consiste en : un rotor éolien d'une vingtaine de pales entrainé par un système de bielle-manivelle, ainsi qu'une pompe à piston plongé au fond du puit (Figures I.13). C'est un système qui s'adapte avec les zones peut venter, et avec des besoins en eau journalières ne dépassant pas les 20 m3 en volume et 50 m en profondeur du puit. Pour les puits plus profond, les quantités d'eau pompé sont faible et risque de la tringlerie de pompage sont accrus compte tenu des efforts mécanique [16].

Comme toute éolienne, cette éolienne a ces avantages et ses inconvénients. Elles sont généralement fiable, facile à entretenir et d'un coût abordable, sa contrainte principale réside dans le fait qu'elle doit être installée directement au-dessus du puit ou de l'étang, ceci même si l'eau doit être utilisé a une certaine distance de ce puit **[15]**.



Fig.I. 5 Schéma d'une éolienne de pompage d'eau mécanique [17]

## **b\_**Eolienne de pompage d'eau électrique

Contrairement au système mécanique, le système éolien électrique n'est pas obligé de se placé près de la source d'approvisionnement en eau. Ce système commande une pompe électrique (après conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique) qui aspire l'eau de la source (puit ou autres ...) et la refoule à l'endroit de son utilisation (système d'irrigation, abreuvoir a bétail, ...).

La quantité d'énergie consommée par la pompe électrique peut être adaptée à la puissance de la sortie de l'éolienne, de manière à ce que l'énergie éolienne soit utilisée efficacement. Les éoliennes de pompage électrique ne comprennent pas de batterie. L'eau est stockée dans un réservoir qui sert de réserve d'énergie [15].



Fig.I. 6 Eolienne de pompage d'eau électrique [17]

## I.13 les différents types de machines électriques utilisées

En général les machines les plus utilisées sont :

## I.13.1 Les machines synchrones

C'est ce type de machines qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment pour de très grandes puissance (centrale thermique, hydrauliques et nucléaire) la gamme de puissance de ces générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien varie de 500 kW à 2 MW [18].

#### I.13.2Les machines asynchrones

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator. Ces générateurs asynchrones utilisés dans le domaine éolien de moins de 20kw [19].

#### I.13.3 Les machines à courant continu

Ce type présente une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais ces machines sont chères et ont un grand poids [20].

#### I.13.4Les générateurs à réluctances variables

Sont des machines mécaniquement robustes ; ils ont de plus un bon rendement à toutes les vitesses, une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple [18].

#### I.14 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'électricité. Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable.

Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Elles peuvent être très différentes selon que l'on est en forte ou en petite puissance, en fonctionnement à vitesse fixe (ou peu variable) ou à vitesse variable[18].

#### I.14.1 Générateur Asynchrone

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator.

#### I.14.1.1 Génératrices asynchrones à cage

C'est dans les grandes puissances que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Au départ, le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage directement couplées au réseau jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt. Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire .

Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Dans le cas des aérogénérateurs de dimensions importantes (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce que nécessite d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse.





Une autre structure consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence dimensionné pour la puissance transitoire, et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée.



## Fig.I. 16 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable I.14.1.2 Génératrices asynchrones à double alimentation (GADA)

Une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes est connue sous le nom de générateur asynchrone doublement alimenté. Dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à un convertisseur, qui fait office de variateur de fréquence. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor.



#### Fig.I. 8 Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation

#### I.14.2 Génératrices synchrones

L'avantage du générateur synchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique de la génératrice synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut s'utiliser pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boite de vitesses [15].

Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique, lequel permet un fonctionnement à vitesse variable.

#### I.14.2.1 Générateur Synchrone à Aimants Permanents

La caractéristique d'auto excitation du GSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif.



Fig.I. 9 Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents

#### I.14.2.2 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille [12].

On trouve également des machines synchrones associées à un multiplicateur de vitesse. Ces machines fonctionnent à vitesse variable. Elles débitent sur un redresseur commandé, puis la tension continue est convertie à travers un onduleur MLI pour être compatible avec le réseau.



Fig.I. 10 Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné

#### I.15 Structure des systèmes pompage éolien

Le marché nous offre plusieurs types de machines, de générateurs, pompes, et de Systems de commandes qui contribueront au bon fonctionnement d'un système de pompage d'eau éolien, et qui demande des caractéristiques très spécifiques.



Fig.I. 20 Structure des système pompage éolienne

#### I.16 Le système de pompage éolien dans la région d'ADRAR

Nous nous proposons de présenter les résultats d'une étude préliminaire sur l'utilisation de l'énergie éolienne pour le pompage de l'eau appliquée dans une première étape à la région d'Adrar, y compris Timimoun. Les éoliennes de pompage mécanique sont, d'une manière générale adaptées aux puits de faibles profondeurs (inférieures à 30 mètres). Aussi, nous nous intéressons, dans ce qui suit, au cas de l'installation d'aérogénérateurs de petites puissances (de 1 à 10 kW). Ces derniers sont généralement installés sur des pylônes de 12 à 25 mètres de hauteur. Les données vent disponibles sont des résultats de mesures effectuées à 10 mètres de hauteur. Comme la vitesse du vent augmente avec l'altitude ,une relation empirique est appliquée pour l'extrapolation de ces données à la hauteur du mât de l'aérogénérateur. Tenant compte des caractéristiques de quelques forages en cours d'exploitation, des vitesses de vent moyennes à différentes altitudes ainsi que des courbes type de production d'aérogénérateurs (données constructeur), la possibilité d'équiper les forage d'un aérogénérateur pour le pompage de l'eau est étudiée [13].

Dans les systèmes de pompage de l'eau par aérogénérateur, ce dernier est directement connecté à la pompe, i.e. sans convertisseur de puissance. La pompe utilisée est en général une pompe centrifuge à moteur asynchrone, qui fonctionne à puissance et vitesse de rotation variables. Ces conditions de fonctionnement font que le rendement du système global varie avec la vitesse du vent et la taille de la pompe. Ainsi, selon des données de constructeur, pour un aérogénérateur de 1.5 kW le rendement global est de 30 % environ. Pour un aérogénérateur de 10 kW, le rendement est de l'ordre de 65 %. Les aérogénérateurs couplés directement à une pompe électrique sont ainsi caractérisés par des courbes de variations du débit fourni avec la hauteur de pompage, pour différentes valeurs de la vitesse du vent moyenne (fig.I.21 a & b).

A partir de la fig.I.21a, nous pouvons noter que l'aérogénérateur type de 1500 W ne peut répondre aux besoins définis par les caractéristiques des forages sélectionnés. Il peut être installé sur des puits de 70 mètres de profondeur maximale et dans les cas où les besoins en eau sont faibles. En effet, installé sur un mât de 30 mètres de hauteur, cet aérogénérateur peut fournir en moyenne 20  $m^3$ /jour à Adrar et 12  $m^3$ /jour à Timimoun, pour un puits de 70 mètres de profondeur. Pour un puits de 20 mètres de profondeur, le débit moyen fournit par cet aérogénérateur est de l'ordre de 75  $m^3$ /jour et 45  $m^3$ /jour à Adrar et Timimoun respectivement.


a) Aérogénérateur type de 1500 W

b) Aérogénérateur type de 10 kW

Fig.I. 11 Variation de la hauteur de pompage avec le débit moyen fourni, pour différentes vitesses du vent (données constructeur) [43]



Fig.I. 12 Le système de pompage d'eau dans la région d'ADRAR

## **I.17** Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les énergies éoliennes dans le monde et d'une façon particulière en Algérie. Ainsi, nous avons consacré l'étude sur l'énergie éolienne, avantages et inconvénient de cette forme d'énergie, le principe de fonctionnement, les composants principaux, et la description d'un système de pompage, ainsi que le pompage éolien, les différents systèmes de pompages, et un structure des systèmes de pompage éolien.

Dans le deuxième chapitre nous a permis d'étudie la présentation de la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.



# **Chapitre II**

## Présentation et simulation d'un GSAP

## **II.1Introduction**

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [32].

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche. Le stator est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales où trapézoïdales. Les stators, notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine asynchrone.

Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants (Fig. II.1).



a. Rotor à pôles lisses b. Rotoràpôlessaillants c. Rotor à aimant

Fig.II. 1 Types de rotor [32]

## **II.2** Machine synchrone à aimants permanents(MSAP)

Aujourd'hui la plupart des machines synchrones utilisées dans les petites éoliennes sont des machines synchrones à aimants permanents par rapport à la machine à excitation [3].Car leurs performance, notamment en termes de couple massique, sont très intéressantes lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles.

fréquence Leur étant alors incompatible celle avec du réseaux, le convertisseur de fréquence s'impose naturellement. C'est pourquoi les machines à entraînement direct à variable sont toutes vitesse et donc de maximiser la puissance [21].



Fig.II. 2 Photographie de moteur à aimants en géométries cylidriques [21]

## II.2.1 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques. On note : wr = w/p

- Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source, il est semblable au stator de toutes les machines électriques triphasées. Il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trios enroulements identiques décalés entre eux de 2  $\pi/3$  Le rotor est une partie mobile, se compose d'aimants permanents. Les aimants permanents apporte beaucoup de simplicité comme l'élimination des ballais (donc les pertes rotoriques).
Cependant, le flux rotorique n'est plus commandable.

- Le rotor possède différentes configurations . La figure (II .3) montre trois cas typiques pour un rotor à quatre pôles.

- Une configuration du rotor à pôles saillants possédant des pièces polaires servant à la concentration du flux est montrée à la figure (II.3.a). Les aimants permanents sont magnétisés dans le sens radial.

- Une autre possibilité consiste à disposer les aimants permanents radialement (aimants noyés dans le rotor). Les aimants sont magnétisés tangentiellement comme le montre la figure (II.3.b).

- Enfin la figure (II.3.c) représente le cas où les aimants permanents sont distributes uniformément sur la surface cylindrique du rotor. L'aimantation des aimants est radiale [22].



Fig.II. 3 Différents types de rotors d'une MSAP

- (a) aimants permanents (1) et pièce polaire saillante (2).
- (b) aimants permanents (1) noyés.
- (c) aimants permanents (1) distribués sur la surface du rotor.

## **II.2.2** Principe de fonctionnement de la MSAP

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

\* Le stator : ou l'induit est la partie fixe de la machine, il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de 120° dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe.

\* Le rotor : ou inducteur est la partie mobile de la machine se compose d'aimants permanents. Ce dernier présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes

rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique .Il existe deux types de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors à pôles lisses et les rotors à pôles saillants.

## II.2.3 Structure d'une MSAP

Les machines synchrones ont une puissance massique plus importante et flux rotorique étant connu il est plus facile de maitriser le couple. Les progrès fait dans la fabrication des aimants, qu'ils soient base d'alliages métalliques ou de terre rares font qu'aujourd'hui l'utilisation des MSAP va croissante.

Au plan technologiques les aimants peuvent être surfaciques ou placés dans la profondeur du rotor, ils sont dit alors enterrés (cf. Fig. II .4 et Fig. II .5).



Fig.II. 4 Machines à aimants superficiels



Fig.II. 5 Machines à aimants enterrés

Il existe deux structures de la MSAP selon la disposition des aimants avec les matériaux magnétiques : l'une avec pièce polaires et l'autre sans pièces polaires. Parmi ces deux catégories, un grand nombre de configurations sont envisageables. Ces différentes possibilités dépendent de la nuance, du sens de l'aimantation, des formes géométriques des aimants et de leur disposition au niveau du rotor[39].

## **II.2.3.1** Structures sans Pièces Polaires MSAP

Les aimants, en forme de tuile ou en barreaux élémentaires juxtaposés, sont directement fixés sur la surface du rotor grâce à des frettes (Fig. II.6). Le sens d'aimantation peut être radial , tangentiel ou mixte, les structures à poles lisses sont caractérisées par un entrefer magnétique assez large accentué par l'épaisseur des aimants et par celle de la frette de maintient. De ce fait, l'inductance statorique est plus faible que celle d'une machine classique à rotor bobiné à pôles lisses. Il est alors difficile d'obtenir un couple massique important Ainsi, la réaction d'induit est plus réduite, ce qui favorise une commande plus simple. De plus, pour une amélioration des performances des machines à aimants, l'utilisation des terres rares est plus recommandée pour cette structure [23].



Fig.II. 6 MSAP avec pièces polaires

## **II.2.3.2 GSAP avec Pièces Polaires**

Comme dans les machines synchrones classiques à pôles saillants, la saillance a pour effet de produire une anisotropie au niveau du rotor dont la conséquence est de produire un couple réluctance qui vient s'ajouter au couple d'interaction. A ce principal rôle que doivent assurer les pôles saillants dans les machines à aimants, un autre rôle peut leur être confié, c'est celui de la concentration de flux.

Les pièces polaires permettant également de fixer les aimants sans avoir à utiliser des frettes et de réduire de façon significative l'épaisseur équivalente de l'entrefer ainsi que le volume des aimants par rapport aux structures sans pièces polaires. Les aimants ferrites et à terres rares peuvent être utilisé [23].

## **II.3** Les aimants permanents

#### **II.3.1 Description**

Les matériaux utilisés pour leur proprieties magnétiques se classent en foncnction de la largeur de leur cycle d'hystérésis (fig.II.8) et forment deux grandes familles. La première est celle des matériaux magnétique dure (à large cycle), appelés communément << aimants permanents>> car leur aimantation ne varie pas sous l'effet d'un champ magnétique extérieur la seconde est celle des matériaux magnétiques dits << doux >> qui ne manifestent de proprieties magnétique qu'en presence d'une excitation externe [3].



Fig.II. 7 cycle d'hystérésis

#### II.3.2 Propriété des aimants permanents

Le choix des aimants permanents est primordial puisqu'ils interviennent beaucoup dans le couple massique de la machine.

Les aimants permanents sont principalement caracterises par leurs cycle d'hysteresis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan (B-H) comme le montre laFig.II.8, cette courbe est caractérisée par :



Fig.II. 8 courbe de désaimantation

\*L'induction rémanente (Br), c'est -à-dire l'induction résiduelle au circuit ferme, c'est -à-dire une induction de la puissance potentielle de l'aimant.

\*Le champ coercitif (Hcb), caractérise le champ de magnétisant annulant l'induction, plus sa valeur est élève plus l'aimant est stable.

\*Produit d'énergie volumique(BH) max, ce produit est couramment appelé énergie spécifique de l'aimant ; cette énergie caractérise la qualité du matériau. En effet pour un entrefer donné, le volume est d'autant plus faible, que l'énergie spécifique est élevée[24].

## II.4 Les avantage des machines synchrones à aimants permanentes

Lors de construction des machines synchrones a aimants permanents (MSAP) l'utilisation des aimants permanents a la place des bobinages d'excitation offrent beaucoup d'avantage :

- Commutateur mécanique remplacé par une autre électronique, ce qui a pour effet de rendre le contrôle du moteur plus complexe et coûteux que celui d'un moteur à courant continu,

- suppression de l'alimentation du rotor (absence du contact bagues balais).

- moins des pertes de cuivre, les pertes viennent surtout du stator.

- facteur de puissance et rendement du moteur est améliorées.

- une faible inertie et un couple massique élevé.

- une meilleure performance dynamique.

- construction et maintenance plus simple.

- pas d'échauffement au rotor, et absence des pertes joules

## II.5 Inconvénients des machines synchrones à aimants permanents

- Prix des aimants le rend plus cher,

- La présence de pulsation de couple,

- Risque de désaimantation, ce qui limite l'utilisation par les des contraintes comme la température max, courant max....etc,

- Pertes par courant de Foucault dans les aimants [25].

## **II.6 Générateur Synchrone à Aimants Permanents**

Les éolienne basée sur les génératrices asynchrone ou à rotor bobiné présentement l'inconvénient de nécessité un système de bague et de balai pour la MADA et un multiplicateur pour les deux type induisant des coûts significatifs de maintenance.

Pour limiter ces inconvénients, certain constructeurs ont développé les éoliennes basées sur des machines synchrone à grand nombre de pair de pôles et coupler directement à la turbine évitant ainsi le multiplicateur.

Si de plus la génératrice est équipé d'aimants permanents, le système de bague et ballai est éliminé, l'inconvénient de cette structure, est qu'elle nécessite pour sa connexion au réseau des convertisseurs de puissance. Cet inconvénient est cependant un avantage du point de vu contrôlede l'éolienne [26].

## II.7 Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur





 $G_m$ : Multiplicateur de vitesse.

 $G_E$ : Génératrice électrique.

*G<sub>S</sub>*: Convertisseur statique.

Les éoliennes assurent la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en trois étapes tel que montré sur la figure (II.9) :

• Les pales extraient une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

•La génératrice électrique reçoit l'énergie mécanique et la convertit ensuite en énergie électrique, qui sera ensuite transmise au convertisseur statique [32].

• Le convertisseur statique, qui est en général placé entre le générateur électrique et la charge, adapte l'énergie électrique fournie par le générateur à la charge. Cette dernière peut être une résistance, un moteur, une pompe ou un réseau de distribution d'énergie électrique [27].

## **II.8** Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

#### **II.8.1** Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la Machine synchrone à aimants permanents obéit aux hypothèses simplificatrices suivantes :

-Le circuit magnétique est considéré linéaire (absence de saturation),

-La répartition du champ inducteur dans l'entrefer ainsi que les forces magnétomotrices (FMM) sont sinusoïdales,

- Les harmoniques d'encoches et d'espace ne sont pas pris en compte

-L'hystérésis, les courants de Foucault, l'effet de peau sont négligé.

-Les résistance des enroulements ne varient pas avec la température [21].

#### II.8.2 Les équations de tension et flux

La machine à aimant possède trois enroulements statoriques fixes, a, b, c. au rotor on trouve des aimants permanant. Le flux crée par les aimants permanants est suppose à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer, les expressions des flux mutuelles inducteur phases sont donnée par

(II.1) $\varphi_{a=} \varphi_f cos(p\theta)$ (II.2) $\varphi_{b=} \varphi_f cos(p\theta - \frac{2\pi}{3})$ (II.3) $\varphi_{c=} \varphi_f cos(p\theta - \frac{4\pi}{3})$ 

 $\varphi_f$ : est la valeur crête du flux crée par l'aimant permanant à travers les enroulements statorique.

Les équations électriques de la machine synchrone à aimants permanant dans le référentiel triphasé sont:

$$[v_a] = [R_s][I_a] + \frac{d_{\varphi a}}{dt}$$
(II.4)

$$[v_b] = [R_s][I_b] + \frac{d_{\varphi b}}{dt}$$
(II.5)

$$[v_c] = [R_s][I_c] + \frac{d_{\varphi c}}{dt}$$
(II.6)

 $[\varphi_a \varphi_b \varphi_c]$ :vecteurs des flux dans les enroulements statoriques.

 $[R_s]$ :résistance d'une phase d'enroulement statorique.[3]

#### II.8.3Equationmécanique

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et générateur est donnée par [6]:

$$+(j_t+j_m)\frac{d\Omega}{dt}=c_{eol}-c_{em} \qquad (II.7)(f_m-f_t)\Omega$$

Où:  $J_t$  et  $J_m$ sont les inerties de la turbine et de la machine respectivement, fm le coefficient de frottement de la machine,  $f_t$  le coefficient de frottement des pâles et Ceol le couple statique fournie par l'éolienne.

Dans notre application, nous ne considérons que le coefficient de frottement associé à la génératrice (celui de la voilure ne sera pas pris en compte). Par suite, le modèle qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne éolienne est donné par l'équation différentielle suivante [28] :

$$c_{eol} = j_t \frac{d\Omega}{dt} + c_m + f_m \Omega \tag{II.8}$$

#### **II.8.4** La transformation de park

La transformation de park consiste a transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du systéme.

Dans la théorie de PARK, on utilise la transformation unique permettant le passage direct du systéme triphasé au systéme diphasé tournant, cette transformation est note par [p] d'où [3] :

$$P(\Theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$
(II.9)

Nous appliquons dons le changement de variables defini par la matrice  $P(\theta)$  aux equations des tensions, courant, et flux on obtient:

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

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

$$\varphi_{dq} = \mathbf{P}(\theta)[\varphi_{abc}] \tag{II.12}$$

La matrice inverse de park notée, est donnée par la matrice suivante [3] :

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

## II.9 Modélisation de la MSAP dans le repère de Park

#### **II.9.1 Equation éléctrique**

En transforment les équations statoriques en leurs nouvelles équations dans le repére (d,q) par l'application de la transformation de Park on obtient le système d'équation suivant[29,30,31]:

$$V_{dq} = [\mathbf{P}(\theta)][V_{abc}] = [\mathbf{P}(\theta)][R_s][I_{abc}] + [\mathbf{P}(\theta)]\frac{d[\theta_{abc}]}{dt}$$
(II.14)

Les composantes de la tension statorique sont données dans le repére de Park par :

$$V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_r L_q I_q$$
(II.15)

$$V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} - \omega_r L_d I_q + \omega_r \phi_f$$
(II.16)

Avec  $\theta_q = l_q i_q$ 

$$\theta_d = l_d i_d + \phi_f \tag{II.17}$$



Fig.II. 10 Modèle de PARK pour la GSAP

#### **II.9.2** Calcul de puissance

La puissance instantanée P(t) qui s'écrit pour le stator dans le repère (d,q):

$$P(t) = V_d I_d + V_q I_q \tag{II.18}$$

Par ailleurs, la puissance électrique absorbée s'exprime par

$$P(t) = R_{S}(I_{d} + I_{q}) + (I_{d} \frac{d\phi_{d}}{dt} + I_{q} \frac{d\phi_{q}}{dt}) + (I_{q} \phi_{d} - I_{d} \phi_{q})\omega$$
(II.19)

- > Le premier terme représente les pertes joules dans l'induit.
- Le deuxième terme représente la variation par unité de temps de l'énergie magnétique emmagasinée.
- Le troisième terme représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique à l'intérieur de la machine.

#### II.9.3 Couple électromagnétique

le couple électromagnétique est donné par l'expression suivante [32,33] :

$$Cem = \frac{3}{2}P [(Lq - Ld) I_d . I_q + \phi_f . I_q)]$$
(II.20)

Ou:

L<sub>d</sub>, L<sub>q</sub>:inductance du stator;

 $\phi_f$ : le flux de l'aimant permanent;

P: nombre de paire de poles.

#### **II.10 Simulation et interprétation**

La figure (II-13) présente le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) utilisé pour simulation en *MATLAB/SIMULINK*. Ce modèle sera exploité dans la commande de système éolienne étudiée. Les paramètres de la machine utilisée sont notés dans l'annexe[39].

## II.10.1Fonctionnement à vide

Le fonctionnement à vide est caractérisé par des courants nuls:

$$\begin{cases} I_{sd} = 0 \\ I_{sq} = 0 \end{cases}$$
(II.21)

Les expressions des tensions et celle du couple deviennent:

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = w.\phi_f \\ Cem = 0 \end{cases}$$
(II.22)



(b)Composantes Usd, Usq



(c) Vitesse de rotation et couple moteur.

#### Fig.II. 11 Simulation de la GSAP à vide

#### Interprétation des résultats

On lance la génératrice à l'aide d'un couple moteur égal à 6.28 Nm. Etant donné que les frottements sont considérés nuls, on constate d'après la figure (II.11.c) qu'à la vitesse de 78.5 rad/s, les tensions de phases sont parfaitement sinusoïdales avec une valeur crête de 44V et une fréquence de 50Hz.

#### II.10.2 Fonctionnement en charge (R<sub>ch</sub>, L<sub>ch</sub>)

La génératrice alimente une charge électrique ( $R_{ch}$ ,  $L_{ch}$ ). Pour obtenir les tensions et les courants résultant de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique les expressions des tensions données par :

$$\begin{cases} V_d = -R_s \cdot I_d - L_d \frac{d I_d}{dt} + L_q \omega \cdot I_q \\ V_q = -R_s \cdot I_q - L_q \frac{d I_q}{dt} - L_d \omega \cdot I_d + \phi_f \omega \end{cases}$$
(II.23)

D'autre part, l'application des tensions Vd et Vq sur la charge donne :

$$\begin{cases} V_d = R_{ch} \cdot I_d + L_{ch} \frac{d I_d}{dt} - L_{ch} \omega \cdot I_q \\ V_q = R_{ch} \cdot I_q + L_{ch} \frac{d I_q}{dt} + L_{ch} \omega \cdot I_d \end{cases}$$
(II.24)

En remplaçant les expressions de Vd et Vqdans (II.24), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{d I_{d}}{dt} = \frac{1}{L_{d} + L_{ch}} \begin{bmatrix} -(R_{s} + R_{ch}) & I_{d} + \omega & (L_{q} + L_{ch}) & I_{q} \end{bmatrix} \\ \frac{d I_{q}}{dt} = \frac{1}{L_{d} + L_{ch}} \begin{bmatrix} -(R_{s} + R_{ch}) & I_{q} - \omega & (L_{q} + L_{ch}) & I_{d} + \omega & \phi_{f} \end{bmatrix} \end{cases}$$
(II.25)

On cherche à obtenir un système d'équation d'état :

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_d I_q \end{bmatrix}^t, \quad \begin{bmatrix} U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \quad \phi_f \end{bmatrix}^t \tag{II .26}$$

On peut écrire la matrice [A] comme suite :

$$[A] = [A_{1}] + \omega[A_{2}]$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_{s} + R_{ch}}{L_{d} + L_{ch}} & 0\\ 0 & -\frac{R_{s} + R_{ch}}{L_{q} + L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_{q} + L_{ch}}{L_{d} + L_{ch}}\\ -\frac{L_{d} + L_{ch}}{L_{q} + L_{ch}} & 0 \end{bmatrix}$$
(II.27)

Et la matrice [B] sous la forme :

$$[B][U] = \omega \frac{1}{L_q + L_{ch}} \begin{bmatrix} 0\\ \phi_f \end{bmatrix}$$
(II -28)

A partir des expressions (II.26 à II.28) et en faisant appel à l'expression du mouvement, on peut construire le bloc de simulation de la génératrice (fig. II-13).



Fig.II. 12 Bloc de la simulation de la GSAP en charge



(a) Courants statoriques I<sub>abc</sub>



(**b**) Tensions statoriques  $U_{abc}$ 



(c) Couples électromagnétique et moteur.







(e) Composants Usd; Usq.



(f) Vitesse de rotation.

Fig.II. 13 Simulation de la GSAP en charge

#### Interprétation des résultats

Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents sont appliqués (fig. II.13). On constate que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle de synchronisme, ce qui se traduit par de faibles tensions et courants représentés sur les figures (fig. II.13a) et (fig. II.13b). Cela s'explique par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant. En diminuent le couple moteur de 6.28Nm, à 4.2Nm, la vitesse mécanique varie de 267.60 rad/s jusqu'à 178.9 rad/s. La tension et le courant diminuent respectivement de 77.17V à 51.6V et de 1.54A à 1.03A. Il est donc clair que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.

#### **II.11** Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les machines synchrone à aimants permanents en basant ; son principe de fonctionnement ainsi que les différentes structures des machines. Nous avons donné le model mathématique de la machine et une simulation numérique a été effectuée sous MATLEB/SIMULINK. Les résultats de simulation de la GSAP à vide et en charge sont présentés.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la modélisation de la turbine éolienne et l'arbre mécanique ainsi que le système éolien globale avec la GSAP.



# Chapitre III

## Modélisation et Contrôle de système étudié

## **III. 1 Introduction**

Dans ce dernier chapitre on apporte notre contribution a l'étude d'une simulation grâce au logiciel MATLAB/SIMULINK, toute la chaine de conversion éolienne sera traitée afin de confirmer le bon fonctionnement du système proposés. Le modèle complet de la chaine de conversion éolienne englobe en outre la turbine, la GSAP, un redresseur triphasé à transistor IGBT commandés.

Après avoir étudié et cité les différents composants du système de pompage éolien, nous procédons à la modélisation et contrôle de notre système. La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié, on doit connaitre alors les critères d'entrées (données de base), c'est-à-dire les données météorologiques du site.

## **III .2 Contrôle PID**

Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie est le régulateur PID (proportionnel, intégral, dérivé), car il permet de régler à l'aide de ses trois paramètres les performances (amortissement, temps de réponse) d'une régulation d'un processus modélisé par un deuxième ordre. Nombreux sont les systèmes physiques qui ont un comportement voisin de celui de deuxième ordre dans une certaine échelle de temps.

Par conséquent, le régulateur PID est bien adapté à la plupart des processus de type industriel et il est relativement robuste par rapport aux variations des paramètres de procédé, quand on n'est pas trop exigeant pour les performances de la boucle fermée par rapport à celles de la boucle ouverte (par exemple, accélération très importante de la réponse ou augmentation très importante de l'amortissement en boucle fermée) [34].

#### III.2.1Principe de la commande PID

L'intérêt du correcteur *PID* est d'intégrer les effets positifs des trois correcteurs précédents. La détermination des coefficients  $K_p$ ,  $T_i$  et  $T_d$  du correcteur *PID* permet d'améliorer à la fois la précision( $K_p$  et  $T_i$ ); la stabilité ( $T_d$ ); la rapidité ( $T_d$ ,  $K_p$ ).

Le réglage d'un PID est en général assez complexe, des méthodes pratiques de réglages permettent d'obtenir des bons résultats.



#### Fig.III. 1Structure d'un correcteur PID

#### **III.2.2 Structure d'un PID**

Les actions élémentaires d'un régulateur peuvent être associées de plusieurs façons. On parle de la structure d'algorithme du régulateur. Les valeurs des paramètres PID ne donnent pasle même comportement du procédé selon que la structure est parallèle ou mixte [10]. C'est pourquoi il est primordial que l'automaticien connaisse les structures existantes du régulateur.

Pour les déférentes structures on prend:

X(p): Consigne de régulation. Y(p): Grandeur réglant.

e(p): Ecart mesure/consigne. W(p): Grandeur réglée (mesure) [35].

## III.2.2.1 Structure parallèle

Cette structure est illustrée par la figure (III.2).Dans ce cas la sortie Y(t) est donné par :

$$Y(t) = K_p \cdot \mathbf{e}(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$
(III.1)

En considérant les conditions initiales sont nulles et en appliquant la transformée de Laplace à l'équation (I. 1), on obtient la fonction de transfert du régulateur PID à structure parallèle :

$$C(p) = \frac{Y(p)}{E(p)} = K_p + \frac{1}{T_i P} + T_d P$$
(III.2)

 $Ou: T_i = \frac{1}{K_i} \quad \text{et} \quad T_d = K_d$ 

Avec :  $T_i$  et  $T_d$  sont respectivement la constante d'intégration et la constante de dérivation.



Fig.III. 2 Régulateur PID à structure parallèle

#### III.2.2.2 Structure série

Cette structure est illustrée par la figure (III.3).Dans ce cas la sortie Y(t) est donner par :

$$Y(t) = \alpha. K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$
(III.3)

Avec :  $\alpha = \frac{T_i + T_d}{T_i}$  est le coefficient théorique d'interaction entre action intégrale et action dérivée.

On considérant les conditions initiales sont nulles et en appliquant la transformée de Laplace à l'équation (III. 3), on obtient la fonction de transfert du régulateur PID à structure série.

$$C(p) = \frac{Y(p)}{E(p)} = K_p \ (1 + \frac{1}{T_i \cdot P})(1 + T_d \cdot P)$$
(III.4)



Fig.III. 3 Régulateur PID à structure série

#### **III.2.2.3 Structure mixte**

C'est la structure la plus utilisée actuellement par les constructeurs [40]. L'expression de la sortie du régulateur PID est donnée par :

$$Y(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$
(III.5)

Par application de la transformée de Laplace on obtient :

$$C(p) = \frac{Y(p)}{E(p)} = K_p \ (1 + \frac{1}{T_i P} + T_d P)$$
(III.6)

Cette structure est représentée par la figure III.4 :





## III.3 Stratège du commande MLI

## **III.3.1 Description**

La modulation de largeur d'impulsions (MLI ; en anglais : Pulse Width Modulation, soit PWM), est une technique couramment utilisée pour synthétiser des signaux continus à l'aide de circuits à fonctionnement tout ou rien, ou plus généralement à états discrets. Le principe générale est repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension a haute fréquence de commutation) [39].

#### III.3.2 Les techniques de commande MLI

Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées sont : la naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bonde d'hystérésis [36].

## III.3.2.1MLI à Bande d'hystérésis

La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du redresseur, lorsque l'erreur entre le signal et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis. Cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase [37].



Fig.III. 5 Modulateur MLI à bande d'hystérésis

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué dans la Fig. III.5,l'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à -H/2, il se ferme si cette dernière est supérieure à +H/2, où H représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre -H/2 et +H/2 (c à d, qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas.

la technique à bande d'hystérésis, est caractérisée par la simplicité et le temps de réponse minimal aux perturbations. Cette méthode consiste à élaborer le signal MLI directement à partir de la grandeur à contrôler, par des décisions de type tout ou rien.

#### III.3.2.2 MLI vectorielle

Dans la MLI vectorielle les vecteurs à appliquer et les temps d'application de ces vecteurs sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques. Chacun des états possibles du convertisseur est représenté par un vecteur de tension. L'ensemble de ces vecteurs forme le diagramme vectoriel des tensions du convertisseur. La modulation vectorielle diffère, entre d'autres techniques par le fait que les signaux de commandes sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras de redresseur en même temps [38].

#### III.3.2.3 MLI à échantillonnage périodique

La méthode d'échantillonnage périodique permet aux semi-conducteurs constituant le filtre actif de commuter durant les transitions d'une horloge à onde carrée et à fréquence fixe (fréquence d'échantillonnage). Comme illustré à la Figure (Figure.III.7), ce type de commande est très simple à implanter dans la mesure où il ne nécessite qu'un comparateur et une bascule D type par phase. L'avantage principal de cette méthode est que le temps minimal entre les commutations est limité par la période d'échantillonnage de l'horloge. Cependant, la fréquence de commutation actuelle n'est pas clairement définie.



Fig.III. 6 Modulateur MLI à échantillonnage périodique

## III.3.2.4 MLI à porteuse triangulaire

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire, compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. L'erreur passe par un correcteur avant d'être comparée avec la porteuse triangulaire [37].



Fig.III. 7 Modulateur MLI à porteuse triangulaire

#### III.4 Structure de la commande



Fig.III. 8 Structure du système éolien étudiée

## III.5 Modélisation de la chaine de production d'énergie éolienne III .5.1 Modélisation du vent

Le vent est hautement variable, à la fois géographiquement et dans le temps. Il varie d'un endroit à l'autre, d'une journée à l'autre, d'une seconde à l'autre. Il est le vecteur énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne, déterminant pour le calcul de la production de l'électricité, donc pour la rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent (cf. formule (III - 2)).Ces fluctuations étant influencées par le déplacement des masses d'air en altitude, mais également par le relief, le type de recouvrement du sol et la stabilité thermique de l'atmosphère. Le vent varie en direction et en intensité, mais pour les besoins du modèle, on se limite à la variation du vent en intensité, dans une seule direction afin de déterminer une séquence valable et représentative de vents réels.

Des différentes approches utilisées dans la littérature pour la génération d'une série synthétique de vent, dans notre cas, la vitesse de vent sera modélisé par une somme de plusieurs harmoniques [39]:

$$V_{vent}(t) = A + \sum_{k=1}^{i} a_k \sin(\omega_k \cdot t)$$
(III.7)

 $a_k$  : amplitude des harmoniques

 $\omega_k$  : fréquance des harmoniques

La vitesse du vent est représentée par la fonction :

 $V(t) = 10 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t)$ (III.8)

#### III .5.2 Modélisation de la turbine éolienne

Une turbine éolienne est une machine qui, par définition, transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Pour débuter, il y a lieu de quantifier la source d'énergie dont on dispose, c'est-à-dire l'énergie associée au vent. Si le vent présente une certaine vitesse "V" à un moment donné et traverse une certaine surface "A", la puissance instantanée du vent est donnée par la relation suivante :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \tag{III.9}$$

où  $\rho$  est la masse volumique de l'air, qui vaut approximativement 1.2 kg/m<sup>3</sup>. A est la surface balayée par la turbine en m<sup>2</sup>, V est la vitesse du vent en m/s. Cp (coefficient de puissance).

La turbine, utilisée dans le cadre de notre travail, est une éolienne "Savonius" à axe vertical(voireFigure.III.10).



Fig.III. 9 Voilure à axe vertical de type Savonius

La surface "A " donnée par la formule suivant :

$$A = 2R.H \tag{III.10}$$

où R représente le rayon de la voilure (m) et H sa hauteur (m).

La puissance de sortie est donnée par l'équation suivante que nous normaliserons en pu :

$$P_m = C_p (\lambda). \ \rho. \ H. \ R. \ V^3 \tag{III.11}$$

où  $C_p$  est un coefficient qui exprime l'efficacité de la voilure dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, est en fait souvent donné en fonction de la vitesse réduite (la vitesse spécifique  $\lambda$ ) qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit définie par:

$$\lambda = \frac{R.\Omega}{V} \tag{III.12}$$

où $\Omega$  la vitesse angulaire de rotation des pales en rad/s.

L'évaluation du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. A partir de relèves réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour cette turbine, par l'équation analytique en fonction de  $\lambda$  (résultante de l'interpolation) suivant :



$$C_p(\lambda) = -0.12992 \ \lambda^3 - 0.11681\lambda^2 + 0.45406 \ \lambda \tag{III.13}$$

Fig.III. . Courbe caractéristique retenue pour les essais

La figure (Fig.III.11) représente les caractéristiques de coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$ , il présente un facteur de puissance maximal  $Cp_{max} = 0.13$  pour  $\lambda_{max} = 0.85$ .

Le couple éolien noté :  $C_e$  est obtenue partir de l'équation (III.12) et en utilisant l'expression (3.14) de la vitesse réduite :

$$C_e = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{Cp(\lambda).\rho.R^2.H.V^2}{\lambda}$$
(III.14)



Fig.III. 10 Modèle du couple éolien sous Simulink

La figure (Fig. II.13) présente la caractéristique de la turbine à travers de la courbe d'extraction de puissance éolien de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.



Fig.III .13 La puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation

On remarque da la figure (Fig. III.13) que la puissance électrique est variable avec la variation de la angulaire mécanique de la turbine. L'allure de la puissance électrique en fonction de la angulaire mécanique est semble à celle du Cp en fonction de  $\lambda$ . On remarque

aussi que plus la vitesse du vent est grande plus la puissance délivrée est grande car la puissance est exprimée par la vitesse cube du vent.

#### III .5.3 Modélisation mécanique du couplage turbine – génératrice

Le comportement dynamique (mécanique) de l'ensemble turbine et génératrice peut être représenté par la relation suivante :

$$J\frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_{em} - C_f \tag{III.15}$$

où $\Omega$  la vitesse sur l'arbre du générateur,  $C_f$  le couple de frottement,  $C_{em}$  le couple électromagnétique développé par le générateur,  $C_e$  le couple mécanique appliqué à l'arbre de l'alternateur et J est le moment total d'inertie, calculé avec :

$$J = J_{gen} + \frac{J_t}{i^2}$$
(III.16)

On note que :

$$C_f = f_m . \Omega \tag{III.17}$$

Où  $f_{\rm m}$  est le coefficient de frottement visqueux en N.m.

Le couple éolien fourni par la turbine, permet d'entraîner la génératrice. En tenant compte des chutes de couple causées par le frottement et l'inertie de la turbine, nous pouvons établir le modèle électromécanique de la figure (Fig. III. 14).



Fig.III. 11 Modèle du couple de la turbine éolienne

On peut aussi, modéliser la turbine par le schéma bloc suivant :



Fig.III. 12 Schéma bloc de la turbine éolienne

#### III.5.4 Modèle de la GSAP

D'après le chapitre II, la génératrice synchrone à aimant permanant (GSAP) est classiquement modélisée dans le repère de Park, donnant lieu au l'équation suivantes :

$$\begin{cases} V_{d} = -R_{s} \cdot I_{d} - L_{d} \frac{d I_{d}}{dt} + L_{q} \omega \cdot I_{q} \\ V_{q} = -R_{s} \cdot I_{q} - L_{q} \frac{d I_{q}}{dt} - L_{d} \omega \cdot I_{d} + \phi_{f} \omega \end{cases}$$

$$\begin{cases} III.18 \\ J \frac{d\Omega}{dt} = Cm - Cem - F\Omega \\ Cem = \frac{3}{2}P \left[ (Lq - Ld) I_{d} \cdot I_{q} + \phi_{f} \cdot I_{q} \right] \end{cases}$$

où :  $\theta$  est l'angle entre un axe de référence du stator et un axe du pole nord du rotor, p -le nombre de paires de pôles,  $R_s$  la résistance d'une phase statorique,  $V_d$ ,  $V_q$  et  $I_d$ ,  $I_q$  sont les composantes sur les axes d et q de la tension, respectivement du courant statorique.

Aussi,  $\varphi_f$  est le flux d'excitation produit par les aimants permanents,  $L_d$ et  $L_q$  sont les inductances équivalents sur les axes d, respectivement q (les inductances synchrones direct et quadratique).Cem est le couple électromagnétique, Cm est le couple moteur appliqué sur la génératrice avec F le coefficient de frottement, J : Moment d'inertie et p le nombre de paires de pôles.

## **III.6** Simulation

Le vent sera modélisé sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques :

$$V(t) = 10 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t)$$
 (III.19)

Lesrésultatsdesimulationdelagénératricesynchroneàaimantspermanentsassociéàla turbine éolienne et avec la vitesse du vent simulée par l'équation (III.19)sont donnés parles figures qui suivent:



(a) La vitesse du vent en fonction du temps.



(b) La vitesse de la turbine en fonction du temps.


(e) La puissance active.

Fig.III. 13 les résultats de la simulation de système éolien

Nous remarquons que les résultats prennent la forme du vent, le coefficient de puissance est de 0,13 (c'est la valeur maximal pour avoir un maximum de puissance extraite du vent). La puissance active est de l'ordre de 400W. Mais notre système présent des fluctuations dues à la variation de la vitesse du vent pour cela le système nécessite une commande pour maintenir cette puissance à sa valeur nominale.

# III.7 Redresseur à commande MLI

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

Il y a deux manières de mettre en application des redresseurs MLI ; comme redresseur à source de courant, et redresseur à source de tension [40].



Fig.III. 14 topologies de base d'un redresseur de tension

Les redresseurs de tension sont de plus loin extensivement utilisés et en raison de la dualité des deux topologies.

# **III.7.1** Le principe de fonctionnement

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée, comme montré dans la figure II.17. Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu Udc est mesurée et comparée avec une référence Udc-ref , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture età l'ouverture.

De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu Udc mesurée aux bornes du condensateur C.

Quand le courant ich est positif (fonctionnement redresseur), le condensateur C est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande de plus de puissance de la source alternative. Le bloc de commande prend la puissance de la source alternative en produisant un signal MLI approprié pour les six interrupteurs. De cette façon, un écoulement plus de courant de la source alternative au côté continu, et la tension de condensateur est récupérée. Inversement, quand ich devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur C est surchargé, et le signal d'erreur demande au block de commande pour décharger le condensateur, et la puissance retourne à la source alternative.

La commande MLI non seulement peut contrôler la puissance active, mais également la puissance réactive, ce type du redresseur permet la correction du facteur de puissance. En outre, les formes d'onde des courants de la source peuvent être maintenu comme presque sinusoïdales, ce qui réduit la distorsion de la source [40].

#### III.7.2 Modélisation d'un redresseur

Nous trouvons également le redresseur à IGBT qui est un redresseur commandé à l'ouverture et à la fermeture, le modèle de ce type de redressement est représenté par la figure(III.8), il est constitué de transistors IGBT comprenant chacun une diode en antiparallèle d'une manière à assure la continuité des courants de source. [41]



Fig.III. 15 modèle d'un redresseur a base d'un IGBT

# III.8Modélisation de système de pompage avec l'éolien

Les turbines de petites et moyennes puissances dans trois domaines [45]:

- ✓ Micro-éoliennes: une plage de puissance nominale de 20 à 500 W.
- ✓ Mini éoliennes: une plage de puissance nominale de 500 W à 1 kW.
- ✓ Wind Petit vent: de 1 kW à 100 kW.

Dans notre étude, le système de pompage de l'eau utilisait une éolienne à base de PMSG qui alimentait le moteur à courant continu afin de générer le couple nécessaire pour la centrifugeuse hydraulique [6].



Fig.III. 16 Structeur de système de pompage avec l'éolien

#### III.8.1 Model d'un motor DC

Dans ce travail, la machine à courant continu est exploité en mode moteur avec différentes relations utilisées dans leurs modèles.

Appliquées à la phase machine, les lois d'Ohm décrivant l'enroulement d'induit et l'enroulement de champ sont respectivement données par les relations ci-dessous:

$$V_{ma} = \begin{cases} K.W + Ri_a + \frac{Ldi_a}{dt} \\ V_{mf} = R.i_f + \frac{Ldi_f}{dt} \end{cases}$$
(III.20)

Le couple électromagnétique est donné par:

 $T_M = K i_a$ 

Après la boîte de vitesses, le système mécanique peut être décrit comme une relation suivante, où Tt et Ta représentent respectivement le couple de vent d'entrée et le couple avant la boîte de vitesses.

### III.8.2 Modélisation de la pompe hydraulique

Le modèle de pompe centrifuge peut être décrit en Connaissant les caractéristiques mécaniques illustrées en relation:

$$h = a_0 \Omega^2 - a_1 \Omega Q - a_2 Q^2$$
(III.21)

La puissance hydraulique PH et le couple de la pompe centrifuge peuvent être donnés respectivement par:

$$P_{H} = \rho g H$$
$$T_{r} = \alpha \Omega_{m}^{2} + T_{s}$$
(III.22)

Le modèle mécanique du moteur électrique et de la pompe centrifuge peut être décrit par:

$$T_{Mem} = J_{mp} \cdot \frac{d \Omega_m}{dt} + f_{mp} \cdot \Omega_m + T_r$$
(III.23)

Résultats de la simulation et discussion



(a) Vitesse du rotor du moteur



(b)Tension redressée



(c) Zoom de la tension redressée.

Fig.III. 17 Simulation de système de pompage

#### **Interprétations**

Suivant les résultats de simulation obtenus, nous concluons que la réponse de la tension à la sortie de redresseur (redressée) à une variation de vitesse est relativement rapide et ne dépasse pas 2% de la valeur de référence, lors des perturbations.

Malgré l'augmentation ou la diminution de la vitesse du vent, l'allure de la tension du bus continue estétablieà45.8Vavecun temps de réponse qui dépend de la commande duredresseur, de l'ordrede0.5s dans l'exemple traité.

### **III.9** Conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons présenté un modèle globale de la chaine de pompage éolienne. Nous avons fait description mathématique de la turbine éolienne à axe vertical de type Savonneuse, la génératrice synchrone à aimants permanents, un redresseur, du bus continu et le DC moteur.

Nous avons présenté les structure des blocs de régulation d'un contrôle PID et de la commande MLI de la GSAP, puis on appliqué cette commande sur la génératrice synchrone à aimant permanent. Et enfin, nous avons présenté interprétation des résultats de simulation de la chaine complète.



### **Conclusion général**

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire master présente, d'une façon générale, la modélisation et la commande d'un système de production d'électricité hors réseau basé sur la machine synchrone à aimants permanent et à partir de ressources renouvelable(éolienne). L'objectif premier est de modéliser les différents composants d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanent et de concevoir des stratégies de commande permettant un transfert de tension constante à la charge.

Les machines à aimants permanents est une solution intéressante pour l'utilisation des énergies renouvelables. Ces machines présentent plusieurs avantages par rapport aux machines classiques à savoir: une durée de vie élevée, un rendement élevé, une maintenance réduite...etc. La structure de MSAP à intégrer dans le système de conversion d'énergie éolienne envisagé a été modélisée et commandée.

L'objectif de ce travail est d'apporter une commande d'un système de pompage connecté à l'éolienne, à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP). Ce travail est subdivisé en trois chapitres :

Premièrement, on a présenté brièvement l'état de l'art sur différents types d'éoliennes existant avec leurs différents structures d'alimentation, à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal, et le système de pompage.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté quelque définitions et généralités sur la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), Puis nous avons étudie la modélisation de la GSAP. Nous avons donné le model mathématique de la machine et une simulation numérique a été effectuée sous MATLEB/SIMULINK.

En suite, nous utilisons le régulateur proportionnel intégral dérivé (PID), et la modélisation de largeur d'impulsion (MLI), pour contrôler le modèle complet de la chaine de conversion éolienne englobe en outre la turbine, la GSAP, un redresseur triphasé à transistor IGBT commandés.

Comme perspective, on peut appliquera les autres stratèges de commande pour voire la robustes et l'amélioration des performances.

# **Références bibliographiques**

[1] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes , soutenue le 19/12/2003.

[2] lunaruind.org.

[3] H.Yaichi et S.Guendouz « Modélisation et simulation d un générateur synchrone a aiment permanant couple a un aérogénérateur » ,Mémoire de master ,université de adrar, 2018

[4] N.Kasbadji Merzouk et M. Merzouk «perspectives du pompage eolien en algerie», projet nationl de recherche, domicilie au CDER alger 2008.

[5] AGGOUN GHANIA ; « Etude Qualitative de l'Association Convertisseur Machine

Pour l'Entrainement Electrique d'un Système de Génération Eolienne »; Thèse

Magistère ; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

[6] S. Hamdouche, « Contribution à l'alimentation des structures de régulation des courants des machines à courant alternatif », Mémoire de Magister en Electromécanique, option Electronique de puissance, Université de Batna, Algérie, 2007.

[7] L. Menasri, I. Menasri, « étude d'un système Eolien Autonome basé sur une génératrice asynchrone avec stockage », Mémoire de fin d'études, option Electromécanique, Université de Bejaia. Algérie, 2008.

[8] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechnye, « éoliennes ». Technique de l'ingénieur, vol. BM4640, janvier 2011.

[9] metalformingmagzine.com

[10] M.T.Letreche« Commande floue de la machine synchrone a aiment permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », mémoire de magister, université de Sétif, 2010.

[11] A.Mirecki. « étude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiée a une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2005.

[12] G.Thierry et D.fedullo « Le Grand Livre de L'électricité », troisième Edition 2014.

[13] K.Idjdarene « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonome » Thèse de doctorat, Université Abderahmane Mira-Bejaia, 2010.

[14] N.BENBELAID et R.MAIZ IA «Commande et optimisation d'un système de

pompage hybride (photovoltaïque-éolien)», mémoire de Master, Université Abderahmane Mira-Bejaia,2016. [15]M. Chadel « dimensionnement d'un système de pompage d'eau potable pour les sites de Tlemcen et Adrar » université de Tlemcen, 2012.

[16]A. Guettaf « Optimisation floue-Génétique d'un système de pompage éolien », thèse de doctorat, Université de Biskra, 2013.

[17]N.Kasbadji Merzouk, M. Merzouk «Perspectives du pompage éolien en Algérie », Colloque CIRESS, 12-13 Decembre 2005, Ouargla.

[18] L.ZAROUR «Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau», Thèse de doctorat en électrotechnique, université de Constantine, 2010.

[19] M. Lopez «contribution à l'optimisation d'un system de conversion éolien pour une unité de production isolée» Thèse de doctorat« sciences et technologies de l'information des télécommunications et des systèmes » université paris-sud11, 2005.

[20] L. Meziane, S. Oublaid «Etude d'un system de pompage alimenté par une source hybride (éolienne-photovoltaïque)», Mémoire de Master de l'université de Bejaia, 2014.

[21] B. HERISSI «Commande d'une Eolienne basée sur les modèles flous de Takagi-Sugeno», Mémoire de Master de l'université LARBI TEBESSI-TÉBESSA,2016.

[22] N. BOUNASLA «Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur

de la Machine Synchrone à Aimants Permanents», mémoire de magister, Université Ferhat ABBAS Sétif -1,2014.

[23] N. CHOUG «Etude de la Robustesse des Contrôleurs Flous d'une

Machine Synchrone à Aimants Permanents avec

Pilotage Vectoriel», mémoire de magister, UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BANTA, 2011.

[24] Abdelhalim Tlemssani « contribution a l'application des commandes adaptives par les systèmes floue a une machines synchrone a aimant permanent alimente par un convertisseur multicellulaire série » Janvier 2006.

. [25] K. BELAIDI et O.HAMDOU, «Commande robuste d'un moteur synchrone à aimant permanent

», Mémoire de Master de UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2016.

[26]A.Tamaarat« Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA » thèse doctorat université Mohamed Khider de Biskra, 2005.

[27]S.MEZZAIetK. TADJINE «Etude d'un système hybride (Eolien – Photovoltaïque)», Mémoire de Master de Université Abderrahmane Mira-Bejaia,2015.

[28] R. Cardenas-Dobson, 'Control of Wind Turbine Using a Switched Reluctance

Generator', PhD Thesis, University of Nottingham, 1996

[29] G.Lacroux, "Les aimants permanents", Edition technique et documentation, 1989.

[30] https://www.windpower.org/fr/.core.htm

[31] P.Leconte, M.Rapin, E.Szechenyi,"eoliennes" technique de l'ingenieur traite geniemecanique ,BM 4640,N de volume :BL3.

[32] Fang Liu, Xing Zhang, Zhen Xie, Po Xu, Liuchen Chang, « Shunt Active Power Filler»

[33]NAOUEL HAMDI « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », mémoire de magister de Université MENTOURI de CONSTANTINE,2008.

[34] M<sup>elle</sup> DifNihed, M<sup>elle</sup>TrikiRazika, "Synthèse d'un contrôleur PID pour la commande d'une MCC", mémoire master Université Larbi Ben M'hidi –Oum El Bouaghi, 2011.

[ 35] CHALANE Ider, OURI Tarek, " optimisation de paramètre d'un PID oar essaims particulaires(PSO) ", mémoire Master en Automatique Université A. MIRA de Bejaia , 2017.

[36] A. Naima, "Étude et Modélisation de l'Entrainement Électrique d'un Système Éolien à base de la Machine synchrone à Aimant Permanents", Mémoire de Magister en électronique, Université de Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, Décembre 2010.

[37] A. Boulahia, "Étude des convertisseur statique destinés à la Qualité de l'Énergie

Électrique", Mémoire de magister électrotechnique de l'Université de constantine, avril 2009.

[38] D.H. TRAN, "Conception Optimale Intégrée d'une chaine éolienne passive ; Analyse de robustesse, validation expérimentale", Thèse de Doctorat de L'université TOULOUSE, septembre 2010.

[39] Mahdaoui Hamza, " Simulation et commande vectorielle MLI d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents GSAP", mémoire master universite ahmed draia adrar, 2017.

[40] Abdelmalek BOULAHIA,« Etude des Convertisseurs Statiques destinés à

la Qualité de l'Energie Electrique », Mémoire de magister de Université de Constantine, 2009.

[41] F.LAOUDJ, H. ZEBBAR, "Etude et simulation d'un commande numérique (discréte) d'un pont redresseur à IGBT/MOSFET ", mémoire master Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen, 2015.

[42]Z.AFTISet Y.ASLOUNI," Commande non linéaire d'un système

de pompage éolien", Mémoire de Master de l'université de Bejaia, 2017.

[43] Pompage de l'Eau à l'Aide d'un Aérogénérateur ,Rev. Energ. Ren.: Zones Arides (2002)