

*REPUBLIQUE ALGÉRIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE*

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

## **UNIVERSITE IBN KHALDOUNE TIARET**

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

Département de génie électrique

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : électrotechnique

Spécialité : commandes électriques

### **THÈME**

**Amélioration de l'énergie produite par un aérogénérateur  
synchrone à aimants permanents**

*Préparé par :*

*Mr MABROUK Younes Abdel Badie*

*Mr BERROUANE Islem Imad eddine*

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
Toumi Djilali	MCB	Président
Laribi Souad	MCB	Examineur
Mihoub Youcef	MCB	Examineur 1
ZINE Souhila	MCB	Encadreur
BELABBES Belkacem	MCB	Encadreur

**Promotion 2019/2020**

## Remerciements

---

**À l'issue de cette fin d'étude, nous adressons nos sincères remerciements  
premièrement à « Allah » tout puissant qui nous a donné la santé, la  
patience et le courage.**

**Nous remercions sincèrement Mme ZINE et Mr BELABBES Pour avoir  
dirigé et suivi ce travail.**

**En suite on tient à adresser nos plus vifs remerciements à Monsieur TOUMI,  
pour le grand honneur d'avoir accepté de présider le jury de soutenance..**

**Nos vifs remerciements vont également à Monsieur MIHOUB Youcef, Mme  
LARIBI, d'avoir accepté d'examiner notre travail et d'être membres du  
jury de soutenance.**

**On remercie aussi Mr, ALLAOUI et tous nos enseignants du département  
de génie électrique.**

**De grands remerciements aux membres de laboratoires de génie électrique  
et énergétique pour leurs aides précieuses et pour le temps qu'ils ont bien  
voulu nous consacrer.**

**On n'exclue pas de ces remerciements toutes les personnes qui ont aidé de  
près ou de loin dans la réalisation de cette PFE.**

**Enfin, on remercie tout particulièrement nos parents, pour leur soutien  
inconditionnel tout au long de nos longues années d'études.**

**On veut également remercier nos familles et nos amis pour leur soutien  
moral.**

**Les discussions, les remarques et les commentaires de nos collègues ont été  
sources d'idées et ont contribué au développement et à l'amélioration de  
cette étude.**

## Sommaire

Sommaire

<b>CHAPITRE I</b> .....	<b>3</b>
-------------------------	----------

### *chapitre I* *Généralités sur les éoliennes*

<i>I.1. Introduction</i> .....	<i>4</i>
<i>I.2. Génération d'énergie renouvelable</i> .....	<i>4</i>
<i>I.3 Les énergies renouvelables</i> .....	<i>6</i>
<i>I.3.1 L'énergie hydraulique</i> .....	<i>6</i>
<i>I.3.2 L'énergie de la biomasse</i> .....	<i>6</i>
<i>I.3.3 Géothermie</i> .....	<i>7</i>
<i>I.3.4 Photovoltaïque</i> .....	<i>7</i>
<i>I.3.5 L'énergie des marines</i> .....	<i>7</i>
<i>I.3.6 L'énergie éolienne</i> .....	<i>8</i>
<i>I.4 Production éolienne</i> .....	<i>8</i>
<i>I.5 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne</i> .....	<i>9</i>
<i>Avantages et inconvénients</i> .....	<i>10</i>
<i>I.6 Les différents types des aérogénérateurs</i> .....	<i>11</i>
<i>I.6.1 Eoliennes à axe verticales</i> .....	<i>11</i>
<i>I.6.1 .a Avantages</i> .....	<i>11</i>
<i>I.6.1 .b Inconvénients</i> .....	<i>12</i>
<i>I.6.2 Les éoliennes à axe horizontal</i> .....	<i>12</i>
<i>I.6.2.a Avantages</i> .....	<i>12</i>
<i>I.6.2.b Inconvénients</i> .....	<i>13</i>
<i>I.7 Conception des pales</i> .....	<i>13</i>
<i>I.7.1 Conception Monopale</i> .....	<i>13</i>
<i>I.7.2 Conception Bipale</i> .....	<i>13</i>
<i>I.7.3 Conception tripale</i> .....	<i>13</i>
<i>I.8 principaux composants de l'éolienne</i> .....	<i>13</i>
<i>I.9 fonctionnement d'une éolienne</i> .....	<i>14</i>
<i>I.10 Constitution d'une éolienne</i> .....	<i>15</i>
<i>I.11 Modes d'exploitation de l'énergie éolienne</i> .....	<i>16</i>
<i>I.11.1 Les systèmes à vitesse fixe</i> .....	<i>16</i>

## Sommaire

<i>Avantage du fonctionnement à vitesse fixe</i> .....	16
<i>Inconvénient du fonctionnement à vitesse fixe.</i> .....	17
<i>I.11.2 Les systèmes à vitesse variable</i> .....	17
<i>Avantage du fonctionnement à vitesse variable</i> .....	17
<i>Inconvénient du fonctionnement à vitesse fixe.</i> .....	17
<i>I.12 Historique sur les machines électriques</i> .....	17
<i>I.12.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil</i> .....	18
<i>I.12. 2 Machine asynchrone à double alimentation</i> .....	19
<i>I.12. 3 éolienne à machine synchrone</i> .....	19
<i>I.12.4 Autres machines</i> .....	20
<i>I.13 Aérogénérateur étudié</i> .....	20
<i>I.14 conclusion</i> .....	22

## Chapitre II

### Modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents

<i>II.1 Introduction</i> .....	24
<i>II.2 Modélisation de la turbine éolienne à vitesse variable</i> .....	24
<i>II.2.1 Modélisation du vent</i> .....	24
<i>II.2.2 conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique</i> .....	24
<i>II.2.3. Lois fondamentales régissant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique</i> .....	24
Loi de Betz .....	24
Coefficient de couple.....	26
<i>II.2.4 Production d'énergie mécanique</i> .....	26
<i>II. 2.5 Bilan des forces sur une pale</i> .....	27
<i>II.2.6 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine</i> .....	27
<i>II.2.7 Équations dynamiques de l'arbre de transmission</i> .....	29
<i>II.2.8 Modèle du multiplicateur</i> .....	30
<i>II.3 Modélisation de la GSAP</i> .....	30
<i>II.3.1 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents</i> .....	30
<i>II.3.2 Principe de fonctionnement de la MSAP</i> .....	31
<i>II.3.3 les avantages et les inconvénients de la MSAP</i> .....	31
<i>II.3.3.a les avantages</i> .....	31
<i>II.3.3.b les inconvénients</i> .....	31
<i>II.3.4 Fonctionnement de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)</i> .....	32

## Sommaire

<i>Fonctionnement en mode génératrice (GSAP)</i> .....	32
<i>II.3.5 hypothèses simplificatrices</i> .....	32
<i>II.3.6 Mise en équation de la MSAP</i> .....	32
Expression des tensions statoriques.....	33
Expression des tensions statoriques.....	33
<i>II.3.7 Mise en équation de la GSAP</i> .....	33
<i>II.4 Transformation de Park</i> .....	35
<i>II .4.a) Equations électriques dans le repère de Park</i> .....	35
<i>II .4.b) Equations magnétiques</i> .....	36
<i>II .4.b) Equations de couple électromagnétique</i> .....	36
<i>II .4.c) Equation mécanique</i> .....	37
<i>II .4 Résultats de simulation en boucle ouverte</i> .....	37
<i>A)Résultats de simulation de la turbine</i> .....	37
<i>B)Résultats de simulation de la GSAP</i> .....	39
<i>II.5) conclusion</i> .....	41

## Chapitre III

### *Stratégies de commande appliquées à l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents*

<i>III. 1. Introduction</i> .....	43
<i>III. 2 Stratégie de commande de la turbine :</i> .....	43
<i>III. 2.1 zone de fonctionnement</i> .....	43
<i>III .2.2 Technique d'interaction du maximum de puissance</i> .....	44
<i>III .2.3 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse :</i> .....	46
<i>Principe</i> .....	46
<i>Conception du correcteur PI</i> .....	46
<i>Résultats de simulation de la MPPT</i> .....	47
<i>III .3 Commande vectorielle :</i> .....	49
<i>III .3.1 Description de la commande vectorielle :</i> .....	49
<i>III .3.1 Principe de la commande vectorielle :</i> .....	49
<i>III .4.1 Type de la commande vectorielle :</i> .....	50
<i>III .4.2 Avantage et Inconvénient de la commande vectorielle :</i> .....	50
<i>III .4.2 .a avantages</i> .....	50
<i>III .4.2 .b inconvénients</i> .....	51
<i>III .5 commande vectorielle de la MSAP</i> .....	51

## Sommaire

<i>III .6 commande de la MSAP avec découplage du régulateur de courant par compensation des pôles :</i> .....	52
<i>III .7 commande de la MSAP avec mode glissant</i> .....	53
<i>III .7.1 régulation du courant direct</i> .....	54
<i>III .7.1 régulation du courant quadrature</i> .....	55
<i>III .8 Résultats de simulation de la commande vectorielle</i> .....	56
<i>III .9 conclusion</i> .....	59

## Chapitre IV

### Simulation de la chaîne complète

<i>IV.1 Introduction</i> .....	62
<i>IV.2 Principe de la commande MLI</i> .....	62
<i>Caractéristique de la modulation</i> .....	63
<i>IV.3 Modélisation du convertisseur MLI1 (le redresseur)</i> .....	63
<i>IV.4 : Modélisation du bus continu</i> .....	66
IV.4.1 Régulation du bus continu.....	67
<i>IV.5 Modélisation du convertisseur MLI2 (l'onduleur)</i> .....	67
IV.5.1 principe d'un onduleur de trois niveaux.....	68
Caractéristiques générales [34].....	68
Commande des interrupteurs.....	68
<i>IV.6 modélisation du filtre</i> .....	70
IV.6 .1. Modélisation du filtre dans le repère de Park.....	70
<i>IV.7 contrôle des courants envoyés au réseau</i> .....	70
IV.7.1 contrôle des courants.....	70
<i>IV.8 Simulation de la chaîne complète (Turbine, Génératrice synchrone à aimants permanents)</i> .....	72
<i>IV.9 Conclusion</i> .....	788

## Notations et abréviations

- $m_0$ : Masse d'air traversant l'hélice par seconde ;
- $\rho$ : Densité de l'air ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;
- $S$ : Surface balayée par les pales de l'éolienne ( $\text{m}^2$ ) ;
- $V_1$ : Vitesse du vent en amont ;
- $V_2$ : Vitesse du vent en aval ;
- $P_m$ : La puissance extraite ( $W$ ) ;
- $C_p$ : Coefficient de puissance ;
- $\lambda$ : vitesse spécifique;
- $\beta$ : Pitch angle;
- $R_t$ : Le rayon des pales de la turbine ( $m$ ) ;
- $\Omega_t$ : La vitesse de la turbine ( $\text{rad}/s$ );
- $C_g$ : Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ( $N.m$ ) ;
- $C_{aer}$ : Couple aérodynamique ( $N.m$ );
- $G$ : Gain du multiplicateur ;
- $\Omega_{turbine}$ : Vitesse de rotation du générateur (avant le multiplicateur) ( $\text{rad}/s$ ) ;
- $\Omega_{mec}$ : Vitesse de rotation du générateur (après le multiplicateur) ( $\text{rad}/s$ );
- $J$ : Moment d'inertie total sur l'arbre ( $\text{kg.m}^2$ );
- $J_{turbine}$ : Moment d'inertie de la turbine ( $\text{Kg.m}^2$ );
- $J_g$ : Moment d'inertie de la génératrice ( $\text{Kg.m}^2$ );
- $C_{mec}$ : Couple mécanique total ( $N.m$ );
- $C_{em}$ : Couple électromagnétique du générateur ( $N.m$ ) ;
- $C_g$ : Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ( $N.m$ ) ;
- $C_{vis}$ : Couple des frottements visqueux ( $N.m$ );
- $f$ : Le coefficient de frottement visqueux ( $N.m.s/\text{rad}$ ) ;
- $\Omega$ : Vitesse de rotation du rotor ( $\text{rad}/s$ );

## Notations et abréviations

- $\omega$ : Vitesse de rotation de la génératrice (rad/s) ;
- $p$  : Nombre de pair de pole ;
- $R_s$ : Résistance statorique ( $\Omega$ );
- $V_{sd\_q}$ : Les composantes de la tension statorique dans le repère d-q (V);
- $i_{sd\_q}$ : Courants statorique instantanée dans l'axe d et q (A);
- $L_{d,q}$ : Inductances de la génératrice (H);
- $C_r$ : Couple résistant (N.m);
- $\phi_f$ : flux (wb);
- $\omega$  : Vitesse de rotation (rad/s);
- $T_r$ : Constante de temps rotorique (sec);
- $T_s$ : Constante de temps statorique (sec);
- $K_p$ : Constante du gain proportionnel ;
- $K_i$ : Constante du gain intégrateur;
- $P_a$ : Puissance absorbé (W);
- $c$ : Capacité du bus continu (F);
- $[P(\theta)]$ : Matrice de transformation de Park.;
- $i_{Nd\_q}$ : Courants de réseau instantané dans l'axe d et q (A) ;
- $i_{dc}$ : Courant du bus continu (V) ;
- $R_N$ : Résistance du filtre ( $\Omega$ ) ;
- $V_{dc}$ : Tension du bus continu (V) ;
- $V_{Nd\_q}$ : tensions de réseau instantanée dans l'axe d et q (V) ;
- $L_N$ : Inductance du filtre (mH) ;
- $\Omega_n$ : pulsation;
- $P_g$ : Puissance active (W);
- GSAP: Génératrice synchrone à aimants permanents ;
- MPPT: Maximum Power Point Tracking;
- SMC: Sliding Mode Control.

# Liste des figures

---

## Chapitre I

### Généralité sur les éoliennes

<b>Figure I-1</b> : croissance des ressources renouvelables dans le monde.....	6
<b>Figure I-2</b> : structure de la production électrique d'origine renouvelable .....	6
<b>Figure I-3</b> : puissance éolienne cumulée dans le monde en MW .....	8
<b>Figure I-4</b> : Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	9
<b>Figure I-5</b> : Technologies des éoliennes à axe vertical .....	11
<b>Figure I-6</b> : Technologies des éoliennes à axe horizontal.....	12.
<b>Figure I-7</b> : les principaux composants de l'éolienne .....	14
<b>Figure I-8</b> Principe de la conversion de l'énergie éolienne.....	15
<b>Figure I-9</b> : les principaux composants d'une éolienne.....	15
<b>Figure I-10</b> : éolienne à MAS piloté au stator .....	18
<b>Figure I-11</b> : éolienne à MADA piloté au rotor.....	19
<b>Figure I-12</b> : système éolienne basé sur GSAP.....	20
<b>Figure I-13</b> : systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents .....	21
a) GSAP avec convertisseur MLI	
b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur MLI	
<b>Figure I-14</b> : éolienne au cout minimum basé sur GSAP .....	22

## Chapitre II

### Modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents

<b>Figure II-1</b> : principe de la loi de BETZ.....	25
<b>Figure II-2</b> : coefficient de puissance en fonction de la vitesse du vent .....	26
<b>Figure II-3</b> : comportement d'une pale dans un flux.....	27
<b>Figure II-4</b> : schéma mécanique équivalent de la turbine éolienne.....	28
<b>Figure II-5</b> : modèle mécanique simplifié de la turbine .....	29
<b>Figure II-6</b> : photographie d'un moteur à aimants en géométrie cylindrique .....	31
<b>Figure II-7</b> : schéma équivalent de la MSAP dans le repère (a,b,c) et le repère (d,q,o).....	33
<b>Figure II-8</b> : schéma de la MSAP dans le repère (d,q,o).....	35
<b>Figure II-9</b> : allure du profil du vent.....	37
<b>Figure II-10</b> : allure de la vitesse de rotation de la turbine.....	38

## Liste des figures

---

<b>Figure II-11</b> : allure de la vitesse spécifique du vent en boucle ouverte.....	38
<b>Figure II-12</b> : allure du coefficient de puissance en boucle ouverte .....	38
<b>Figure II-13</b> : tensions triphasés de la machine synchrone.....	39
<b>Figure II-14</b> : tension $V_{dq}$ de la machine synchrone.....	39
<b>Figure II-15</b> : vitesse de rotation de la machine synchrone .....	40

### *Chapitre III*

#### *Stratégies de commandes appliquées à l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents*

<b>Figure III.1</b> : caractéristiques vitesse de rotation, vitesse du vent.....	42
<b>Figure III.2</b> : Réseau de courbes puissances - vitesse de rotation de la turbine paramétrée par la vitesse du vent.....	44
<b>Figure III.3</b> : schéma fonctionnel de la boucle d'asservissement de vitesse.....	44
<b>Figure III.4</b> : boucle de régulation de vitesse.....	46
<b>Figure III.5</b> : Résultats de simulation de la MPPT.....	47
<b>Figure III.6</b> : structure générale de la commande vectorielle de la MSAP.....	49
<b>Figure III.7</b> : boucle de régulation des courants $i_{sd}$ et $i_{sq}$ .....	51
<b>Figure III.8</b> : Commande de la génératrice synchrone à aimants permanents.....	54
<b>Figure III.9</b> : allure du couple électromagnétique .....	58
<b>Figure III.10</b> : allure des courants $i_{sd}$ et $i_{sq}$ obtenus avec un régulateur PI.....	58
<b>Figure III.11</b> : tensions et courants triphasés avec PI.....	58
<b>Figure III.12</b> allure des courants direct et en quadrature avec SMC.....	58
<b>Figure III.11</b> : tensions et courants triphasés avec SMC.....	59

### *Chapitre IV*

#### *Simulation de la chaîne complète*

<b>Figure IV.1</b> : Principe de la commande MLI.....	58
<b>Figure IV.2</b> : schéma d'un redresseur .....	60
<b>Figure IV.3</b> : différents états de commutations des interrupteurs d'un redresseur MLI.....	61
<b>Figure IV.4</b> : schéma électrique du bus continu.....	62
<b>Figure IV.5</b> : boucle de régulation du bus continu.....	63
<b>Figure IV.6</b> : différentes configurations des signaux MLI.....	67
<b>Figure IV.7</b> : onduleur à trois niveaux à structure NPC.....	68

## Liste des figures

---

<b>Figure IV.8</b> : schéma électrique du filtre .....	69
<b>Figure IV.9</b> : schéma bloc du contrôle des courants transités par le réseau dans le repère de Park....	<b>70</b>
<b>Figure IV.10</b> : Représentation des commandes appliquées au système (turbine, GSAP).....	63
<b>Figure IV.11</b> : La vitesse spécifique du vent.....	74
<b>Figure IV.12</b> : le coefficient de puissance .....	74
<b>Figure IV.13</b> : La vitesse mécanique.....	75
<b>Figure IV.14</b> : le couple électromagnétique.....	76
<b>Figure IV.15</b> : Les courants $i_{sd}$ et $i_{sq}$ .....	76
<b>Figure IV.16</b> : La tension du bus continu.....	77
<b>Figure IV.17</b> : les tensions triphasées d'un onduleur à trois niveaux .....	77
<b>Figure IV.18</b> : la puissance injectée au réseau.....	77
<b>Figure IV.19</b> : Partie zoomée de la puissance injectée au réseau .....	77
<b>Figure IV.20</b> : Puissance réactive fournie par la chaîne de conversion.....	77
<b>Figure (IV.21)</b> : l'analyse spectrale du courant injecté au réseau.....	78

## Introduction générale

---

La consommation mondiale d'énergie a connu une augmentation énorme ces dernières années, à cause de l'industrialisation massive qui a tendance de s'amplifier de plus en plus, et plus précisément dans certaines zones géographiques notamment dans les pays de l'Asie.[1]

La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du 18e siècle, puis du pétrole au milieu du 20e siècle.[2]. D'une part, les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente. D'autre part, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en termes de pollution des déchets radioactifs, du démantèlement prochain des vieilles centrales et du risque industriel [3]. Depuis le premier choc pétrolier de 1973, les pays industrialisés optent progressivement pour les énergies nouvelles et renouvelables.[2]

D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. Plusieurs sources des énergies sont en cours d'exploitation et de recherche, dont le but est de développer des techniques d'extraction de puissances visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage, et de recyclage), et d'augmenter l'efficacité énergétique[4], L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique ; le vent brassant les pales d'une éolienne ; la lumière solaire excitant les photopiles ; mais aussi l'eau chaude des profondeurs de la terre alimentant des réseaux de chauffage. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau, etc. ne rejettent aucune pollution lorsqu'elles produisent de l'énergie. [5]

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. Dans un premier temps, cette énergie n'a été exploitée que dans les domaines mécaniques. L'exemple le plus connu est le moulin à vent utilisé par le meunier pour la transformation du blé en farine. On peut citer les nombreux moulins à vent servant à l'assèchement des polders en Hollande.[6]

Les systèmes utilisant l'énergie du vent représentent la technologie à plus forte croissance. Parmi ces technologies éoliennes, de nombreux systèmes de différents types ont été conçus et développés tout en prolongeant une expérience dans ce domaine remontant sur plusieurs siècles. De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de la technologie éolienne est l'aérogénérateur, une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un courant électrique. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique intègre différents organes électrotechniques. Afin de maximiser l'efficacité de cette conversion d'énergie, de nombreuses solutions ont été étudiées aussi bien au niveau de la génératrice et ont poussé à utiliser l'électronique de puissance. La plupart des dispositifs utilisent des machines synchrones ou asynchrones mais des études sont aussi réalisées dans l'objectif de développer des machines spéciales. L'interface électronique de puissance entre l'éolienne et la charge a généralement pour but de commander le générateur afin d'extraire un maximum de puissance du vent. [7]

## Introduction générale

---

Dans le but d'extraire le maximum de puissance, la commande d'extraction du maximum de puissance (MPPT) est appliquée au niveau de la turbine et la commande vectorielle au niveau de la génératrice, la commande vectorielle est appliquée au début avec un régulateur PI puis avec la commande mode glissant, ceci permet d'avoir de bonnes performances dynamiques, et assure un couple même en basses vitesses.

La commande du mode glissant est une structure de contrôle variable. Proposé au début des années 1950, son succès a été confirmé dans de nombreux problèmes de contrôle. Connue par sa simplicité, sa rapidité et sa robustesse, elle a montré son efficacité dans de nombreuses applications. Cependant ce type de contrôleur possède un inconvénient majeur qui est le phénomène de chattering.

Le but de ce travail est de présenter un modèle global d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents basé sur une structure proposée, et des stratégies de contrôle permettant à la fois d'optimiser la puissance produite, de réguler la tension du bus continu, et de contrôler les puissances transmises au réseau. Tous les modèles développés au cours de cette étude sont simulés par le logiciel Matlab-simulink.

### **Structure de mémoire**

Le premier chapitre, expose quelques généralités sur les éoliennes, un état de l'art des énergies renouvelables est présenté. Il comprend une description du domaine des énergies renouvelables. Quelques notions principales sur la technologie éolienne sont données telles que, la conception des turbines, les différents types des éoliennes utilisés, leur fonctionnement, ainsi que l'architecture de chaînes de conversion d'énergie en association avec les différents types de génératrices. On termine par un état de l'art sur les différentes configurations électriques utilisées et leurs effets sur le fonctionnement des aérogénérateurs.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation du générateur éolien (machine à aimants) du point de vue de l'estimation de la production d'énergie à partir de données de vitesse de vent.

La commande de vitesse et de courant de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents fait l'objet du troisième chapitre. On commence par l'application de la MPPT munie d'un PI pour la turbine, et la commande vectorielle pour la génératrice synchrone à aimants permanents est munie d'un régulateur PI puis l'application du mode glissant à fin d'améliorer les performances. Les résultats de simulation sont présentés et analysés à la fin de ce chapitre.

Dans le quatrième chapitre, Afin d'injecter l'énergie produite au réseau nous avons utilisé un onduleur à trois niveaux de type NPC. La modélisation des deux convertisseurs et du bus continu, est établie.

Les résultats de simulation de la chaîne complète sont présentés pour mettre en évidence la validité de la stratégie choisie face aux fluctuations du vent.

# ***CHAPITRE I***

## ***GENERALITES SUR LES EOLIENNES***

## I.1. Introduction

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de cent ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale actuellement. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel. [8]

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal). Les structures de ces capteurs sont de plus en plus performantes.

Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes. [2]

Dans ce chapitre, sera présenté une définition de l'énergie éolienne de manière générale, puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques seront données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde, ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens. [4]

## I.2. Génération d'énergie renouvelable

Une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est lié au fait que la matière première (source de l'énergie) n'est pas transportable dans la majorité des cas contrairement aux sources traditionnelles comme le pétrole ou l'uranium qui est extrait des gisements respectifs et acheminé « sans gros problèmes » vers les distributeurs ou les usines qui peuvent être éloignées de milliers de kilomètres. Par contre, le lieu de « l'extraction » de l'énergie renouvelable est déterminant pour le lieu de transformation. Seule la biomasse semble avoir les propriétés les moins restrictives. Par exemple un site éolien doit être précisément déterminé en choisissant les lieux géographiques les plus régulièrement ventés, les panneaux solaires doivent évidemment être placés dans les zones bien ensoleillées, les propriétés de la houle ne sont pas favorables partout sur les mers. [1]

Dans les zones où le réseau existe, il est donc pratique et dans la majorité des cas nécessaire de transformer l'énergie renouvelable sous la forme électrique qui est transportable via les lignes électriques. La production énergétique est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de

consommation. Cependant, le caractère capricieux des sources renouvelables pose le problème de la disponibilité énergétique et du stockage de masse, [1]

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...), en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre.

Etant donné que l'énergie mécanique est difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement (pompage direct de l'eau, moulins,...). Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique.

A l'exception de la biomasse et de l'hydraulique, l'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables vient de la non régularité des ressources. A l'opposé, les fluctuations de demande en puissance selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément en phase avec les ressources. Par exemple, en hiver il y a un besoin énergétique plus important pour le chauffage et l'éclairage mais les journées d'ensoleillement sont plus courtes. La solution à retenir est certainement la diversification voire le couplage entre plusieurs sources, par exemple du solaire avec l'énergie éolienne.

Le stockage de l'énergie électrique à grande échelle n'est pas pour le moment envisageable même si l'hydrogène synthétisé par électrolyse de l'eau semble être un débouché privilégié des énergies renouvelables. Ainsi, la pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène d'origine renouvelable constituerait une filière entièrement propre et disponible. De plus, stocker l'hydrogène en même temps qu'on produit de l'électricité dans une ferme éolienne ou une centrale solaire permettra d'absorber les surplus de ces « énergies capricieuses » et d'améliorer considérablement le lissage de la production d'électricité, aspect critique des énergies renouvelables pour les gestionnaires de réseau.

A l'opposé, un couplage des énergies renouvelables (solaire, éolien) avec la pile à combustible résout en très grande partie le problème de la disponibilité de l'énergie. Des travaux au stade sont par exemple en cours sur le stockage d'hydrogène d'origine éolienne en Espagne (Région de Navarre) où la société EHN, premier promoteur mondial en éolien, s'est associée à la société canadienne '*Stuart Energy Systems*' spécialisée dans les technologies de l'hydrogène (électrolyseurs,...). Cependant, cette filière hydrogène, quoique très prometteuse, souffre encore aujourd'hui de sa rentabilité.

La problématique du stockage s'applique différemment dans les sites isolés et de petites puissances où il est parfaitement envisageable, voire impératif d'associer un élément de stockage de type accumulateur électrochimique ou volant d'inertie.

Toutes les ressources renouvelables sont en forte croissance, La figure (I.1) donne la vue sur la répartition de la production d'électricité entre les différentes sources renouvelables. [9]

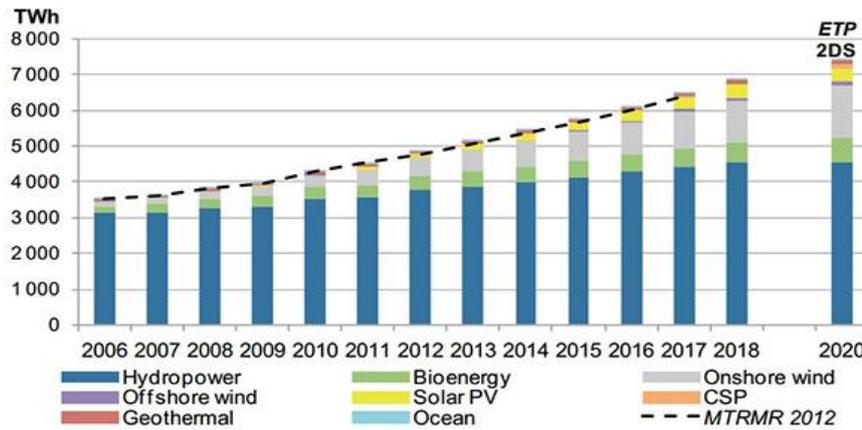


Figure. 1.1 croissance des ressources renouvelables dans le monde

### I.3 Les énergies renouvelables

Au niveau mondial, l'énergie renouvelable provient de six sources distinctes. L'hydroélectricité est la principale avec une contribution de 82,9%. L'éolienne est la seconde source avec (8,3%). Viennent ensuite la filière biomasse (6,3%), la géothermie (1,6%), le solaire qui regroupe les centrales photovoltaïques et thermiques (0,8%), et enfin les énergies marines (0,01%)[10]

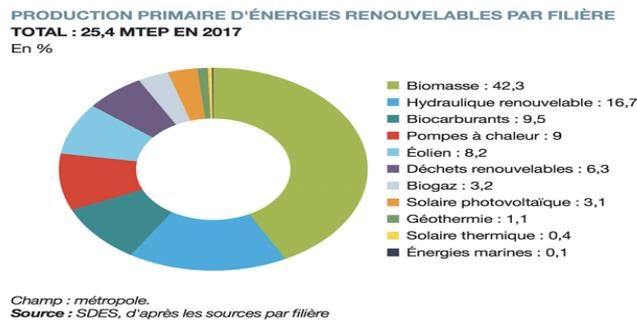


Figure I-2 figure de la production électrique d'origine renouvelable – 2017

#### I.3.1 L'énergie hydraulique

L'énergie fournie par le mouvement de l'eau, tel que : les chutes d'eau, les cours d'eau, les courants marins, les marées, les vagues est appelée énergie hydraulique. Elle peut être utilisée directement, comme dans un moulin à eau, ou converti, en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

L'énergie hydraulique est actuellement parmi les premières sources d'énergies renouvelables, la production en électricité est estimée à environ 16.7% de la production électrique d'origine renouvelable comme le montre la Figure précédente.

#### I.3.2 L'énergie de la biomasse

L'énergie biomasse permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion des matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasses. Elle est la forme d'énergie la plus

ancienne utilisée par l'homme et peut être répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets municipaux renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...) [4]

### **I.3.3 Géothermie**

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol. Partout, la température croît depuis la surface vers le centre de la Terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15 °C ou même 30 °C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre.

La géothermie présente l'avantage de la fiabilité et la disponibilité dans le temps en quatre types selon la température de gisement : la haute (>180°C), moyenne (>100°C), basse (>30°C) et très basse énergie. Les deux premiers types favorisent la réduction de l'énergie électrique. La géothermie basse énergie permet de couvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels... La géothermie très basse énergie nécessite l'utilisation des pompes à chaleur et donc une installation particulière. [11]

### **I.3.4 Photovoltaïque**

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Un inconvénient est celui de la pollution à la production qui est due à la technologie utilisée. Des progrès technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT). Cette dernière caractéristique est assez commune avec la production d'énergie éolienne.

Les panneaux solaires sont très pratiques d'utilisation. L'intégration dans le bâtiment est facile et devient même esthétique. Pour les sites isolés et dispersés qui demandent peu d'énergie, c'est une solution idéale (télécommunication, balises maritimes, etc..) [11]

### **I.3.5 L'énergie des marines**

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux-mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant

électrique. Il existe trois grandes familles de systèmes : rampe de déferlement ou overtopping, colonne d'eau oscillante et puis les flotteurs articulés ou les flotteurs sur ancrage.

L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie est à exploiter dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées. [11]

### I.3.6 L'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En 2016, la puissance totale d'énergie éolienne installée dans l'Europe des 28 s'élevait à 153 gigawatts, alors qu'en 2011 elle était de 94 GW. Par ailleurs, l'UE a installé 12,1 GW de puissance supplémentaire en 2016. D'ici à 2030, l'Union européenne s'est fixée comme objectif d'atteindre 27% d'énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie. [11]

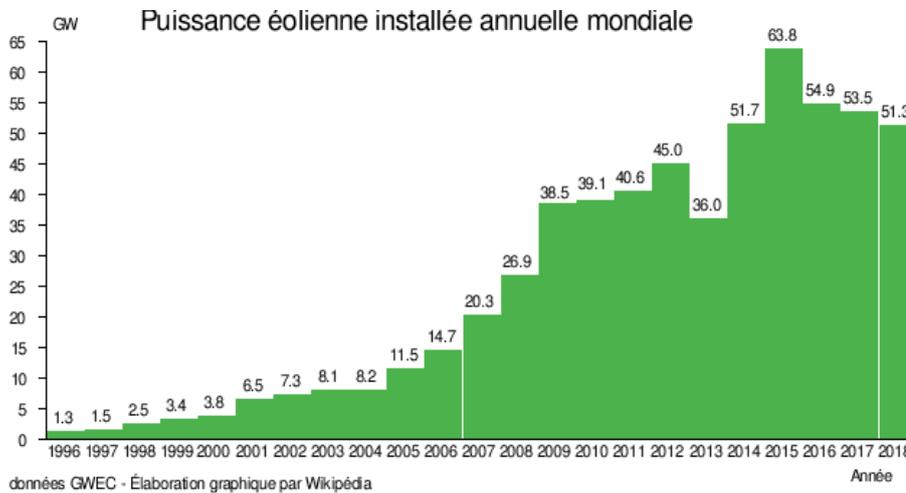


Figure 1-3 Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW [WIKI]

### I.4 Production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Cette énergie a connu depuis environ 30 ans un essor sans précédent qui est dû notamment aux premiers chocs pétroliers. A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an.

En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 15000 MW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27000 MW pour 40000MW de puissance éolienne installée dans le monde. En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une puissance éolienne installée en Europe de l'ordre 70000 MW.

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I.4).

L'énergie éolienne est une énergie intermittente "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences. Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. [12]

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

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Depuis plus de 100 ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel.[8]

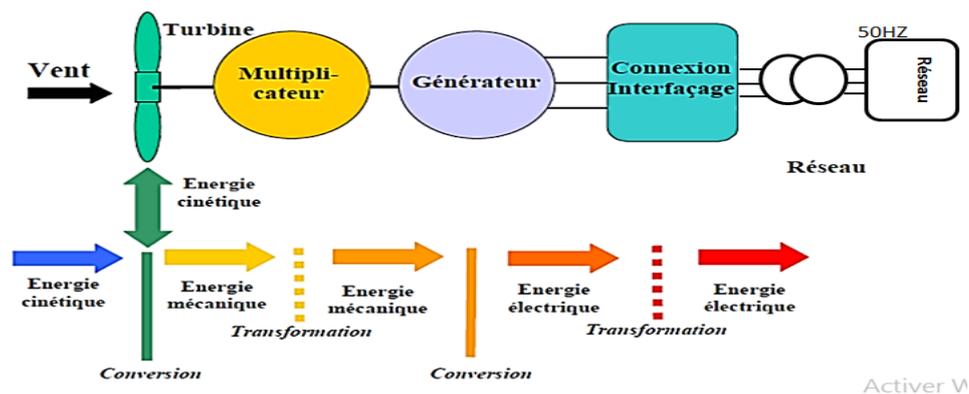


Figure I -4 Conversion de l'énergie cinétique du vent

## I.5 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et

ensuite les moulins à blé et le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C environ.

Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moulinier le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIXème siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive.

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poule La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde. [11]

#### Avantages et inconvénients [4] [8] [9]

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
L'énergie éolienne est une énergie renouvelable inépuisable contrairement aux énergies fossiles.	à puissance électrique produite, est influencée par la nature stochastique du vent, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
L'énergie éolienne est une énergie qui respecte l'environnement. L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie	L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.
C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.	Le coût de l'énergie éolienne est plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés
L'énergie éolienne ne produit pas de déchets toxiques.	Le bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des multiplicateurs.
Les éoliennes ont la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment,	L'impact sur les oiseaux: certaines études démontrent que les sites éoliens ne doivent pas être

	implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas piéger
Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables.	
La surface occupée au sol est peu importante.	
L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.	

## I.6 Les différents types des aérogénérateurs

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal.

### I.6.1 Eoliennes à axe verticales

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrius (figure I.5). [11]



Figure I -5 Technologies des éoliennes à axe vertical

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit : [9]

#### I.6.1 .a Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.

- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

### I.6.1 .b Inconvénients

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne a tour.

### I.6.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées à la manière des ailes d'avion. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le cout et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un cout moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité.[4] Leur structure est présentée dans la figure(I.6)



Figure I -6 topologie éolienne à axe horizontal

Elles sont caractérisées à leur tour par des avantages et des inconvénients.

#### I.6.2.a Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour.

Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.[9]

### **I.6.2.b Inconvénients**

- Le Cout de construction est très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour, ce qui gêne l'intervention en cas d'incident. [4]

## **I.7 Conception des pales**

### **I.7.1 Conception Monopale**

Les éoliennes monopales sont assez rares, les problèmes étant encore plus prononcés que dans le cas des éoliennes bipales. Outre une vitesse de rotation plus élevée, et des problèmes de bruit et d'impact visuel, l'inconvénient de ce type d'éolienne est le couple de torsion important appliqué sur l'arbre, ainsi pour équilibrer le rotor, il faudra munir l'éolienne d'un balancier du côté du moyeu opposé à la pale. [1]

### **I.7.2 Conception Bipale**

Les éoliennes bipales présentent l'inconvénient de nécessiter une vitesse de rotation bien plus élevée pour produire la même quantité d'énergie qu'une éolienne tripale, ce qui exige une conception très complexe vu qu'elle doit être munie d'un rotor basculant pour éviter les vibrations cycliques importantes qui peuvent apparaître lorsque la nacelle cherche à suivre le vent et que les pales sont à l'horizontale. Toutefois le grand avantage des éoliennes bipales par rapport à leurs cousines tripales est le fait qu'elles permettent d'économiser le coût d'une pale de rotor, ainsi que le poids de celle-ci. [4]

### **I.7.3 Conception tripale**

La grande majorité des éoliennes modernes vendues sur le marché mondial sont tripales, le rotor étant maintenue dans une position face au vent (c.-à-d. du côté de la tour exposé au vent) par un mécanisme d'orientation actionné par des moteurs électriques. On appelle normalement cette construction la conception danoise classique, et elle tend aujourd'hui à constituer le standard d'après lequel les conceptions alternatives sont jugées.

## **I.8 principaux composants de l'éolienne**

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour, comme illustré sur la figure (I -7). [1]

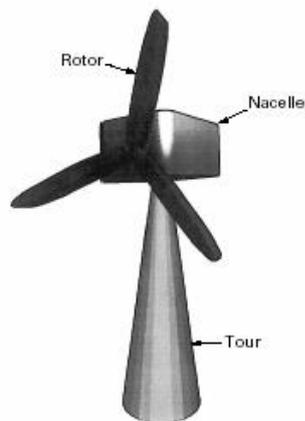


Figure I.7 les principaux composants de l'éolienne

### Le rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variables, freinage du rotor...)

### La nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine.

### La tour

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi le captage de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor, nacelle) de manière à s'adapter au mieux aux différents sites d'implantation.

## I.9 fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré dans la Figure I.8. L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamique, mécaniques, électriques et automatiques.

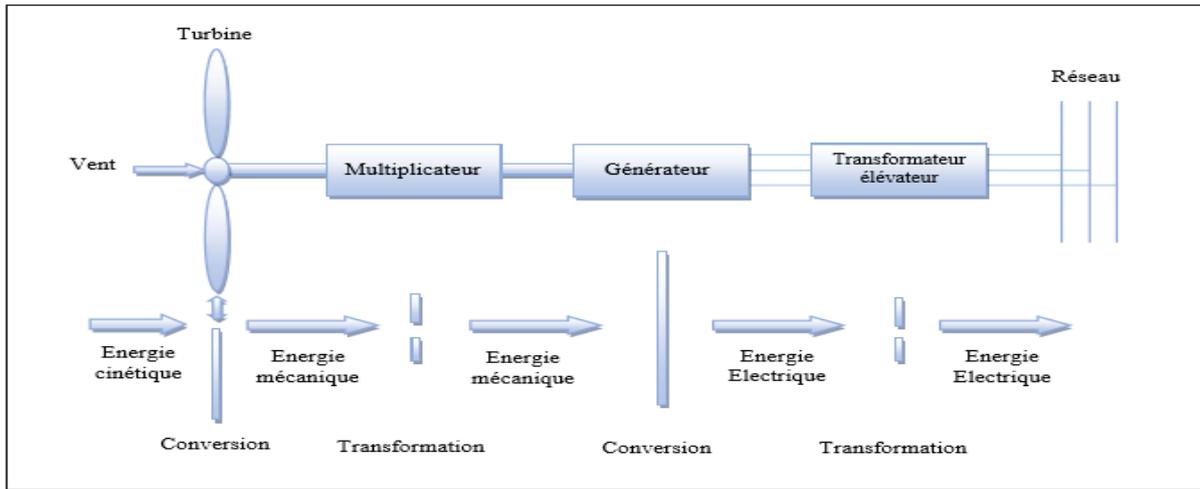


Figure I -8Principe de la conversion de l'énergie éolienne

### I.10 Constitution d'une éolienne

Une éolienne est composée de plusieurs éléments, les principaux présentés dans la figure I.9

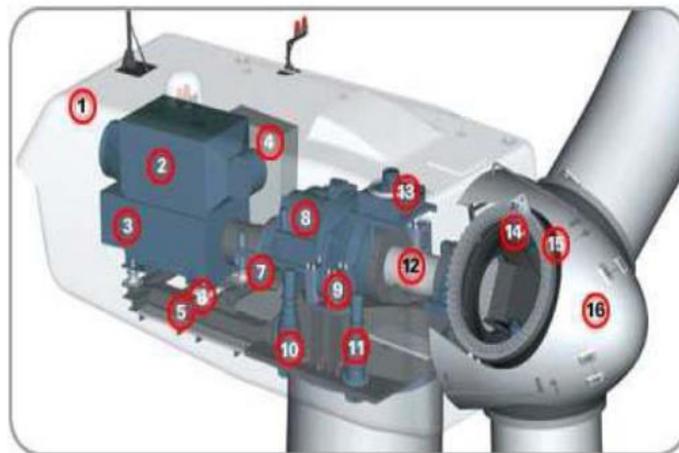


Figure I -9les principaux composants d'une éolienne

1: Nacelle, 2,13: Systèmes de refroidissement, 3: Génératrice, 4: Système de contrôle, 5: Armature métallique, 6,9: insonorisant, 7 : Frein à disque, 8: Multiplicateur de vitesse, 10,11: Servomoteurs, 12 : Arbre lent, 14 : Système d'orientation des pales, 15 : Les pales, 16 : Rotor de la turbine.

Un mat ou tour, supporte la nacelle et la turbine. Il est important qu'il soit haut du fait l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales. Il est tubulaire et contient une échelle voire un ascenseur. La nacelle partiellement insonorisée, avec une armature métallique, accueille la génératrice et son système de refroidissement, le multiplicateur de vitesse et

différents équipements électroniques de contrôle qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne.

Le multiplicateur de vitesse (quand il existe) comporte un arbre lent supportant la turbine et un arbre à grande vitesse (1000 à 2000 tours /min). Il est équipé d'un frein mécanique à disque, auquel est accouplé le générateur. Le multiplicateur de vitesse peut être pourvu d'un système de refroidissement à huile.

La turbine possède trois pales qui permettant de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent. Un système électromécanique ou hydraulique permet généralement d'orienter les pales et de contrôler ainsi le couple de la turbine et de réguler sa vitesse de rotation. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par "mise en drapeau" ou seulement par rotation de leurs extrémités. Un mécanisme utilisant des servomoteurs électriques permet d'orienter la nacelle face au vent. Un anémomètre ou bien deux et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent. [5]

## **I.11 Modes d'exploitation de l'énergie éolienne**

En vue de l'exploitation de l'énergie fournie par le vent, plusieurs systèmes peuvent être utilisés. Nous pouvons les classer en deux catégories :

- Les systèmes à vitesse fixe
- Les systèmes à vitesse variable

### **I.11.1 Les systèmes à vitesse fixe**

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence de réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. La technologie inhérente aux éoliennes à vitesse fixe est bien maîtrisée. En effet, c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité, d'implantation, une fiabilité et un faible coût. Cela permet une installation rapide de certaines de KW de génération éolienne. Cependant, avec la mise en place très progressive de projets d'éoliennes dont la puissance est supérieure au MW, ce sont les éoliennes à vitesse variable qui développeront à l'avenir pour cette gamme de puissance. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne est composée de la turbine, le multiplicateur de vitesse et la génératrice.

#### **Avantage du fonctionnement à vitesse fixe**

Les avantages du fonctionnement à vitesse fixe sont représentés comme suit :

- Un système électrique plus simple.
- Utilisation d'une machine standard robuste et pas chère, et une fiabilité plus élevée.
- Une faible probabilité d'excitation des fréquences de résonances des éléments de l'éolienne.

- Absence d'interface d'électronique de puissance.
- Un cout moins cher.

#### **Inconvénient du fonctionnement à vitesse fixe.**

- La puissance extraite n'est pas optimisée.
- Maintenance de la boîte de vitesse.
- Magnétisation de la machine non gérée.
- Fonctionnement à une plage de vitesse de vent très étroite, donc des applications limitées.
- En raison de tous ces inconvénients, les industriels ont été poussés à développer d'autres systèmes plus performants et fonctionnant pour une gamme de vitesse plus large. [5]

#### **I.11.2 Les systèmes à vitesse variable**

Les systèmes à vitesse variable permettent à l'éolienne de fonctionner sur une plus large plage de vitesses de vent et de pouvoir tirer le maximum de puissance possible pour chaque vitesse de vent.

On distingue différents types d'éoliennes à vitesse variable classés en fonction de la plage de variation de la plage de vitesse qu'elles autorisent. [4]

##### **Avantage du fonctionnement à vitesse variable**

- Fort rendement de conversion d'énergie.
- Puissance électrique de meilleure qualité.
- Stress mécanique réduit. [13]

##### **Inconvénient du fonctionnement à vitesse fixe.**

- Coût et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs
- Contrôle du système plus compliqué [13]

#### **I.12 Historique sur les machines électriques**

Avant de s'étendre sur les différentes machines utilisées au sein des turbines, il convient de faire un petit détour sur les prémices, leurs histoires qui ont été importantes et intéressantes dans notre vie de tous les jours.

L'histoire des machines électriques débuta avec le professeur Pacinotti (1811-1879) qui effectua des travaux sur un anneau tournant dans un champ magnétique. Bien que restée au stade expérimental, il a envisagé une utilisation en mode générateur et moteur. Cependant certaines voix se sont levées pour réfuter cette théorie car l'effet magnétique du courant électrique a été découvert un peu plus tôt par Oersted en 1820 et l'induction magnétique par Faraday en 1831.

En 1869, le belge Zénobe Gramme réalisa les premières génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Ses travaux furent présentés à l'Académie des Sciences de Paris et cette première machine a reçu le nom de machine de Gramme.

En 1887 Nikola Tesla (1856-1943), ingénieur yougoslave en électronique, fonde une société de construction d'alternateurs. Grâce à ses travaux, l'utilisation du courant alternatif va se trouver profondément bouleversée et gagner la bataille du transport à distance. C'est donc dans les années 1890 que la première expérience de transport d'électricité s'est faite vers l'Allemagne sur une distance de 175 km avec un rendement de 75 %.

Tesla recommande d'abord l'utilisation des courants polyphasés et réussit à créer un champ magnétique tournant qui permet d'entraîner en rotation une armature mobile tournante.

Grâce à l'électricien Russe Michail Ossipowitsch Doliwo-Doborwolski, l'invention du moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil intervient en 1889. Cette machine ne sera construite industriellement que deux ans plus tard. La paternité de cette invention est contestée et souvent attribuée à Tesla. Avant le début du vingtième siècle la plupart des machines électriques que nous connaissons actuellement avaient été mises en œuvre ou leur principe avait été déjà posé.

Les machines synchrones, asynchrones et à collecteur constituent l'essentiel du parc des machines électriques depuis un siècle et demi. Cependant, l'évolution de l'électronique de puissance, comme la découverte du transistor en 1948 et du thyristor en 1958, a permis au domaine des machines électriques de ne pas rester figé, des progrès immenses ont été effectués dans ce domaine conduisant à d'importants développements théoriques et technologiques.[4]

### I.12.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.[9]

L'éolienne dans cette configuration entraîne une machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé au circuit statorique, comme la montre la figure suivante

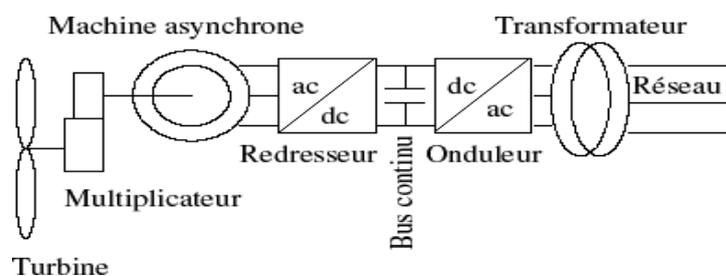


Figure I -10 éolienne à MAS piloté au stator

### I.12. 2 Machine asynchrone à double alimentation

Le principe de la machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation est issu de celui de la cascade hyposynchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence (plus ou moins élaboré). Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit.

Les machines asynchrones à double alimentation sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage, toutefois elles partagent un point commun qui est la nécessité d'avoir un multiplicateur de vitesse.

La présence de système à bagues et balais engendre une légère diminution de leur robustesse, cependant le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants utilisent ce type de machine.[4]

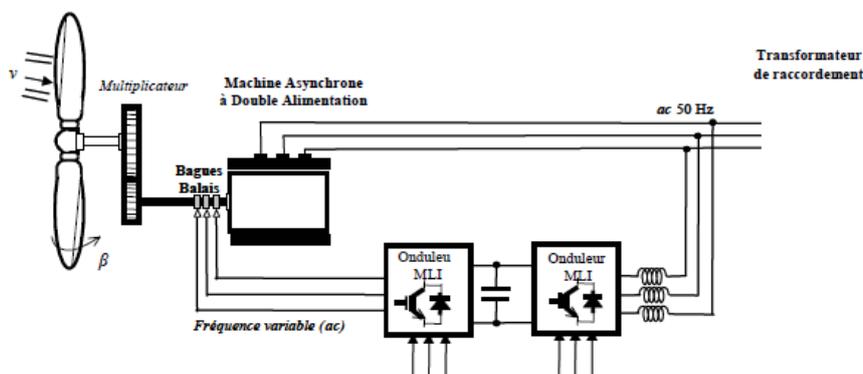


Figure I -11 éolienne à MADA piloté au rotor

### I.12. 3 éolienne à machine synchrone

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux à très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation reste fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. [11]

L'avantage du générateur synchrone par rapport au générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur 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 être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de

vitesses. 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. [4]

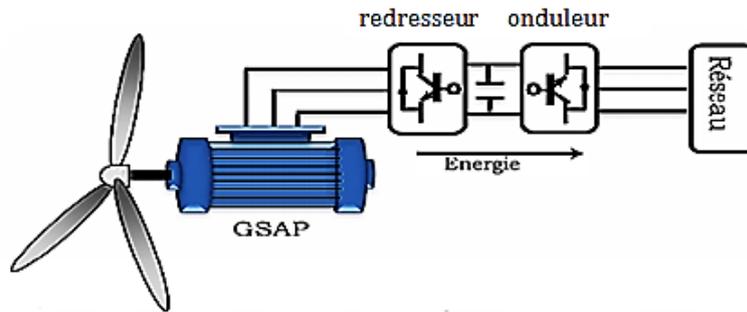


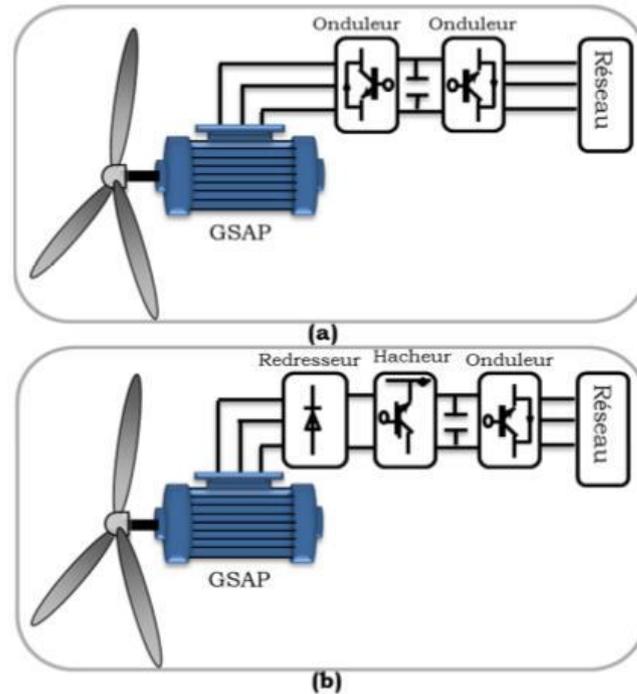
Figure 1-12 système éolienne basé sur GSAP

#### I.12.4 Autres machines

D'autres types de machines auraient techniquement la possibilité d'être utilisées notamment dans les aérogénérateurs à vitesse variable. Les machines à courant continu présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais elles sont chères et ont un grand poids. Les générateurs à réluctances variables sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus un bon rendement à toutes vitesses et une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple mais la puissance produite par ces éoliennes est généralement faible. Ce type de machine pourrait être un candidat de futures éoliennes. [5]

#### I.13 Aérogénérateur étudié

La technologie des aérogénérateurs s'est diversifiée en même temps qu'elle progressait. Ainsi, de nos jours, il existe de nombreuses sortes d'aérogénérateur. La machine synchrone à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais (Figure I.13). Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple). La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.[8]



**Figure I-13** GSAP systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents (a) GSAP avec convertisseurs MLI (b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur

L'inconvénient majeur de l'utilisation de la GSAP est le coût des aimants utilisés. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie. Dans la configuration de la GSAP de la Fig. I.13-b, la génératrice est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un hacheur, qui a pour rôle de contrôler le couple électromagnétique. La liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI qui assure la régulation de la tension du bus continu aussi bien qu'il contrôle le facteur de puissance. L'inconvénient de cette configuration est l'utilisation du redresseur, ce qui augmente l'amplitude du courant et la déformation de la tension. En conséquence, cette configuration a été considérée pour les petites puissances (inférieures à 50KW). Dans la configuration de la Fig. I.13-a, un redresseur MLI est placé entre la génératrice et le bus continu, et la liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI. L'avantage de cette configuration par rapport à la configuration précédente est l'utilisation de la commande vectorielle ce qui permet à la génératrice de fonctionner au voisinage du point optimal. Cependant, ces performances dépendent de la bonne connaissance des paramètres de la génératrice qui dépendent de la température et la fréquence. En choisissant judicieusement les paramètres du système représenté sur la Fig. I.14, un système à vitesse « Non constante », à coût minimum et énergétiquement assez performant peut être obtenu. [8]

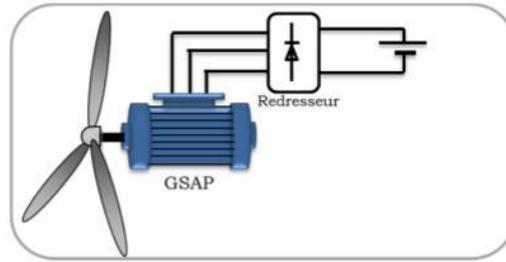


Figure 1-14 éolienne a cout minimum basé sur GSAP

### I.14 conclusion

Dans ce chapitre une brève description du domaine des énergies renouvelables, ainsi que l'évolution de la production d'électricité dans le monde ont été montrées. Puis, Quelques notions principales sur la technologie éolienne ont été données concernant principalement, la conception des turbines, les différents types des éoliennes utilisés, ainsi que leur fonctionnement.

Enfin, Nous avons donné un aperçu sur la conversion électromécanique et les différents types de machines utilisées. La comparaison entre ces machines a dégagé l'idée de consacrer notre étude à un système utilisant une machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

# ***CHAPITRE II***

## ***Modélisation de l'aérogénérateur***

## II.1 Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique, et d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pâles de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- Un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande)

Dans cette partie, un modèle analytique de la turbine éolienne est décrit ainsi que l'identification des différents paramètres qui régissent le fonctionnement de cette dernière à savoir le coefficient de puissance  $C_p$ , l'angle de calage ( $\beta$ ) et la vitesse spécifique du vent ( $\lambda$ ). [14]

## II.2 Modélisation de la turbine éolienne à vitesse variable

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement, sa vitesse de rotation en particulier. Cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne. [15]

### II.2.1 Modélisation du vent

Le vent 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. [11]

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent, comme suite [8]:

$$v(t) = 7.5 + 0.7 * [3 * \sin 0.09t + 0.7 * \sin 0.42t + 18 * \sin 0.01t + \sin 0.038t] \quad (\text{II .1})$$

### II.2.2 conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique

La nacelle a le rôle de capter l'énergie cinétique du vent et la transformer en énergie électrique. Cette opération est basée sur un certain nombre de lois physiques qui sont présentées dans ce qui suit.

### II.2.3. Lois fondamentales régissant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

## Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (II.1) sur le quel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$ , soit  $V_{12}$

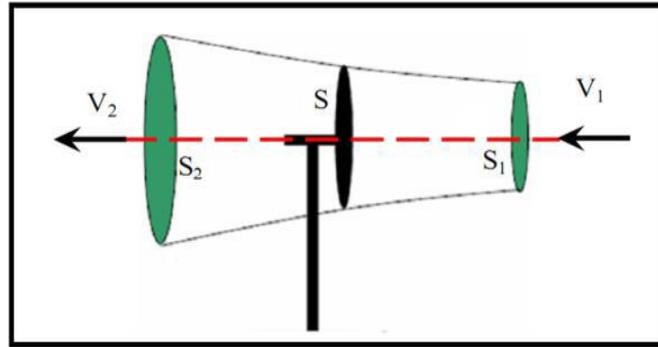


Figure II-1: Principe de la théorie de Betz

La masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II .2})$$

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

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II .3})$$

En remplaçant  $m$  par son expression alors

$$P_m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II .4})$$

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

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{II .5})$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{(1 + \frac{V_1}{V_2})(1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)}{2} = C_p \quad (\text{II .6})$$

Le coefficient  $C_p$  est variable, il est fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega t$ , et les paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage. Il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ . La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de **Betz**, est de  $\frac{16}{27}$  soit 0.593

$$\eta = \frac{16}{27} C_p \quad (\text{II .7})$$

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte, et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de **BETZ** ; on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique. [1]

La figure II.2 représente l'évolution du ratio en fonction de  $\frac{Pm}{Pmt}$  en fonction de  $\frac{V1}{V2}$  qui est appelé aussi coefficient de puissance

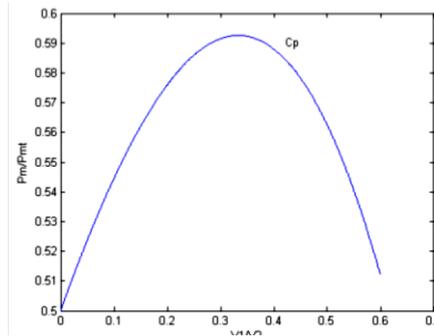


Figure II-2 coefficient de puissance en fonction de la vitesse du vent

Le coefficient de puissance et l'efficacité d'un système d'éolienne sont différents. L'efficacité d'une éolienne inclut la perte dans la transmission mécanique, la production d'électricité, les pertes du convertisseur, etc., où le coefficient de puissance est l'efficacité de convertir la puissance du vent en puissance mécanique dans l'arbre du rotor.

**Coefficient de couple**

Le coefficient de couple  $Cm$  est assez proche du coefficient de puissance  $Cp$ . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation  $\Omega t$  nulle, ce qui correspond à une valeur de  $Cp$  nulle pour une valeur de  $Cm$  non nulle. [1]

L'expression du coefficient du couple est notée comme suit : [27]

$$Cp = C1 * \left(\frac{C2}{\lambda i} - c3\beta - C4\right) e^{-c5\lambda i} + C6\lambda \tag{II .8}$$

Avec  $\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda i + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$

Et

Tableau II.1 valeur des coefficients utilisés pour le calcul du cp

C1	0.22
C2	116
C3	0.4
C4	5
C5	21
C6	0.0068

**II.2.4 Production d'énergie mécanique**

La puissance mécanique  $Pm$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par : [28]

$$Pm = \frac{1}{2} Cp(\lambda) \rho \pi R^2 V1^3 \tag{II .9}$$

Avec  $\lambda = \frac{R\Omega_{turbine}}{V}$  (II .10)

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

**II .2.5 Bilan des forces sur une pale**

Les modes de fonctionnement d'une hélice peuvent être représentés de la façon suivante (Figure II.3). La vitesse du vent arrivant face à un élément de pale, situé à un rayon de  $r$  est représentée par le vecteur  $V_a$ . Le vecteur  $V_t$  représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée vent apparent ou vent relatif  $W$ . Celui-ci engendre un moment  $M$  et une force résultante  $R$ . Cette force peut se décomposer en une force de traction  $F_{ax}$  suivant l'axe de l'hélice directement compensée par la résistance mécanique du mat, et une force dans le plan rotor  $F_{rot}$ , responsable d'un couple.

$$C = F_{rot}R \tag{II .11}$$

Le domaine (A) correspond à celui d'une hélice tractrice où l'énergie est fournie au fluide par l'élément de pale (avion).

Lorsque la résultante  $R$  se situe dans le domaine (C), c'est le fluide qui fournit de l'énergie à la pale; on se trouve alors dans le cas d'un fonctionnement aéromoteur caractéristique des éoliennes.

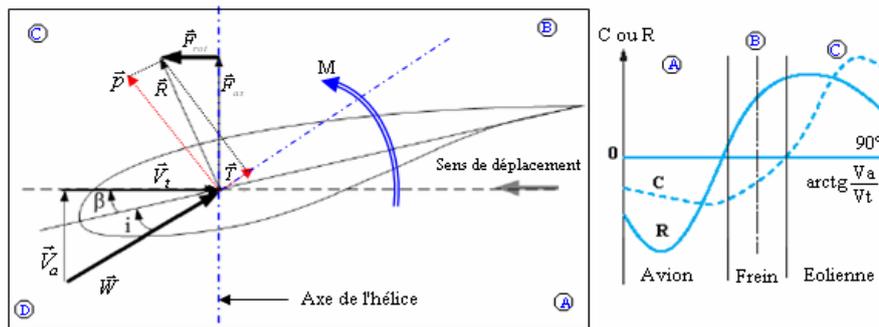


Figure II-3 Comportement d'une pale dans un flux

On définit les angles suivants :

- l'angle d'incidence «  $i$  » celui que fait la surface de la pale avec la direction du vent apparent.
- L'angle de calage «  $\beta$  » est l'angle formé par la pale et le plan de rotation. [1]

**II.2.6 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine**

La partie mécanique de la turbine qui sera étudié comprend trois pales orientables et de longueur  $R$ . elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{turbine}$  qui est relié à un multiplicateur de gain  $G$ . ce multiplicateur entraine une génératrice électrique.

La figure (II.4) représente le schéma mécanique équivalent de la turbine éolienne.

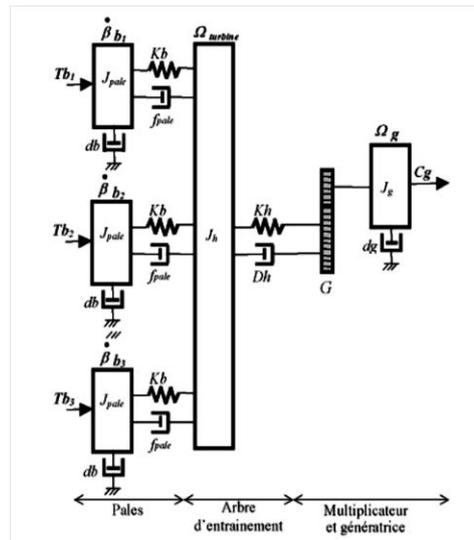


Figure II-4 Schéma mécanique équivalent de la turbine éolienne

- ❖ Les trois pales sont considérées de conceptions identiques et possèdent donc:
  - La même inertie  $J_{pale}$ .
  - La même élasticité  $K_b$ .
  - Le même coefficient de frottement par rapport à l'air  $db$ .

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support  $f_{pale}$ . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées  $\beta_{b1} \beta_{b2} \beta_{b3}$

Chaque pale reçoit une force  $T_{b1}, T_{b2}, T_{b3}$  qui dépend du vent qui lui appliqué. [16]

- ❖ L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :
  - Son inertie  $J_h$
  - Son élasticité  $K_h$
  - Son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur  $D_h$
- ❖ Le rotor de la génératrice possède
  - Une inertie  $J_g$
  - Un coefficient de frottement  $d_g$

Ce rotor transmet un couple entraînant  $C_g$  à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée  $\Omega_{mec}$ .

- ❖ La turbine comporte également un multiplicateur de vitesse noté  $G$ .
- ❖ Si l'en considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toute les forces de poussée ( $T_{b1}=T_{b2}=T_{b3}$ ) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leurs coefficient de frottement par rapport à l'air  $db$  est très faible et peut être ignoré.
- ❖ De même, les pertes par frottement coté turbine sont négligeables par rapport aux pertes par frottement coté génératrice.

En tenant compte de ses considérations, le modèle mécanique de la figure (II.4) devient celui donné dans la figure (II.5) comportant deux masses tournantes grâce au couple aérodynamique. [16]

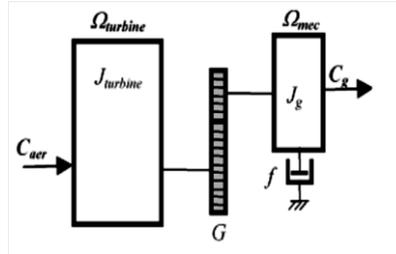


Figure II.5 : modèle mécanique simplifié de la turbine

### II.2.7 Équations dynamiques de l'arbre de transmission

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

$$J = J_{turbine} + J_{génératrice} \tag{II .12}$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe.

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple total  $C_{mec}$  appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{II .13}$$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{II .14}$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f_m$  tel que :

$$C_{vis} = f_m \Omega_m. \tag{II .15}$$

La modélisation d'une turbine éolienne revient à connaître le couple qu'elle développe au niveau du rotor, et qu'elle extrait de puissance éolienne suivant ces équations

$$P_{eol} = c_p(\lambda) \rho S V_v^2 \tag{II .16}$$

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

$$C_{eol} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v_v^2 \frac{c_p(\lambda)}{\lambda} \tag{II .17}$$

Afin d'obtenir la vitesse de rotation de la turbine, on utilise l'équation mécanique de l'arbre de la turbine solidairement lié à celui de la machine synchrone utilisée. .[38]

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = c_g - c_{em} - f_m \Omega_{mec} \tag{II .18}$$

## II.2.8 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes.

[4]

$$C_g = \frac{c_{aer}}{G} \quad (\text{II .19})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II .20})$$

## II.3 Modélisation de la GSAP

### II.3.1 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

Le terme de la 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 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.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles :

- ❖ les machines synchrone à rotor bobiné.
- ❖ les machines synchrone à réluctance.
- ❖ les machines synchrone à aimants permanents.

Notre intérêt va plus particulièrement vers cette dernière catégorie, en effet avec l'apparition d'aimants permanents de plus en plus performants (faible désaimantation, énergie maximale stockée plus grande, induction de saturation et champ coercitif plus élevé). La machine synchrone à aimant permanent est devenue compétitive par rapport a la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance.



Figure II-6 : photographie d'un moteur à aimants en géométrie cylindrique

Le stator de la machine synchrone à aimant permanent est identique à celui d'une machine asynchrone, il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de  $2\pi/3$ .

Le rotor de la MSAP est généralement de deux types :

- ❖ rotor possédant des pièces polaires, servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à l'entrefer, soit de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.
- ❖ rotor sans pièces polaires, donc à entrefer constante, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer. [17]

La machine qu'on va étudier dans ce mémoire est à pôles lisses.

### II.3.2 Principe de fonctionnement de la MSAP

La machine étudiée permet une conversion électromécanique de l'énergie. Le stator de celui-ci est alimenté par un réseau triphasé. Il produit ainsi un champ tournant qui entraîne le rotor. Plus le couple sur l'arbre est élevé plus l'angle de décalage polaire est plus grand. Le rotor décroche du flux tournant dès que cet angle dépasse  $90^\circ$ . La vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de synchronisme. Elle est donc directement proportionnelle à la fréquence d'alimentation du stator.[18]

### II.3.3 les avantages et les inconvénients de la MSAP

La MSAP a plusieurs avantages mais aussi elle a quelques inconvénients

#### II.3.3.a les avantages

- ❖ L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes joules au niveau du rotor.
- ❖ Le couple volumique et la puissance massique importante permettent une meilleure compacité.
- ❖ L'absence des collecteurs et des balais simplifie la construction et l'entretien.
- ❖ La densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une très bonne performance dynamique.
- ❖ Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- ❖ Très bon rendement et un facteur de puissance élevé (proche de l'unité).
- ❖ Grande fiabilité.
- ❖ Fonctionnement à très haute vitesses

#### II.3.3.b les inconvénients

- Coût élevé (à cause du prix des aimants).
- Problème de tenue en température des aimants
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.
- Impossibilité de régler l'excitation.

- Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes statoriques par effet Joule (fonctionnement moteur).
- La non-régulation de ce flux ne permet pas une souplesse de contrôle sur une très large plage de vitesse. [18]
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- Pertes par courant de Foucault dans les aimants

### II.3.4 Fonctionnement de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

La machine synchrone à aimant permanent est une machine réversible donc elle peut fonctionner en deux modes (mode génératrice et mode moteur). Dans notre étude on va s'intéresser au fonctionnement en mode génératrice

#### Fonctionnement en mode génératrice (GSAP)

Les alternateurs à base des machines synchrones sont la source primaire de toute énergie électrique. Entraînées par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde.

L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les forces électromotrices (f-é-m) dans ces bobinages provoquent la circulation des courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer qui tourne à la même vitesse que celui de champ inducteur. [18]

### II.3.5 hypothèses simplificatrices

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) obéit à certaines hypothèses simplificatrices

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice (FMM) créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis, les courants de Foucault, l'effet de peau sont négligés.
- L'effet des encoches est négligé.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

La structure de la machine à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation est créée par les aimants permanents au niveau du rotor, ces derniers sont supposés de perméabilité voisine de celle de l'air. [20]

### II.3.6 Mise en équation de la MSAP

La figure (II.7) donne la représentation des enroulements pour une machine synchrone triphasée à aimants permanents.

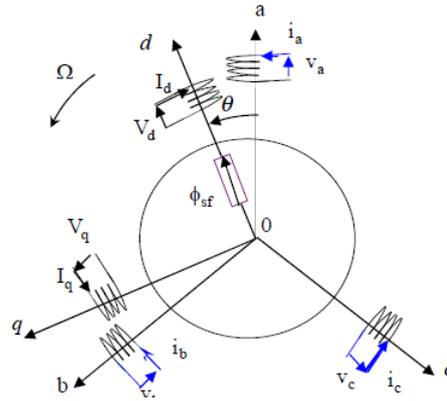


Figure II-7 schéma équivalent de la MSAP dans le repère a,b,c et le repère dqo

**Expression des tensions statoriques**

$$[v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \tag{II .21}$$

**Expression des tensions statoriques**

$$[\Phi_s] = [L_s][i] + [\Phi_f] \tag{II .22}$$

Où

$[v_s] = [v_a \ v_b \ v_c]^t$  vecteur tensions statoriques

$[i_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^t$  vecteur courants statoriques

$[\Phi_s] = [\Phi_a \ \Phi_b \ \Phi_c]^t$  vecteur flux statoriques

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \text{ Matrice résistance des stators}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \text{ matrice inductance du stator}$$

$[\Phi_{sf}] = [\Phi_{af} \ \Phi_{bf} \ \Phi_{cf}]$  Vecteur flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique

L'étude analytique du comportement des équations (II.20) et (II.21) est relativement laborieuse, vu le grand nombre de coefficients variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. L'une de ces transformations est la transformation de Park.

**II.3.7 Mise en équation de la MSAP en mode génératrice**

Le système d'équations de tensions de la machine synchrone en mode génératrice est donné par les équations suivantes :

$$V_a = -R_a \cdot I_a + \frac{d\Phi_a}{dt} \quad (\text{II .23})$$

$$V_b = -R_b \cdot I_b + \frac{d\Phi_b}{dt}$$

$$V_c = -R_c \cdot I_c + \frac{d\Phi_c}{dt}$$

Avec  $R_c=R_b=R_a=R_s$  les résistances statoriques et  $\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$  respectivement les flux totaux circulant dans les enroulements statoriques de la phase a, b, et c. Pour simplifier, nous écrivons ce système sous forme matricielle avec l'équation suivante :

$$[v_s] = -[R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (\text{II .24})$$

Les flux statoriques peuvent être décomposés en flux auto-induits par les enroulements du stator et ceux dû au flux de l'aimant permanent. Tel que :

$$[\Phi_s] = -[L_s][i] + [\Phi_f] \quad (\text{II .25})$$

$$\text{Avec } [L_s] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix}$$

$$[\Phi_f] = \begin{bmatrix} \Phi_{rmax} \cdot \cos(\theta) \\ \Phi_{rmax} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \Phi_{rmax} \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Avec

$\Phi_{rmax}$  représente la valeur maximum du flux rotorique générée par les aimants permanents.

$L_a, L_b, L_c$  représentent les inductances propres de chaque bobine du stator.

$M_s$  représente l'inductance mutuelle entre les enroulements statoriques. [13]

En tenant compte que  $M_s i_a + M_s i_b + M_s i_c = 0$  .nous réécrivons l'équation des flux :

$$[\Phi_{abc}] = - \begin{bmatrix} L_a - M_s & 0 & 0 \\ 0 & L_b - M_s & 0 \\ 0 & 0 & L_c - M_s \end{bmatrix} [i_{abc}] + [\Phi_{sr}]$$

Puisque le système est symétrique les inductances statoriques sont aussi égales

$$L_s = L_a = L_b = L_c$$

$$[\Phi_{abc}] = -(L_s - M_s) \cdot [i_{abc}] + [\Phi_{sr}]$$

## II.4 Transformation de Park

Il existe plusieurs transformations ayant pour objectif la simplification des équations de la machine en les rendant plus facile à résoudre numériquement. Parmi ses transformations, la transformée de Park qui consiste à remplacer les enroulements triphasés (a b c) par deux enroulement d et q.

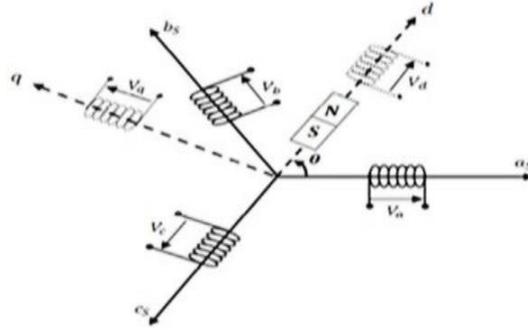


Figure II-8 schéma de la MSAP dans le repère (dq)

Les axes (d, q) sont liés au rotor et tournent avec lui. Ainsi les grandeurs réelles (tensions, courants ou flux) sont liées aux grandeurs de Park par la relation suivante

$$[V_{abc}] = [P(\theta)][V_{dq}]$$

$$[V_{dq}] = [P(\theta)]^{-1}[V_{abc}]$$

Avec  $[P(\theta)]^{-1}$  et  $[P(\theta)]$  : Sont les matrices de passage direct et inverse qui conserve les puissances et qui assure le changement de variable. Elle est donnée par la matrice suivante: [20]

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II .26})$$

Et

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II .27})$$

### II .4.a) Equations électriques dans le repère de Park

Les équations électriques de la MSAP convention moteur sont données par [29]

$$v_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} - w_r L_q I_q$$

$$v_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + w_r L_d I_d + w_r \Phi_f \quad (\text{II .28})$$

En convention génératrice on inverse le sens des courants on aura donc les équations électriques de la GSAP comme suit :

$$\begin{aligned} v_{sd} &= -R_s I_{sd} - L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + w_r L_q I_q \\ v_{sq} &= -R_s I_{sq} - L_s \frac{dI_{sq}}{dt} - w_r L_d I_d + w_r \Phi_f \end{aligned} \quad (\text{II .29})$$

Cette convention de signe sera conservée tout le long de cette modélisation.

#### II .4.b) Equations magnétiques

Comme la machine étudiée est à pole lisse  $L_{sd} = L_{sq} = L_s$  les flux s'écrivent comme suit :

$$\Phi_{sd} = L_s I_{sd} + \Phi_f \quad (\text{II .30})$$

$$\Phi_{sq} = L_s I_{sq}$$

Dans la machine synchrone à répartition sinusoïdale les flux  $\Phi_{sd}$  d'axe directe ( $\Phi_{sd}$ ) et de quadrature ( $\Phi_{sq}$ ) sont fonction linéaire des courants ( $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ ) respectivement d'axe direct et de quadrature. [6]

#### II .4.b) Equations de couple électromagnétique

Le couple électromécanique  $C_{em}$  est produit par l'interaction entre les pôles formés par les aimants au rotor et les pôles engendrés par les FMM dans l'entrefer ; générées par les courants statorique. Selon Park. L'expression de la puissance transmise est comme suite :

$$P_t = \frac{3}{2} p [v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}] \quad (\text{II .31})$$

En remplaçant les tensions  $v_{sd}$  et  $v_{sq}$  par leurs expressions on obtient :

$$P_t = \frac{3}{2} [R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + \left( i_d \frac{d\Phi_d}{dt} + i_q \frac{d\Phi_q}{dt} \right) + \frac{d\theta}{dt} (\Phi_d i_q - \Phi_q i_d)] \quad (\text{II .32})$$

$\frac{3}{2} R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2)$  Représente la puissance dissipée en perte joules dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \left( i_d \frac{d\Phi_d}{dt} + i_q \frac{d\Phi_q}{dt} \right)$  : Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \frac{d\theta}{dt} (\Phi_d i_q - \Phi_q i_d)$  Représente la puissance électromagnétique.

Sachant que :

$$\omega = p\Omega \quad \text{et} \quad P_e = C_{em} \cdot \Omega$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} [\Phi_d i_q - \Phi_q i_d] \quad (\text{II .33})$$

Après affectation des opérations nécessaire on obtient :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p[(L_d - L_q)i_d i_q + i_q \Phi_f] \quad (\text{II .34})$$

Puisque la machine que nous avons étudiée est à pole lisse ( $L_d = L_q$ ) alors le couple devient comme suit :[20]

$$C_{em} = \frac{3}{2}p i_q \Phi_f \quad (\text{II .35})$$

#### II .4.c) Equation mécanique

L'équation de la dynamique de la GSAP est donnée comme suit [6]:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_m - f\Omega \quad (\text{II .36})$$

### II .4 Résultats de simulation en boucle ouverte

Dans ce qui suit nous allons présenter les résultats de simulation obtenus à partir de notre étude.

#### A) Résultats de simulation de la turbine

Le modèle de la turbine a été validé par simulation sous l'environnement matlab/simulink.les résultats présentés sont obtenus pour une turbine de 10kw.ces résultats sont obtenus en boucle ouverte à fin d'observer le comportement de la turbine face aux fluctuations du vent.

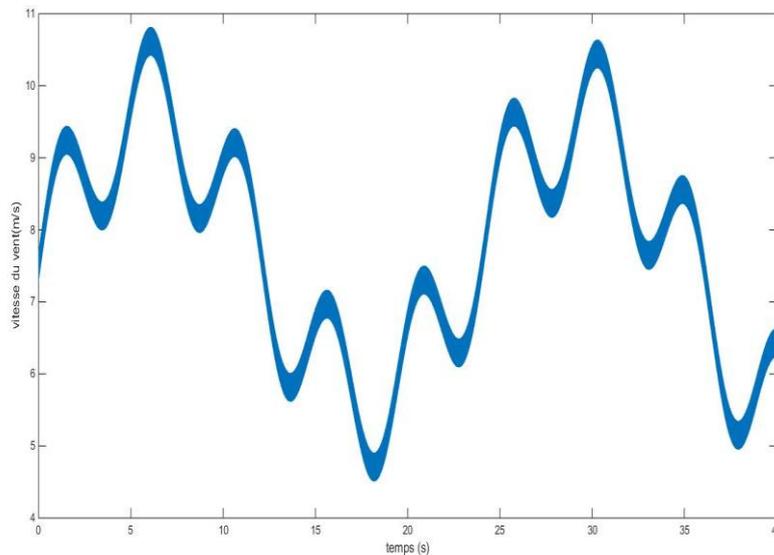


Figure II-9 Allure du profil du vent

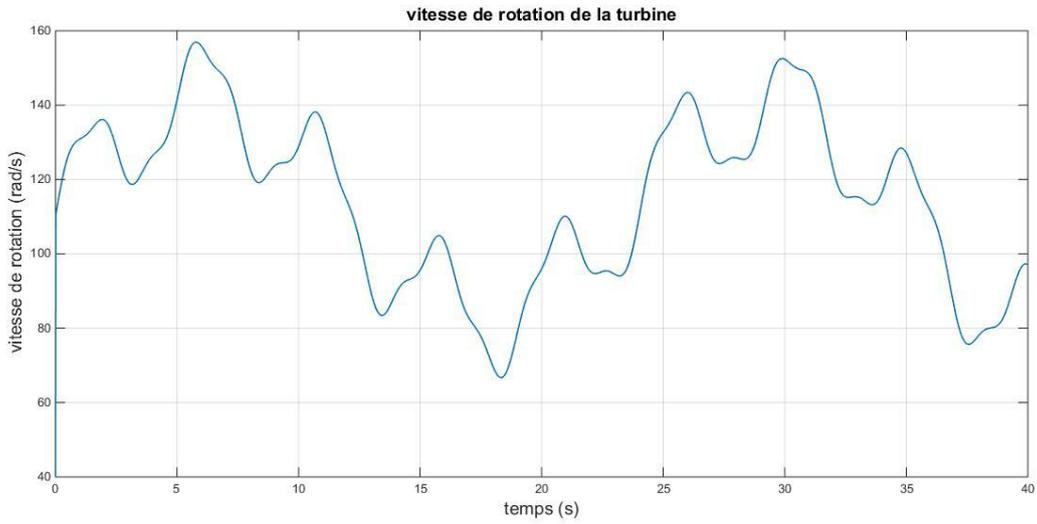


Figure II-10 : allure de la vitesse de rotation de la turbine

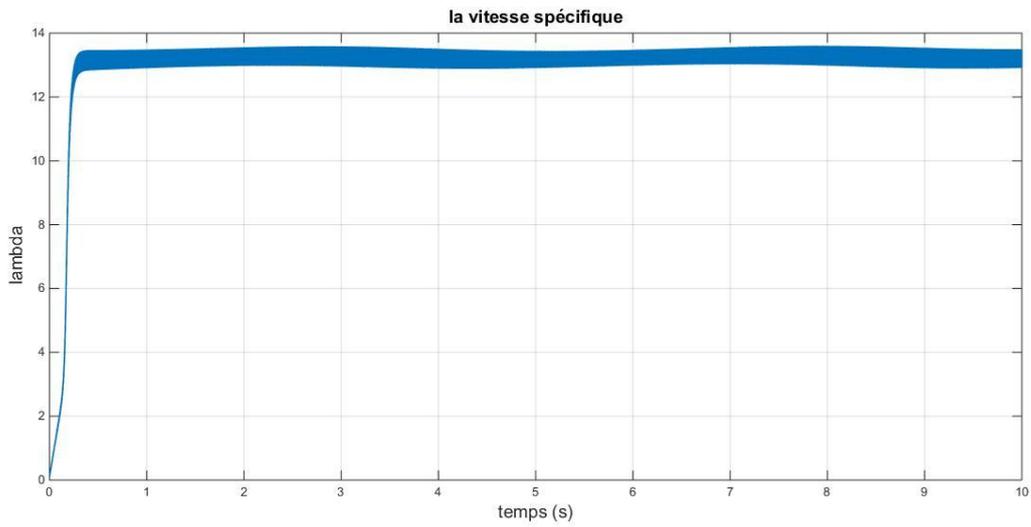


Figure II-11 Allure de la vitesse spécifique du vent en boucle ouverte

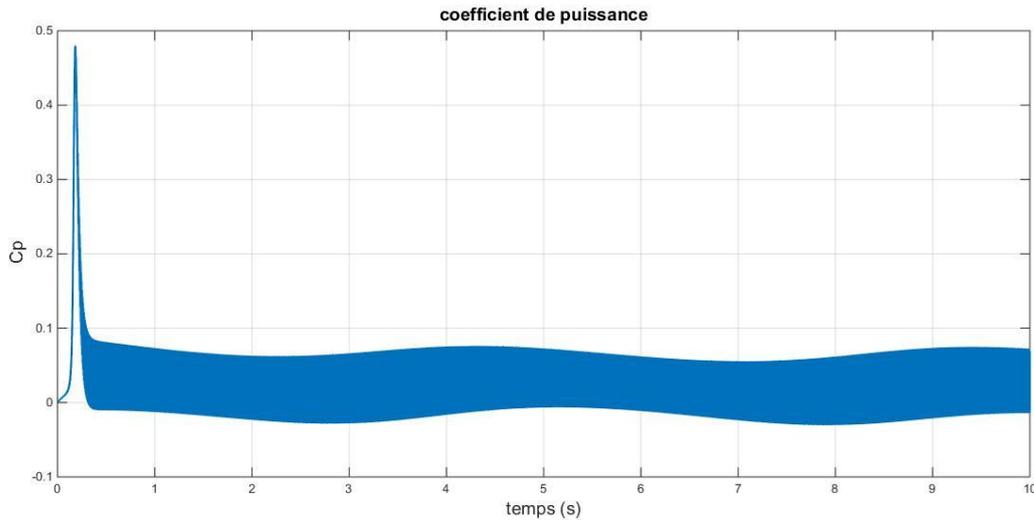


Figure II-12 Allure du coefficient de puissance en boucle ouverte

- ❖ La figure (II-9) représente le profil du vent il est de valeur moyenne (7.5m/s) s'applique sur la turbine.
- ❖ La figure (II-10) présente la vitesse de rotation de la turbine, elle est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Ce qui montre l'influence directe de la vitesse du vent sur la vitesse de rotation de la turbine.
- ❖ Les figures (II-11) et (II-12) montrent l'évolution de la vitesse spécifique du vent, et du coefficient de puissance, nous remarquons qu'ils ne sont pas à leurs valeurs nominales, et qu'ils dépendent de la vitesse du vent

## B) Résultats de simulation de la GSAP

Dans ce qui suit nous allons présenter les résultats obtenus à partir de la simulation de la machine synchrone à aimants permanents en boucle ouverte connectée avec notre turbine, cette génératrice est de puissance de 6.5Kw.

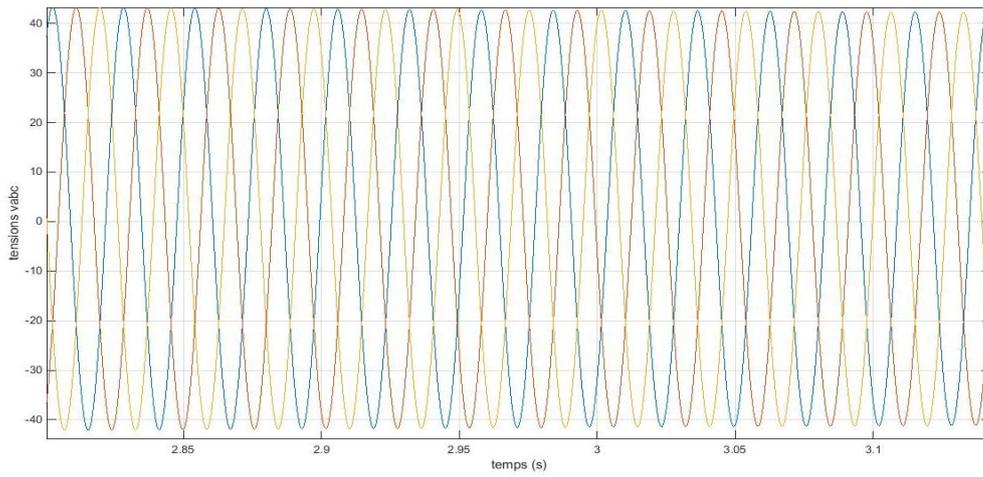


Figure II-13 tensions vabc de la MS

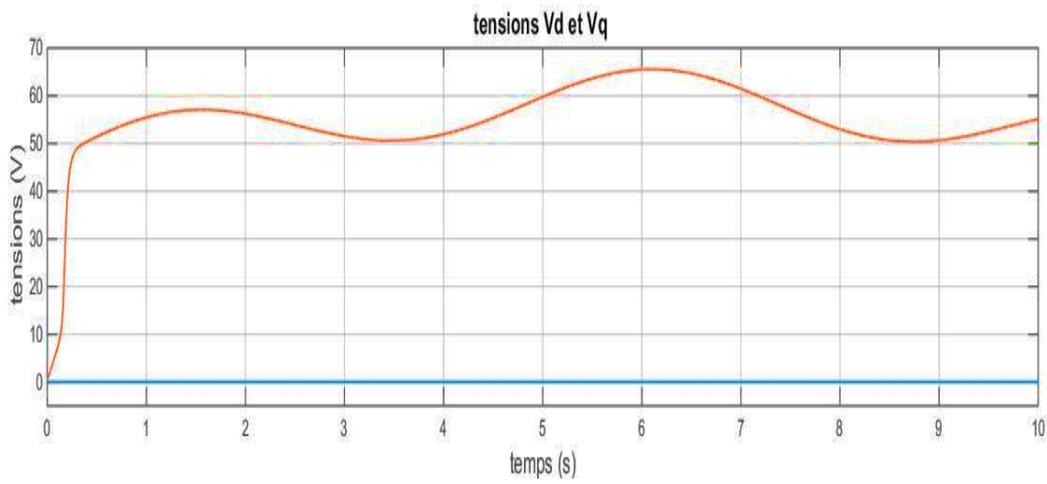


Figure II-14 tensions Vdq de la GSAP

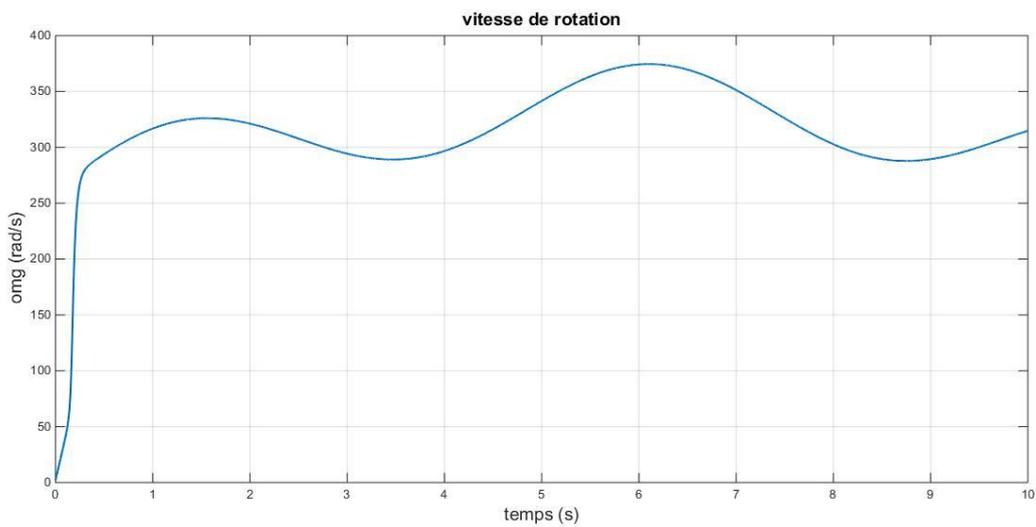


Figure II-15 vitesse de rotation de la GSAP

- ❖ La figure (II-13) représente une partie zoomée des tensions triphasées statoriques à la sortie de la machine synchrone, on remarque qu'elles prennent une forme sinusoïdale et ont une valeur maximale qui égale 42V.
- ❖ La figure (II-14) présente les tensions statoriques  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$ . La composante  $V_{sq}$  reste constante et nulle durant toute la période de la simulation, par contre la composante  $V_{sd}$  varie proportionnellement avec la vitesse du vent.
- ❖ La figure (II-15) représente la vitesse de rotation de la machine synchrone, nous remarquons qu'elle est adaptée à la variation de la vitesse du vent ce qui montre l'influence de cette dernière sur la vitesse de rotation de la machine.

### II.5) conclusion

Dans ce chapitre nous avons traité la modélisation des différentes parties de la chaîne de conversion éolienne. Nous avons établi les équations électriques, magnétiques et mécaniques dans le repère triphasé puis dans le repère biphasé pour simplifier le modèle à utiliser. Nous avons représenté les résultats de simulation obtenus en boucle ouverte.

Le chapitre suivant sera consacré pour la modélisation de la chaîne précédente en appliquant la commande vectorielle sur la machine synchrone et en introduisant la technique de contrôle MPPT pour voir les performances et l'efficacité de cette technique.

***Chapitre III***  
***Stratégies de commande***  
***appliquées à L'aérogénérateur***  
***synchrone à aimants***  
***permanents***

### III. 1. Introduction

Les équations mathématiques présentées dans le deuxième chapitre ont permis de modéliser les différentes parties de notre système à savoir (la turbine et la génératrice synchrone à aimants permanents). Les résultats obtenus ont permis de montrer que le système suivait la fluctuation du vent et ne fonctionnait pas à sa valeur optimale.

Ce chapitre permet d'introduire les concepts de la commande vectorielle appliquée à la MSAP en mode génératrice et de la commande MPPT à la turbine, afin de contrôler les tensions et les puissances active et réactive à la sortie de cette génératrice. La synthèse d'un régulateur Proportionnel-Intégral (PI) est réalisée par la méthode de compensation du pôle dominant et par imposition d'un temps de réponse petit (rapide). Ce type de régulateur reste le plus communément utilisé pour la commande de la MSAP, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriels. [21].

### III. 2 Stratégie de commande de la turbine :

#### III. 2.1 zones de fonctionnement

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale  $P_n$  à partir d'une vitesse de vent nominale  $V_n$ . Pour des vitesses de vents supérieures à  $V_n$ , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que sa vitesse de rotation reste constante. Ainsi, Les dispositifs de sécurité de la machine éolienne font en sorte à avoir l'expression de la puissance répartie sur différentes gammes de vitesses du vent qui se répartissent en quatre zones :

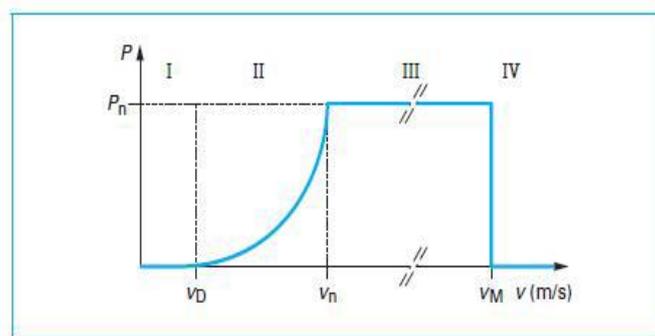


Figure III.1 Caractéristiques vitesse de rotation, vitesse de vent

- **Zone I** : la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage  $V_D$  de l'éolienne. Dans ce cas, la turbine ne fonctionne pas et ne produit donc pas d'énergie ;
- **Zone II** : elle correspond à la zone où il est possible d'optimiser la conversion d'énergie éolienne. C'est dans cette zone qu'il est intéressant de faire varier la vitesse de rotation, la puissance récupérée est alors variable ;

- **Zone III** : c'est la zone de fonctionnement où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance développée par l'éolienne est limitée à la puissance nominale  $P_n$ .
- **Zone IV** : lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne VM, la turbine doit être arrêtée.

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

- Système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses (**Figure III.1**). Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé (pitch control). En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine, et plus précisément le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses, puis pour les fortes vitesses du vent, s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance.
- système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales).

Pour les éoliennes de fortes puissances on utilise la combinaison de ces deux systèmes appelée système « stall actif » dans lequel le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minime des pales nécessitant des moyens de réglage plus économique et plus robuste que dans le système « pitch ». [22]

### III .2.2 Technique d'interaction du maximum de puissance

Lorsque l'on trace les courbes puissances - vitesse de rotation de la turbine paramétrée par la vitesse du vent (**Figure III.2**), on s'aperçoit qu'elles passent chacune par un unique maximum. Le but de ce contrôle est la recherche Permanente de ce maximum.

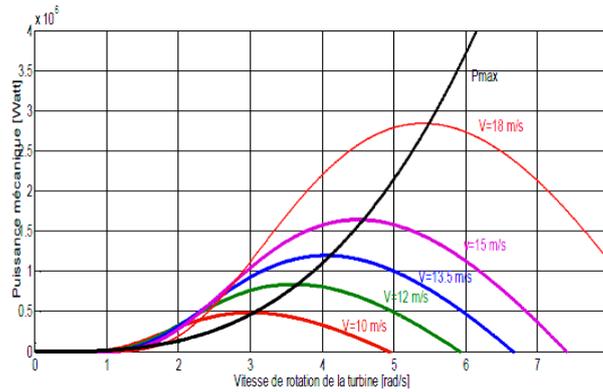


Figure III.2 Réseau de courbes puissances - vitesse de rotation de la turbine paramétrée par la vitesse du vent

Il existe plusieurs techniques pour poursuivre le MPPT (Maximum Power Point Tracking). Ces techniques différentes selon le type d'informations dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse. On peut classer ces techniques en deux familles, selon que la vitesse du vent est nécessaire ou non à la genèse de référence. Parmi les méthodes présentées, la commande en rapport de vitesse ainsi que la commande en puissance ont besoin de la mesure de la vitesse du vent pour générer  $(\Omega_t)_{ref}$ . [23]

Parmi ces méthodes on a utilisé la commande en rapport de  $\lambda$ . Les sommets de cette courbe sont équivalents à la puissance maximale « extractible » donc au point optimal. Il est caractérisé par la vitesse réduite optimale  $\lambda_{opt}$  et le coefficient de puissance maximal  $C_p_{max}$ . La valeur de la vitesse de rotation d'après l'équation (III.1) est égale à:

$$\Omega t = \frac{\lambda \cdot v}{Rt} \tag{III.1}$$

Dans cette partie on cherche à maintenir la vitesse spécifique à son optimum notée  $\lambda_{opt}$ . Une boucle de vitesse est alors mise en œuvre et sa vitesse de référence  $\Omega_{ref}$  est déduite de la relation :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot v}{Rt} \tag{III.2}$$

Cette boucle est munie d'un régulateur de vitesse afin de l'asservir à chaque fois à sa valeur de référence et d'atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice. Plusieurs correcteurs de vitesse peuvent être envisagés dans ce but, mais nous nous sommes intéressés ici par un correcteur proportionnel intégral PI.[2] la structure de ce régulateur est illustrée dans la figure (III.3).

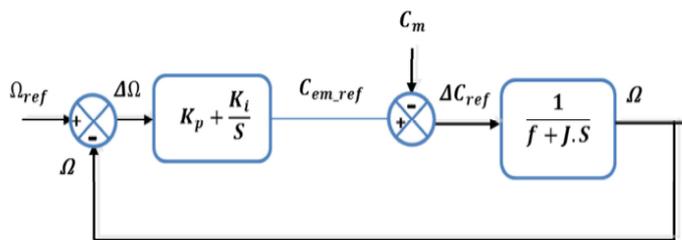


Figure III.3 Schéma fonctionnel de la boucle d'asservissement de vitesse.

### III .2.3 Maximation de la puissance avec asservissement de la vitesse :

#### Principe

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuant. Les fluctuations du vent constituant la perturbation principale de la chaine de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

Pour cette étude, on supposera que la machine et son variateur sont idéaux et donc, quel que soit la puissance générer, le couple électromagnétique développé est à tout instant égale à sa valeur de référence

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

La technique d'extraction du maximum de puissance consistent à détermine la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir la maximum de puissance générée. La vitesse est influencée par l'application de trois couples : un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, La vitesse n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur  $C_g$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$ :

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J} (C_g - f \cdot \Omega_{mec} - C_{em}) \quad (III.4)$$

Le couple électromagnétique de référence  $C_{em\_ref}$  permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence  $\Omega_{ref}$  est obtenu par une relation inverse indirecte :

$$C_{em\_ref} = C_{ass}(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (III.5)$$

Tell que

$C_{ass}$  : représente le régulateur de vitesse.

$\Omega_{ref}$  : la vitesse mécanique de référence.

#### Conception du correcteur PI

Cette structure de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour atteindre les objectifs de commande, une boucle de vitesse avec un régulateur proportionnel intégral est utilisée. On supposera pour notre étude que la machine électrique et son variateur sont idéaux, donc quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.  $C_{em} = C_{em\_ref}$

Considérons le boucle de régulation donné par la figure (III.4), le couple turbine de référence est obtenu grâce à l'action d'un contrôleur de type PI sur la différence entre la vitesse de référence et la vitesse de rotation.

La fonction de transfert qui décrit cette action est donnée par :

$$C_{em\_ref} = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \cdot (\Omega_{ref}(s) - \Omega_{mec}(s)) \quad (III.6)$$

$K_i$  : le gain intégral ;

$K_p$  : le gain proportionnel ;

La boucle de régulation de la vitesse est représentée par la figure suivante :

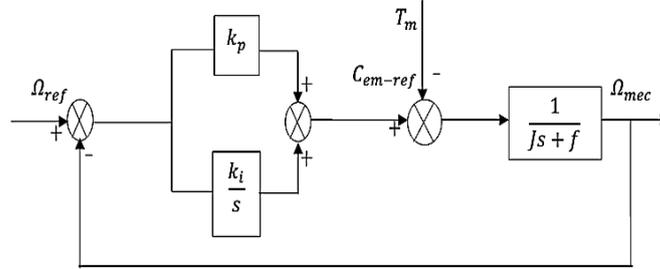


Figure III.4 boucle de régulation de vitesse

$$\Omega_t(s) = F(s)\Omega_{ref}(s) - P(s).C_t(s) \tag{III.7}$$

$$F(s) = \frac{K_p s + K_i}{Js^2 + (f + K_p)s + K_i} \tag{III.8}$$

$$P(s) = \frac{s}{Js^2 + (f + K_p)s + K_i} \tag{III.9}$$

Au régime permanent l'erreur statique due à la perturbation externe en l'occurrence le couple aérodynamique  $C_g$  est nulle grâce à la fonction intégrale du régulateur. La fonction de transfert s'écrit alors comme ceci :

$$\Omega_t(s) = F(s)\Omega_{ref}(s) \tag{III.10}$$

Le choix d'une pulsation  $\omega_n$  propre et d'un facteur d'amortissement  $\xi$  permet de calculer les coefficients du régulateur PI. [21]

$$K_i = \omega_n \cdot J^2 \tag{III.11}$$

$$K_p = 2\xi\omega_n J - f \tag{III.12}$$

**Résultats de simulation de la MPPT**

Dans ce qui suit nous allons présenter les résultats de simulation de la turbine étudiée précédemment après l'application de la commande MPPT, les résultats présentés dans la suite sont obtenus pour une turbine de 10KW. Le modèle de la turbine a été validé par simulation sous l'environnement Matlab/Simulink. Ils sont réalisés dans la Zone 2 afin d'exploiter le maximum d'énergie du vent disponible, cette énergie est maximisée en réglant le coefficient de puissance  $C_p$ , qui dépend de la vitesse de la génératrice ou encore de la ration de la vitesse  $\lambda$ .

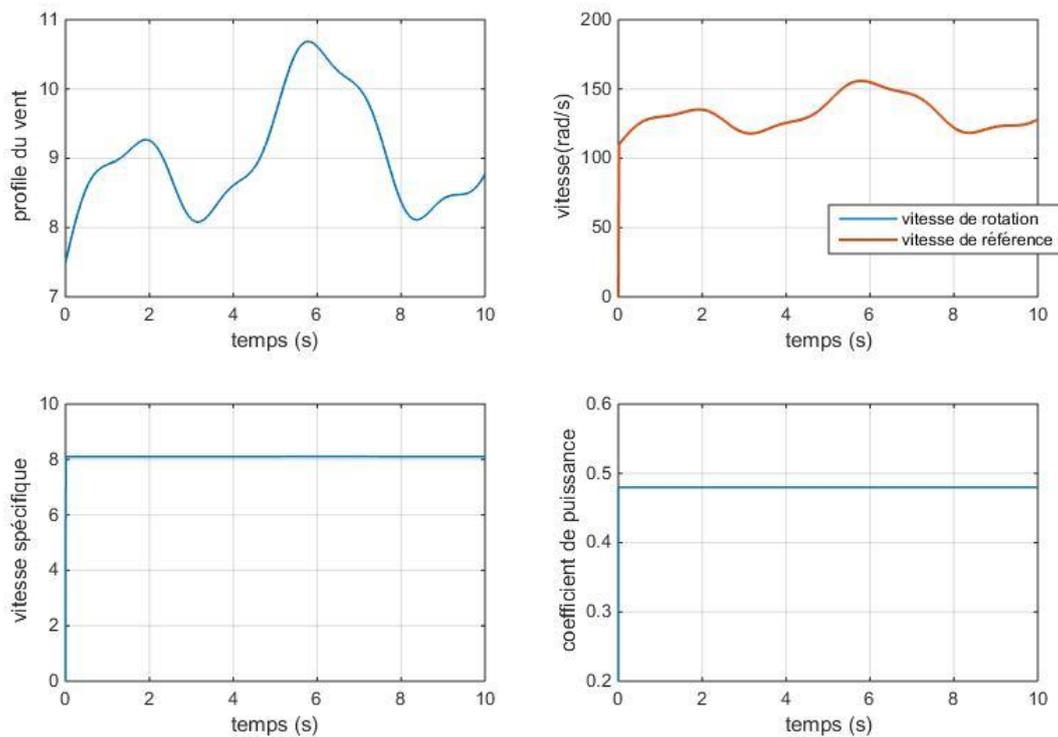


Figure III.5 Résultats de simulation de la MPPT

Le maintien du coefficient de puissance nécessite la conception d'une stratégie de commande (MPPT) permettant la maximisation de la puissance électrique générée, en ajustant la vitesse de rotation à sa valeur de référence par le biais d'un régulateur classique de type PI, quelle que soit la vitesse considérée et le degré de perturbation du vent.

- Les Figures (III.5) montrent que l'application de la commande MPPT permet de maintenir la valeur du coefficient de puissance à sa valeur nominale égale à 0.48. Toutes fois les performances dynamiques obtenues avec le régulateur classique PI, quelle que soit la vitesse considérée et le degré de perturbation du vent.
- La figure de coefficient de puissance montre que l'application de la commande MPPT permet de maintenir la valeur du coefficient de puissance à sa valeur nominale égale à 0.48.
- La figure de la vitesse spécifique montre son évolution au cours du temps, on constate que cette vitesse oscille légèrement autour de la vitesse spécifique nominale ( $\lambda_{nom}=8.1$ ) avec la variation du vent et garde cette valeur dans le but d'augmenter la production.
- D'après la Figure de la vitesse mécanique on remarque qu'elle est adaptée à la variation du vent, ce qui montre l'influence directe du vent sur la vitesse de rotation de l'arbre, on constate aussi que la vitesse mécanique suit parfaitement sa valeur de référence, ce qui confirme l'efficacité de la commande appliquée.

### III .3 Commande vectorielle :

#### III .3.1 Description de la commande vectorielle :

Connu aussi par "commande par orientation du flux" et notée FOC (Field Oriented Control). En 1971, BLASCKE a proposé une théorie de commande de champ orienté qui permet d'assimiler le comportement de la machine synchrone a aimants permanents à une machine à courant continu à excitation séparée, ou la force magnétomotrice de l'induit établie un angle de  $90^\circ$  avec l'axe du flux inducteur, et ceci, quelle que soit la vitesse de rotation.

Pour la réalisation de ce control, il est nécessaire que l'orientation du flux soit en quadrature avec le courant qui génère le couple. Ainsi, on obtient le modèle de la machine où le flux et le couple électromagnétique sont découplés de sorte que l'on puisse agir sur le couple sans influencer le flux, puisque le couple dépend uniquement du courant  $i_q$ .

Ce qui permet l'obtention des performances considérables, relatives à la réponse du système en régime dynamique similaire à celle d'une MCC. [21]

#### III .3.1 Principe de la commande vectorielle :

L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la MSAP à celui d'une MCC. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Par conséquent, ceci permet de contrôler le flux de la machine avec la composante  $I_{ds}$  du courant statorique. Tandis que, la composante  $I_{qs}$  permet de contrôler le couple électromagnétique correspond au courant induit de la MCC.

Si le courant  $I_{ds}$  est dans la même direction que le flux rotorique, le flux statorique suivant l'axe (d) s'ajoute au flux des aimants, ce qui donne une augmentation au flux d'entrefer. D'autre part, si le courant  $I_{ds}$  est négatif, le flux statorique sera en opposition à celui du rotor, ce qui donne une diminution du flux d'entrefer (défluxage). [17]

La forme du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p\Phi_f i_{sq} \quad (\text{III.13})$$

Comme le flux est constant, le couple est directement proportionnel à  $i_q$  d'où la représentation suivante :

$$C_{em} = K_t i_{sq} \quad (\text{III.14})$$

$$\text{Avec } K_t = \frac{3}{2}p\Phi_f \quad (\text{III.15})$$

La commande vectorielle sert alors à contrôler les deux composantes  $id$  et ( $iq$ ) du courant statorique en imposant les tensions ( $Vd$ ) et ( $Vq$ ) qui conviennent. Pour imposer ces tensions il suffit d'imposer les tensions de références ( $Vd\_ref$ ) et ( $Vq\_ref$ ) à l'entrée de l'onduleur.[20]

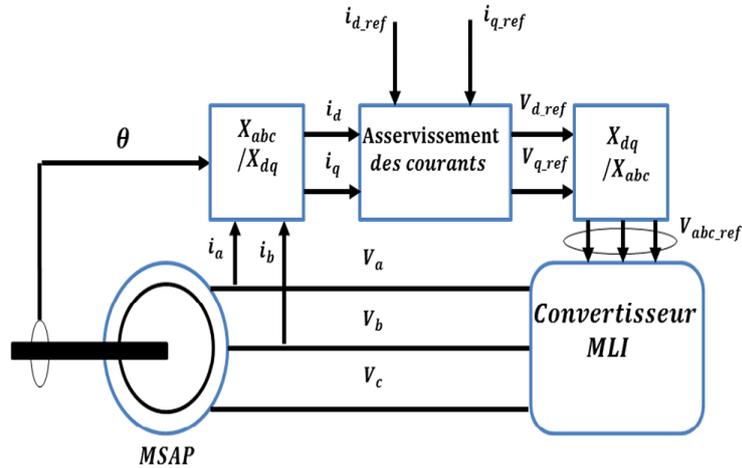


Figure III.6. Structure générale de la commande vectorielle de la MSAP

Pour une machine à FEM sinusoïdale dont le flux est imposé par des aimants et sans amortisseurs, l'équation du couple est donnée par :

$$C_{em} = p[(L_d - L_q)i_{sd}i_{sq} + i_{sq}\phi_f] \tag{III.16}$$

- Dans le cas d'une machine sans saillance (lisse) ( $L_d=L_q$ ) et sans amortisseur, le couple électromagnétique ne dépend que de la composante du courant sur l'axe q,  $C_{em} = p\phi_f i_{sq}$ . La puissance absorbée est optimisée pour un couple donné  $i_d=0$ . Si la commande doit maintenir  $i_d=0$  et réguler le couple avec  $i_q$ .
- Si la machine possède une saillance directe ( $L_d < L_q$ ) ou inverse ( $L_d > L_q$ ), le couple dépend simultanément de  $i_q$  et de  $i_d$ . Dans le cas des machines à aimants, on peut utiliser  $i_d$  pour affaiblir, dans une certaine mesure, la composante du flux sur l'axe d. Et la forme du couple électromagnétique sera :[21]

$$C_{em} = P * p h i_f * i_q \tag{III.17}$$

### III .4.1 Type de la commande vectorielle :

Il existe deux types de la commande vectorielle :

- La commande vectorielle directe
- La commande vectorielle indirecte

Dans notre étude nous avons choisi la commande vectorielle indirecte.

### III .4.2 Avantage et Inconvénient de la commande vectorielle :

#### III .4.2 .a avantages

- Entraînement en boucle fermée.
- Régulation indirecte du couple.

- Faible encombrement.
- Maintenance réduite.
- Couple maximum à une vitesse nulle (elle maintien la charge à l'arrêt).
- Performances comparables à celles des entraînements en courant continu.

### III .4.2 .b inconvénients

- Utilisation obligatoire d'un capteur de position angulaire.
- L'orientation dépend des paramètres de la machine.
- Technique coûteuse. [21]

### III .5 commande vectorielle de la GSAP

La commande de la génératrice est basée sur un pilotage vectoriel classique avec capteur de position, le champ magnétique d'excitation dans une machine synchrone est produit par le rotor. Ce champ magnétique tourne avec une vitesse angulaire égale à la vitesse de rotation électrique. Un champ magnétique tournant est appelé la réaction de l'induit est produits par les enroulements du stator.  $P\Omega$  la vitesse de rotation est liée à la pulsation du champ tournant par la relation :

$$\Omega = \frac{\omega}{P} \quad (\text{III.18})$$

Où P est le nombre de paires de pôles de la machine. Si on suppose un fonctionnement de la machine à vide et sans pertes, seul le flux magnétique d'excitation apparait. La commande vectorielle classique sert à aligné un des deux axes du repère du Park, généralement l'axe direct d selon ce vecteur tournant composé par le champ d'excitation.

Lorsque la machine est chargée, une réaction d'induit apparait et déplace le flux d'excitation. Le couple électromagnétique et la vitesse de rotation dépendent donc des courants statoriques et du flux magnétique. Le modèle de la machine synchrone à aimant permanent dans le repère de Park est donné par les équations (III.19) et (III.20) : [26]

$$v_{sd} = -R_s I_{sd} - L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + \omega_r L_q I_q \quad (\text{III.19})$$

$$v_{sq} = -R_s I_{sq} - L_s \frac{dI_{sq}}{dt} - \omega_r L_d I_d + \omega_r \Phi_f \quad (\text{III.20})$$

Avec :

$$\Phi_{sd} = L_s I_{sd} + \Phi_f \quad (\text{III.21})$$

$$\Phi_{sq} = L_s I_{sq} \quad (\text{III.22})$$

Les expressions de la tension deviennent comme suit : [19]

$$v_{sd} = -R_s I_{sd} - \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + \omega \varphi_q \tag{III.23}$$

$$v_{sq} = -R_s I_{sq} - \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \omega L_d I_d + \omega_r \Phi_f \tag{III.24}$$

Pour permettre un découplage du couple et du flux. Si le courant  $i_d$  est forcé à zéro, comme le flux constant, le couple est directement proportionnel à  $i_q$ , d'où la représentation suivante :

$$Cem = i_q / k_t$$

Avec :  $k_t = 2 / (3 * P * \varphi_f)$

Ce dernier est alors réglé en agissant sur le courant en quadrature.

Pour pouvoir appliquer la commande vectorielle nous devons :

- Imposer la référence du courant sur l'axe d égale à zéro.
- La composante du courant en quadrature devient comme suit :

$$i_{qref} = Cem * k_t \tag{21}$$

### III .6 commandes de la GSAP avec découplage du régulateur de courant par compensation des pôles :

Pour une commande en couple, deux correcteurs suffisent. Pour une commande en vitesse, il faut ajouter un correcteur. Les correcteurs de courant, de type proportionnel intégral seront réglés de la même manière car les fonctions de transfert sur les deux axes sont identiques pour une machine sans saillance. Autrement dit, les valeurs des gains intégral et proportionnel de chaque correcteur seront identiques.[23] La figure (III.7) présente la boucle de régulation des courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$

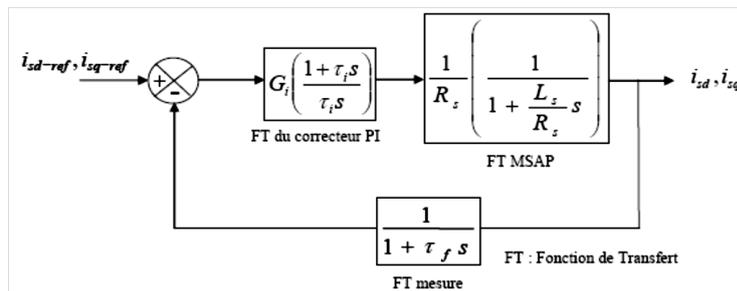


Figure III.7 boucle de régulation des courants  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$

$\tau$ : Constante de temps du correcteur PI (S) ;

$G_i$  : Gain du correcteur PI ;

$\tau_f$  : Constante de temps de la mesure (S).

Au regard de la **figure** (III.7) on peut écrire la fonction de transfert en boucle ouverte  $FTbo(s)$  :

$$FTBO = \frac{i_{sd}}{i_{sdref}} = \frac{i_{sq}}{i_{sqref}} = \frac{G_i(1+\tau_i s)}{R_s \cdot (1+\tau_f \cdot s) \left(1 + \frac{L_s}{R_s} s\right) \tau_i \cdot s} \quad (III.25)$$

On considère que la mesure des courants est parfaite et sans retard (fonction de transfert égale à 1 pour la fonction de transfert de la mesure). On obtient donc :

$$FTBO = \frac{G_i(1+\tau_i s)}{R_s \cdot \left(1 + \frac{L_s}{R_s} s\right) \tau_i \cdot s} \quad (III.26)$$

On peut choisir de compenser le pôle de la fonction de transfert de la machine. On pose donc :

$$\tau_i = \frac{L_s}{R_s}$$

Et la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$FTBO = \frac{G_i}{L \cdot s} \quad (III.27)$$

On calcul alors la fonction de transfert en boucle fermée  $FTbf(s)$  :

$$FTBF = \frac{i_{sd}}{i_{sdref}} = \frac{i_{sq}}{i_{sqref}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{FTbo}} = \frac{1}{1 + \frac{L_s}{G_i s}} \quad (III.28)$$

Pour un premier ordre, le temps de réponse à 5% de la valeur finale est égal à trois fois la constante de temps, d'où :

$$Tr = 3 \frac{L_s}{G_i}$$

$$\text{Donc : } G_i = 3 \frac{L_s}{Tr}$$

Dans le cas où la mesure des courants n'était pas parfaite, on aurait obtenu une fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTbf = \frac{G}{\frac{L_s}{G} s^2 + \frac{L_s}{G} s + 1} \quad (III.29)$$

On peut alors identifier le dénominateur de  $FTbo(s)$  au polynôme caractéristique suivant:

$$\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1$$

Sachant que  $\xi=0.707$ ,  $\omega_n=10$

On fixe un temps de réponse pour obtenir la valeur du gain G. [23]

### III .7 Commande de la GSAP avec mode glissant

L'idée de base est d'attirer les états du système dans une région correctement sélectionnée, puis de concevoir une loi de commande qui maintiendra toujours le système dans cette région. La commande par régime glissant est divisée en trois parties:

- Le choix de la surface.
- L'établissement des conditions de la convergence.
- La détermination de la loi de commande. [4]

Les systèmes à structure variable sont caractérisés par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation.

Soit le système décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{X}(t) = f(x, t, u)$$

Où  $x = [x_1, x_2, x_3; \dots \dots, x_n] \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur d'état,  $U \in \mathbb{R}$  est le vecteur de commande.

On définit  $S \in \mathbb{R}$  une fonction suffisamment différentielle telle que  $\frac{\delta S}{\delta x}$  soit non nul la variété de glissement est définie par :  $S = \{X \in \mathbb{R}^n, s(X)=0\}$  [25]

En mode glissant, le but est de forcer la dynamique du système à correspondre avec la surface de glissement  $S(X)$  au moyen d'une commande définie par l'équation suivante :

$$U = U^{eq} + U^n,$$

$U$  est la grandeur de commande ;  $U^{eq}$  grandeur de commande équivalente ;  $U^n$  grandeur de commande discontinue.

$$U^n = U^{max} \text{sgn}(S(X))$$

Où  $\text{sgn}(s(x)/\varphi)$  est la fonction de sign,  $\varphi$  la largeur du seuil de la fonction de saturation,  $U^{max}$  un gain positif.

Pour que la surface soit attractive, le régulateur par mode glissant [26]

$$S(X) \cdot \dot{S}(X) < 0$$

### III .7.1 régulation du courant direct

Soit  $e_1$  l'erreur du courant direct

$$e_1 = i_{sd}^* - i_{sd}$$

On prend le degré  $n$  de la surface de glissement définie par l'équation égal à 1, la surface de glissement  $S(i_{sd})$  est :

$$S(i_{sd}) = i_{sd\_ref} - i_{sd}$$

En dérivant l'équation précédente en en prenant en compte le système d'équation (III.19) on obtient :

$$\dot{S}(X) = \frac{di_{sd\_ref}}{dt} - \frac{1}{L_{sd}} (-V_{sd} - R_s I_{sd} + \omega_s L_{sq} i_{sq})$$

Durant le mode de glissement la surface  $S(i_{sd})$  devient nulle de même sa dérivée. La tension de commande  $V_{sd\_ref}$  est définie par :

$$V_{sd\_ref} = V_{sd}^{eq} + V_{sd}^n$$

Avec

$$V_{sd}^{eq} = \left( \frac{di_{sd\_ref}}{dt} + \frac{R}{L_d} i_{sd} - \frac{L_q}{L_d} i_{sq} \omega \right) L_{sd}$$

$$V_{sd}^n = K_d \operatorname{sgn}(S(i_{sd}))$$

### III.7.1 régulation du courant quadrature

Soit  $e_2$  l'erreur du courant direct

$$e_2 = i_{sq}^* - i_{sq}$$

On prend le degré  $n$  de la surface de glissement définie par l'équation égal à 1, la surface de glissement  $S(i_{sq})$  est :

$$S(i_{sq}) = i_{sq\_ref} - i_{sq}$$

En dérivant l'équation précédente en en prenant en compte le système d'équation (III.19) on obtient :

$$\dot{S}(X) = \frac{di_{sq\_ref}}{dt} - \frac{1}{L_{sq}} (-V_{sq} - R_s I_{sq} - \omega_s (L_{sd} i_{sd} + \varphi_f))$$

Durant le mode de glissement la surface  $S(i_{sq})$  devient nulle de même sa dérivée. La tension de commande  $V_{sq\_ref}$  est définie par :

$$V_{sq\_ref} = V_{sq}^{eq} + V_{sq}^n$$

Avec

$$V_{sq}^{eq} = \left( \frac{di_{sq\_ref}}{dt} + \frac{R}{L_q} i_{sq} + \frac{L_d}{L_q} i_{sd} \omega + \omega \frac{\varphi_f}{L_{sq}} \right) L_{sq}$$

$$V_{sq}^n = K_q \operatorname{sgn}(S(i_{sq}))$$

La figure (III.8) présente le schéma de commande de la génératrice synchrone à aimants permanents

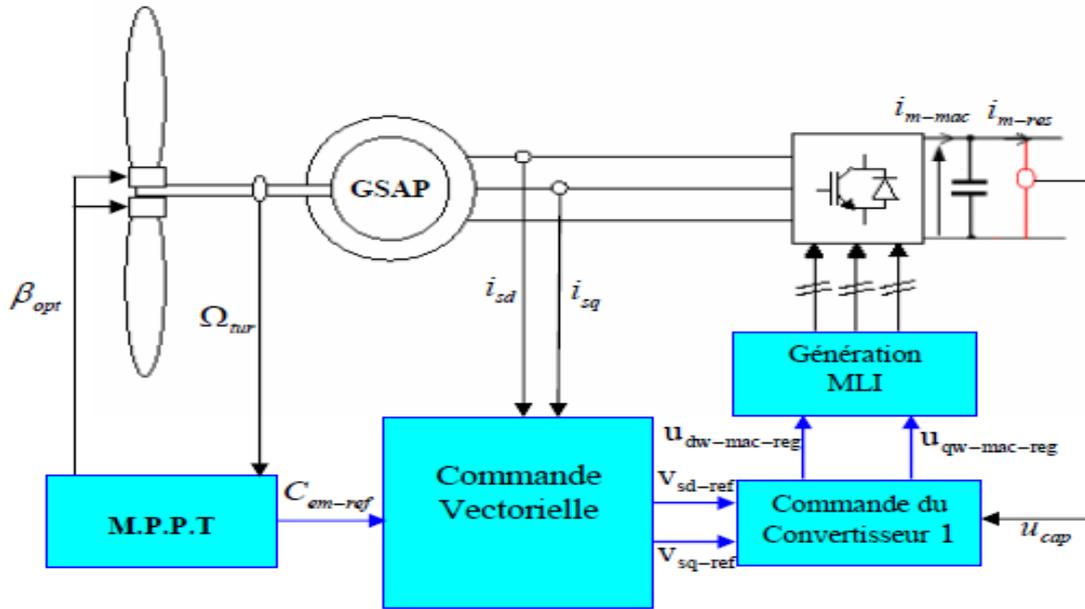


Figure III.8 Commande de la génératrice synchrone à aimants permanents

### III .8 Résultats de simulation de la commande vectorielle

Dans cette partie nous allons présenter les résultats de simulation de la machine synchrone après l’application de la commande vectorielle, pour une durée de temps de 10s. Cette machine a une puissance nominale qui égale à 6.5KW

Tableau III.1 : Résultats obtenus avec les différents régulateurs

	Régulateur PI	Commande par mode glissant
Temps de réponse (s)	0.16	0.05

- La figure (III.9) montre que le couple électromagnétique est adapté à sa valeur de référence.
- les figures (III.10) montrent que Le courant en quadrature est à l’image du couple électromagnétique, il est au voisinage de sa référence. Le courant de la composante directe est nul, il est au voisinage de sa composante de référence. L’obtention des deux composantes aux voisinages de leurs références prouve l’efficacité de la commande vectorielle.
- Les tensions et les courants sont illustrés dans les figures (III.11), on constate que les deux signaux ont la forme sinusoïdale. Sachant que le courant  $i_{sd}$  est égal à 0, et que  $i_{sq} = 2 * C_{em-ref} / (3 * P * \Phi_f)$ , donc l'amplitude du courant  $i_{sq}$  donne l'amplitude des courants statoriques qui en résulte.

- D'après la figure (III.12) on remarque que les composantes des courants directe et en quadrature sont au voisinage de leurs référence, avec un temps de réponse de 0.15s ce qui confirme l'efficacité de la commande appliquée. Néanmoins un zoom sur ces deux graphes montre qu'il existe une petite erreur entre le courant  $i_d$  et sa référence, aussi entre le courant  $i_q$  et sa référence. Cette différence est exprimée par les équations suivantes :  $e_1 = i_{sd}^* - i_{sd}$  ;  $e_2 = i_{sq}^* - i_{sq}$
- Les performances dynamiques obtenues lors de l'application du régulateur SMC sont meilleure ce qui met en évidence l'efficacité du réglage par les commandes avancées par apport au réglage par PI classique, ceci est confirmé par les allures du courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  (les figures (III.12).)

### Résultats obtenus par le régulateur PI

Au début on va présenter les résultats de la commande vectorielle après l'utilisation d'un régulateur classique de type PI.

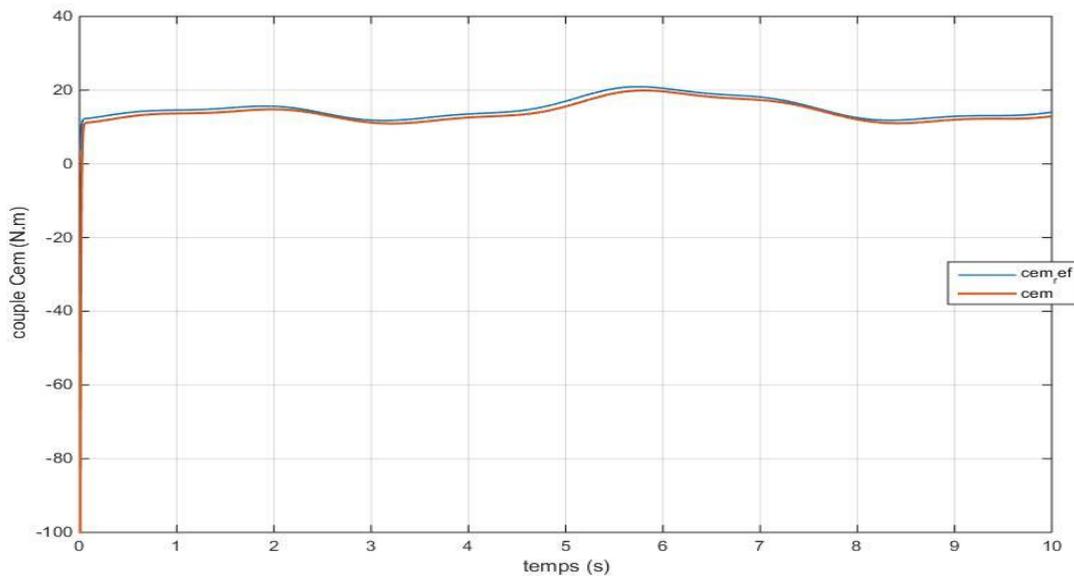


Figure III.9 Allure du couple électromagnétique

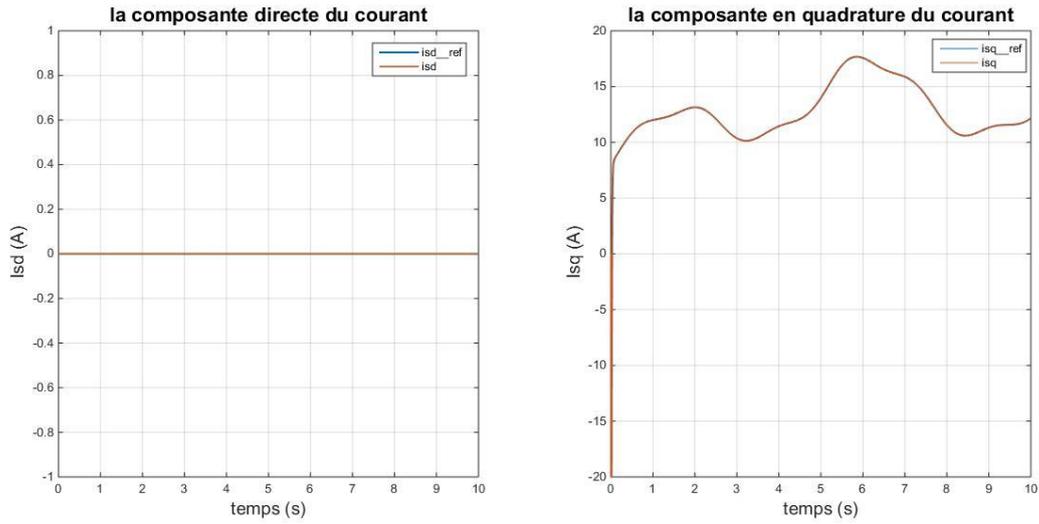


Figure III.10 allures des courants isd et isq avec régulateur PI classique

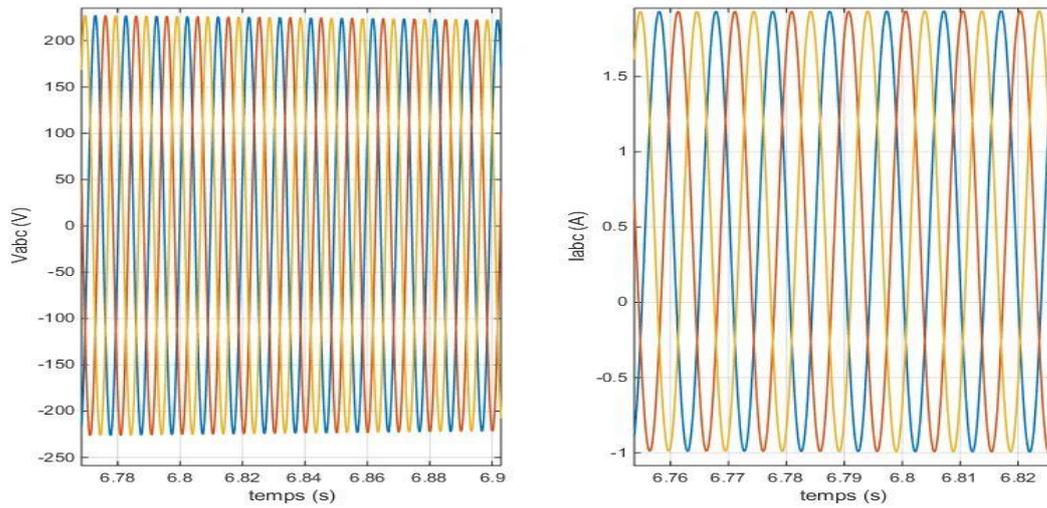
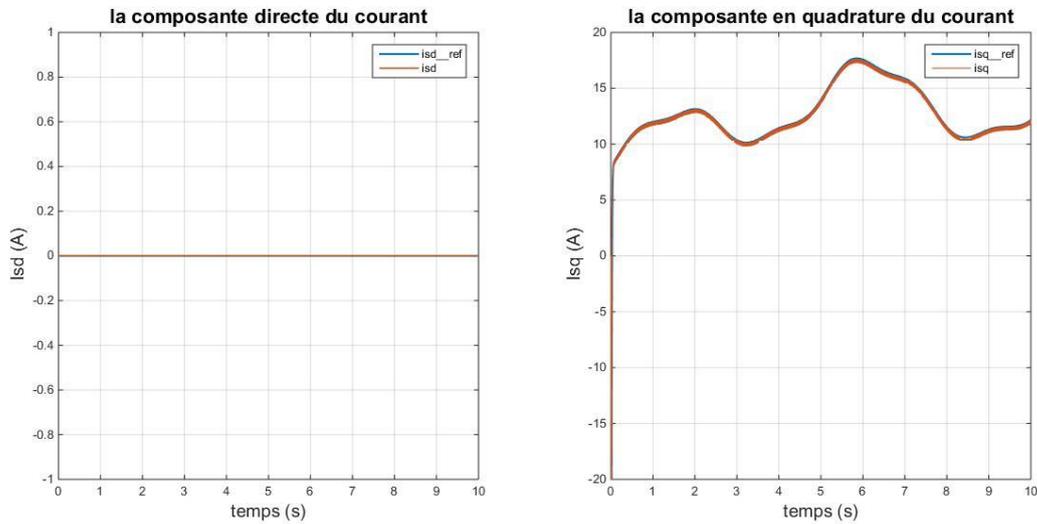


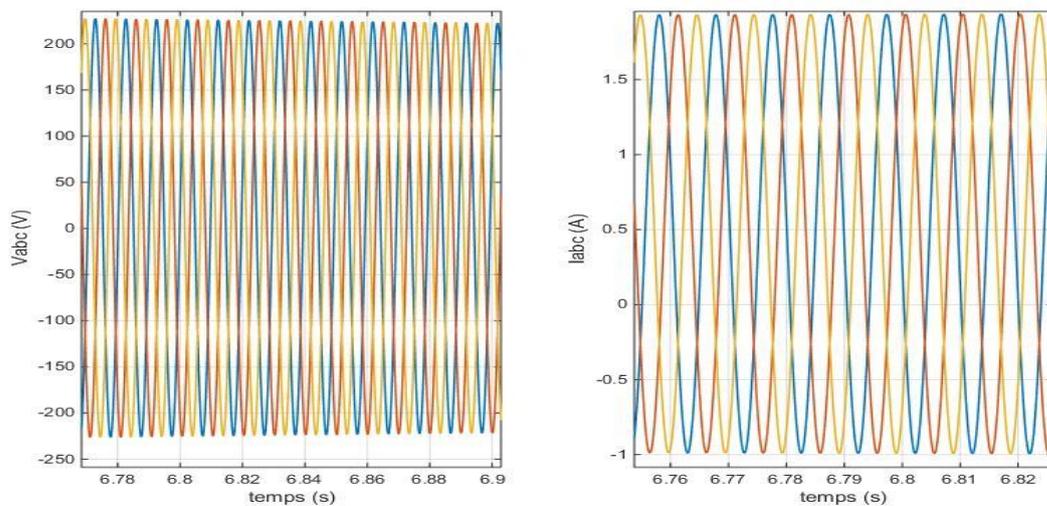
Figure III.11 tensions et courants triphasés obtenus avec correcteur PI (parties zoomées)

**Résultats obtenus lors de l'utilisation du mode glissant :**

Dans ce qui suit, on va présenter les résultats obtenus après l'utilisation de la commande mode glissant pour le réglage des courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ .



**Figure III.12 allures des courants direct et en quadrature avec SMC**



**Figure III.13 tensions et courants triphasés obtenus avec le mode glissant (parties zoomées)**

**III .9 conclusion**

Ce chapitre nous a permis de valider le modèle proposé de la turbine éolienne à axe vertical en le reproduisant sous MATLAB/SIMULINK. Ce modèle, nous a aidés d'implanter un schéma de commande qui permet de maximiser la puissance mécanique fournie par la turbine éolienne grâce à un asservissement de la vitesse de celle-ci.

Les résultats obtenus par simulation ont montré l'efficacité de la stratégie de contrôle proposée (MPPT) dans l'extraction de la puissance maximale pour chaque vitesse du vent et donc l'amélioration du rendement énergétique de la turbine éolienne basée sur la GSAP.

Dans la deuxième partie, une présentation des généralités sur la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) a été présentée. Pour valider le modèle mathématique, des simulations ont été effectuées et les résultats présentés. Dans cette partie aussi nous avons appliqué deux commandes différentes sur la commande vectorielle (la commande par le PI classique et celle avec le mode glissant (SMC)), en comparant les résultats obtenus, on constate que l'application dans la commande SMC donne des meilleures performances.

***Chapitre IV***  
***Simulation de la chaîne***  
***Complète***

### IV.1 Introduction

Après avoir présente le principe de la conversion d'énergie éolienne, et modéliser les parties essentielles dans la chaîne de conversion éolienne, qui sont la turbine et la génératrice, nous nous attachons dans ce chapitre à présenter la structure globale de cette chaîne avec une simulation comportementale du système complet sur le plan électrique et énergétique. Les générateurs éoliens n'imposant pas l'amplitude de la tension et ne règlent pas le rapport puissance-fréquence, autrement dit, elles ne participent pas au service système, et donc perturbent d'autant plus la stabilité des réseaux que leur taux de pénétration est important. [5][9]

Pour remédier à ces problèmes, il est nécessaire de recourir à l'électronique de puissance par l'intermédiaire d'un redresseur à MLI et d'un onduleur à six bras commandés également par une commande à MLI.

Nous allons d'abord présenter la commande MLI, puis le redresseur à MLI on donnant son modèle mathématique qui permet de simuler sous MATLAB. Ensuite nous allons détailler le fonctionnement de l'onduleur à MLI et son modèle également afin de liée notre système au réseau électrique.

Enfin, nous allons terminer par donner les résultats du schéma global de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

### IV.2 Principe de la commande MLI

Cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice d'amplitude  $A_r$  et de fréquence  $f$ , avec un signal appelé porteuse d'amplitude  $A_p$  et de fréquence  $f_p$  très élevée. Le signal de commande de l'interrupteur d'un bras de l'onduleur triphasé  $K_i$   $K'_i$  ( $i=1,2,3$ ) est fermé si l'onde de référence de la phase correspondante est supérieure ou égale à la porteuse triangulaire ,et vice versa.

La figure (IV.1) illustre le principe d'une MLI sinus –triangle [30]

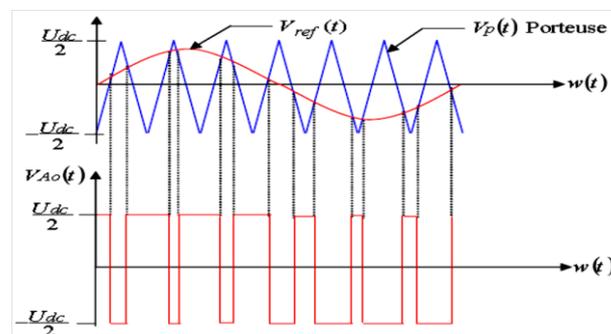


Figure IV.1 Principe de la commande MLI[5]

### Caractéristique de la modulation

Dans le cas d'une référence sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la modulation :

- Indice de modulation  $m$  égale au rapport de la fréquence  $f_c$  de la porteuse à la fréquence  $f_m$  de la référence  $m=f_c/f_m$ .
- Taux de modulation ou coefficient de réglage de tension  $r$  égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence  $A_m$  à celle de la porteuse  $A_c$  ;  $r = A_m/ A_c$ . [31]

### IV.3 Modélisation du convertisseur MLI1(le redresseur)

Avant de modéliser le redresseur à MLI, il est utile de rappeler qu'un redresseur est un convertisseur statique. Il sert comme son nom l'indique à redresser un signal alternatif et le transformer en un signal continu.

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 (IV.2). Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu  $U_{dc}$  est mesurée et comparée avec une référence  $U_{dc-ref}$ , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu  $U_{dc}$  mesurée aux bornes du condensateur  $C$ . Quand le courant  $i_{ch}$  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  $i_{ch}$  devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur  $C$  est surchargé, et le signal d'erreur demande au bloc 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. [32]

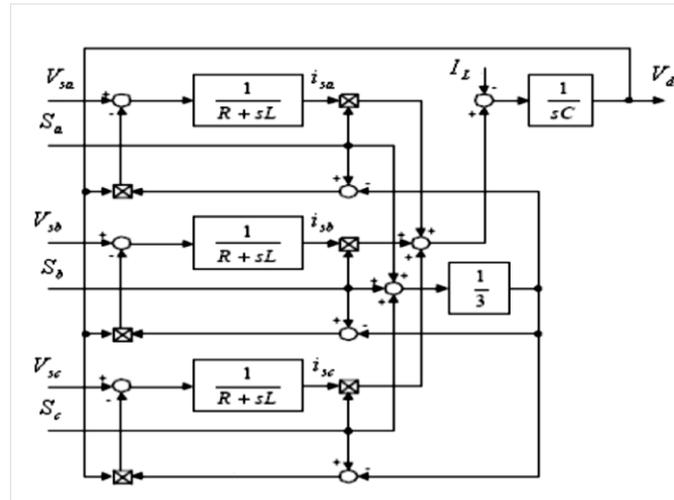


Figure IV. 2 schéma d'un redresseur

Les tensions d'entrée entres phases du redresseur peuvent être décrites par :

$$\begin{aligned}
 V_{sab} &= (S_a - S_b)V_{dc} \\
 V_{sbc} &= (S_b - S_c)V_{dc} \\
 V_{sca} &= (S_c - S_a)V_{dc}
 \end{aligned}
 \tag{IV.1}$$

La variation des courants absorbés, dans le cas d'un réseau triphasé équilibré, est alors donnée par les équations du système suivant :

$$\begin{aligned}
 v_{sa}(t) &= \frac{Ldi_a}{dt} + v_a(t) + Ri_a(t) \\
 v_{sb}(t) &= \frac{Ldi_b}{dt} + v_b(t) + Ri_b(t) \\
 v_{sc}(t) &= \frac{Ldi_c}{dt} + v_c(t) + Ri_c(t)
 \end{aligned}
 \tag{IV.2}$$

Les tensions simples s'expriment en fonction des ordres de commande par la relation ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}
 \tag{IV.3}$$

En substituant l'équation (V.2) dans (V.3) et on écrit sous forme matricielle

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa}(t) \\ v_{sb}(t) \\ v_{sc}(t) \end{bmatrix} - \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}
 \tag{IV.4}$$

Après la transformation de Laplace on obtient :

$$(Ls + R) \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa}(t) \\ v_{sb}(t) \\ v_{sc}(t) \end{bmatrix} - \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}
 \tag{IV.5}$$

Le courant débité par le redresseur est donné en fonction des courants prélevés sur le réseau par l'expression ci-après :[33]

$$i_1 = s_a i_{sa} + s_b i_{sb} + s_c i_{sc} \tag{IV.6}$$

Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties: le coté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs, et le côté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir une liaison entre le côté alternatif et le bus continu. Ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante :

$$S = \begin{cases} +1 & \text{si } i_j = -1 \\ -1 & \text{si } i_j = 1 \end{cases} \quad j \in (a, b, c) \tag{IV.7}$$

Les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction des fonctions, de la tension redressée  $U_{dc}$ , et les courant d'entrée  $i_a, i_b, i_c$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \tag{IV.8}$$

La figure (IV.3) représente les différents états de commutation des interrupteurs d'un redresseur MLI.

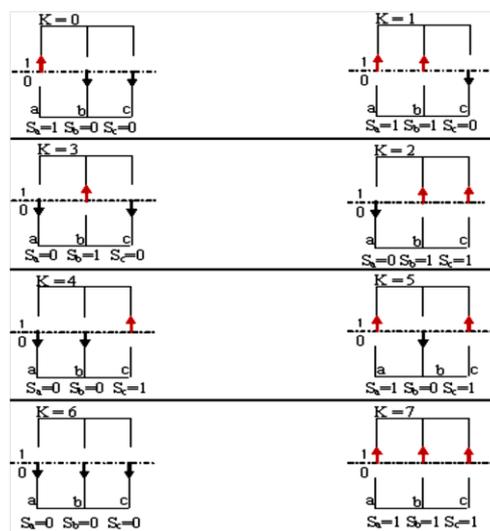


Figure IV. 3différents états de commutations des interrupteurs d'un redresseur MLI

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur MLI peuvent être décrites à partir de tableau IV.1:

Tableau IV.1 : les huit états possibles des interrupteurs.

$K$	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$
0	1	0	0	$V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
1	1	1	0	0	$V_{dc}$	$-V_{dc}$
2	0	1	0	$-V_{dc}$	$V_{dc}$	0
3	0	1	1	$-V_{dc}$	0	$V_{dc}$
4	0	0	1	0	$-V_{dc}$	$V_{dc}$
5	1	0	1	$V_{dc}$	$-V_{dc}$	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

**IV.4 : Modélisation du bus continu**

La figure (IV.4) représente le schéma électrique du bus continu.

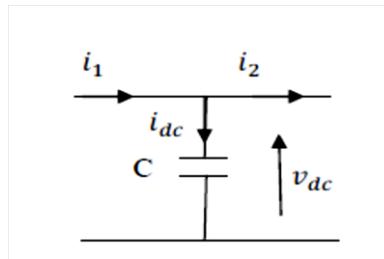


Figure IV.4 : Schéma électrique du bus continu.

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{c} i_{dc}(t) \tag{IV.9}$$

Selon la loi de Kirchhoff (loi des nœuds) le courant  $i_{dc}$  est définie comme suit

$$i_{dc} = i_1 - i_2 \tag{IV.10}$$

Avec :

$i_{dc}$  : Le courant de charge du condensateur

$i_1$  : Le courant redressé

$i_2$  : Le courant ondulé

$$V_{dc} = \frac{1}{c} \int_{t_1}^{t_2} i_{dc} dt + V_{dc0} \tag{IV.11}$$

Avec :  $V_{dc0}$  La valeur initiale de la tension (à  $t=0$ )

#### IV.4.1 Régulation du bus continu

Vu que la puissance fournie par la génératrice est fluctuante, un réglage de la tension du bus continu s'impose via une boucle de régulation avec un correcteur proportionnel intégral.

La régulation de la tension du bus continu a pour but de la maintenir à une valeur de référence constante, en contrôlant le processus de chargement et de déchargement du condensateur.

Le contrôle de la tension continue exige une boucle d'asservissement fermée comme le montre l'équation ci-dessous, la tension continue est mesurée est comparée à une référence et le signal d'erreur obtenu à partir de cette comparaison est employé pour produire une forme d'onde pour la référence du courant.

$$I_{max} = Gc(v_{dc,ref} - v_{dc}) \tag{IV.12}$$

Dont Gc représente le correcteur proportionnel-intégral PI.

La boucle de régulation de la tension Vdc est représentée sur le schéma bloc suivant :

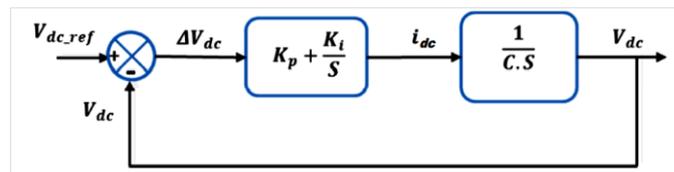


Figure IV.5 boucle de régulation du bus continu

Le calcul des paramètres du régulateur sera déduit de la fonction de transfert en boucle fermée :

$$G(s) = \frac{(k_p s + k_i)}{c s^2 + k_p s + k_i} \tag{IV.13}$$

Les paramètres du régulateur seront calculés en comparant la FTBF avec celle du deuxième ordre :

$$G_c(s) = \frac{\left(\frac{k_i}{c}\right)}{s^2 + \left(k_p \frac{1}{c}\right)s + \frac{k_i}{c}} \tag{IV.14}$$

On obtient

$$k_p = 2\xi\omega_n c ; k_i = \omega_n^2 c \tag{IV.15}$$

#### IV.5 Modélisation du convertisseur MLI2 (l'onduleur)

La chaine de conversion d'énergie éolienne est connectée au réseau électrique afin d'injecter l'énergie électrique exploitée. Cette injection est assistée par un onduleur de tension triphasé, ce convertisseur statique assure la phase d'injection de l'énergie par les deux tâches suivantes :

- Maintenir la tension du bus continu constante en contrôlant la puissance transitée vers le réseau via l'onduleur de tension.

- Commander les interrupteurs statiques afin d'injecter la puissance de référence (puissance électromagnétique en retranchant celle du condensateur) au réseau. [33]

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet de convertir un signal d'entrée continu en un signal de sortie alternatif, il est doté de la même structure que le redresseur à MLI 1.

Dans notre étude nous avons choisi l'utilisation d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC.

#### IV.5.1 principe d'un onduleur de trois niveaux

##### Caractéristiques générales [34]

Les signaux MLI pour onduleur à trois niveaux de tension permettent d'appliquer alternativement sur les phases de la machine les trois tensions fournies par le pont capacitif. Les créneaux qui composent cette onde sont positionnés d'abord de manière à contrôler l'amplitude de son fondamental. On pourra également, dans le cas où le nombre de créneaux est suffisamment grand, procéder à un placement des instants de commutation pour limiter ou minimiser les harmoniques qui créent des pertes dans la machine.

Contrairement aux signaux MLI à deux niveaux qui n'autorisent que le placement des instants de commutation, les signaux MLI à trois niveaux autorisent à la fois le placement des instants de commutation et le choix du signe de chaque impulsion (+1 ou -1).

Parmi les signaux MLI trois niveaux, les plus couramment utilisés sont décrits soit par une succession d'impulsions positives dans la première demi-période du signal (figure IV.6.a), soit par l'alternance d'impulsions positives et négatives (figure IV.6.b). Néanmoins, rien n'exclut d'utiliser des signaux d'évolution quelconque, tels que celui représenté figure I.10.c. Pourvu que dans tous les cas, les caractéristiques spectrales requises soient respectées.

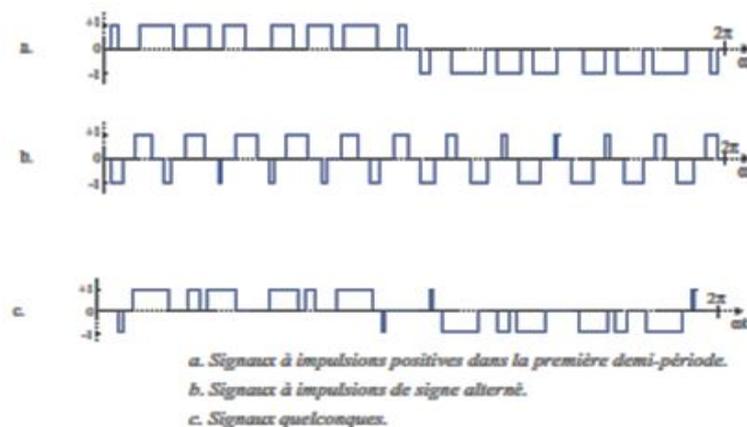


Figure (IV.6) différentes configurations des signaux MLI

#### Commande des interrupteurs

La figure (IV.7) montre la structure d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC. On commence par définir la fonction de connexion  $F_{ki}$  de l'interrupteur.

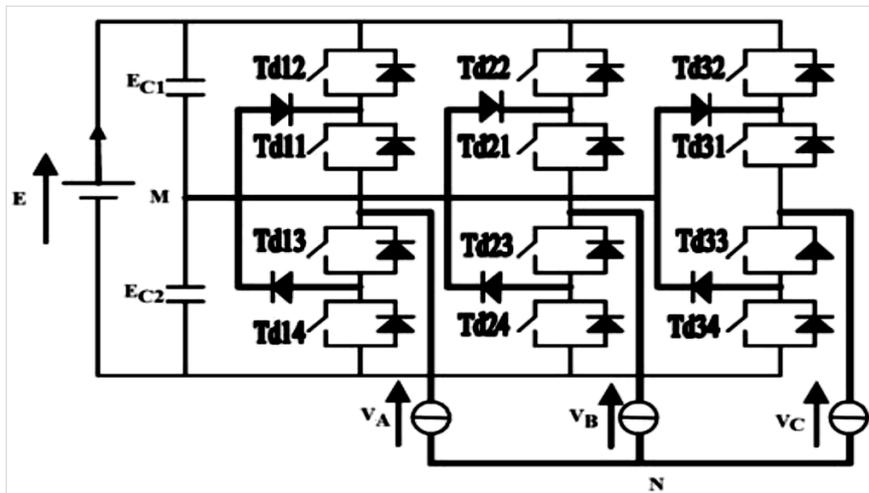
Elle vaut 1 si l'interrupteur est fermé et 0 dans le cas contraire.

En mode commandable, les fonctions de connexion de l'onduleur sont liées par la relation (IV.16).

$$Td_{12} = 1 - Td_{14} \tag{IV.16}$$

$$Td_{22} = 1 - Td_{23}$$

Avec, d = 1,2 ou 3 représente le numéro du bras [35]



Figure(IV.7) onduleur à trois niveaux à structure NPC

On définit la fonction de connexion  $T_{dm}^b$  du demi-bras comme suit:

$$T_{d12}^B = T_{d1} * T_{d2} \tag{IV.17}$$

$$T_{d22}^B = T_{d13} * T_{d14}$$

On désigne par: m = 1: le demi-bras du haut et m = 0 : le demi-bras du bas.

Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M s'expriment comme suit:

$$V_{AM} = T_{11}^b * U_{c1} - T_{10}^b U_{c2}$$

$$V_{BM} = T_{21}^b * U_{c1} - T_{20}^b U_{c2} \tag{IV.18}$$

$$V_{CM} = T_{31}^b * U_{c1} - T_{30}^b U_{c2}$$

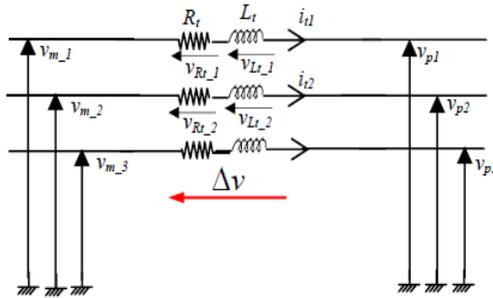
Les tensions simples de sorties s'écrivent comme suit

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} * \left\{ \begin{bmatrix} T_{11}^b \\ T_{21}^b \\ T_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} T_{10}^b \\ T_{20}^b \\ T_{30}^b \end{bmatrix} U_{c2} \right\} \tag{IV.19}$$

## IV.6 modélisation du filtre

### IV.6.1. Modélisation du filtre dans le repère de Park

Il s'agit d'un filtre passif série ( $R_t$ ,  $L_t$ ) raccordé entre le convertisseur de puissance et le réseau (Figure (IV.8)) pour réduire la propagation des harmoniques dans le réseau électrique. [1]



Figure(IV.8) schéma électrique du filtre

Les équations différentielles définissant le filtre peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{pmatrix} V_{m-1} \\ V_{m-2} \\ V_{m-3} \end{pmatrix} = R_t \begin{pmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \\ i_{t3} \end{pmatrix} + L_t \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \\ i_{t3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{p1} \\ V_{p2} \\ V_{p3} \end{pmatrix} \quad (IV.20)$$

L'application de la transformation de Park sur le système d'équations (IV.20) nous donne :

$$\begin{aligned} v_{md} &= R_t \cdot i_{td} + L_t \frac{di_{td}}{dt} - L_t \cdot \omega_s i_{tq} + v_{pd} \\ v_{mq} &= R_t \cdot i_{tq} + L_t \frac{di_{tq}}{dt} + L_t \cdot \omega_s i_{td} + v_{pq} \end{aligned} \quad (IV.21)$$

## IV.7 contrôles des courants envoyés au réseau

Les puissances active et réactive transitées par le réseau sont données dans le modèle de Park par les relations suivantes [36]

$$\begin{aligned} P_g &= i_{td} \cdot V_{td} - V_{tq} \cdot i_{tq} \\ Q_c &= i_{td} \cdot V_{tq} - V_{td} \cdot i_{tq} \end{aligned} \quad (IV.22)$$

D'après les équations précédentes, on remarque que les puissances active et réactive dépendent des courant injectés, il est donc possible de contrôler ces dernières en régulant les courant  $i_{td}$  et  $i_{tq}$ .

### IV.7.1 contrôles des courants

Les équations (IV.22) présentent un couplage causé par les deux derniers termes de tensions de compensation, ce qui rend difficile de contrôler les deux courants indépendamment. Pour avoir les courants désirés, les tensions de compensation sont considérées comme des grandeurs de perturbation, et les tensions de référence peuvent être écrites sous la forme :

$$\begin{aligned} \Delta v_d^* &= \Delta v_d - L_N \omega_n i_{td} \\ \Delta v_q^* &= \Delta v_q + L_N \omega_n i_{td} \end{aligned} \tag{IV.23}$$

Avec  $\Delta v_d$  et  $\Delta v_q$  les termes de compensation.

$$\begin{aligned} \Delta v_d &= R_N i_{Nd} + L_n \frac{d}{dt} i_{Nd} \\ \Delta v_q &= R_N i_{Nq} + L_n \frac{d}{dt} i_{Nq} \end{aligned} \tag{IV.24}$$

En appliquant la transformée de Laplace sur les équations précédentes on obtient deux fonction de transfert identiques

$$F(s) = \frac{i_N(s)}{\Delta v_d(s)} = \frac{1}{R_s + L_N s} \tag{IV.25}$$

Le schéma bloc du dispositif de contrôle des courants transités par le réseau dans le repère de Park est représenté par la (Figure IV.9) : [6]

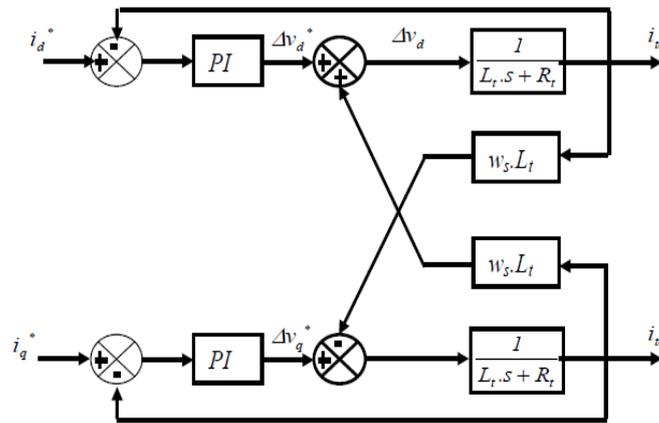


Figure (IV.9) Schéma bloc du contrôle des courants transités par le réseau dans le repère de Park.

Avec  $e_{Nd} = p \omega_N L_d i_{Nq}$ ;  $e_{Nq} = p \omega_N L_q i_{Nd}$

Le calcul des paramètres des régulateurs se fera de la même manière que celui de la commande vectorielle.

La fonction de transfert est égale à:

$$A(s) = \frac{1}{L_N s + R_N} = \frac{b}{a + s} \tag{IV.26}$$

Où  $a = \frac{R_N}{L_N}$  et  $b = \frac{1}{L_N}$

La constante de temps en boucle ouverte est :

$$\tau_{iNd_{Bo}} = \frac{1}{a}; \quad t_{riNd_{Bo}} = 3\tau_{iNd_{Bo}} = \frac{3}{a} \tag{IV.27}$$

Par compensation on trouve :  $\frac{k_{i_{iNd}}}{k_{p_{iNd}}} = a$

La fonction de transfert du régulateur devient :

$$\frac{i_{Nd}}{i_{Nd}^*} = \frac{k_{p_{iNd}} * b}{k_{p_{iNd}} * b + s} \quad (IV.28)$$

Avec une constante du temps :

$$\tau_{iNd\_BF} = \frac{1}{k_{p_{iNd}} * b} \quad (IV.29)$$

Et un temps de réponse :

$$\tau_{riNd\_BF} = 3\tau_{iNd\_BF} = \frac{3}{k_{p_{iNd}} * b} \quad (IV.30)$$

On impose généralement un temps de réponse en boucle fermée plus rapide que celui du courant en boucle ouverte on trouve :

$$\tau_{riNd\_BF} = \tau_{riNd\_Bo} / h \quad (IV.31)$$

Avec h un coefficient supérieur à 1,

Ce qui permet de déterminer :

$$k_{p_{iNd}} = \frac{3}{\tau_{riNd\_BF} * b} \text{ et } k_{i_{iNd}} = a * k_{p_{iNd}}$$

- **Synthèse du régulateur de courant INq**

De la même manière que le réglage du courant  $I_{Nd}$  on trouve :

$$\tau_{riNq\_BF} = \tau_{riNq\_Bo} / h \quad (IV.32)$$

$$k_{p_{iNq}} = \frac{3}{\tau_{riNq\_BF} * b} \text{ et } k_{i_{iNq}} = a * k_{p_{iNq}}$$

## IV.8 Simulation de la chaine complète (Turbine, Génératrice synchrone à aimants permanents)

L'application de la commande SMC (mode glissant) a permis d'obtenir des performances dynamiques assez satisfaisantes. Le mode glissant s'est démarquée par une bonne précision et un meilleur temps de réponse.

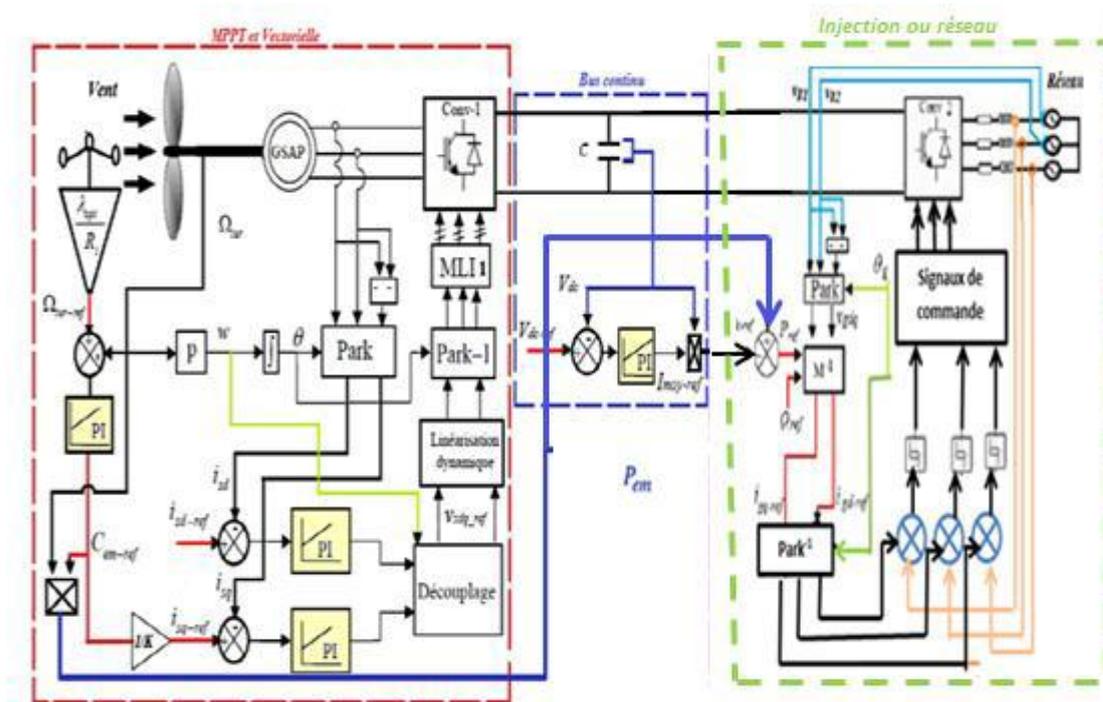


Figure IV.10: Représentation des commandes appliquées au système (turbine, GSAP).

En appliquant le profil de vent illustré dans le précédent à la chaîne complète, l'objectif est de vérifier le fonctionnement de poursuite du point de maximum de puissance et d'examiner l'efficacité du réglage de vitesse associé au régulateur SMC.

D'après les résultats obtenus, on remarque que :

- La vitesse spécifique  $\lambda$ , ainsi que le coefficient de puissance ne varient pas et gardent pratiquement leur valeur de référence optimale à savoir (8.1 pour la vitesse spécifique et 0.48 pour le coefficient de puissance). Figure (IV.11) Figure(IV.12) respectivement.
- L'allure de la vitesse de la GSAP est à l'image du vent entraînant l'éolienne, avec un bon suivi de référence comme le montre la Figure (IV.13).
- Le couple électromagnétique de la Figure (IV.14) suit le couple éolien, afin d'assurer une vitesse de rotation égale à celle optimale.
- Les courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  de la figure (IV.15) suivent leur référence confirmant le fonctionnement de l'algorithme de la commande appliquée. L'allure du courant  $i_{sq}$  traduit la forme du couple électromagnétique qui lui est directement proportionnel.
- La tension du bus continu présentée par la Figure (IV.16),  $V_{dc}$  est assurée à sa consigne de 500V avec un temps de réponse égale à 0.01s.
- La Figure (IV.17), représente les allures des tensions  $V_{abc}$  à la sortie de l'onduleur MLI2 injectés au réseau, sont avec une fréquence égale 50 Hz respectant la norme du réseau.

- La puissance active injectée au réseau est décrites par la Figure (IV.18). la puissance active est d'une valeur moyenne de 4000W.
- La figure (IV.19) montre une partie zoomée de la puissance injectée au réseau, on remarque que cette puissance est adaptée à la variation de la vitesse du vent.
- La figure (IV.20) représente la puissance réactive fournie au réseau, elle est à valeur nulle.
- L'utilisation d'un onduleur à trois niveaux de type NPC nous a permis d'obtenir un THD de valeur 4.08% (inférieur à 5.5%) (figure IV.21) ce qui prouve que notre énergie est de bonne qualité, donc cette dernière peut être injectée au réseau sans introduire aucune perturbation.

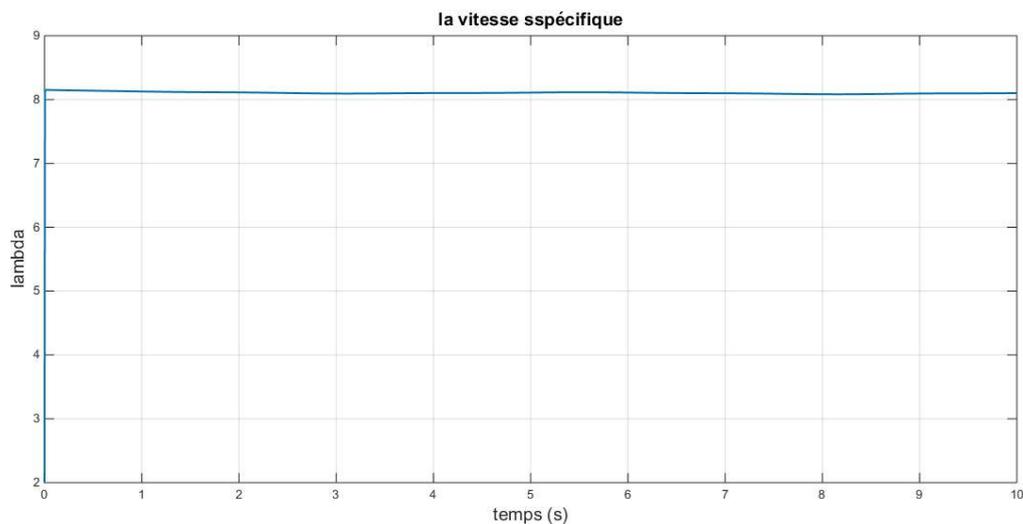


Figure IV.11 : La vitesse spécifique du vent

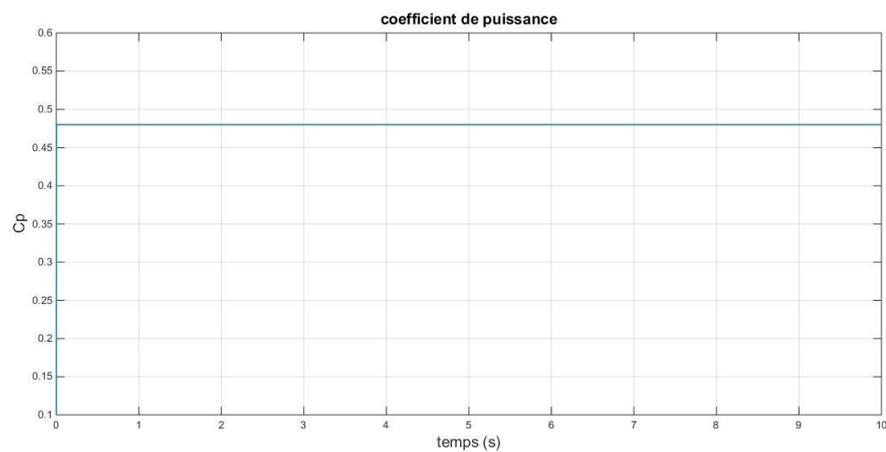


Figure IV.12 : le coefficient de puissance

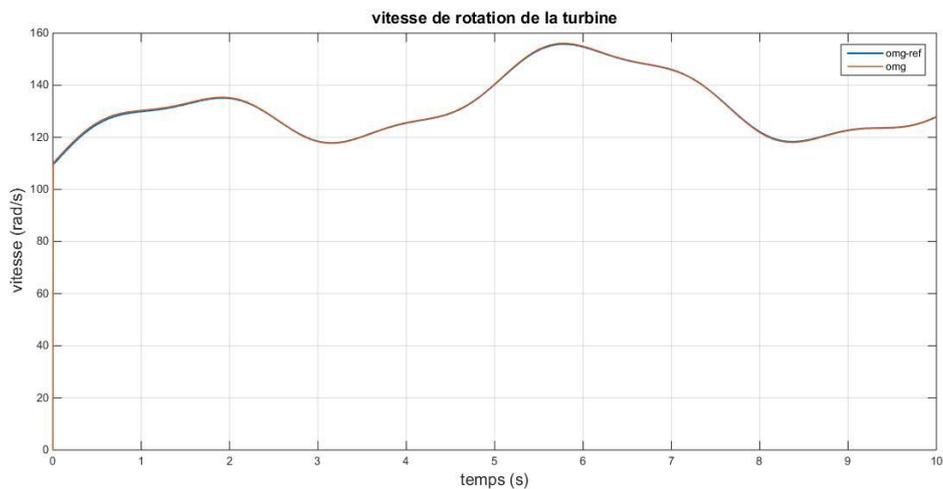


Figure IV.13 : La vitesse mécanique

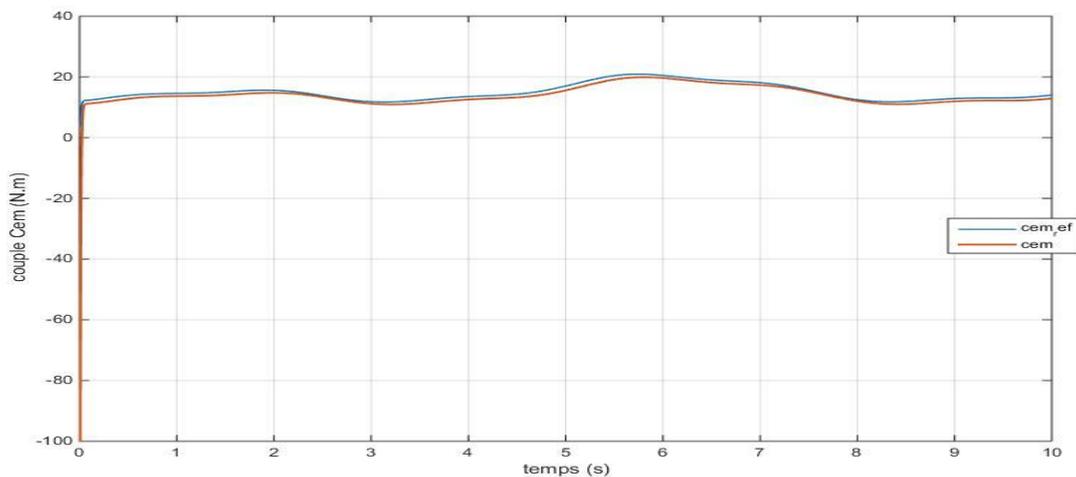


Figure IV.14 : le couple électromagnétique

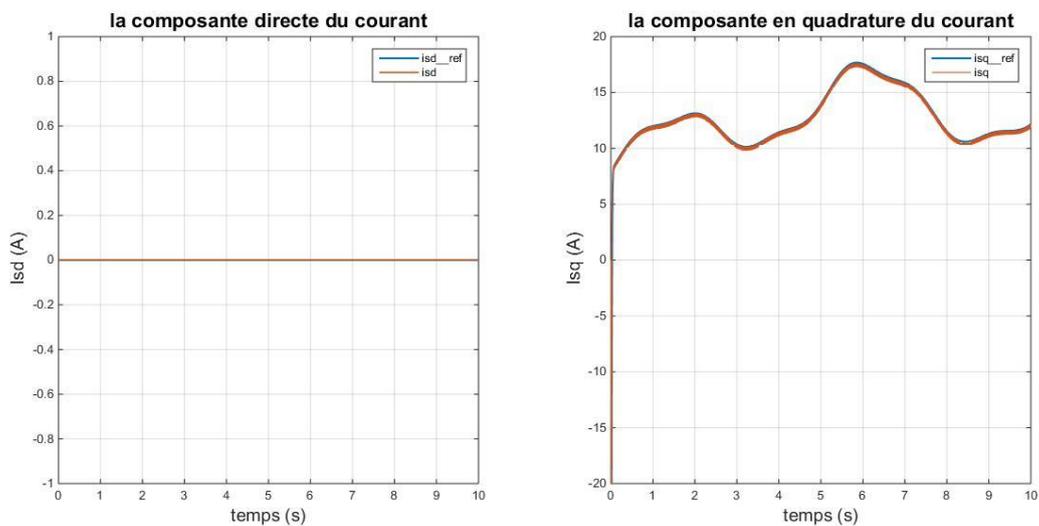


Figure IV.15 : Les courants isd et isq obtenus par le mode glissant

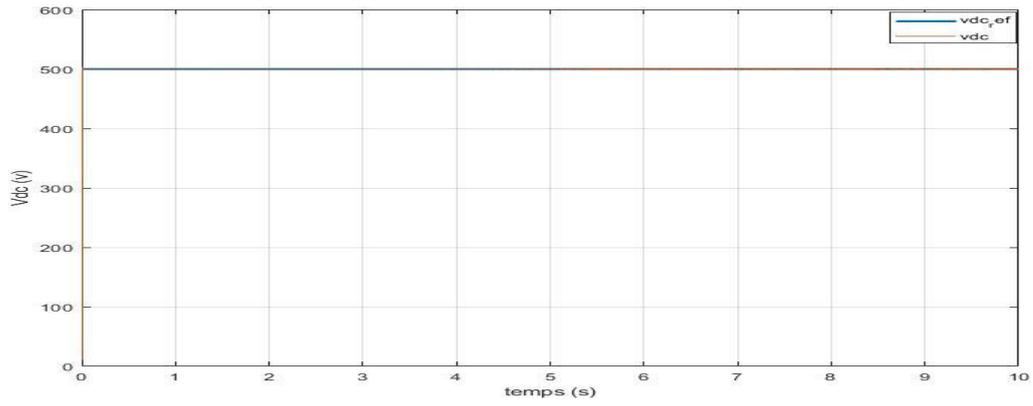


Figure IV.16 : La tension du bus continu

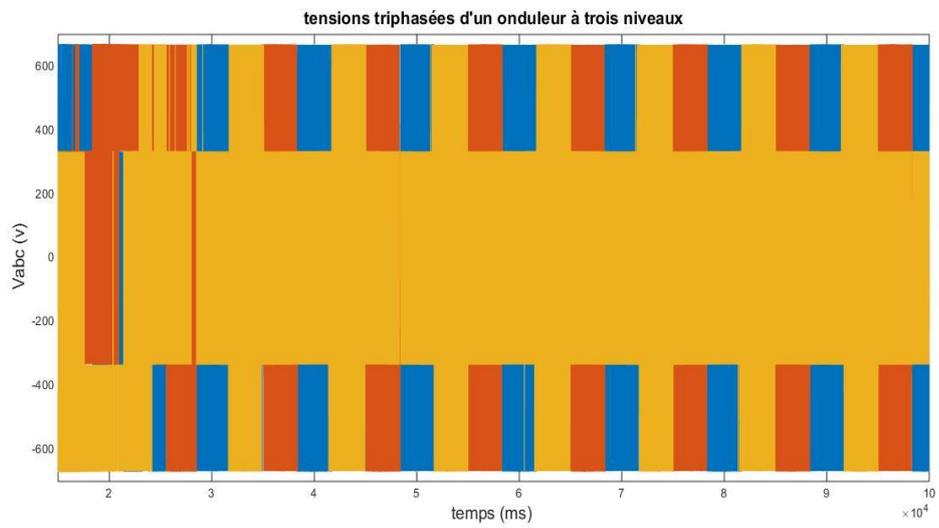


Figure IV.17 : les tensions triphasées d'un onduleur à trois niveaux

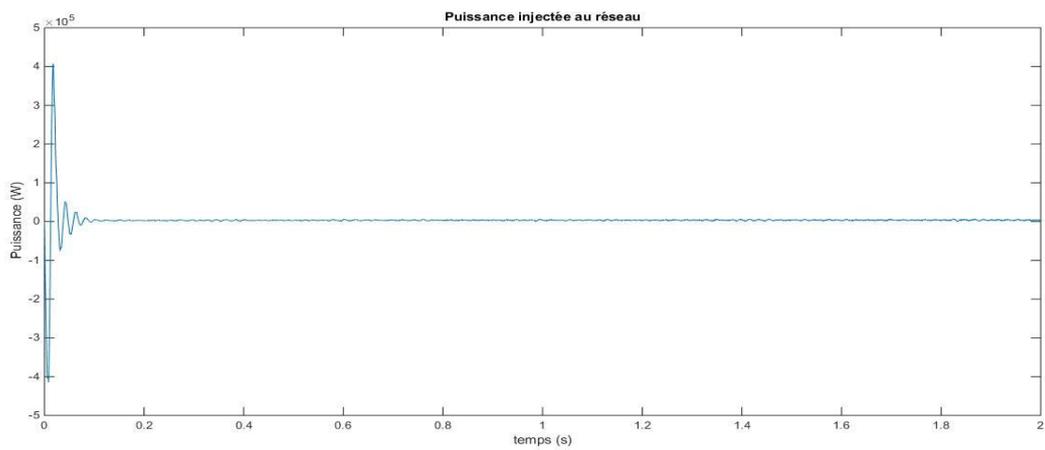


Figure IV.18 : la puissance injectée au réseau

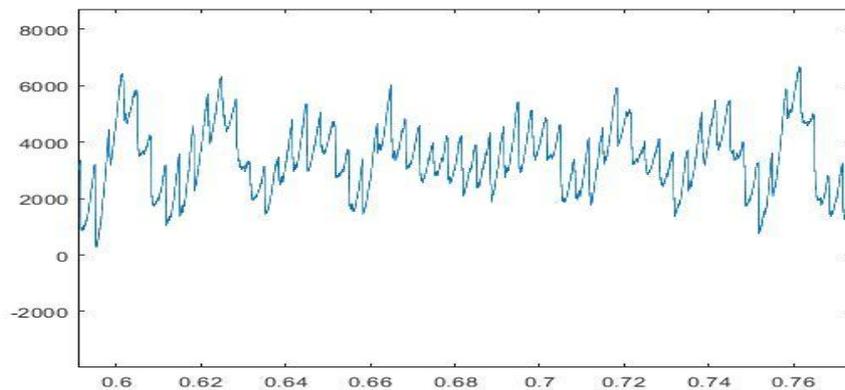


Figure IV.19. Partie zoomée de la puissance injectée au réseau

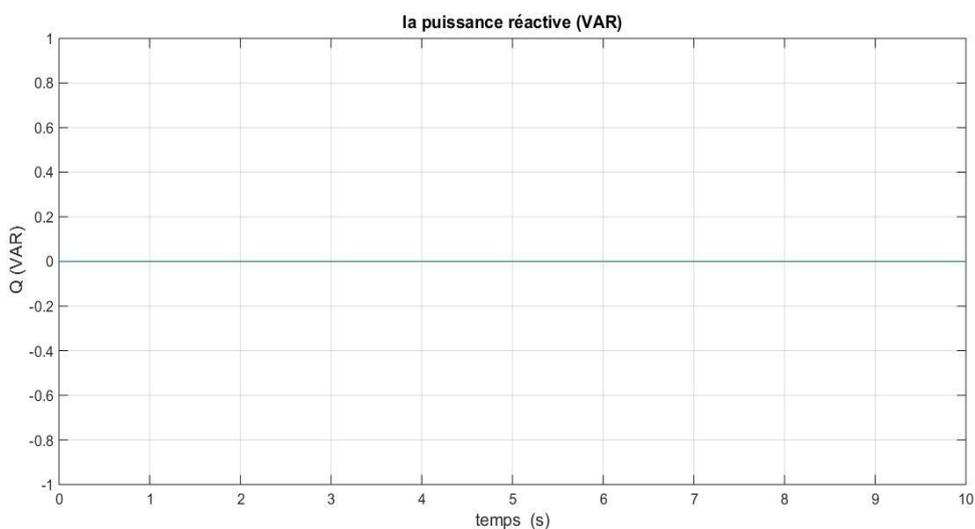


Figure IV.20 la puissance réactive fournie par la chaine de conversion

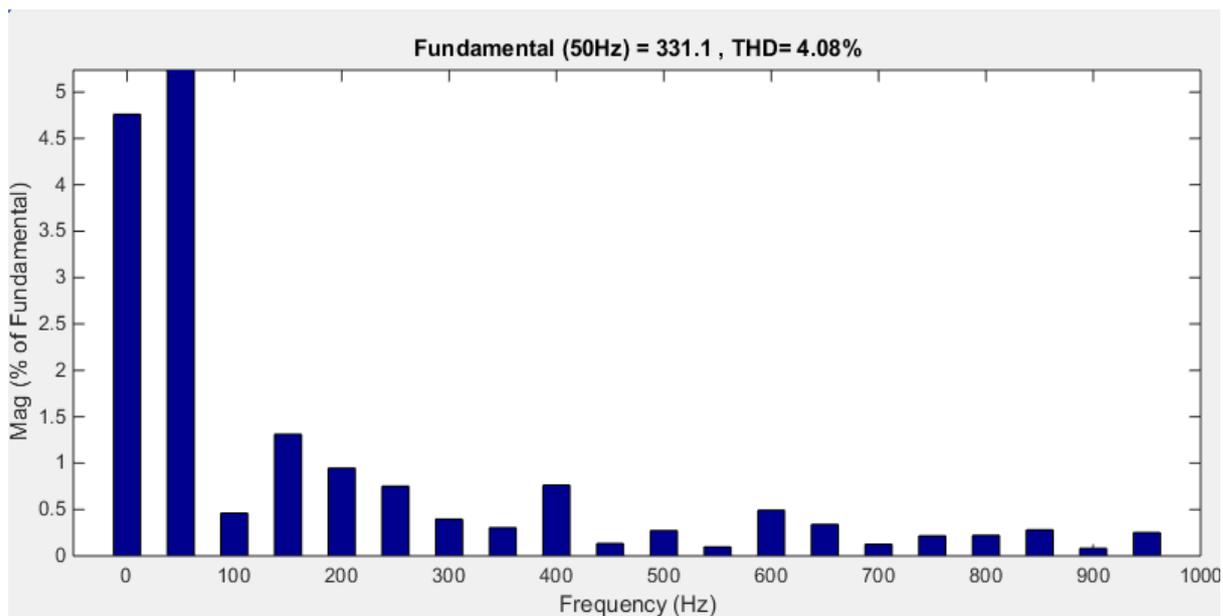


Figure (IV.21) : l'analyse spectrale du courant injecté au réseau

**IV.9 Conclusion**

Après avoir décrit les différentes topologies de convertisseurs utilisés fréquemment dans les structures d'éoliennes basées sur la génératrice synchrone à aimants permanents, nous avons établi un modèle de la chaîne de conversion éolienne constitué d'une génératrice synchrone à aimants permanents, un redresseur triphasé à contrôle vectoriel par MLI, l'ensemble est relié au réseau via un bus continu, un filtre et un onduleur de trois niveaux. Nous avons en suite, construit un dispositif de commande de la chaîne de conversion proposée.

Le système global a été simulé pour un profil de vent bien précis. Les résultats de simulation ont démontré la possibilité d'extraire le maximum de puissance de l'énergie du vent, de réguler la tension du bus continu, réduire le THD du courant, et de contrôler les puissances actives et réactives échangées avec le réseau en employant la commande SMC.

# **Conclusion générale**

La progression des capacités de production d'énergies renouvelables observée dans le monde au cours de la dernière décennie a été particulièrement rapide et constitue un changement profond et durable de l'équilibre énergétique mondial. Certains pays assurent d'ailleurs à ce jour, grâce aux énergies renouvelables, une couverture significative de leurs besoins énergétiques. Cette mutation a été accompagnée par la libéralisation du marché de l'électricité et la multiplication de la production renouvelable, notamment celle de type éolien.

L'énergie éolienne a connu une très forte croissance au cours de la dernière décennie grâce aux avantages qu'elle présente pour l'environnement et aux percées technologiques connexes. Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire concerne l'utilisation de la machine synchrone à aimants permanents avec des convertisseurs statiques de puissance dans un système de conversion d'énergie éolienne.

Dans un premier nous avons traité des généralités sur l'énergie éolienne avec un état de l'art sur l'exploitation mondiale de ce créneau énergétique. Nous avons également traité les lois fondamentales permettant la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique.

Une comparaison entre les éoliennes à vitesse variable et les éoliennes à vitesse fixe nous a permis de choisir un système à vitesse variable. Puis la comparaison entre les différentes génératrices utilisées dans ce domaine nous a permis de choisir un système basé sur une machine synchrone à aimants permanents GSAP à vitesses variables avec redresseur et onduleur commandés par MLI.

A travers l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne, on constate que la production de l'énergie éolienne est de plus en plus importante et de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement de nouvelles technologies telles que les matériaux de construction, l'électronique de puissance et les techniques de commande.

Après avoir déduit les caractéristiques aérodynamiques principales de la turbine, nous avons pu donner la structure de la chaîne de conversion éolienne ; un modèle mathématique de chaque élément a été présenté.

La modélisation du système de conversion éolienne traite deux parties essentielles ; la partie mécanique qui contient la turbine et l'arbre de la génératrice, la deuxième partie, inclue le modèle de la GSAP, basé sur des équations différentielles périodiques, est simplifié par la transformation de PARK.

L'objectif principal de notre travail consiste d'un côté à l'extraction du maximum de puissance appelée "MPPT" avec régulateur PI pour la turbine, et d'un autre côté la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents. Pour améliorer cette extraction et avoir un meilleur rendement, une nouvelle stratégie de commande avancée (Mode glissant (SMC)) est appliquée et des essais de simulation sont effectués et commentés.

Les résultats de simulations ont montré que l'application d'une commande avancée telle que le mode glissant (SMC) présentes des meilleures performances.

L'adaptation au réseau nécessite de recourir à l'électronique de puissance par l'intermédiaire de convertisseurs statiques. La modélisation des deux convertisseurs, leur principe de fonctionnement et la technique de commande MLI., ainsi que la modélisation du bus continu, ont été traité en dernier. Les résultats de simulation de la chaine complète réalisés en utilisant l'outil MATLAB, montrent la faisabilité de connecter un système à vitesse variable à un réseau stable, et confirment l'efficacité de la stratégie choisie à savoir le mode glissant, ainsi que son bon suivi face aux fluctuations du vent.

L'utilisation d'un onduleur à trois niveaux a permis une bonne adaptation de l'énergie produite au réseau électrique.

En perspective, beaucoup de points peuvent être envisagés tels que :

- Utiliser des régulateurs de type fractionnaire à la place des régulateurs entiers.
- L'étude des perturbations inhérentes au couplage du dispositif avec le réseau ; La validation expérimentale ou une implémentation sur la plateforme « dSPACE » afin de confirmer les résultats de simulation des différentes méthodes de commandes.
- Réalisation sur site de la stratégie de contrôle proposée

- [1] : M. Maayouf, «Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent». Thèse de Magistère de l'université de Batna. 2008
- [2] : M. Latreche, «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien». Thèse de Magistère de l'université de Sétif. 2012
- [3] : A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance». Thèse de doctorat institut polytechnique de Toulouse. 2005
- [4] : Zine Souhila Rached « commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone a aimant permanent », thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf. 2016/2017.
- [5] : Salah Kheira, Mokah Yasmine «Commande d'une génératrice asynchrone dédiée à la production d'énergie par éolienne», mémoire de master, Université Ibn Khaldoun Tiaret. 2019
- [6] : Ziraoui Salah Eddine, « modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau», mémoire de master, université badji Mokhtar Annaba. 2017
- [7] : Soltane Belakehal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », thèse de doctorat université de Constantine. 2010
- [8] : Dione Fatou, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne A base de machine synchrone à aimants permanents », Mémoire de master, université badji Mokhtar Annaba. 2018
- [9] : Belabbed Med/ Benyahya Tariq « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents ». Université Dr Tahar Moulay Saïda. 2015
- [10] : Minh Huynh Quang « Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site Isolé thèse de doctorat ». Université de Reims Champagne-Ardenne
- [11] Kadid Ilyes Lotfi, « modélisation et simulation des différents aérogénérateurs éoliens », thèse de master, Université Djilali Liabes Sidi-Bel-Abbès. 2018
- [12] : Yacine Bentaleb, Youcef Hassen, « Etude d'un émulateur éolien », mémoire de magister 2008
- [13] : Adnane Zaimi, « optimisation de la commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanent », thèse de magister, conservatoire national des arts et métiers, Maroc. 2014
- [14] : Bilal ben Khaled, « étude et modélisation d'une chaine de production éolienne », thèse de master, université de Msila, Msila. 2013
- [15] : Sebti Hamza, « Commande vectorielle appliquée à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne », mémoire de master, université Batna 2, Batna. 2017
- [16] ; Salima EL Aïmani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrés dans un réseau de moyennes tensions », thèse de doctorat, université de Lille. 2004
- [17] : Ben Brahim Amel, « Commande Prédictive Généralisée d'une Machine Synchrone à Aimants Permanent », thèse de magistère, université de Batna, Batna. 2009
- [18] : T Merzougui, K AbdelKbir, « Commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) », mémoire de master, université Mohamed Boudhiaf, Msila. 2019

- [19] : Bouhedda Ali, « contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne », mémoire de magistère, université Mouloud Mammri, Tizi-ouzou. 2011
- [20] : Mazouz Fares, Korichi Mohand, « modélisation et commande d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents », mémoire de master, université A, Mira, Bejaia. 2019
- [21] : A Bencheikh, Moulali Sara, « commande par DTC de la machine synchrone à aimants permanents application pour un système éolien », mémoire de master, université Djilali Liabess, Sidi-Bel-Abbès. 2017
- [22] : « MODELISATION DU SYSTEME ELECTRIQUE A EOLIEN COUPLEE AU RESEAU ELECTRIQUE DE DISTRIBUTION ».
- [23] : Meddouch Houssein Eddine, « modélisation et simulation d'un générateur éolien couplé au réseau », mémoire de master, université Mentouri, Constantine. 2011
- [24] : Boussekra Faiza, « la commande non linéaire à régime glissant de la MSAP », thèse de magistère, université de Msila, Batna. 2011
- [25] : A Aissaoui, H Abid, A Tahour, « COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE ET MODE GLISSANT D'UNE MACHINE SYNCHRONE AUTOPILOTÉE », Université Sidi Bel Abbes, Sid-Bel-Abbes. 2007
- [26] : J. S. Thongam, P. Bouchard, H. Ezzaidi, and M. Ouhrouche, « Wind Speed Sensorless Maximum Power Point Tracking Control of Variable Speed Wind Energy Conversion Systems », University of Quebec at Chicoutimi, Chicoutimi, QC, Canada. 2009
- [27] : Maria Letizia Corradini, Gianluca Ippoliti, Giuseppe Orlando, « Fully sensorless robust control of variable-speed wind turbines for efficiency maximization », université de Camireno, Italie. 2013
- [28] : Jan Vergauwe<sup>(1)</sup>, André Martinez<sup>(2)</sup>, Alberto Ribas<sup>(3)</sup>, « Optimization of a Wind Turbine using Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) », (1) Belguim, (2) France, (3) CORDOBA – Spain.
- [29] : Jordi Zaragoza, Josep Pou, Antoni Arias, Cyril Spiteri, Eider Robles, Salvador Ceballos, « Study and experimental verification of control tuning strategies in a variable speed wind energy conversion system », University of Malta, Faculty of Engineering, Msida, Malta. 2010
- [30] : F. Berrezzak, « Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone », mémoire de magistère, université Badji Mokhtar, Annaba. 2006
- [31] : Ben Zemamouche Houria, « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi-niveaux à base de GTO et d'IGBT », mémoire de magister, **mémoire de magistère, université Badji Mokhtar, Annaba. 2010**
- [32] : Abdel Malek Boulahia, « Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique » thèse de magister, université de Constantine. 2009
- [33] : Bouafia Abdouaheb, « TECHNIQUES DE COMMANDE PREDICTIVE ET FLOUE POUR LES SYSTEMES D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE: APPLICATION AUX REDRESSEURS A MLI », thèse de doctorat, université Ferhat Abbes, Sétif. 2010

## *Références bibliographiques*

---

[34] : Daniel Deprent, « OPTIMISATION DE LA COMMANDE D'UN ONDULEUR MLI A TROIS NIVEAUX DE TENSION POUR MACHINE ASYNCHRONE », thèse de doctorat, université de Reims champagne Ardenne, Reims. 1995

[35] : T. Abdelkrim, E.M. Berkouk, K. Aliouane, K. Benamrane et T. Benslimane, « Etude et réalisation d'un onduleur à trois niveaux commandé par MLI vectorielle », article, université de M'sila 2011

[36] : Ahmed A. Daoud, Sobhy S. Dessouky, and Ahmed A. Salem, «Control Scheme of PMSG Based Wind Turbine for Utility Network Connection », article, port said university, Egypt.

[37] : S. Belakehal, H. Benalla and A. Bentounsi, « Power maximization control of small wind system using permanent magnet synchronous generator », article, université Mentouri, Constantine, 2009

[38]: Hamcha Samira, « étude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents », mémoire de magister, université Mouloud MAAMERI, Tizi-Ouzou 2013.

## Paramètres de la chaîne de conversion éolienne

Élément de la chaîne de conversion	Valeurs numérique	Signification
<b>Turbine</b>	$R=3$	Rayon de pale (m)
	$R_o=1.22$	Masse volumique
	$J_{tur}=0.0.42$	Moment d'inertie (kg.m <sup>2</sup> )
	$C_{opt}=0.48$	Coefficient de puissance optimale
	$\lambda_{opt}=8.1$	Ration optimale
	$\beta=0$	Angle de calage
<b>GSAP</b>	$P=6$	Puissance (Kw)
	$L_{sd}=L_{sq}=8.4^e-3$	Inductance statorique (H)
	$R_s=0.425$	Résistance statorique ( $\Omega$ )
	$J =0.01197$	Moment d'inertie (kg.m <sup>2</sup> )
	$P=5$	Nombre de paire de pole
	$f=0.001189$	Coefficient de frottement de la GSAP
<b>Réseau électrique</b>	$V_{bus}=500$	Tension du bus continu (V)
	$C=2200e-6$	Capacité (F)
	$L_n=0.09$	Inductance entre onduleur et réseau (H)
	$R_n=0.1$	Résistance entre onduleur et réseau ( $\Omega$ )
	$V_{eff}=380\sqrt{2}$	Valeur crête du réseau (V)
	$f=50$	Fréquence du réseau (Hz)
<b>Filtre</b>	$R_f=0.05$	Résistance du filtre ( $\Omega$ )
	$L_f=0.003$	Inductance du filtre (H)

## Résumé:

Ce travail traite l'amélioration de la qualité d'énergie produite par le Système de Conversion d'Énergie Éolienne (SCEE) basée sur la Génératrice Synchrone à Aimant Permanent (GSAP) connecté au réseau électrique à travers des convertisseurs à trois niveaux à structure NPC. Un schéma de contrôle global comprend un contrôleur des puissances (active, réactive) de la GSAP, un contrôleur de suivi de point de puissance maximal est conçu pour extraire la puissance optimale de SCEE et un contrôleur pour assurer la stabilité de la tension du bus continu. MATLAB /SimPower System sont utilisés pour mettre en œuvre le modèle global du SCEE connecté au réseau électrique. Les résultats de simulation ont montré une bonne qualité d'énergie produite par le SCEE avec des meilleurs performances

## Mots clés

Turbine, générateur synchrones à aimants permanents, MPPT, commande vectorielle, mode glissant, onduleur à trois niveaux.

## ملخص

في هذا العمل نعالج تحسين جودة الطاقة المنتجة من طرف نظام تحويل الطاقة الهوائية المركزة على مولد كهربائي متزامن ذو مغناطيس دائم متصل بشبكة كهربائية بواسطة المحولات الثابتة ذو ثلاث مستويات ذو هيكل مخطط التحكم الكلي يحتوي على NPC مراقب استطاعات (الطاقة الناشطة و طاقة رد الفعل) للمولد المتزامن. مراقب المتابعة لنقطة الاستطاعة العظمى موجه لاستخراج الطاقة المثلى لنظام تحويل الطاقة الهوائية و مراقب لتأمين ثبات التوتر الكهربائي الخاص بالناقل المتواصل. تم استعمال MATLAB/Simpower system للحصول على محاكاة للنظام المدروس. نتائج المحاكاة أثبتت النوعية الجيدة للطاقة المنتجة عن طريق نظام الانتاج الهوائي مع أفضلية الأداء الكلمات المفتاحية التحكم ذي النبضات , تتبع نقطة الاستطاعة العظمى, التحكم الغامض, المحرك الهوائي , المولدة المتزامنة ذات المغناطيس الدائم المعدلة للنقض الشعاعي

## Abstract.

This work deals with improving the quality of energy produced by the Wind Energy Conversion System (WECS) based on the Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) connected to the power grid through three-level converters with NPC structure. An overall control scheme includes a PMSG powers (active, reactive) controller, a maximum power point tracking controller is designed to extract optimum power from SCEE, and a controller to ensure DC bus voltage stability. MATLAB / SimPower System are used to implement the overall model of WECS connected to the power grid. The simulation results showed a good quality of energy produced by the WECS with better performance.

## Keywords

Wind turbine, Permanent magnet synchronous generator, MPPT, vector control, SMC