



Université ABBES LAGHROUR Khenchela
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Industriel
جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الصناعية



Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commandes Electriques

Présenté par
Djaafri Assam
&
Melih Salah Edinne

**Commande vectorielle D'un Aérogénérateur À
base d'une Machine Synchrone à Aimants
Permanent**

Soutenu le : 13 juillet 2021 devant la commission d'examen composée de :

<i>Dr BEDDIAF Yassin</i>	<i>MCA : à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela</i>	<i>Président</i>
<i>Dr LAGGOUN Louanasse</i>	<i>MCB : à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela</i>	<i>Encadreur</i>
<i>Dr BENHADA Nabil</i>	<i>MAA : à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela</i>	<i>Examineur</i>

Promotion : 2020/2021

Remerciements

Ayant tout, nous remercions ALLAH pour nous avoir donné le
Pouvoir de réaliser ce modeste travail.

Un remerciement particulier à Monsieur Dr Laggoun Lounasse Maitre-Assistant à
l'Université de Khenchela, pour son soutien, ses Conseils et son encadrement qui nous ont été
bénéfique pour mener à bien ce travail.

Nous tenons également à remercier Monsieur Dr Laanani Maitre-Assistant à l'Université de
Khenchela, d'avoir accepté
D'examiner ce travail.

Nous voudrions également remercier tous les enseignants que nous avons eu l'honneur
d'avoir de connaître et d'apprécier durant
Notre scolarité.

Nous tenons également à remercier nos parents, pour tout le soutien moral, financier,
psychologique et particulièrement pour
L'amour qu'ils nous portent.

Enfin, Nos remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont participé de près ou de
loin à la réalisation de ce travail par leur
Amour, sacrifice et compétence.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À ma mère est un témoignage de mon amour, mon respect et ma gratitude pour elle ;

A mon oncle et frère Sabre je le respect beaucoup. ;

A toute ma famille ;

A ma grande mère rahmaotou allah aaliha ;

A mes amies ;

A monsieur Dr Laggoun Lounass et monsieur Dr Labdanni Rafik et Dr Beddiaf Yassin et Dr Benhada Nabil A tous les responsables de département de génie industrielle de Khenchela

ASSAM Djacfri

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes chères parents Bahya. Abde Lhafid, qui étaient toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout

En signe de reconnaissance, qu'ils se trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

A mes frères

A tous mes amis

A tous mes camarades de la promotion commande électriques 2020/2021.

Salah Edinne

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT.....	II
DÉDICACES.....	III
SOMMAIRE.....	V
LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	XII
Introduction générale.....	1
Chapitre I : ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES EOLIENS	
I.1 Introduction.....	5
I.2 Les différentes formes de l'énergie renouvelable.....	6
I.2.1 Hydraulique.....	6
I.2.2 La biomasse.....	6
I.2.3 La géothermie.....	6
I.2.4 Solaire.....	6
I.2.5 L'éolien.....	7
I.3 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne.....	7
I.4 Définition de l'énergie éolienne.....	8
I.5 Différentes parties d'un aérogénérateur.....	9
➤ La nacelle	9
➤ Le tour (mat)	9
➤ Le rotor	9
➤ Le multiplicateur	10
➤ La génératrice.....	10
I.6 Différents types d'éoliennes	10
I.6.1 Eoliennes à Axe Vertical.....	10
➤ Avantages	10
➤ Inconvénients	10
I.6.2 Eoliennes à Axe Horizontal.....	11
➤ Avantages	11

➤ Inconvénients	11
I.7. Régulation de la Puissance Mécanique d'une Eolienne.....	12
I.8 Evolution de l'énergie éolienne dans le monde.....	13
I.9 Evaluation de l'Energie Eolienne en Algérie.....	14
I.10 Types Des Générateurs Électrique.....	16
➤ Générateur synchrone.....	16
➤ Générateur synchrone à rotor bobiné.....	16
➤ Génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP).....	17
➤ Générateurs asynchrone à cage.....	18
➤ Générateurs asynchrone à doubles stator.....	19
I.11 Conclusion.....	20

CHAPITRE II Modélisation Et Simulation De La GSAP

II.1 Introduction.....	22
II.2 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents.....	22
II.2.1 Constitution.....	23
II.2.2 Disposition des aimants dans le rotor.....	23
II.2.3 Matériaux pour aimants.....	24
II.3 Domaine d'application de MSAP.....	25
➤ Applications aux petites puissances.....	25
➤ Applications aux moyennes puissances.....	25
➤ Applications aux fortes puissances.....	25
II.4 Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone.....	26
➤ Avantages.....	26
➤ Inconvénients.....	26
II.5 Eolienne à base de la GSAP.....	27
III.5.1 Eolienne à base de la GSAP Connecté au réseau électrique.....	27
III.5.2 Les éoliennes à base de la GSAP en fonctionnement isolé et autonome.....	27
II.6 modélisation de la génératrice synchrone a aimant permanent.....	28
II.6.1 hypothèses simplificatrices.....	28

II.6.2 équations électriques de la GSAP.....	28
II.6.3 passage au repère de Park.....	29
II.6.4 Equations magnétiques.....	30
II.6.5 expression du couple électromagnétiques.....	31
II.6.6 Equations mécaniques.....	32
II.7 Modélisations De La Génératrice A Vide et en charge.....	32
➤ GSAP à vide.....	32
➤ GSAP en charge.....	33
II.8 Résultats de simulation de la GSAP à vide.....	35
➤ A vide.....	35
➤ En charge.....	36
II.9 Conclusion.	37
Chapitre III MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE	
III.1 Introduction.....	39
III.2 la turbine éolienne.....	39
III.3 Conversion de l'énergie éolienne.....	39
III.3.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.....	39
III.3.2 Modèle du vent.....	40
III.3.3 Loi de BETZ.....	41
III.3.4 Coefficient de puissance.....	43
III.3.5 Coefficient de couple.....	44
III.3.6 Courbes caractéristiques des turbines éoliennes.....	44
III.3.7 Techniques d'extraction du maximum de la puissance (MPPT).....	45
III.4 Modélisation du système éolien.....	46
III.4.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine.....	46
III.4.2 Modèle de turbine.....	48
III.4.3 Bilan des forces sur une pale.....	48
III.4.4 Modèle de multiplicateur.....	49
III.4.5 Equation dynamique de l'arbre.....	49

III.4.6	<i>Modélisation d'une éolienne à vitesse variable.....</i>	50
III.4.7	<i>Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse.....</i>	51
III.4.8	<i>Schéma bloc du modèle de la turbine.....</i>	52
III.5	<i>Simulation de la turbine éolienne.....</i>	53
III.6	<i>Conclusion.....</i>	55
Chapitre IV : Commande vectorielle de la GSAP		
IV.1	<i>Introduction.....</i>	57
IV.2	<i>Avantages et inconvénients de la commande vectorielle.....</i>	57
IV.2.1	<i>Avantages de la commande vectorielle.....</i>	57
IV.2.2	<i>Inconvénients de la commande vectorielle.....</i>	57
IV.3	<i>Principe de la commande vectorielle.....</i>	58
IV.4	<i>Stratégie de la commande vectorielle de la GSAP.....</i>	59
IV.5	<i>Découplage par compensation.....</i>	60
IV.6	<i>Description du système global.....</i>	62
IV.7	<i>Synthèse de correcteurs.....</i>	63
IV.8	<i>Structure complète de contrôle vectoriel de GSAP.....</i>	64
IV.9	<i>Simulation et interprétation des résultats de la commande vectorielle de GSAP.....</i>	65
IV.10	<i>Conclusion.....</i>	68
	Conclusion générale.....	70
	BIBLIOGRAPHIE.....	73
	ANNEXE.....	76
	Résumé.....	77

Notations et symbole

V : la vitesse du vent.

S : la surface des pales.

ρ : densité du vent.

ω_s : Pulsation statorique

ω_r : Pulsation rotorique

P : nombre de paires de pôles.

P_m : puissance mécanique.

C_p : coefficient de puissance du turbin.

GSAP : générateur synchrone à aimant permanent.

MSAP : Machine synchrone à aimants permanents.

s, r : indices d'axes correspondant au stator et rotor.

A, b, c : indices correspondant aux trois phases.

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : tension d'alimentation des phases rotorique.

V_{sabc} : Tensions aux phases a, b et c du stator.

I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} : courants statoriques.

I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} : courants rotorique.

$\Psi_{sa}, \Psi_{sb}, \Psi_{sc}$: flux statoriques.

$\Psi_{ra}, \Psi_{rb}, \Psi_{rc}$: flux rotorique.

(d, q) : Indice du repère de Park lié au rotor

L_r : la matrice des inductances rotorique

L_{ch} : Inductances de charge.

R_{ch} : la résistance de charge.

R_r, I_r : résistance et inductance propre d'une phase statorique.

R_s, I_s : résistance et inductance propre d'une phase rotorique.

θ : angle électrique.

G : gain de multiplicateur.

J_g : Moment d'inertie du rotor de la génératrice.

J_t : moment d'inertie de la turbine.

C_g : Couple de la génératrice

Ω_{mec} : vitesse mécanique.

J : Moment d'inertie totale.

C_{mec} : Couple mécanique totale appliqué au rotor de l'éolienne.

F : Coefficient de frottement visqueux.

C_{em} : Couple électromagnétique

C_f : Le couple résistant dû aux frottements.

R : Rayon de la turbine éolienne.

β : Angle de calage des pales de la turbine.

C_{pmax} : Coefficient de puissance optimal de la turbine.

Ω_{ref} : Vitesse mécanique de référence de la génératrice.

$\Omega_{turbine}$: Vitesse angulaire de la turbine.

Ω_{mec} : Vitesse mécanique de la génératrice.

C_r : Couple résistant.

Ω_t : Vitesse de rotation avant multiplicateur en rad/s.

E_c : Energie cinétique.

C_f : Couple résistant dû aux frottements.

K_p : Coefficient proportionnel du régulateur.

K_i : Le gain de l'intégrateur.

D_h : Coefficient de frottement de l'arbre par rapport au multiplicateur.

J_h : Inertie de l'arbre.

K_h : Elasticité de l'arbre.

C_{aer} : Couple aérodynamique de l'éolienne.

L_d : Inductance statorique sur l'axe d.

L_q : Inductance statorique sur l'axe q.

e_d : f.é.m. de la machine sur l'axe d.

e_q : f.é.m. de la machine sur l'axe q.

T_e : Constante de temps électrique.

$P(\theta)$: Transformation de Park.

$P(\theta)^{-1}$: Transformation inverse de Park.

ω : La vitesse angulaire (rad/sec).

I_{d_ref} : le courant direct référence.

I_{q_ref} : le courant quadrature référence.

τ : La constante de temps électrique relative.

$C_p(\beta, \lambda)$: Coefficient de puissance de l'éolienne.

λ_{opt} : Vitesse spécifique optimale de la turbine.

V_v : Vitesse du vent.

M.P.P.T: Maximum Power Point tracking.

Liste des Figures

Figures chapitre I

<i>Figure I.1</i> : L'évolution de l'éolienne.....	7
<i>Figure I.2</i> : Conversion de l'énergie cinétique du vent	8
<i>Figure I.3</i> : schéma d'une éolienne.....	9
<i>Figure I.4</i> : Les types des éoliennes.....	12
<i>Figure I.5</i> : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.....	13
<i>Figure I.6</i> : Evolution de l'énergie éolienne dans le monde.....	14
<i>Figure I.7</i> : Atlas de la vitesse moyenne du vent (en m/s) de l'Algérie estimée à 10 m du sol.	15
<i>Figure I.8</i> : Système éolien basé sur le générateur synchrone à rotor bobiné.....	17
<i>Figure I.9</i> : systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents.....	18
<i>Figure I.10</i> : Génératrice asynchrone à cage dans la chaine de conversion éolienne.....	19
<i>Figure I.11</i> : Génératrice asynchrone double stator dans la chaine De conversion éolienne...	20

Figures chapitre II

<i>Figure II.1</i> : Différents structure des rotors des MSAP.....	24
<i>Figure II.2</i> : Caractéristiques magnétiques de quelques matériaux.....	25
<i>Figure II.3</i> : Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents À fréquence variable.....	27
<i>Figure II.4</i> : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.....	29
<i>Figure II.5</i> : Passage de repère naturel du stator au repère (d, q) de Park.....	30
<i>Figure II.6</i> : Modèle de PARK pour la GSAP	31
<i>Figure II.7</i> : schéma bloc de simulation de la GSAP à vide	33
<i>Figure II.8</i> : schéma bloc de simulation de la GSAP en charge	35
<i>Figure II.9</i> : simulation de la GSAP à vide	36

Figure II.10 : GSAP sur une charge.....37

Figures chapitre III

Figure III.1: colonne d'air animée d'une vitesse v40

Figure III.2 : Simulation de vitesse du vent.....41

Figure III.3 : Simulation du profil de la vitesse du vent.41

Figure III.4 : Tube de courant autour d'une éolienne42

Figure III.5 : Vitesse de vent (v) et vitesse tangentielle de l'aubage ($\Omega t R_t$).....43

Figure III.6 Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ44

Figure III.7 : Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse de vent.....45

Figure III.8: Représentation du système mécanique de l'éolienne.....46

Figure III.9 : Schéma mécanique équivalent simplifié de la turbine éolienne.....47

Figure III.10 : Bilan des forces sur une pale.....48

Figure III.11 : Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse.....49

Figure III.12 : Schéma de la turbine éolienne.....50

Figure III.13 : Schémas bloc de modèle de la turbine sans asservissement de la vitesse.....52

Figure III.14 : Schéma bloc de la turbine.....53

Figure III.15 : Les courbes de $C_p(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β (deg).....54

Figure III.16 : Variations de la puissance produite pour différentes vitesses de vent.....55

Figures chapitre IV

Figure IV.1 : Principe de la commande vectorielle.....60

Figure IV.2 : Principe de découplage par compensation.....61

Figure IV.3 : Boucle de régulation du courant directe.....62

Figure IV.4 : Boucle de régulation du courant quadratique.....63

Figure IV.5 : Schéma du bloc de la commande vectorielle de la GSAP.....65

Figure IV.6 : Boucle de régulation de courant.....66

Figure IV.7 : la simulation de commande vectorielle GSAP.....67

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. 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. Depuis le premier choc pétrolier de 1973[1], les pays industrialisés optent progressivement pour les énergies nouvelles et renouvelables. 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. [2] La brûlure du soleil, la chaleur de la terre, l'ardeur du vent, la puissance de l'eau, la générosité des plantes, autant d'énergies infinies ou sans cesse régénérés qui cristallisent tous nos espoirs. L'engouement pour les énergies renouvelables est tel un vent frais de créativité semble inspirer, tous azimuts, la recherche publique et privée. Solaire thermique, photovoltaïque, géothermie, éolien, hydroélectricité, exploitation de la biomasse : les idées foisonnent encore dans les laboratoires [3]

Par ailleurs, la demande mondiale en énergie électrique, sans cesse croissante, a contraint certains pays développés à combler leur déficit énergétique par l'utilisation des centrales nucléaires. L'énergie nucléaire a l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique, mais le risque d'accident, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels. Ce qui rend cette énergie de moins en moins attractive pour le futur. [4]

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffé inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent. [5] Le développement et la multiplication de l'utilisation de chaînes de conversion de l'énergie éolienne ont conduit les industriels et les scientifiques à s'investir dans l'amélioration des indices technicoéconomiques de cette conversion et la qualité de l'énergie fournie. [4]

Après des siècles d'évolution et des recherches plus poussées depuis quelques décennies, aujourd'hui, plusieurs pays qui sont résolument tournés vers l'énergie éolienne. Les plus avancés dans le domaine sont : l'Allemagne avec une puissance installée de 14609 MW, l'Espagne 6202 MW, le Danemark 3110 MW, la Hollande 912 MW et l'Amérique du nord 6677 MW. Avec certains projets d'énergie éolienne développés ("offshore", au large des côtes) de

Introduction Générale

grandes centrales éoliennes fournissent de l'électricité dans certaines parties du monde, à un prix concurrentiel à celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles (par ex. : les centrales nucléaires et les centrales thermiques au mazout ou au charbon [6]

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type synchrone a aimant permanent dans un système éolien. [2]

Le présent mémoire est structuré de la façon suivante :

Dans le premier chapitre nous présentons l'état de l'art de l'énergie éolienne, les différents types d'aérogénérateur, leurs caractéristiques technologiques, évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde.

Dans la deuxième chapitre, nous allons présenter la modélisation et la simulation de la génératrice synchrone à aimants permanent (GSAP) dans le plan de Park. A vide et a charges.

Le troisième chapitre est dédié à l'étude du système de conversion d'énergie éolienne et éléments essentielle de la chaîne éolienne. Elle est constituée de la turbine et la génératrice synchrone aiment permanent(GSAP).

Le quatrième chapitre est la commande vectorielle de la GSAP, on utilise un régulateur de type PI.

À la fin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale regroupant les différents résultats obtenus et quelque perspective pour compléter ce travail.

CHAPITRE I
Etat De L'art Sur Les
Systèmes Eoliens

I.1 Introduction

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique du vent, elle est en partie issue de l'énergie solaire. En effet, les grands flux de circulation atmosphérique sont en grande partie provoqués par la différence de température entre l'équateur et les pôles. Du fait de cette différence de pression, un flot d'air s'établit entre ces régions. [7]

Par ailleurs, il existe une forte opposition politique contre le renforcement de l'énergie nucléaire dans de nombreuses parties du monde. Pour répondre à une demande mondiale continuellement croissante de l'énergie, les industriels s'investissent de plus en plus dans les énergies renouvelables. [4]

Mais la motivation principale derrière l'intérêt croissant envers cette source d'énergie renouvelable est son caractère écologique, surtout dans le contexte actuel où la terre entière subit les conséquences du réchauffement climatique qui épuise les réserves mondiales en eau, principale source de l'énergie électrique, La génération de l'énergie éolienne représente une solution importante qui pourrait mitiger ces problèmes grâce à ces impacts insignifiants sur l'environnement, et le fait que cette énergie est renouvelable et pourrait contribuer au développement dans le monde.[22] [3].

L'énergie éolienne ou l'énergie du vent, C'est une énergie plus respectueuse de l'environnement que les énergies classiques telles que les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire. Elle est presque universellement reconnue comme une source d'énergie la plus prometteuse pour produire de l'électricité propre à court et à moyen termes et elle contribue à la préservation de l'environnement [6]

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. [2] 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. [8]

Dans ce premier chapitre, une brève description des systèmes éoliens serait présentée. Dans ce contexte, quelques notions principales sur la technologie éolienne seraient données, concernant principalement, la conception, les différents types d'éoliennes et configurations ainsi que leurs avantages et inconvénients.

1.2 Les différentes formes de l'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables sont nombreuses, la plupart sont issues directement ou indirectement du soleil : son rayonnement réchauffe l'atmosphère terrestre provoque le vent, les courants, le cycle de l'eau, les plus célèbres formes de l'énergie renouvelable sont [6] :

1.2.1 Hydraulique-Hydroélectricité

L'énergie hydroélectrique met à profit l'énergie de l'eau qui se déplace d'un point haut vers un point bas, essentiellement pour produire de l'électricité. Cette diversité permet à l'énergie hydroélectrique de répondre aux importants besoins urbains centralisés ainsi qu'aux besoins ruraux décentralisés. La production varie selon les aléas de l'hydraulicité (débit d'une année ou d'un mois donné par rapport à une année ou un mois considéré comme "normal"). [9]

1.2.2 La biomasse

La filière biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse solide (bois, déchet de bois, déchets agricole, déjections animales), le biogaz (de décharge, de station d'épuration ou d'unités de méthanisation industrielle ou agricoles) les déchets municipaux renouvelables solides et la biomasse liquide (bioéthanol, biodiesel, huile végétale). [6]

1.2.3 La géothermie

La production de l'électricité géothermique consiste à convertir la chaleur des nappes aquifères haute température (de 150 à 350 C°) à l'aide de turboalternateur, la géothermie est essentiellement développée dans les zones volcaniques. [9]

1.2.4 Solaire

La production d'électricité solaire repose "sur deux technologies bien distinctes. La technologie de modules photovoltaïques utilise une des propriétés de semi-conducteur (généralement le silicium) que au contact de la lumière génèrent de l'électricité. La seconde technologie est celle des centrales hélios thermodynamique (ou centrale solaire thermique) cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de miroir sur un point focal afin d'obtenir des températures très élevées (de 400 à 1000 c°) qui permettent la production de vapeur d'eau et donc de l'électricité.

Trois technologies distinctes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration :

- ✓ Dans les concentrateurs paraboliques, les rayons du soleil convergent vers un seul point, le foyer d'une parabole.
- ✓ Dans les centrales à tour, des centaines voire des milliers de miroirs (héliostats) suivent

la course du soleil et concentrent son rayonnement sur un récepteur central placé au sommet d'une tour.

- ✓ Troisième technologie : des capteurs cylindro paraboliques concentrent les rayons du soleil vers un tube caloporteur situé au foyer du capteur solaire. [9] [6]

I.2.5 L'éolien

La production d'électricité éolienne est une opération qui consiste à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique par l'intermédiaire d'un système mécanique appelé « turbine éolienne » entraînant une génératrice électrique. Depuis l'apparition des éoliens, ces derniers sont en progrès perpétuel. [6]



Figure I.1 L'évolution de l'éolienne

I.3 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

Depuis plusieurs siècles (avant 3000 ans environ) l'énergie du vent, comme étant une source d'énergie inépuisable non polluante [3] La première utilisation connue de l'énergie éolienne remonte à 1700 ans avant J-C. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de là 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 âge. [10]

En 1891, le Danois Poul La Coura eu l'idée d'associer une turbine éolienne à une génératrice. Cette technologie est améliorée durant la première et la deuxième guerre mondiale avec une grande échelle par les ingénieurs danois. C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences, cette fois à plus grande échelle

l'expérience californienne a été la première à grande échelle (le «Wind-rush») au début des années 80, notamment avec des turbines de moyenne puissance (55 kW) et grâce à une incitation fiscale très volontariste. On passa ainsi de 144 machines (pour un total de 7MW) en 1981, à 4687 machines (386MW) en 1985. Ensuite, des siècles avant les Européens l'homme servit des moulins à vent. Probablement, la première turbine à vent générant de l'électricité a été construite par le Danois Poul. La Cour en 1891. Parmi ces investissements, on cite le premier marché de la Californie au cours des années 1980-1986. [3] [10]

1.4 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure 1.2). [2]

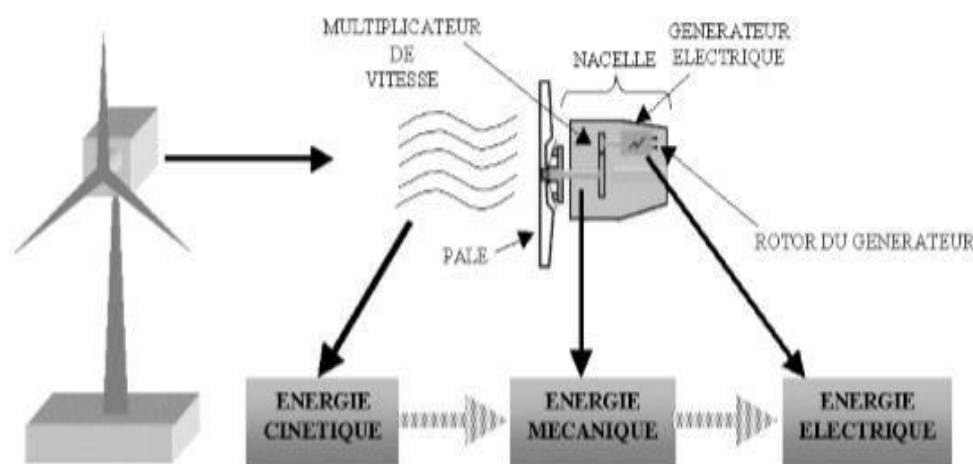


Figure 1.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

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. [4]

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. 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. [2] [3]

1.5 Différentes parties d'un aérogénérateur

Une éolienne est généralement constituée de cinq éléments principaux :

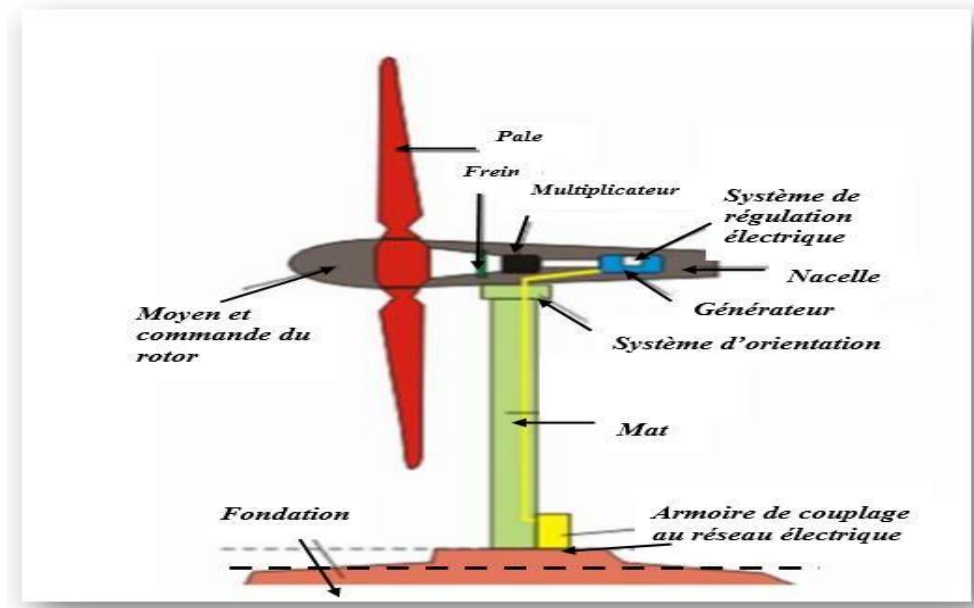


Figure I.3 : schéma d'une éolienne.

- **La nacelle** : C'est la partie l'essentielle de l'éolienne, elle contient les éléments de transmission mécanique entre le rotor et le générateur, aussi comprenant le multiplicateur et le système de freinage de sécurité ainsi que les équipements de mesures du vent [3]. La salle des machines est accessible depuis le mat et contient les éléments principaux : les paliers, la boîte de vitesse, le générateur, les freins et le système de rotation ainsi que la chaîne de transmission permettant de transmettre de couple rotor à la boîte de vitesse. [11]
- **La tour (le mat)** : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. [12]
- **Le rotor** : C'est le capteur d'énergie qui permet de transformer l'énergie du vent reçu en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué par des pales et de l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse [3] le nombre de pales varie classiquement de 1 à

3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. [12]

- **Le multiplicateur** : Sert à adapter la vitesse de la turbine de l'éolienne à celle de la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques. [2] [13]
- **La génératrice** : C'est un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. C'est généralement soit une machine synchrone, ou une machine asynchrone à cage ou encore une machine à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10MW. [2]

1.6 Différents types d'éoliennes

1.6.1 Éoliennes à axe vertical

Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessible, De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation. [5]

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus. [8] [14]

Les avantages et les inconvénients sont différents d'une éolienne à une autre :

➤ **Avantages**

- ✓ Les organes de commande et le générateur sont au niveau du sol donc facilement accessible.
- ✓ L'éolienne reçoit le vent de n'importe quelle direction.
- ✓ Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

➤ **Inconvénient**

- ✓ Difficulté de contrôle des pales dans la survitesse.
- ✓ La surface qu'elles s'occupent au sol est très importante pour les puissances élevées.
- ✓ Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.

I.6.2 Eoliennes à Axe Horizontal

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multi-pales. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent. Pour les petites puissances, ce dernier est en général, une machine à aimant permanent. Pour les grandes puissances le générateur synchrone est mieux adapté. La puissance de sortie est contrôlée essentiellement par deux méthodes, la méthode de décrochage et la méthode de l'angle de calage variable. [3] [10]

- ✓ Le premier est un contrôle passif de la puissance, est due simplement à la forme de la pale (vrillage et profil).
- ✓ La deuxième méthode est réalisée grâce à un mécanisme actionnant les pales afin de leur faire varier l'angle de calage. Pour les très grandes vitesses du vent, l'aéromoteur est freiné ou bien carrément arrêté pour éviter tous dommages.

Malgré la nécessité d'un mécanisme d'orientation des pales pour cette structure et le coût le plus élevé par rapport au celle de l'autre type (éolienne à axe vertical), les éoliennes à axe Horizontale sont les plus utilisées actuellement dans le monde grâce à son rendement élevé et la faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical et ainsi la capture du vent en hauteur qui est plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol. [5] [10] [2] [3] [8]

➤ *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.

➤ *Inconvénient*

- ✓ Coût de construction très élevé
- ✓ L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident

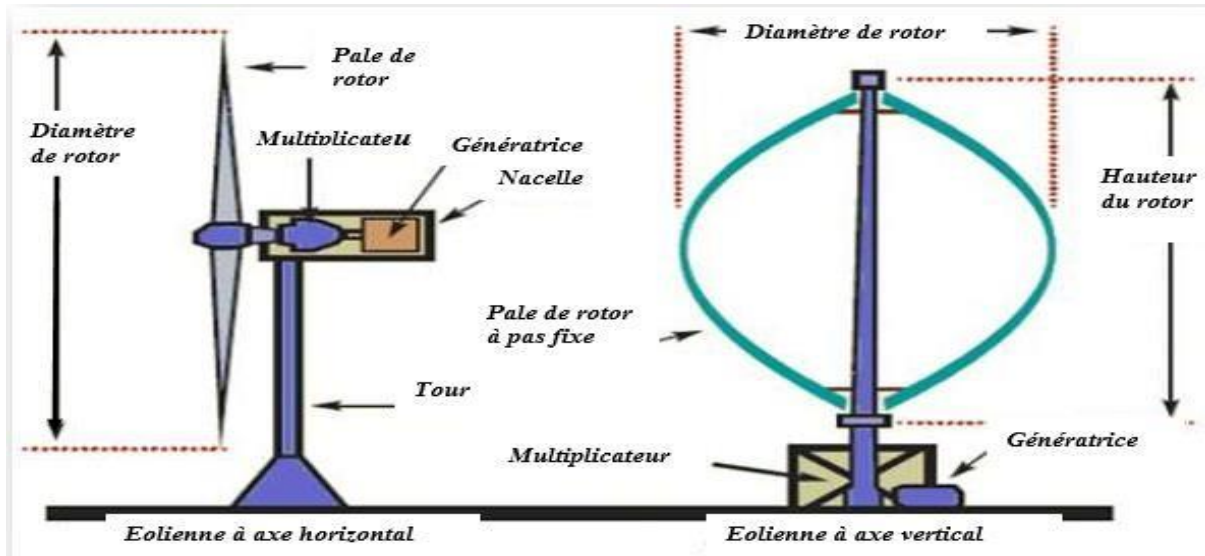


Figure I.4 : Les types des éoliennes

I.7 Régulation de la Puissance Mécanique d'une Eolienne

Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la puissance.

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale P_n . La puissance P_n est obtenue à partir d'une vitesse du vent v_n , dénommée vitesse nominale. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à v_n la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

La courbe typique donnant la puissance aérodynamique d'un aérogénérateur, fonctionnant à vitesse variable, en fonction de la vitesse de vent est illustrée par la (FIGURE I.5). [4] [12]

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent [8]

Trois zones de fonctionnement de l'éolienne :

- ✓ **La zone A** : correspond aux vitesses très faibles du vent insuffisant pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance.
- ✓ **La zone B** : correspond aux vitesses moyennes dont le système de contrôle de l'aérogénérateur peut intervenir pour contrôler la puissance électrique à générer.
- ✓ **La zone C** : correspond aux vitesses très élevées du vent pour lesquelles la vitesse

de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale pour éviter des dégâts sur la structure. Par conséquent, la puissance électrique produite est maintenue constante et égale à sa valeur nominale.

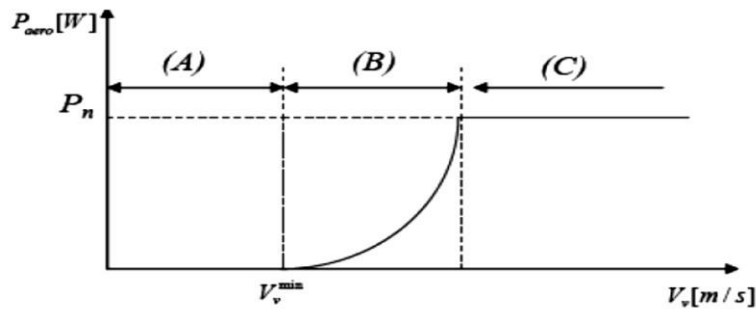


Figure I.5 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

I.8 Evolution de l'énergie éolienne dans le monde

Au niveau mondial, près de 51,3 GW de nouvelles capacités éoliennes ont été installées en 2018 (plus de 91% d'installations terrestres) selon les dernières données du Global Wind Energy Council (GWEC) qui doit remettre son rapport définitif le 3 avril prochain. Le volume de ces nouvelles installations est inférieur de 3,6% à celui de 2017 mais GWEC souligne l'émergence de nouveaux marchés comme l'Amérique latine, l'Asie du Sud-Est et l'Afrique (avec toutefois seulement 10% des capacités installées en 2018).

En 2018, la Chine a compté à elle seule pour près de 45% des nouvelles installations éoliennes dans le monde (+ 23 GW), très loin devant les États-Unis (+ 7,6 GW) et les pays européens. Signalons que l'empire du Milieu est également en tête des installations d'éoliennes offshore (+ 1,8 GW en 2018) alors que ce marché s'est historiquement développé dans les eaux européennes.

Au total, la puissance du parc éolien mondial a atteint 591 GW à fin 2018 selon GWEC qui n'a pas encore communiqué ses données sur les productions associées (1 096 TWh en 2017 selon les dernières données de l'AIE (4)). Selon GWEC, les installations de nouvelles éoliennes pourraient dépasser 55 GW par an d'ici à 2023. Il est en particulier attendu " une énorme croissance en Asie " (Asie du Sud-Est en particulier), celle-ci étant toutefois conditionnée en partie au politiques de soutien public mises en uvre dans cette région.

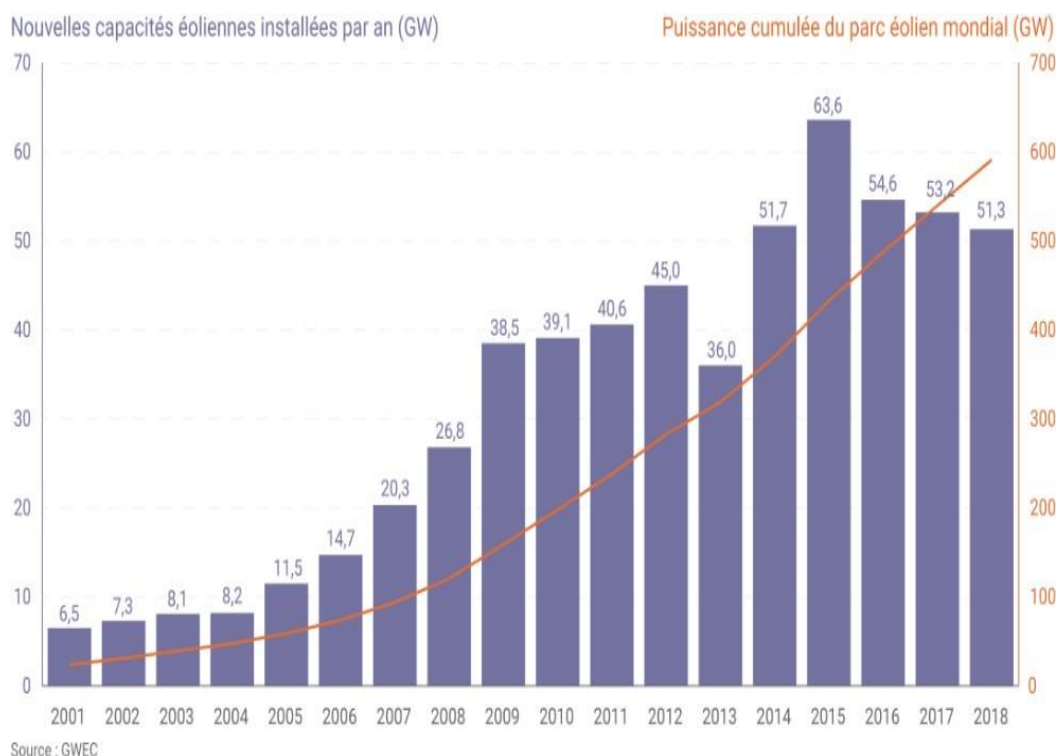


Figure 1.6 Evolution de l'énergie éolienne dans le monde.

L'éolien représente environ 4,7 % de la production mondiale d'électricité. Fin 2018, la puissance éolienne installée atteignait 591 GW, dont 23 GW en mer. Sur l'année 51,3 GW ont été installés, contre 53,2 GW l'année précédente, soit une baisse de 3,6%. " Cette nouvelle baisse du niveau d'installation mondiale, la troisième année consécutive, s'explique cette année par une contraction importante des marchés européens et indiens qui n'a pas été entièrement contre balancée par le retour à la croissance des marchés chinois et états- uniens. Les marchés les plus dynamiques ont été la Chine (+23 GW), les Etats-Unis (+7,6 GW) et l'Allemagne (+2,4 GW). [5] [10]

1.9 Evaluation de l'Energie Eolienne en Algérie

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en figure I.7. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque qu'à l'exception de la région côtière (moins Béjaïa et Oran), du Tassili et de Beni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s, [Kas 01]. [12]

Octobre 2011 que la ferme éolienne d'Adrar, qui doit servir de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 420 MW à l'horizon 2024, a été mise en service par le ministre de l'Energie, Mr : Yousef Yousfi. Constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de

0.85MW chacune (pour une capacité globale de 10 mégawatts), La carte représentée en figure I.1 montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-Ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de micro- climats sur les sites côtiers d'Oran, Béjaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter. [13] ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au Nord et Biskra au sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne, ETTERKIB et INERGA, en l'occurrence pour un coût global de 2,8 milliards de dinars devaient être achevés au deuxième trimestre de l'année 2013. Première du genre à l'échelle nationale, cette nouvelle centrale de production d'électricité fait partie d'un vaste plan de projets de génération de 22 GW, d'énergie renouvelable à l'horizon 2030 dont 1,7 GW en éolien. En matière d'énergie renouvelables, le plan du gouvernement accuse un énorme retard. Le plan lancé en 2011 devrait être réalisé en trois phases. La première (2011-2013), consacrée aux études et au lancement de projets pilotes ; la seconde (2014-2015), à la réalisation des premières installations, et la troisième (2016-2020), au lancement de l'industrie à grande échelle. [10]

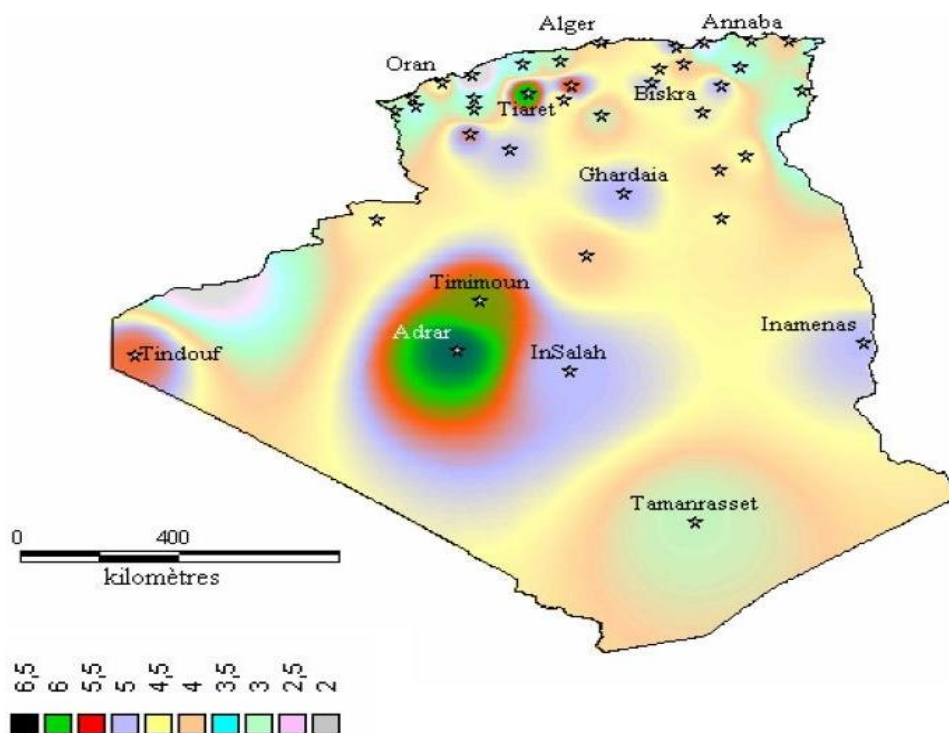


Figure I.7 Atlas de la vitesse moyenne du vent (en m/s) de l'Algérie estimée à 10 m du sol [Kas 06].

1.10 Types des générateurs électriques

➤ *Générateur synchrone*

Les générateurs synchrones (GS) sont connus pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes.

L'avantage du générateur synchrone sur le 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.

Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais. Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines Synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. [6] [5]

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. [5]

➤ *Générateur synchrone à rotor bobiné*

La connexion directe au réseau de puissance implique que le générateur synchrone tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la Machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système "Brushless" avec un redresseur tournant.

La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable.

Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système. [15]

Les générateurs synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. [5]

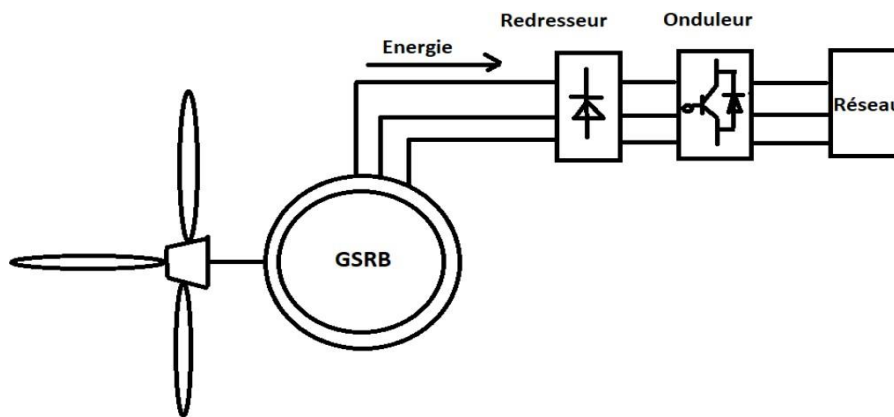


Figure I.8 Système éolien basé sur le générateur synchrone à rotor bobiné.

➤ **Génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP)**

Aujourd'hui la plupart des machines synchrones utilisées dans les petites éoliennes sont des machines synchrones à aimants permanents par rapport à la machine à excitation. La caractéristique d'auto excitation du GSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement avec un coût réduit. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif. [15]

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. 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]

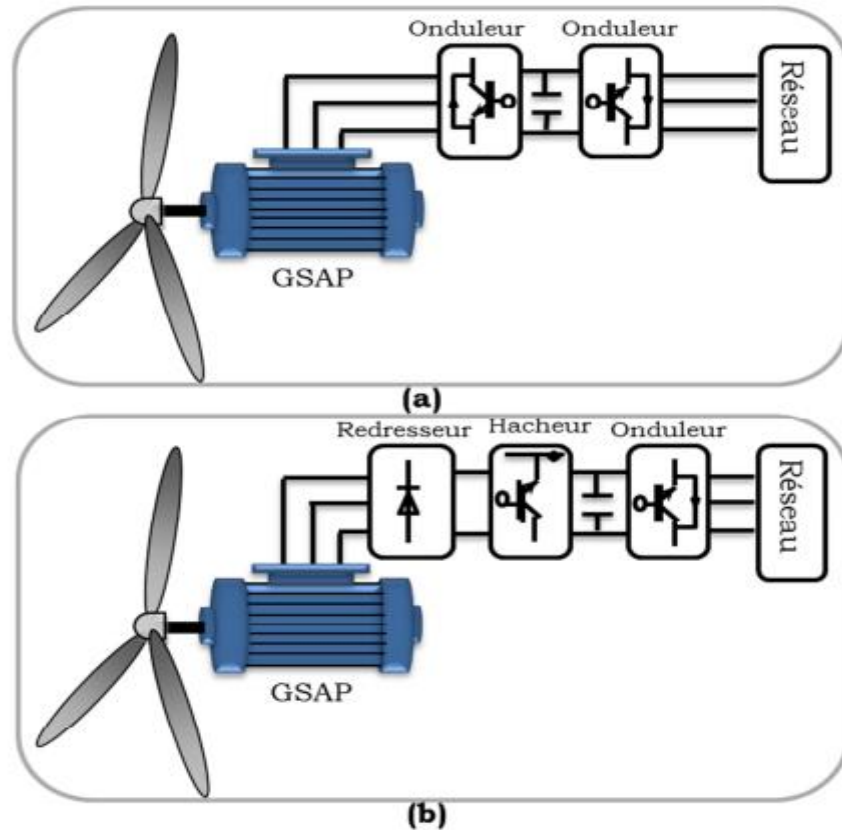


Figure 1.9 Systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents

(a) GSAP avec convertisseurs MLI

(b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur.

➤ **Générateurs asynchrone à cage**

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. Cette machine est un convertisseur électromécanique qui peut fonctionner en mode moteur ou en mode générateur, cela est déterminé selon la vitesse de la machine par rapport à la vitesse de synchronisme, donc si la vitesse est inférieure à la vitesse de synchronisme la machine est en mode moteur et si la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme la machine est en mode génératrice [8].

L'aérogénérateur à vitesse fixe est constitué d'une machine asynchrone à cage d'écureuil est couplée mécaniquement à la turbine par un multiplicateur. Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control). La machine fonctionne alors en hyper synchronisme c'est-à-dire le glissement $g < 0$ pour un fonctionnement en génératrice. [5]

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Il est

très fiable et relativement peu onéreux par rapport à d'autres types de génératrices. La demande de puissance réactive est compensée par la connexion d'un groupe de condensateurs en parallèle avec le générateur, ou par la mise en œuvre d'un convertisseur statique de puissance. [15]

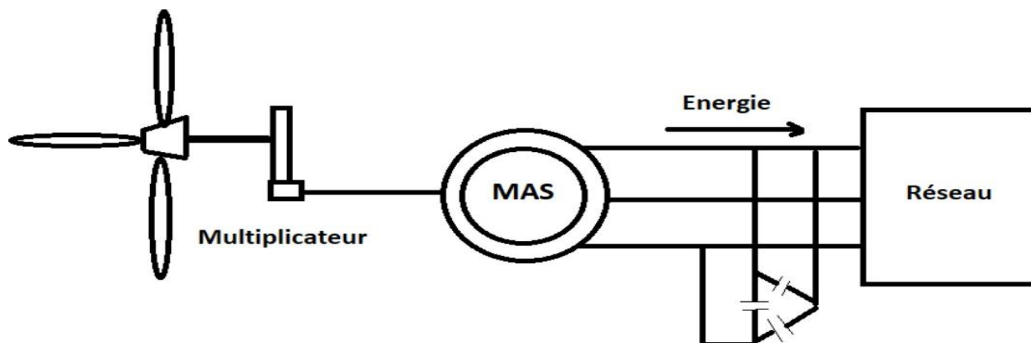


Figure I.10 Génératrice asynchrone à cage dans la chaîne de conversion éolienne.

➤ Générateurs asynchrone à doubles stator

Afin de perfectionner le rendement du système précédent, certains concepteurs ont recours à un autre système à base de machine asynchrone à double stator. On peut imposer deux vitesses de synchronisme par changement du nombre de pôles. D'une part, on a un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent. En effet, la puissance est donnée par

$$P_{mg} = C_{em} \cdot \Omega_s \quad (I.1)$$

P_{mg} La puissance transmise par la génératrice, C_{em} Le couple électromagnétique, Ω_s La vitesse de synchronisme, C La pulsation du réseau et P le nombre de paires de pôles. A une faible puissance correspond une faible vitesse, la vitesse étant liée au nombre de paires de pôles par :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{P} \quad (I.2)$$

Bien qu'elle soit simple, avec ses qualités importantes de robustesse, la machine asynchrone à double alimentation reste plus avantageuse pour l'utilisation dans la conversion d'énergie dans les systèmes éoliens pour certaines raisons :

- ✓ Le deuxième stator rend la conception de la machine plus difficile et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, qui rend le système plus lourd et plus compliqué.
- ✓ La puissance échangée entre la machine et le réseau est très élevée ce qui implique l'utilisation des convertisseurs plus grands.

- ✓ Les pertes sont minimales mais restent non négligeables en atteignant un taux de 3% de la puissance nominale de la machine qui produit des perturbations qui nuisent à la qualité de l'énergie délivrée et au rendement de la machine.
- ✓ Les batteries de condensateur sont primordiales pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Car le redresseur est unidirectionnel et c'est pour cette raison que l'énergie ne peut pas être fournie par le réseau. [8] [5]

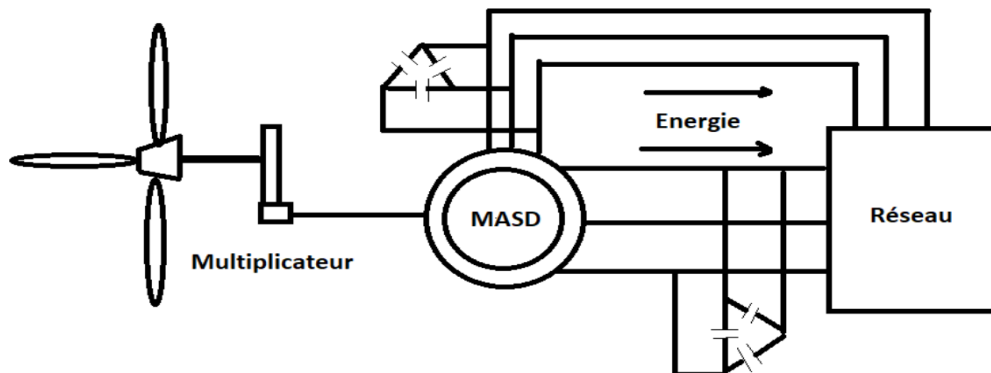


Figure I.11 Génératrice asynchrone double stator dans la chaîne De conversion éolienne.

1.11 Conclusion

Une brève description sur le développement des sources d'énergie renouvelables, des généralités sur la production de l'énergie électrique à partir de la conversion de l'énergie éolienne comme source principale, son historique et son évolution, ont été présentées dans ce chapitre. Dans ce contexte, quelques notions principales sur la technologie éolienne ont été données concernant principalement, la conception des pales, les différents types des éoliennes utilisés et leurs principales différences sur le plan énergétique. Le chapitre suivant, sera consacré à l'étude, modélisation et simulation de la GSAP.

CHAPITRE II

Modélisation Et Simulation De

La GSAP

II.1 Introduction

L'évolution des aimants permanents modernes, qu'ils soient à base d'alliages métalliques ou à terres rares (par exemple du type manico, samarium cobalt, néodyme fer bore ...) leur a permis d'être utilisés comme inducteurs dans les machines synchrones offrant ainsi beaucoup d'avantages : induction de saturation élevée, faible désaimantation, densité massique élevée, énergie maximale stockée plus grande par rapport aux autres types de machines [16]

L'utilisation des aimants permanents a été une vraie révolution dans le domaine de l'utilisation de ces machines, car elle a permis d'éliminer le bobinage rotorique et son excitation ainsi que les balais et les contacts glissants. Ce qui induit moins de maintenance et plus de robustesse pour la machine. Cet avantage a couvert le cout élevé des aimants. [13]

Dans la machine synchrone à aimants permanents MSAP, l'inducteur est remplacé par des aimants. Le champ d'excitation créé par les aimants permanents, présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotorique. Maximale et présente des difficultés de maintenance et des interruptions de fonctionnement. C'est pour cette raison qu'on ait orientée à utiliser des moteurs synchrones a aimant permanents car ils restent le bon choix dû à leurs excellentes caractéristiques dynamiques, à ses faibles pertes ainsi qu'à son important couple massique, qui le rend mieux adapté aux applications industrielles et donc faciliter les commandes en position ou en vitesse. [17] [16] [5]

Après la modélisation dynamique, nous vérifions le comportement dynamique de la machine à travers la simulation numérique.

II.2 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents

Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont des machines à courant alternatif autopilotées, la caractéristique essentielle de ces machines est que leurs vitesses de rotation sont l'image exacte de la fréquence d'alimentation. [18]

En réalité, une machine synchrone à aimants permanents est un convertisseur électromécanique d'énergie réversible. Elle peut fonctionner en mode moteur tout comme en mode générateur. Sa particularité par rapport aux autres machines conventionnelles, réside au

niveau du champ magnétique produit par les aimants permanents au rotor. Mais son bobinage statorique reste identique à celui des autres machines. [17]

II.2.1 Constitution

Comme tout actionneur électrique, la machine synchrone à aimants permanents est constituée d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor). Pour une telle opération, il faut créer un champ magnétique rotatif de deux manières différentes par aimant ou par circuit d'excitation. Ensuite, nous déterminons la position de ce champ pour le rotor, ce qui conduit à la synchronisation du champ magnétique du rotor fixe et du rotor. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques. [19-17]

$$\omega_r = \frac{\omega}{P} \quad \text{II.1}$$

II.2.2 Disposition des aimants dans le rotor

La machine synchrone à aimants constitue d'une partie fixe (stator) et une partie mobile :

Stator : ou l'induit est la partie fixe de la machine, il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de 120° dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe [5]

Rotor : Le rotor peut être à pôles lisses ou à pôles saillants, selon la vitesse de rotation. Pour des vitesses très élevée, la vitesse périphérique du rotor est très élevée, on fait généralement appel aux pôles lisses, pour des raisons de résistance mécanique du rotor et de meilleure répartition et fixation de bobinage sur la surface du rotor. Si la vitesse périphérique du rotor diminue, les MSAP sont alors à pôles saillants de construction plus simple. [20]

Les MSAP peuvent être construites avec plusieurs de configurations rotoriques. Leur classification globale en termes de placement des aimants est le suivant : [21]

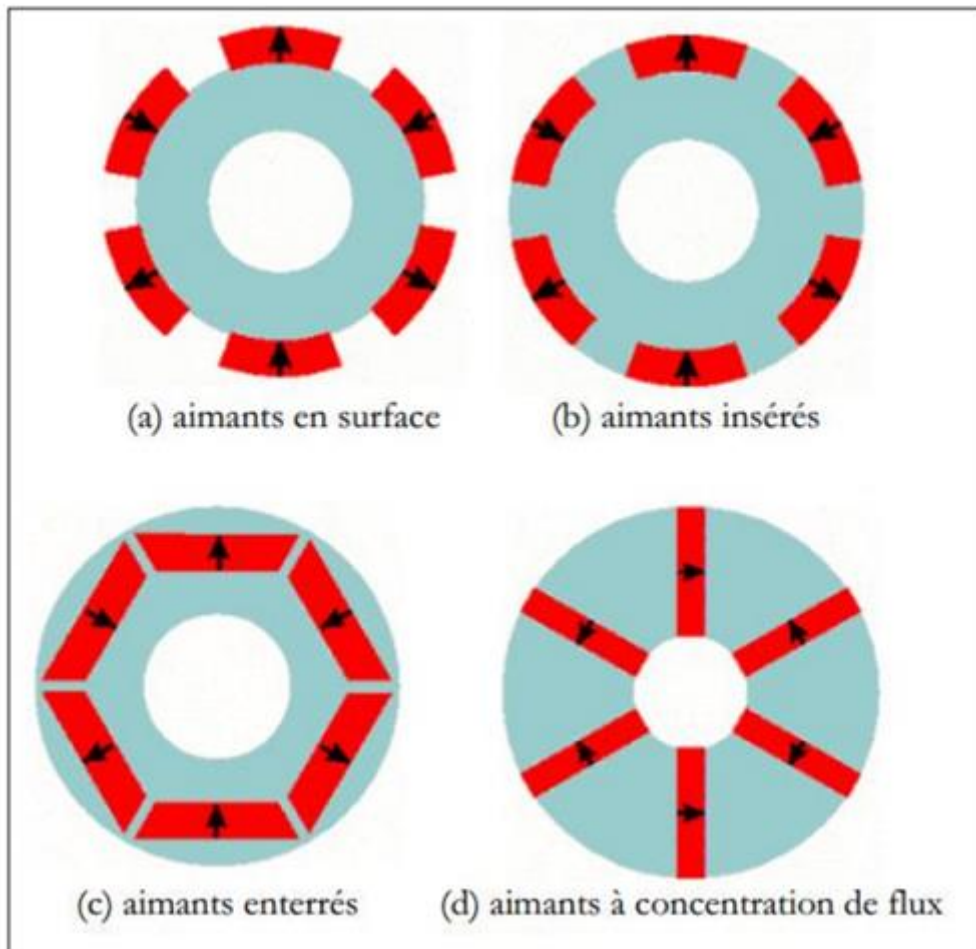


Figure II.1 Différentes structure des rotors des MSAP.

II.2.3 Matériaux pour aimants

On peut distinguer trois grandes catégories de matériaux utilisés pour la réalisation des aimants :

- **Les alnicos** : sont les alliages de fer, d'aluminium, de nickel, et de cobalt. Leur champ rémanent est élevé, mais leur excitation coercitive est faible. Sensibles aux champs antagonistes, leur part de marché est assez réduite et leur coût est moyen. [19]
- **Les ferrites** : sont des composés d'oxyde de ferrique et d'oxyde de strontium ou de baryum, leur champ rémanent n'est pas très élevé, mais leur excitation coercitive est importante, leur faible coût fait que les ferrites occupent aujourd'hui la majorité du marché des aimants. [14]
- **Les composés de cobalt et de terres rares** : comme le samarium. Ces matériaux ont d'excellentes performances techniques. Leur champ rémanent et leur excitation

Coercitive sont élevés, leur inconvénient reste le coût important. [25] [7]

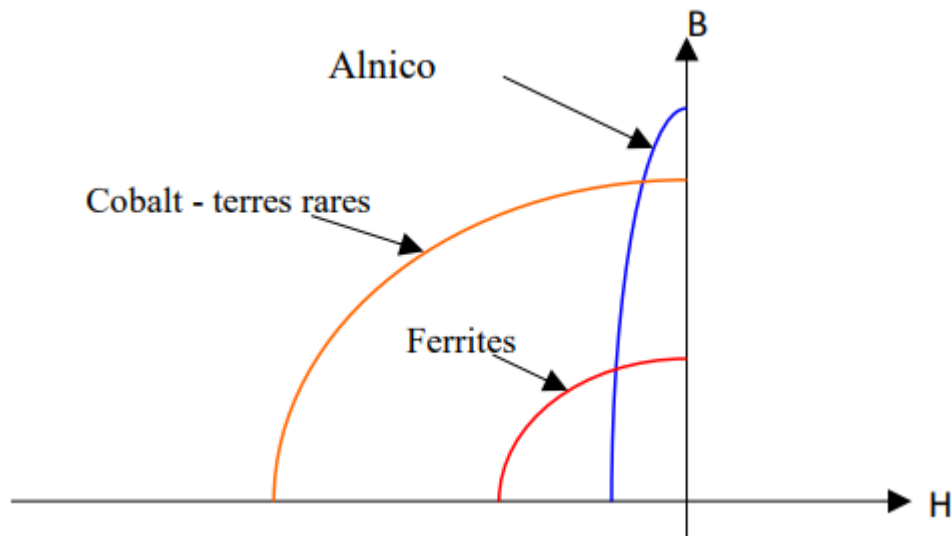


Figure II.2 : Caractéristiques magnétiques de quelques matériaux.

II.3 Domaine d'application de la MSAP

La machine synchrone à aimants permanents est utilisée dans une large gamme de puissance allant de quelques centaines de watts est utilisée largement dans plusieurs applications comme les machines à outils, la robotique, dans des applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation l'entraînement à vitesse variable, et la traction. [23] [7] [14]

- ✓ **Applications aux petites puissances :**
 - Micro Ventilateur
 - Disque Dur
 - Fraise de dentiste
 - Programmeur Mécanique
- ✓ **Applications aux moyennes puissances :**
 - Voiture électrique (Toyota Prius)
 - Machine-outil
 - Robot industrie
- ✓ **Applications aux fortes puissances :**
 - Traction ferroviaire
 - Propulsion navale

II.4 Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone

L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les f.é.m. induites dans ces bobinages provoquent la circulation de courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer, qui tourne à la même vitesse que celle du champ inducteur

Le principe de fonctionnement est basé sur la création d'une variation de flux magnétique par la rotation d'un aimant (nomme rotor) passant devant les faces de trois bobines fixes (appelées stator) alimentées par le réseau, Cette variation provoque l'apparition d'une force électromotrice d'induction dans chacune des bobines, créant ainsi un courant triphasé. [19] [13] [2]

➤ ***Avantages***

La génératrice synchrone à aimants permanents qui offre un grand nombre d'avantages : [14] [21]

- ✓ Cette structure donne à la machine l'avantage de réduire les dimensions et par conséquent un moindre moment d'inertie, ce qui augmente sa fiabilité et sa densité de puissance par unité de volume.
- ✓ Elle possède un C_m élevé au démarrage ce qui permet d'éliminer le multiplicateur de vitesse pour les systèmes éoliens.
- ✓ Facteur de puissance et rendement plus élevés par rapport à la MAS.
- ✓ Suppression des bagues et des ballait, ce qui réduit les problèmes de maintenance.

➤ ***Inconvénients***

- ✓ Technologie coûteuse liée au coût des aimants.
- ✓ Interaction magnétique due au changement de structure.
- ✓ Ondulations de couple.
- ✓ Coût élevé des aimants.

II.5 Eolienne à base de la GSAP

II.5.1 Eolienne à base de la GSAP Connecté au réseau électrique

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts compétitifs. Les machines de ce type sont 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. La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur réseau. Dans ce cas, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que celui connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci. De plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le comportement du réseau. Toutefois, les deux convertisseurs doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, ce qui constitue le principal inconvénient de cette configuration [4].

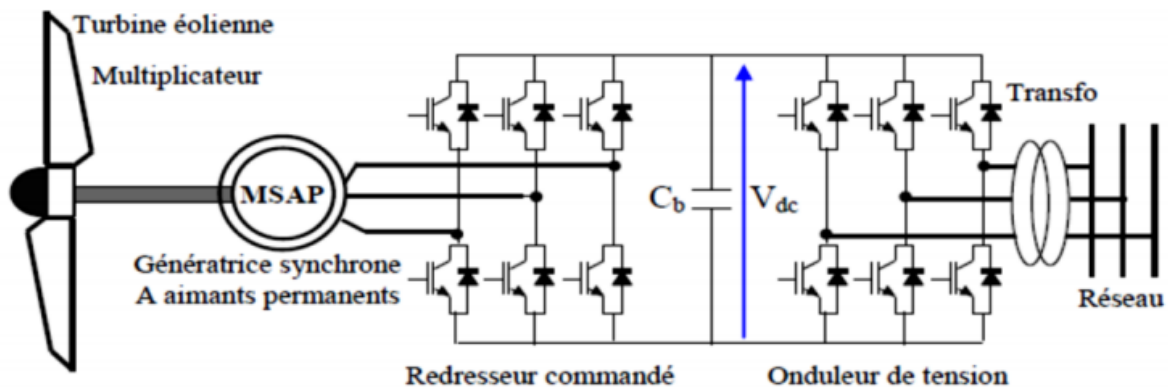


Figure II.3 Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents
À fréquence variable.

II.5.2 Les éoliennes à base de la GSAP en fonctionnement isolé et autonome

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages cités précédemment (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le

circuit d'excitation. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent.

[4]

II.6 Modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent

La machine synchrone à aimants permanents / génératrice (GSAP) joue un rôle clé dans les systèmes de production d'énergie éolienne à entraînement direct pour transformer l'énergie Mécanique en énergie électrique, la modélisation de la GSAP consiste à construire un modèle mathématique de la machine, en traduisant les phénomènes électromagnétiques et mécaniques qui régissent son fonctionnement. Cela permet d'étudier le comportement de différentes variables de manière dynamique et statique et d'utiliser ce modèle dans les simulations. [19] [9]

II.6.1 hypothèses simplificatrices

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (robustesse, maintenance, prix), [6] Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes : [22] [19]

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

II.6.2 équations électriques de la GSAP

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [-R_s] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad \text{II.2}$$

$[V_a V_b V_c]^t$: Vecteur tension de phases statoriques.

$[i_a i_b i_c]^t$: Vecteur courant de phases statoriques.

$[\psi_a \psi_b \psi_c]^t$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

R_s : la résistance des phases statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrones considérés sont connectés en étoile à neutre isolé, d'où la somme instantanée des courants statoriques est nulle, et il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes. [19]

II.6.3 Passage au repère de Park

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor.

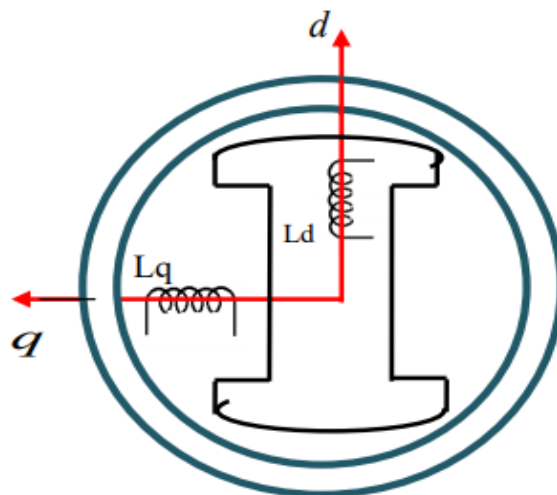


Figure II.4 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.

La transformation de Park consiste à transformer la représentation du moteur triphasé équilibrée à une représentation biphasée équivalente caractérisée par deux axes d-q, nous permettent de passer de repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine. [18][19]

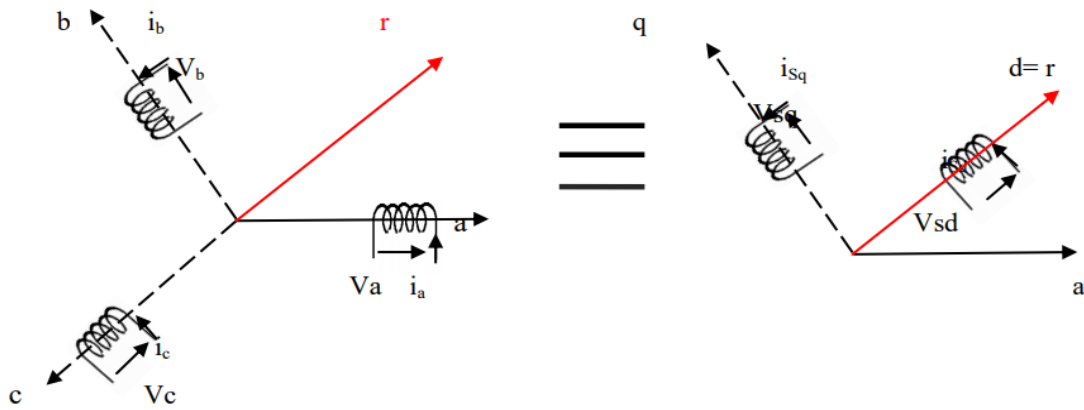


Figure II.5: Passage de repère naturel du stator au repère (d, q) de Park.

A l'aide de transformation de Park on passe de grandeurs réelle (V_a V_b V_c) et (i_a i_b i_c) à leurs composantes (V_d V_q V_0) et (i_d i_q i_0). La matrice de Park s'exprime par :

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

La transformation inverse de Park et donne par :

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

II.6.4 Equations magnétiques

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs ψ_d et ψ_q

Sont fonctions linéaires des courants i_d et i_q :

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad \text{II.5}$$

L_d et L_q sont les inductances directes et en quadrature, et elles sont supposées indépendantes. ψ_f est la valeur crête du flux créé par l'aimant permanent à travers les enroulements statoriques. [5]

En utilisant la convention génératrice ; on inverse le sens des courants i_d et i_q dans les repères de Park et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d + \omega L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q - \omega L_d I_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad \text{II.6}$$

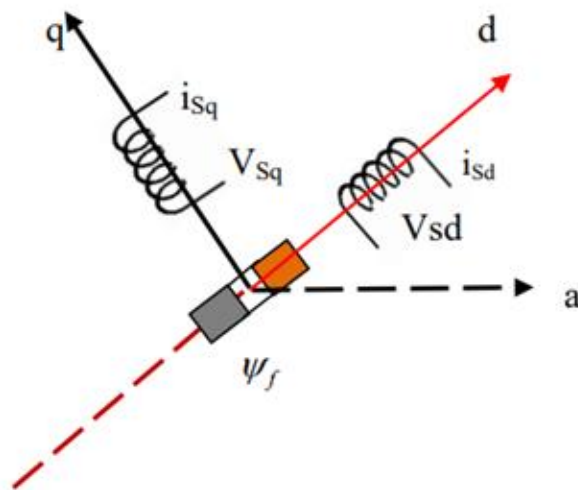


Figure II.6 : Modèle de PARK pour la GSAP.

II.6.5 Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_q - L_d) i_q i_d + i_q \psi_f] \quad \text{II.7}$$

Où :

- ✓ P : nombre de paires de pôles.
- ✓ i_d : courant statorique selon l'axe d.

- ✓ i_q : courant statorique selon l'axe q.
- ✓ L_d : inductance statorique selon l'axe d.
- ✓ L_q : inductance statorique selon l'axe q.
- ✓ ψ_f : flux inducteur.

II.6.6 Equations magnétiques

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

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{II.8}$$

Avec :

C_m : Le couple moteur appliqué sur la génératrice.

$f\Omega$: Le couple de frottement.

J : Moment d'inertie total de la machine.

f : Coefficient de frottement visqueux.

II.7 Modélisations De La GSAP A Vide et en charge

➤ GSAP à vide

$$\begin{cases} I_d = 0 \\ I_q = 0 \end{cases} \quad \text{II.9}$$

Les expressions des tensions et couple deviennent :

$$\begin{cases} I_d = 0 \\ V_q = \omega \Psi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad \text{II.10}$$

La figure (II.7) représente le schéma bloc de simulation de la GSAP à vide.

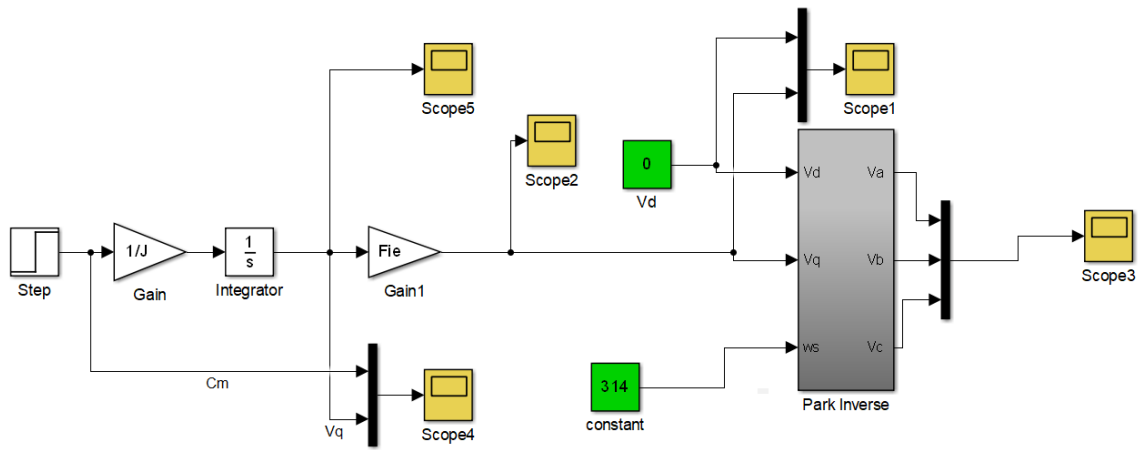


Figure II.7 : Schéma bloc de simulation de la GSAP à vide.

➤ **GSAP en charge**

La génératrice alimente dans ce cas une charge électrique (R_{ch}, L_{ch}). Pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique d'une part, les équations données par (II.6) :

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d + \omega L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q - \omega L_d I_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad \text{II.11}$$

D'autre part, l'application des tensions V_d et V_q sur la charge donne:

$$\begin{cases} V_d = R_{ch} I_d - L_{ch} \frac{d}{dt} I_d + \omega L_{ch} I_q \\ V_q = R_{ch} I_q - L_{ch} \frac{d}{dt} I_q - \omega L_{ch} I_d \end{cases} \quad \text{II.12}$$

En remplaçant les expressions de V_d et V_q dans (II.6), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch}) I_d - (L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} I_d + \omega (L_q + L_{ch}) I_q \\ 0 = -(R_s + R_{ch}) I_q - (L_q + L_{ch}) \frac{d}{dt} I_q + \omega (L_d + L_{ch}) I_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad \text{II.13}$$

En introduisant la transformée de LAPLACE dans les équations ci-dessus, elles deviennent :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_d = \frac{1}{L_d+L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})I_d + \omega(L_q + L_{ch})I_q \\ \frac{d}{dt} I_q = \frac{1}{L_q+L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})I_q - \omega(L_d + L_{ch})I_d + \omega\psi_f \end{cases} \quad \text{II.14}$$

Considérons le flux d'excitation ψ_f comme grandeur de commande, et les courants I_d, I_q comme variables d'état.

On cherche à obtenir un système d'équations sous forme d'équations d'état :

$$[\dot{x}] = [A][x] + [B][v] \quad \text{II.15}$$

$$[x] = [i_d \ i_q]^t, [v] = [0 \ \psi_f]^t \quad \text{II.16}$$

Les équations (II.14), peuvent s'écrire sous la forme matricielle (II.17).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_s+R_{ch}}{L_d+L_{ch}} & \omega \frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} \\ -\omega \frac{L_d+L_{ch}}{L_q+L_{ch}} & -\frac{R_s+R_{ch}}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\psi_f \\ L_q+L_{ch} \end{bmatrix} \quad \text{II.17}$$

On peut écrire les matrices [A] et [B] sous la forme :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s+R_{ch}}{L_d+L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s+R_{ch}}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} \\ -\frac{L_d+L_{ch}}{L_q+L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad \text{II.18}$$

$$[B][v] = \omega \cdot \frac{1}{L_q+L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_f \end{bmatrix} \quad \text{II.19}$$

La figure (II.8) représente le schéma bloc de simulation de la GSAP en charge

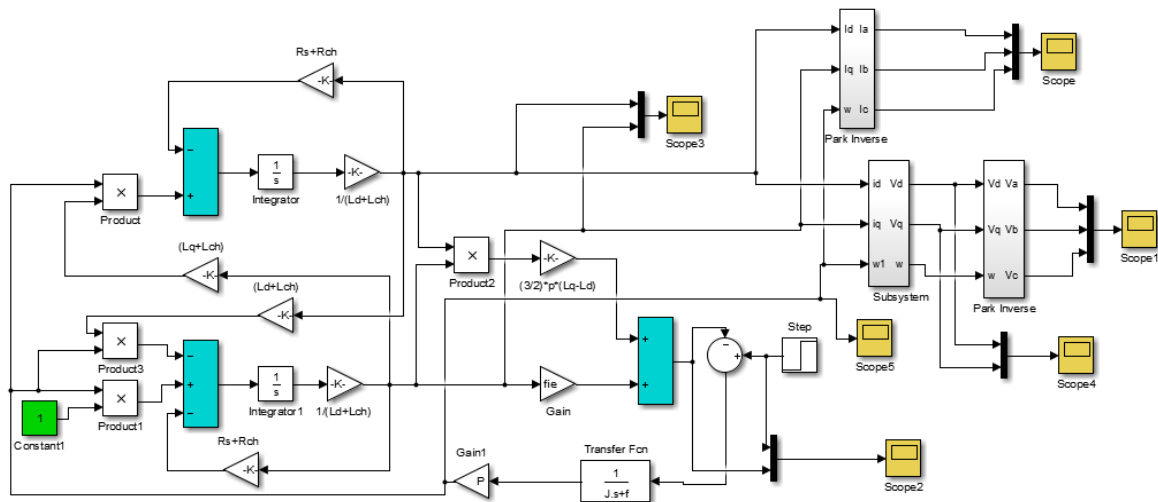
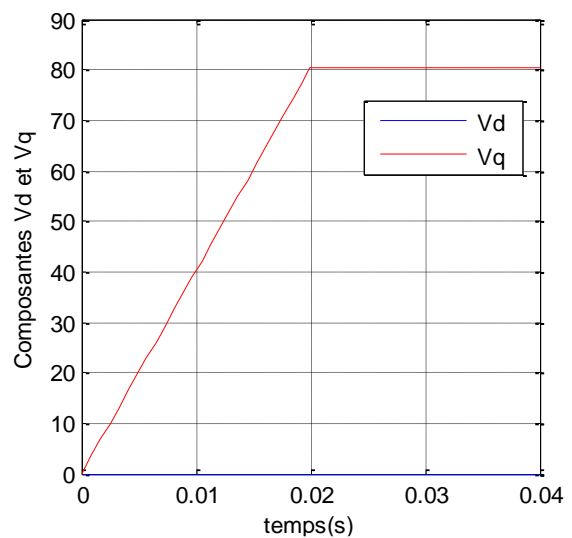
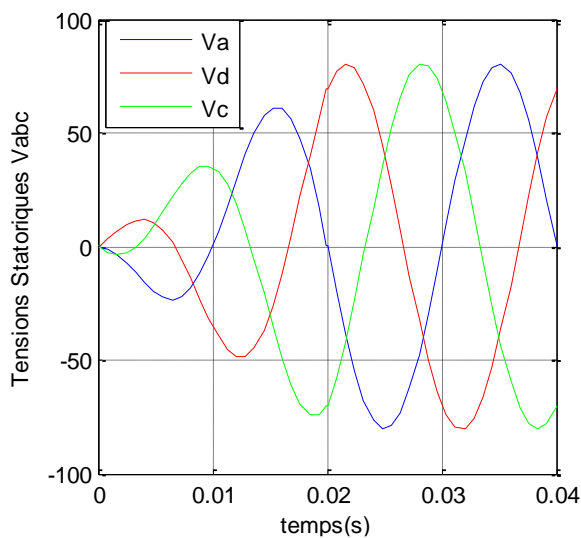


Figure II.8 : schéma bloc de simulation de la GSAP en charge.

II.8 Résultats de simulation de la GSAP

➤ À vide

On fait lancer la génératrice par un couple moteur égale à 6.3 Nm pour une durée de 20(ms), puis, on la laisse tourner librement. Etant donné que le frottement considéré dans ce cas est nul, on constate sur la figure (II.9) que la vitesse est stabilisée à une valeur de 95 (rad/s), alors que les tensions des phases sont parfaitement sinusoïdales en régime stable, avec une valeur crête de 83(V) et une fréquence de 50(HZ).



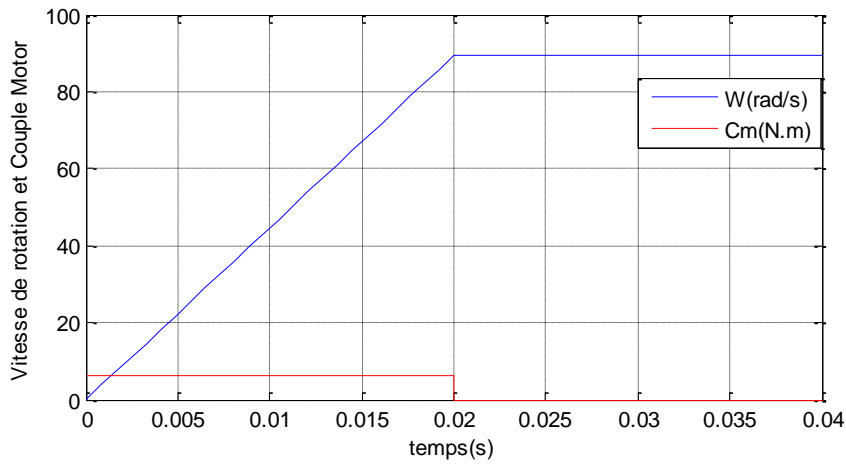
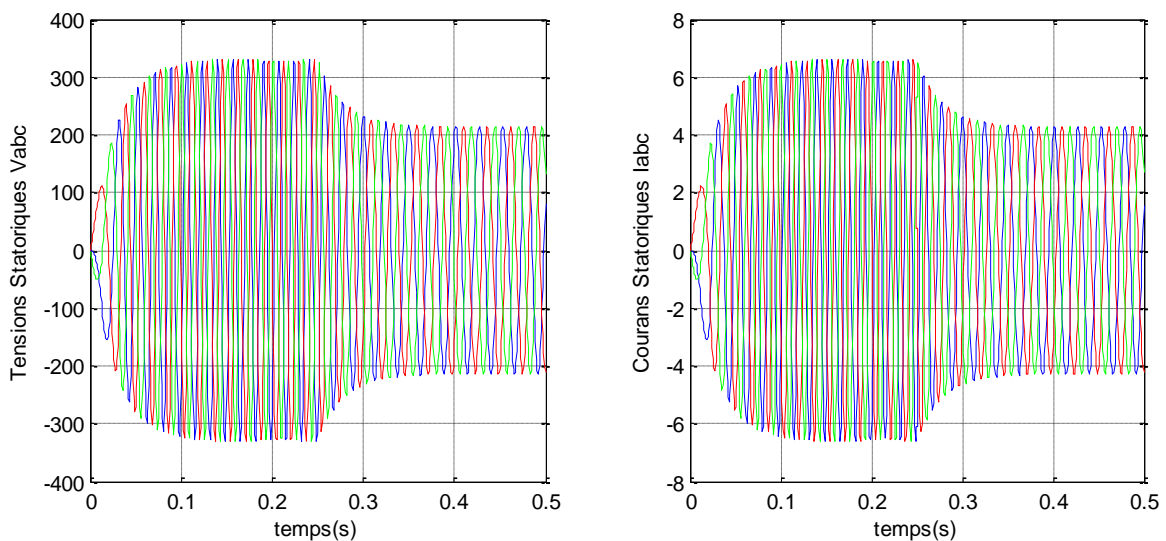


Figure II.9: Résultats de simulation de la GSAP à vide.

➤ **En charge**

Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents sont appliqués. On constate sur la figure (III.10) que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle de synchronisme, ce qui traduit par des faibles fréquences de tension et courant. Ce-ci est expliqué par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant. En diminuant le couple moteur de 6.3 (Nm), à 4 (Nm), la vitesse mécanique varie de 375(rad/s) jusqu'à 245(rad/s). La tension et le courant diminuent.



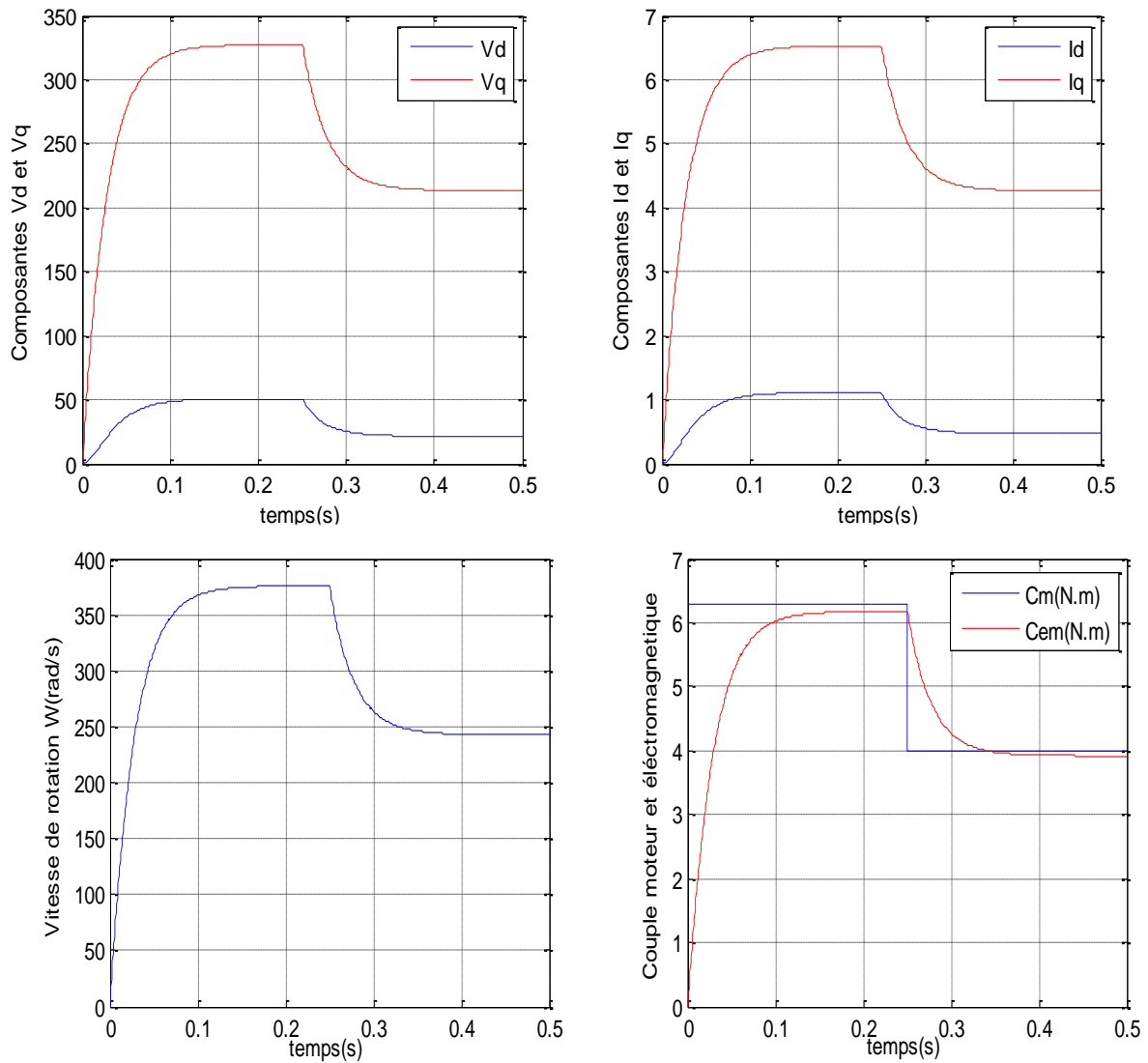


Figure II.10 : Résultats de simulation de la GSAP en charge.

II.9 Conclusion

Une brève description de la machine synchrone à aimants permanents a été présentée dans ce chapitre comportant une comparaison avec la machine synchrone et les différentes structures rencontrées. Nous avons abordé en suite la modélisation de la machine synchrone dans sa structure générale, avant d'arriver à un modèle définitif de la génératrice synchrone à aimants permanents utilisée au cours de ce travail. Ce modèle a été validé par les résultats de simulation aboutis pour une génératrice à vide et en charge.

CHAPITRE III

Modélisation De La Turbine

Eolienne

III.1 Introduction

Une éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [2] [22], tandis que les éoliennes qui pompent directement de l'eau sont parfois dénommées éoliennes de pompage, dont un type particulier est l'éolienne Bollée.

Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique tout en assurant un bon compromis entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique. [9]

Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. [5]

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation et au contrôle de la turbine éolienne. Dans un premier temps, une étude aérodynamique de la turbine est présentée, en vue de connaître ses principaux paramètres de fonctionnement, à savoir les coefficients de puissance (C_p) et de couple, et la limite de BETZ, et le Modélisation d'un système éolien. [2]

III.2 La turbine éolienne

L'aérogénérateur transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation, cette énergie mécanique est alors utilisée pour faire tourner un générateur électrique et produit de l'électricité. Pour l'emploi efficace de cette ressource (le vent) il est indispensable d'étudier les caractéristiques aérodynamiques de la turbine utilisée et le vent lui-même [3]

III.3 Conversion de l'énergie éolienne

III.3.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site.

L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx , de section S , de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v s'écrit : [2] [22] [4]

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dx V^2 \quad \text{III.1}$$

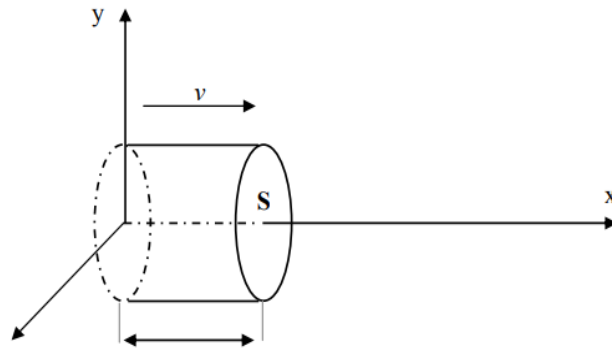


Figure III.1: colonne d'air animée d'une vitesse v .

III.3.2 Modèle du vent

Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien, De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés, L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. [14]

La vitesse du vent en un point de l'espace $vT(t)$ est la résultante de deux composantes, l'une $v_o(t)$ varie lentement et régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné, alors que l'autre $vT(t)$ varie en turbulence en fonction de temps. Son expression est donnée par la formule : [3]

$$v(t) = v_o(t) + vT(t) \quad \text{III.2}$$

L'aéroturbine filtre les fluctuations hautes fréquences. On reconstitue à cet effet un filtre passe bas à la composante de turbulence afin que celle-ci reproduise une caractéristique plus proche de la réalité dont la fonction de transfert (G_f) est donnée par la formule (II. 3)

$$G_f = \frac{1}{1+\tau.s} \quad \text{III.3}$$

La valeur de la constante de temps dépend du diamètre du rotor et également de l'intensité de turbulence du vent et de la vitesse du vent moyenne ($\tau= 0.11375s$)

Avec : $\tau = \gamma \cdot (R_t/V_{moy})$.

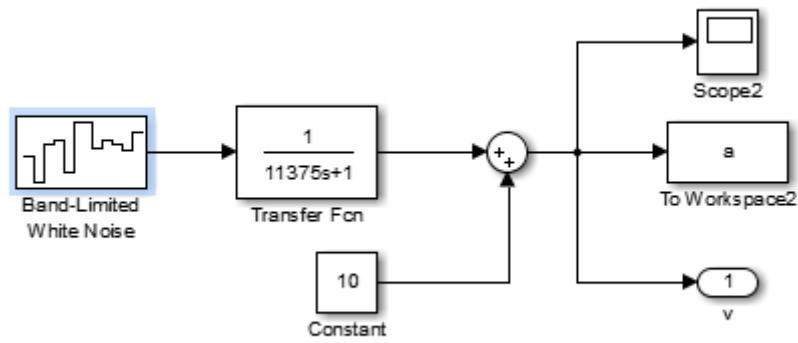
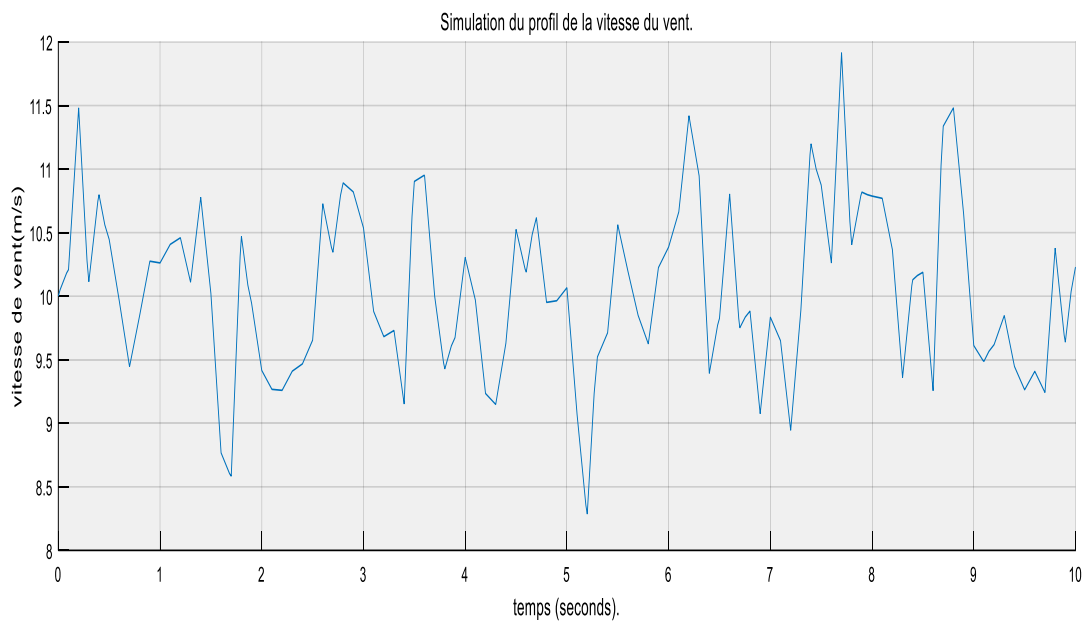


Figure III.2: Simulink de vitesse de vent.

La figure suivante représente une séquence de vent générée par le modèle Simulink de la Figure. III.3 avec une vitesse moyenne de vent $v_0(t)=10\text{m/s}$.



FigureIII.3 : Simulation du profil de la vitesse du vent.

III.3.3 Loi de BETZ

La loi de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par l'unité de temps (seconde)

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la (figure III.4) sur lequel on a représenté la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et la vitesse 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 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 .

Soit $\frac{V_1+V_2}{2}$ [6]

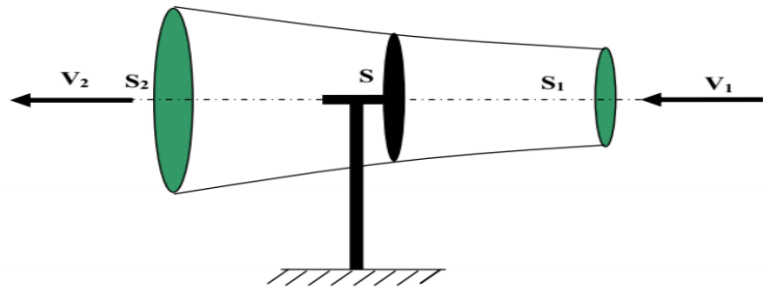


Figure III.4 : Tube de courant autour d'une éolienne [3].

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface, et la vitesse moyenne [3-4]

$$m_0 = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 - V_2)}{2} \quad \text{III.4}$$

La puissance récupérable P est la puissance réelle extraite par le rotor des pales qui signifie la différence des puissances du vent en amont et en aval

$$P_t = \frac{m_0 \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad \text{III.5}$$

Soit en remplaçant m_0 son expression dans (III.5) :

$$P_t = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 - V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad \text{III.6}$$

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface S est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant $V_2 = 0$ dans l'expression (III.6) : [10-3-24]

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad \text{III.7}$$

- ρ est la densité de l'air (approx. 1.22 kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15°C).
- S est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.
- V est la vitesse du vent.

III.3.4 Coefficient de puissance C_p

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent (récupérable) et la puissance totale théoriquement disponible [3-22]

$$C_p = \frac{P_T}{P_V} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right) \cdot 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad \text{III.8}$$

Le coefficient de puissance présente un maximum de $\frac{16}{27}$ soit 0.59 C'est cette limite théorique Appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent Donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant la vitesse relative est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. [3-4]

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_T}{V} \quad \text{III.9}$$

Avec :

- R_T : Rayon de la surface balayée en m.
- V : Vitesse de vent en m/s.
- Ω_t : Vitesse de rotation avant multiplicateur en rad/s.

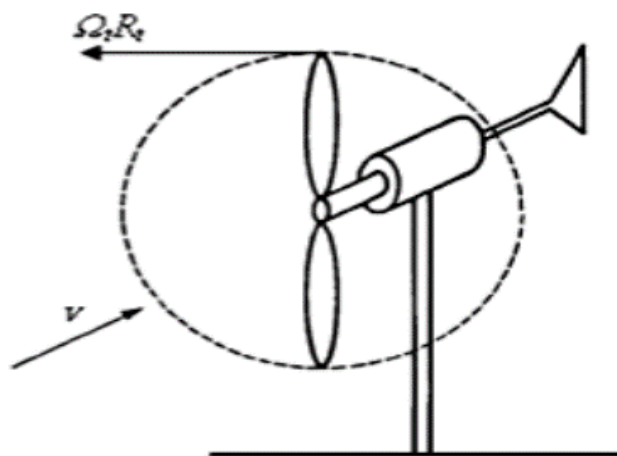


Figure III.5 : Vitesse de vent (v) et vitesse tangentielle de l'aube ($\Omega_t R_t$). [25]

Dans notre travail on utilise cette formule du coefficient de puissance en fonction de la

vitesse relative λ et l'angle de calage β

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.167(\beta - 2)) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2). \quad \text{III.10}$$

III.3.5 Coefficient de couple

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle. [22]

En combinant les équations (III.7), (III.8), et (III.9), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par : [4-22]

Avec :

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad \text{III.11}$$

D'où l'expression du couple de la turbine éolienne :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_T}{V_1} \quad \text{III.12}$$

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda V} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 V^2 \quad \text{III.13}$$

La valeur du coefficient de couple est déterminée par :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_t}{\frac{1}{2} \rho S_t R_t V^2} \quad \text{III.14}$$

III.3.6 Courbes caractéristiques des turbines éoliennes

En général, les turbines disposent d'un système d'orientation des pales destiné à limiter la vitesse de rotation.

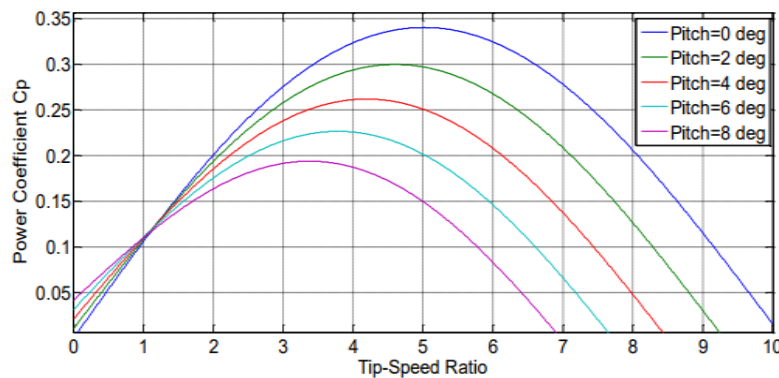


Figure III.6 Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ .

Les courbes caractérisant les turbines éoliennes sont décrites par les coefficients de puissance C_p et de couple C_m en fonction de la vitesse spécifique λ . [4]

III.3.7 Techniques d'extraction du maximum de la puissance (MPPT)

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est une courbe non linéaire en forme de « cloche », Pour chaque vitesse du vent, le système doit atteindre sa puissance maximale qui correspond à sa vitesse de rotation optimale, [4] Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs éoliens à travers une électronique de puissance permettant de maximiser l'efficacité énergétique du système à travers la variation de la vitesse du vent. [2]

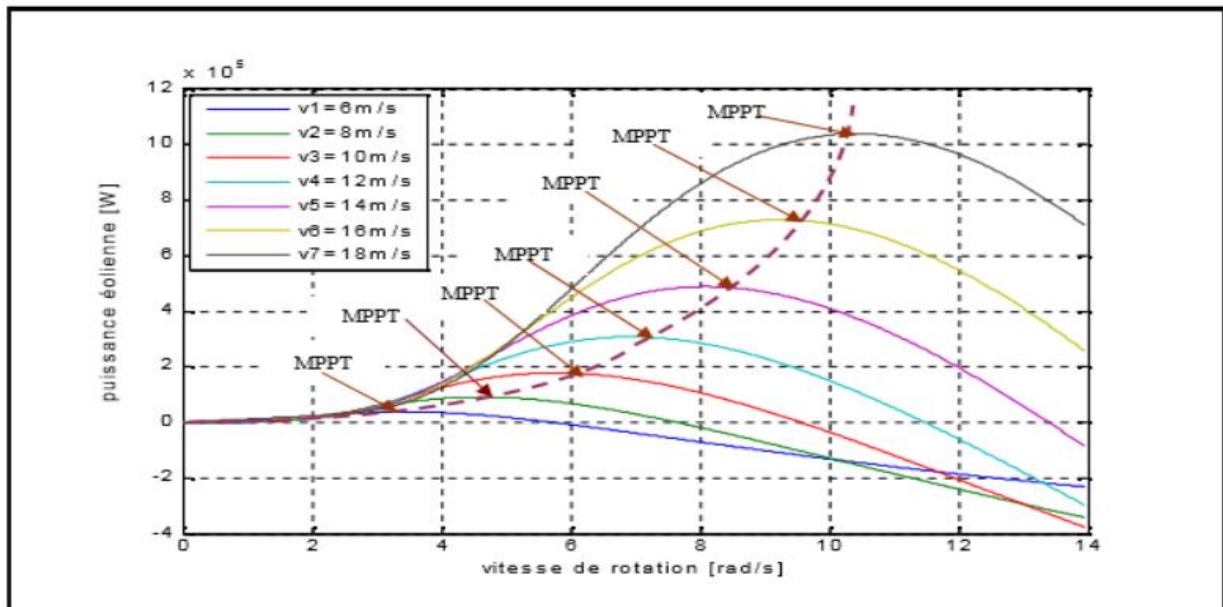


Figure III.7 : Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse de vent.

Par exemple, la figure II.7 montre les extrema que poursuit la MPPT d'une éolienne de type tripale à vitesse du vent variable : la courbe de puissance en forme de cloche, typique des éoliennes et donnée pour chaque vitesse du vent, présente un point de puissance maximale. De plus en plus souvent, les génératrices sont donc reliées à un convertisseur électronique de puissance contrôlé qui permet de réaliser cette fonction.

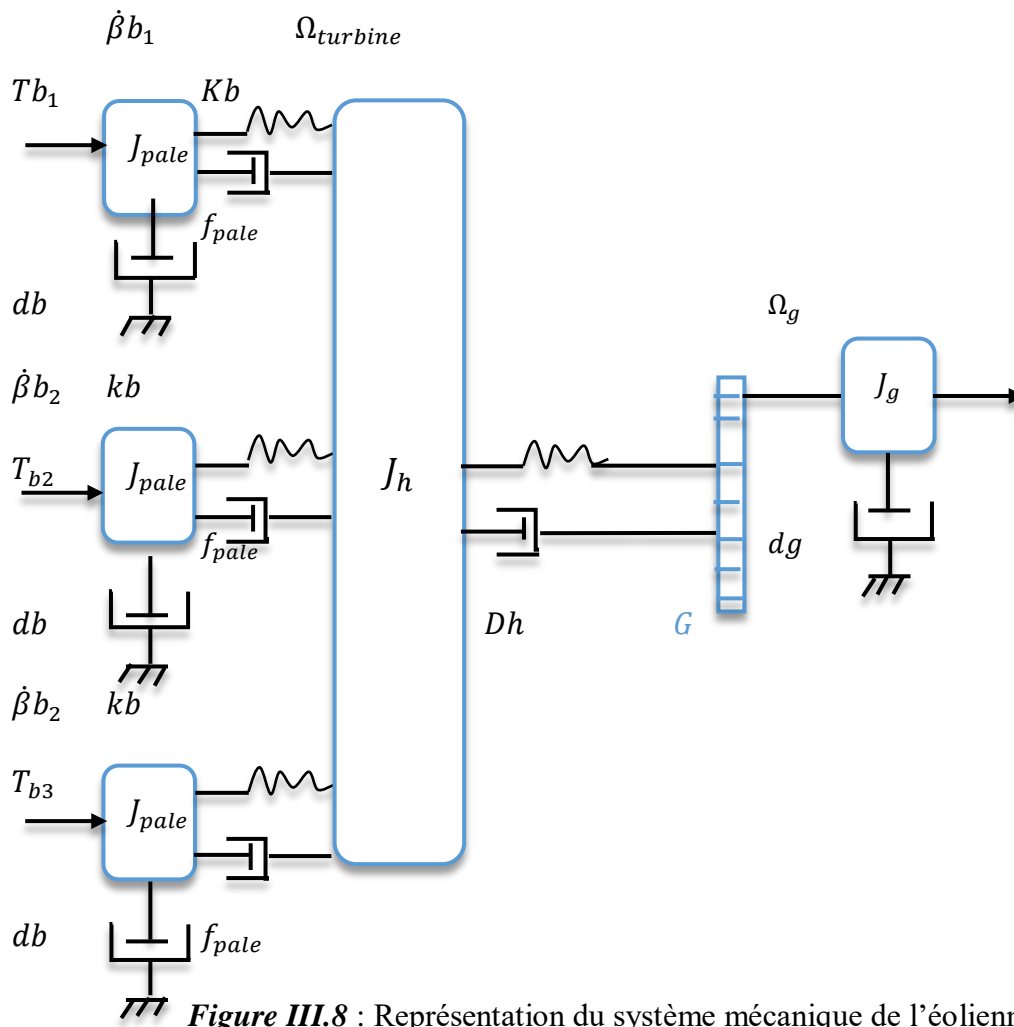
De nombreux concepts ont été introduits pour parvenir à poursuivre efficacement le point de puissance maximum pour le « grand éolien ». [2]

III.4 Modélisation d'une éolienne

III.4.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, et électrique. Et les facteurs déterminant la puissance mécanique, comme la vitesse du vent, la dimension, et la forme de la turbine. [13]

Un modèle dynamique rassemblant tous ces paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine, et le recours à la modélisation est devenu une nécessité pour contrôler ces performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues. Ceci permet de déduire que chaque partie de cet ensemble subit trois contraintes à savoir sa propre inertie, le frottement et la contrainte élastique. D'une manière générale l'arbre de la turbine est solidaire d'un multiplicateur de vitesse, qui, à son tour est lié à l'arbre de la génératrice. et peut être représenté comme illustré sur la figure II.8, [22-24]



- ✓ Trois pales considérées de conception identique et ayant les mêmes paramètres à savoir l'inertie J_{pale} , élasticité K_b , et coefficient de frottement db . Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support J_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées $\beta_{b1}, \beta_{b2}, \beta_{b3}$. Chaque pale reçoit une force Tb_1, Tb_2, Tb_3 , qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée
- ✓ 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 multiplicateur de vitesse, de gain G .
- ✓ Le rotor de la génératrice possède :
 - une inertie J_g
 - un coefficient de frottement d_g

Ce rotor transmet un couple C_g à la génératrice électrique et tourne à une vitesse Ω_{mec} .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($Tb_1=Tb_2=Tb_3$) 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 par la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air d_b est très faible et peut être ignoré. De même, les pertes par frottement côté turbine sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. [13-24-22-16]

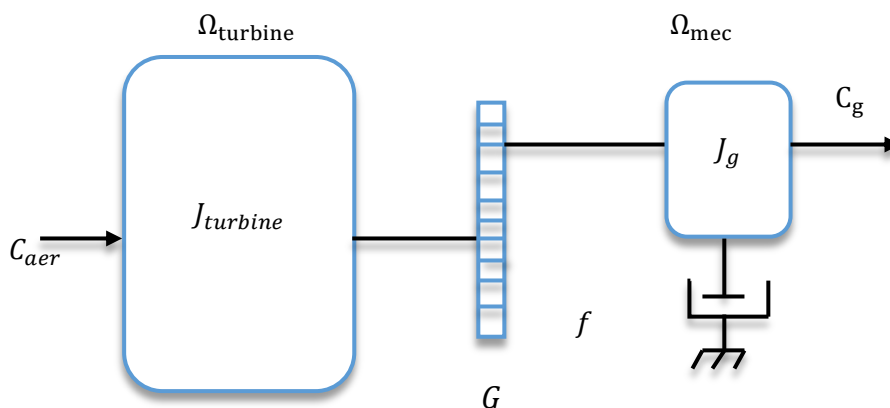


Figure III.9 : Schéma mécanique équivalent simplifié de la turbine éolienne.

III.4.2 Modèle de la turbine

Les variables d'entrée et sortie de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit :

- 1-La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
- 2- Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
- 3-La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales, et l'angle de calage.

Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les quantités d'entrée précédentes. [14-22]

III.4.3 Bilan des forces sur une pale

La figure II.10 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur \vec{V} . Le vecteur \vec{V}_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée \vec{V}_{res} . L'action du vent sur la pale produit une force \vec{F}_{res} qui se décompose en une poussée axiale \vec{F}_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation \vec{F}_{rot} qui produit Effectivement le déplacement.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée.

Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale. [25]

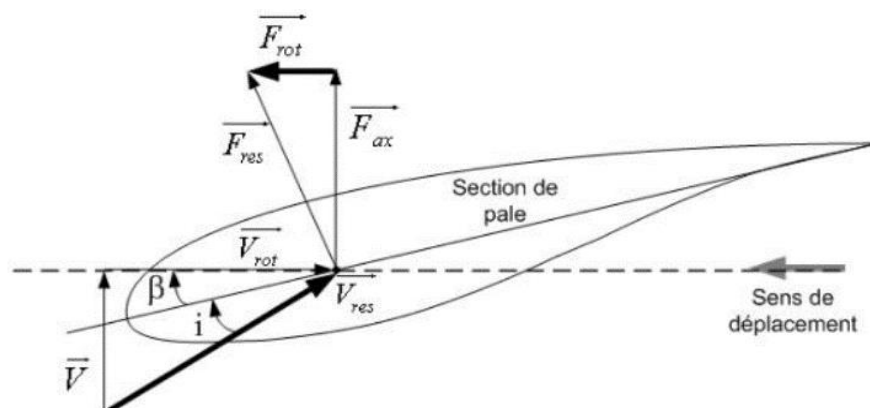


Figure III.10 : Bilan des forces sur une pale.

II.4.4 Modèle de multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à la vitesse de la génératrice, avec un gain G ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes : [9-3]

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_t} \quad \text{III.15}$$

$$C_{turbine} = \frac{C_{mec}}{G} \quad \text{III.16}$$

Donc :

$$C_g = \frac{P_T}{\Omega_g} \quad \text{III.17}$$

C_t :est la vitesse de rotation disponible sur l'axe de la turbine (rad / s).

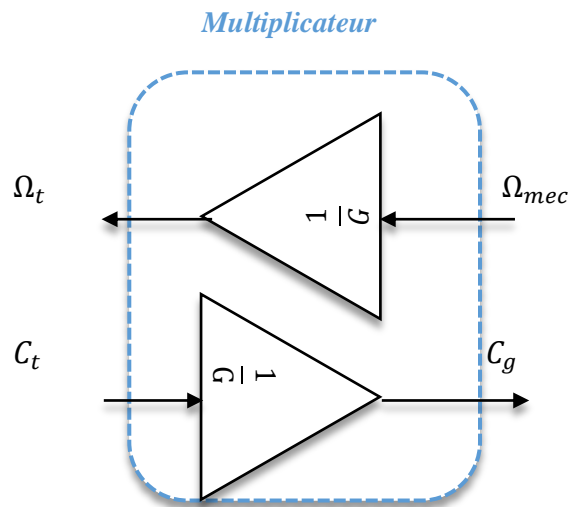


Figure III.11: Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse. [3]

III.4.5 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est transmise à l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice. [2-25]

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad \text{III.18}$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique totale C_{mec} appliquée au rotor : [6-4]

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad \text{III.19}$$

Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{mec} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad \text{III.20}$$

C_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

C_g : Le couple issu du multiplicateur.

C_f : Le couple résistant dû aux frottements. $C_f = f \cdot \Omega_{mec}$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad \text{III.21}$$

A partir des équations précédentes, nous pouvons établir le modèle de la turbine dont le schéma Bloc est donné sur la figure ci-dessous. Avec comme entrées de la turbine ;

- ✓ La vitesse du vent v ,
- ✓ L'angle d'orientation des pales β ,
- ✓ et la vitesse de rotation de la turbine Ω_T .

III.4.6 Modélisation d'une éolienne à vitesse variable

Le modèle de l'éolienne étudié dans ce mémoire est le modèle à une masse, constitué d'une turbine éolienne comprenant trois (3) pales de longueur R à axe horizontal, à vitesse variables et régulation pitch entraînant une génératrice synchrone à aimants permanents GSAP à travers un multiplicateur de vitesse de gain G comme il est représenté sur la figure III.12

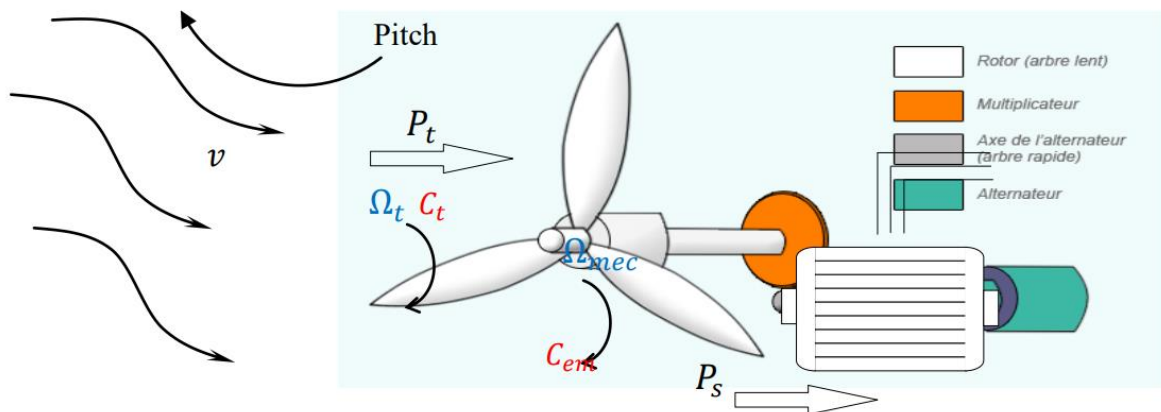


Figure III.12 : Schéma de la turbine éolienne.

III.4.7 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Etant donné que la technique précédente de maximisation de puissance repose sur la connaissance précise de la vitesse du vent, ce qui rend le réglage de la vitesse de rotation de la turbine relativement difficile, et dégrade les puissances captées avec des mesures erronées de cette vitesse de vent. Le recours au control des éoliennes sans asservissement de vitesse est devenu une nécessité pour la plupart des constructeurs. Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent soit estimé et par conséquent la vitesse de rotation de la turbine varie très peu en régime permanent [6-16].

- Le couple mécanique exercé sur l'arbre est considéré nul $C_{mec} = 0$.
- Le couple résistant dû aux frottements peut être négligé $C_f = 0$.

. Le comportement dynamique de la turbine est décrit donc par l'équation statique :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f = C_g - C_{em} = 0 \quad \text{III.22}$$

L'équation (III.24) donne :

$$C_{em} = C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad \text{III.23}$$

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

$$C_{em_ref} = \frac{C_{aer_est}}{G} \quad \text{III.24}$$

Le couple aérodynamique estimé est déterminé par l'expression :

$$C_{aer_estime} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-estime}} V_{estime}^3 \quad \text{III.25}$$

$\Omega_{turbine-estime}$: Est la vitesse estimée de la turbine, elle est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique.

$$\Omega_{turbine-estime} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad \text{III.26}$$

V_{estime} : est la valeur estimée de la vitesse du vent, elle peut être donné par l'expression (III.27).

$$V_{estime} = \frac{\Omega_{turbine-estime} \cdot R}{\lambda} \quad \text{III.27}$$

En utilisant les formules du (III-23), au (III-27), on obtient une expression globale du couple électromagnétique de référence :

$$C_{em_ref} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad \text{III.28}$$

Pour que la puissance extraite soit maximale, on associe au grandeur λ sa valeur optimale λ_{opt} correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax} . La valeur du couple électromagnétique de référence est alors réglée à la valeur maximale suivante :

$$C_{em_ref} = \frac{1}{2} \frac{C_{p\ max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \tag{III.29}$$

En mettant :

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \frac{C_{p\ max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \frac{1}{G^3} \tag{III.30}$$

L'expression (III-29) peut s'écrire sous la forme :

$$C_{em_ref} = K_{opt} \cdot \Omega_{mec}^2 \tag{III.31}$$

III.4.8 Schéma bloc du modèle de la turbine

On s'aidant de modèle mathématique de la turbine obtenu précédemment, on procède à la réalisation de schéma bloc du modèle de la turbine qu'on va exploiter dans la simulation sur Matlab/Simulink. [6]

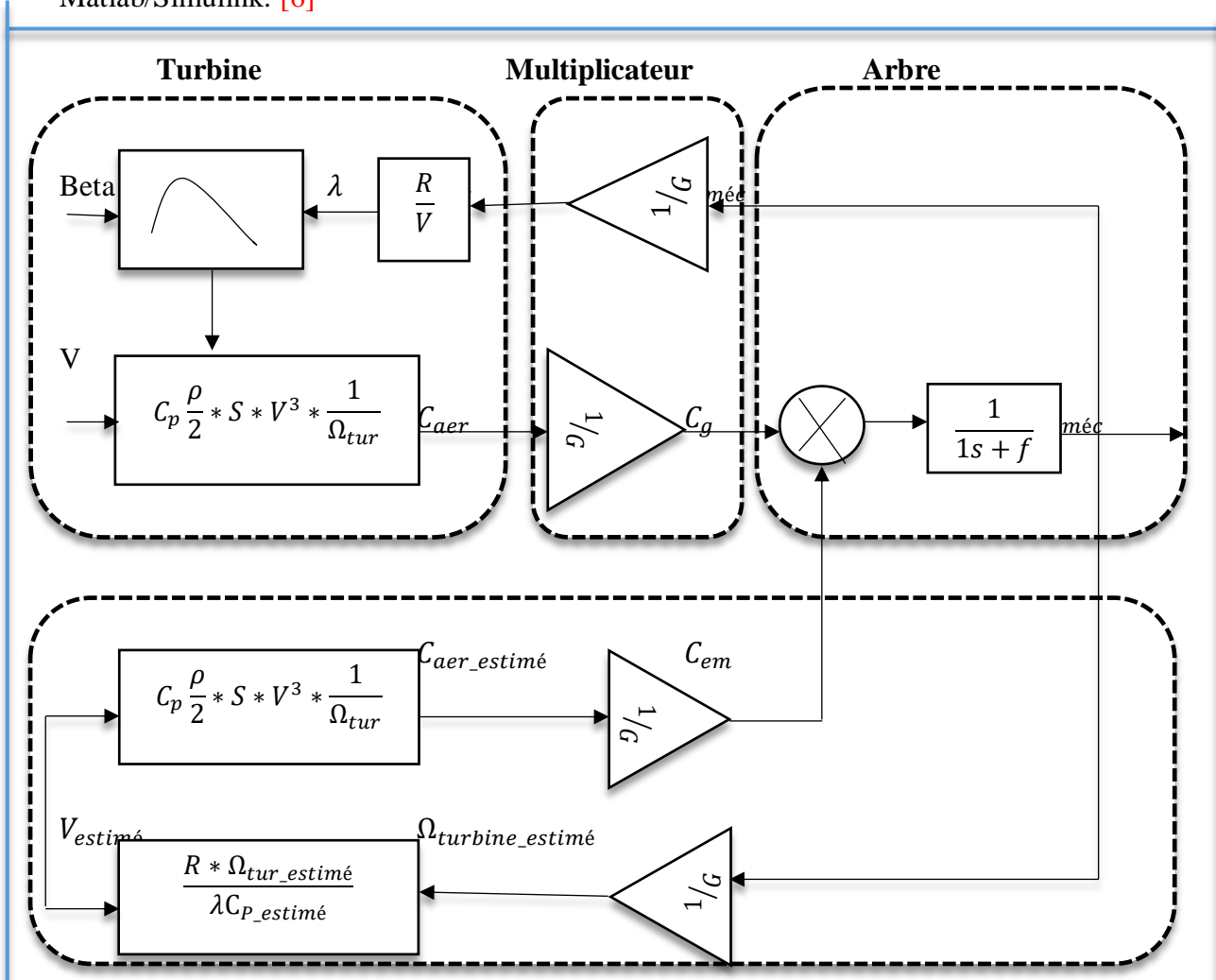


Figure III.13 : Schémas bloc de modèle de la turbine sans asservissement de la vitesse.

La turbine génère le couple aérodynamique, qui est appliqué au multiplicateur. Ce dernier transforme :

- La vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de rotor de la machine et en couple de multiplicateur.
- Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique.

III.5 Simulation de la turbine éolienne

Les performances de la turbine éolienne à vitesses variables et à réglage par orientation de pales, sont déterminées par les caractéristiques des courbes reliant le coefficient de puissance, la vitesse spécifique, et l'angle de calage. Ces courbes peuvent être obtenues à partir des relevés réels réalisés sur différentes catégories d'éoliennes, ou par des formules non linéaires. [22]

Le coefficient de puissance C_p est souvent issu de mesures pratiques, qui dépendent de la vitesse spécifique λ et l'angle de calage β il est calculé à partir de l'équation suivante [14]

$$C_p = C_1(C_2 - C_3\beta^x - C_4)e^{-(C_5/\lambda)} + C_6\lambda \tag{III.32}$$

β : est l'angle d'orientation.

λ : est la vitesse spécifique.

Les valeurs des C_i choisies selon sont :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \tag{III.33}$$

$$C_1 = 0.5 ; C_2 = 116 ; C_3 = 0.4 ; C_4 = 5 ; C_5 = -21 ; C_6 = 0.0068 \tag{III.34}$$

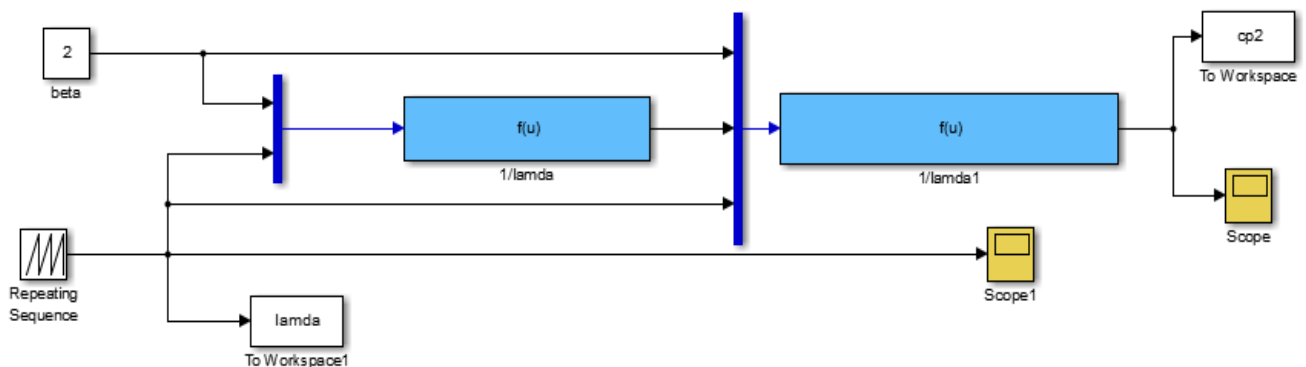


Figure III.14: Schéma bloc de la turbine.

La figure III.15 montre les différentes courbes obtenues pour plusieurs angles de calage. Nous constatons que la vitesse spécifique ait relativement une large gamme pour un angle de calage de 2 degré. Ceci représente un avantage pour les turbines éoliennes destinées pour fonctionner avec une large gamme de vitesses de vent. Avec l'augmentation de l'angle de calage, la vitesse spécifique et le coefficient de puissance diminuent considérablement.

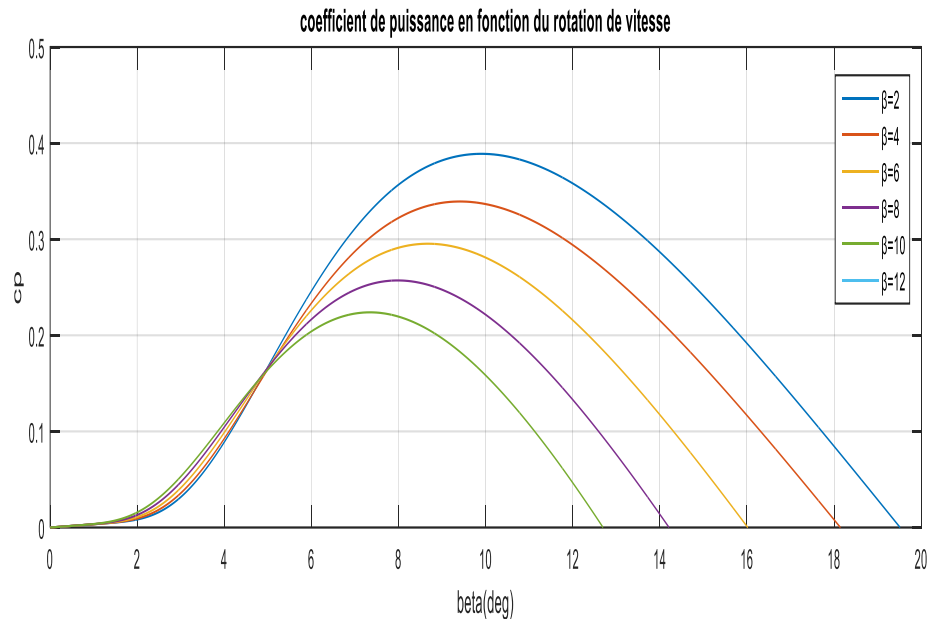


Figure III.15: Les courbes de $C_p(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β (deg).

La valeur optimale du coefficient de puissance est obtenue $\lambda_{opt}=10$ et vaut $C_p=0.39$

La Figure III.16 illustre la variation de la puissance produite pour différentes vitesses de vent, on peut observer que la puissance garde une valeur limite pour les grandes vitesses de vent malgré que la turbine soit capable de produire plus de puissance. Cette limite de puissance est utilisée pour éviter une éventuelle survitesse du rotor, et protéger ainsi toute la chaîne de production éolienne.

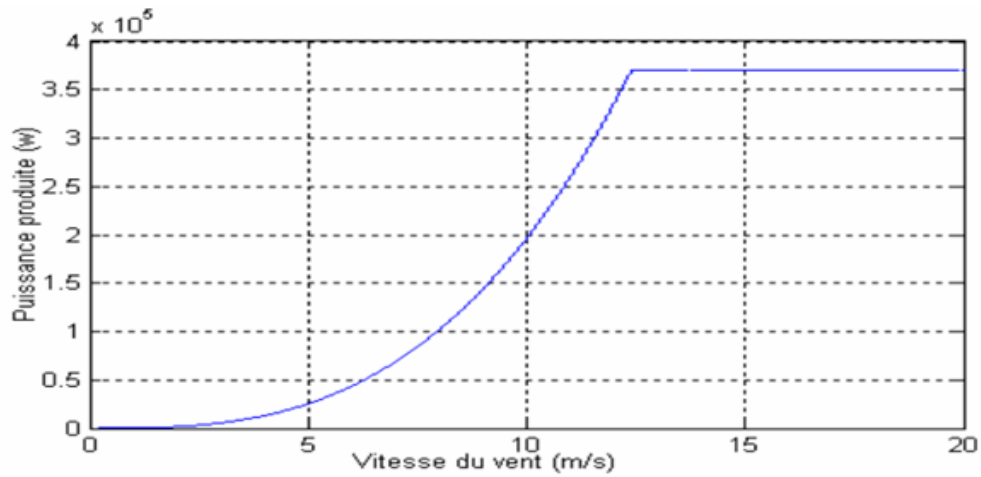


Figure III.16: Variations de la puissance produite pour différentes vitesses de vent.

III.6 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre la modélisation du premier élément de la chaîne de conversion d'énergie éolienne qui est la turbine.

L'énergie mécanique issue de la turbine serait appliquée à l'arbre de la génératrice afin de produire de l'énergie électrique. Nous avons donné aussi une vue sur les stratégies de commande d'une turbine pour extraire le maximum d'énergie (technique MPPT).

CHAPITRE IV

Commande Vectorielle De La

GSAP

IV.1 Introduction

La commande des machines à courant alternatif est difficile du fait qu'il existe un couplage complexe entre le flux et le couple. Cette difficulté a encouragé le développement de plusieurs techniques de commande afin que ces machines se comportent comme des machines à courant continu, caractérisées par un découplage naturel du flux et du couple. Parmi ces techniques de commande, la commande vectorielle. En 1971, BLASCHE a proposé une théorie de commande de champ orienté qui permet d'assimiler le comportement de la machine synchrone à aimants permanents à une machine à courant continu à excitation séparée, ou la force magnétomotrice de l'induit établie un angle de 90° avec l'axe du flux inducteur, et ceci, quelle que soit la vitesse de rotation. [5] [22]

Ce chapitre présente la commande vectorielle de la GSAP, ensuite nous développons un modèle de simulation sur Matlab-Simulink.

IV.2 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle :

La commande vectorielle pour machine synchrone ont été développées afin d'améliorer les performances en régime dynamique.

IV.2.1 Avantages de la commande vectorielle

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

IV.2.2 Inconvénients de la commande vectorielle

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

- ✓ Très chère (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse.) ;
- ✓ Faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante de temps rotorique ;
- ✓ Nécessité d'un modulateur pour la commande rapprochée de l'onduleur qui provoque des retards, surtout à basse fréquence de modulation (grande puissance). Ces retards sont

responsables d'une augmentation du temps de réponse en couple, ce qui pénalise les variateurs utilisés en traction ;

- ✓ Présence de transformations de coordonnées dépendant d'un angle Θ_s estimé;
- ✓ La vitesse de rotation intervient explicitement dans l'algorithme de commande. Quand on ne mesure pas cette vitesse (variateur sans capteur de vitesse), les erreurs sur l'estimée de cette vitesse dégradent les performances du variateur.

IV.3 Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle est une méthode qui traite la technique de contrôle des machines alternatif. [6]. Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes (I_{sd} , I_{sq}) en quadrature dans un référentiel lié au champs tournant de façon que l'une des composantes (I_{qs}) commande le couple et l'autre (I_d) commande le flux [16]. L'idée fondamentale de cette stratégie est d'assimiler le comportement de la machine synchrone à celui d'une machine à courant continu, c'est-à-dire un modèle linéaire et découplé ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique, [18] il est nécessaire de maintenir le courant id nul et de réguler la vitesse ou la position par le courant iq via la tension Vd. Physiquement, cette stratégie revient à maintenir le flux de réaction d'induit en quadrature avec le flux rotorique produit par le système d'excitation [5]

La forme du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p[(L_d - L_q)i_d i_q + i_q \psi_f] \quad \text{IV.1}$$

Parmi les stratégies de commande, on utilise souvent celle qui consiste à maintenir la composante id nulle. Cette stratégie permet de l'obtention d'une loi de commande simplifiée avec une relation linéaire entre le couple et le courant. On retrouve alors une caractéristique similaire à celle de la machine à courant continu a excitation séparée [8]

L'expression du couple devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p\psi_f i_q \quad \text{IV.2}$$

Comme le flux est constant, le couple est directement proportionnel à i_q

Donc :

$$C_{em} = K_t i_q \quad \text{IV.3}$$

Le couple est directement proportionnel à i_q .

Avec :

$$K_t = \frac{3}{2} p \psi_f \quad \text{IV.4}$$

Nous constatons que l'équation du couple est analogue à celle du couple de la machine à courant continu à excitation séparée et qu'un contrôle indépendant du couple et du flux est établi.

Ce dernier est alors réglé en agissant sur le courant en quadrature i_q . Pour pouvoir appliquer la commande vectorielle nous devons poser une référence $i_{dref} = 0$.

Alors :

$$C_{eref} = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} \quad \text{IV.5}$$

IV.4 Stratégie de la commande vectorielle de la GSAP

En convention génératrice, on inverse le sens des courants i_{sd} et i_{sq} de la MSAP on aura donc les équations électriques de la GSAP comme suit :

$$\begin{cases} v_d = -(R_s i_d + l_d \frac{di_d}{dt}) + \omega l_q i_q \\ v_q = -(R_s i_q + l_q \frac{di_q}{dt}) - \omega l_d i_d + \omega \varphi_f \end{cases} \quad \text{IV.6}$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = c_{em} - c_r - f \cdot \omega_r$$

Avec: $\omega = P \omega_r$

$$c_{em} = \frac{3}{2} P [(l_d - l_q) I_d \cdot I_q + \omega_{sf} \cdot I_q] \quad \text{IV.7}$$

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

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

La machine étudiée est à pôles lisses, son couple électromagnétique est maximal lorsque le courant statorique dans le référentiel de *Park* est maintenu calé sur l'axe q

($I_s = I_q$). Ceci revient à imposer la composante directe du courant nulle qui a pour effet la diminution des pertes joule. Le système d'équations (II.2) devient :

$$\begin{cases} V_d = L_q \omega I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{dI_q}{dt} + \psi_f \omega \end{cases} \quad \text{IV.8}$$

Et le couple déviant :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \cdot \psi_f \cdot I_q \quad \text{IV.9}$$

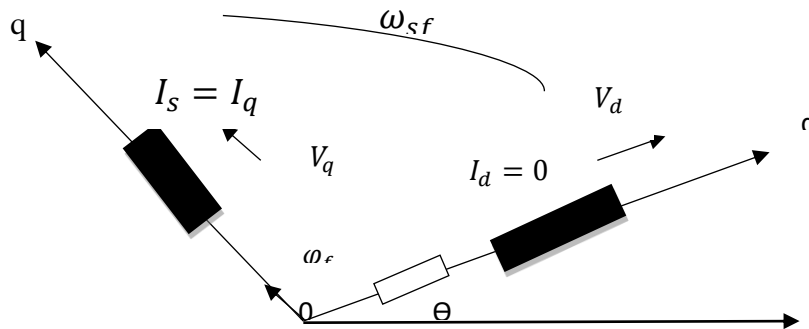


Figure IV.1 : Principe de la commande vectorielle

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation [18]. Cette dernière méthode consiste à faire ajouter des termes afin de rendre les axes d et q complètement indépendants.

IV.5 Découplage par compensation

Nous examinons d'abord le modèle de la machine synchrone dans le plan de Park qui est donné par les équations ci-dessous, pour justifier le recours à la commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation [5]

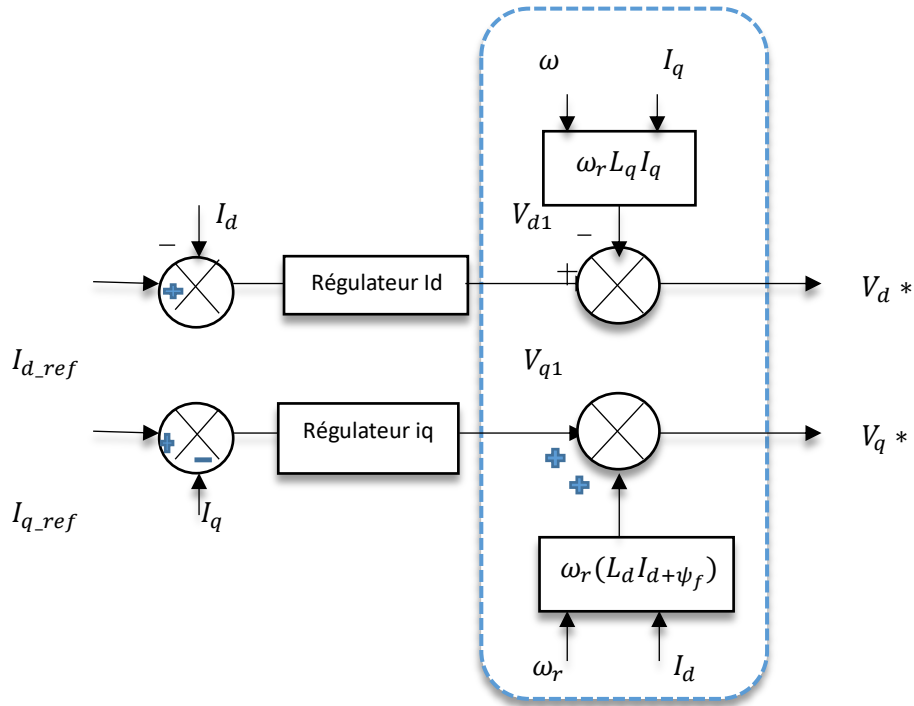


Figure IV.2 Principe de découplage par compensation.

Sur le schéma de principe précédent, V_{d1} et V_{q1} représentent les tensions à la sortie des régulateurs des courants I_d et I_q .

$$\begin{cases} -V_d = (R_s + L_d \cdot S)i_d - \omega_r L_q I_q \\ -V_q = (R_s + L_q \cdot S)i_q + \omega_r (L_d I_d + \psi_f) \end{cases} \quad \text{IV.10}$$

A partir des équations (IV.7) il est possible de définir les termes de découplage qui sont considérés, comme suit :

$$\begin{cases} V_d = V'_{sd} + e_d \\ e_d = -\omega_r L_q i_q \end{cases} \quad \text{IV.11}$$

Avec : $V'_{sd} = (R_s + L_d)i_d$ IV.12

Alors :

$$\frac{I_d}{V'_d} = \frac{1}{(R_s + L_d \cdot S)} \quad \text{IV.13}$$

De manière analogue, pour V_q on aura :

$$\begin{cases} V_q = V'_q + e_q \\ e_q = \omega_r (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad \text{IV.14}$$

Avec :

$$V'_{sq} = (R_s + L_q \cdot S) i_q \tag{IV.15}$$

Alors :

$$\frac{I_q}{V'_q} = \frac{1}{(R_s + L_q \cdot S)} \tag{IV.16}$$

Avec : e_q : FEM de la machine sur l'axe q.

e_d : FEM de la machine sur l'axe d.

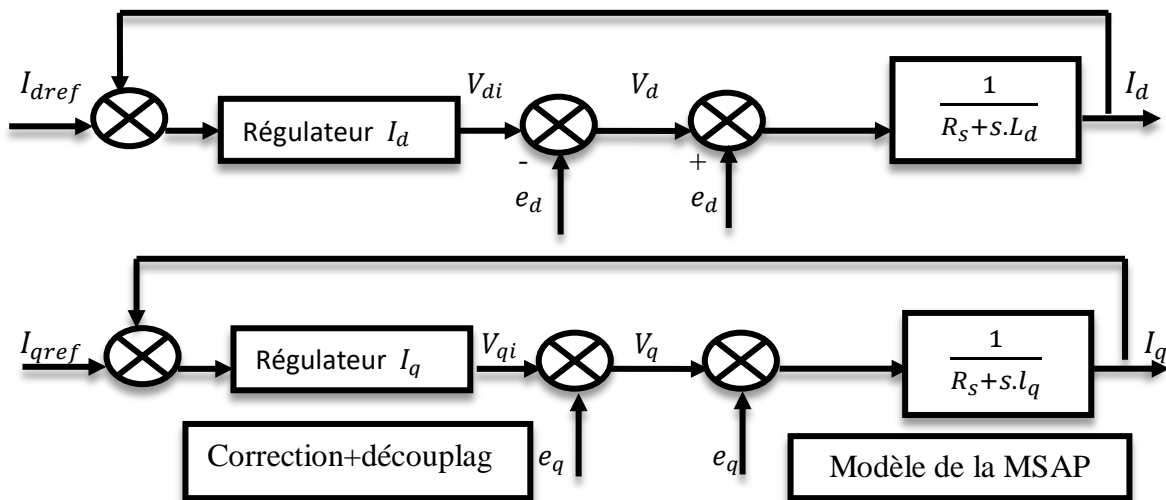


Figure IV.3 Structure générale : (machine-découplage par compensation)

IV.6 Description du système global

La machine étant découplée selon deux axes (d, q), la régulation sur l'axe d est faite par une seule boucle, tandis que la régulation sur l'axe q est faite par deux boucles en cascade l'une interne pour réguler le courant et l'autre externe pour réguler la vitesse.

La vitesse est régulée à travers la boucle externe, la sortie de son régulateur est permise de générer le courant de référence I_{q_ref} qui est comparé à la valeur du courant I_q issue de la mesure des courants réels et leur erreur appliquée à l'entrée du régulateur du courant I_q . En parallèle avec cette boucle, on trouve une boucle de régulation du courant I_d qui est maintenu à zéro.

Les sorties des régulateurs de courant i_d et i_q sont appliquées à un bloc de découplage qui permet de générer les tensions de référence V_{d_ref}, V_{q_ref} et par passage du repère (d, q) au repère (α, β) qui nous donne les deux tensions de référence $V_{\beta_ref}, V_{\alpha_ref}$.

IV.7 Synthèse de correcteurs

On propose de mettre en œuvre des régulateurs de type PI dans la structure de commande. Les équations du modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents peuvent être écrites par la forme [6] :

$$V_{sd}(p) = R_s * I_s(p) + P * L_s * I_s(p) - \omega * \psi_{sq} \tag{IV.17}$$

$$V_{sq}(p) = R_s * I_{sq}(p) + P * L_s * I_{sq}(p) + \omega * \psi_{sd} \tag{IV.18}$$

On considère $e_{dq} = \pm \omega \cdot \psi_{qd}$ comme des perturbations mesurables [5]. Ainsi la machine peut être représentée par la fonction de transfert suivante

$$H_S(s) = \frac{i_{d,q}(s)}{V_{d,q}(s) + e_{d,q}(s)} \tag{IV.19}$$

$$H_S(s) = \frac{1}{R_s + L_s s} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e \cdot s} \tag{IV.20}$$

Avec la constante de temps électrique : $T_e = \frac{L_s}{R_s}$ IV.21

Te : Constante de temps électrique.

$L_q = L_d = L$: (pôle laisse).

Les boucles de régulation se présentent alors sous la forme du schéma donné sur la figure (IV.4), (Le schéma est identique pour la boucle de courant dans l'axe q).

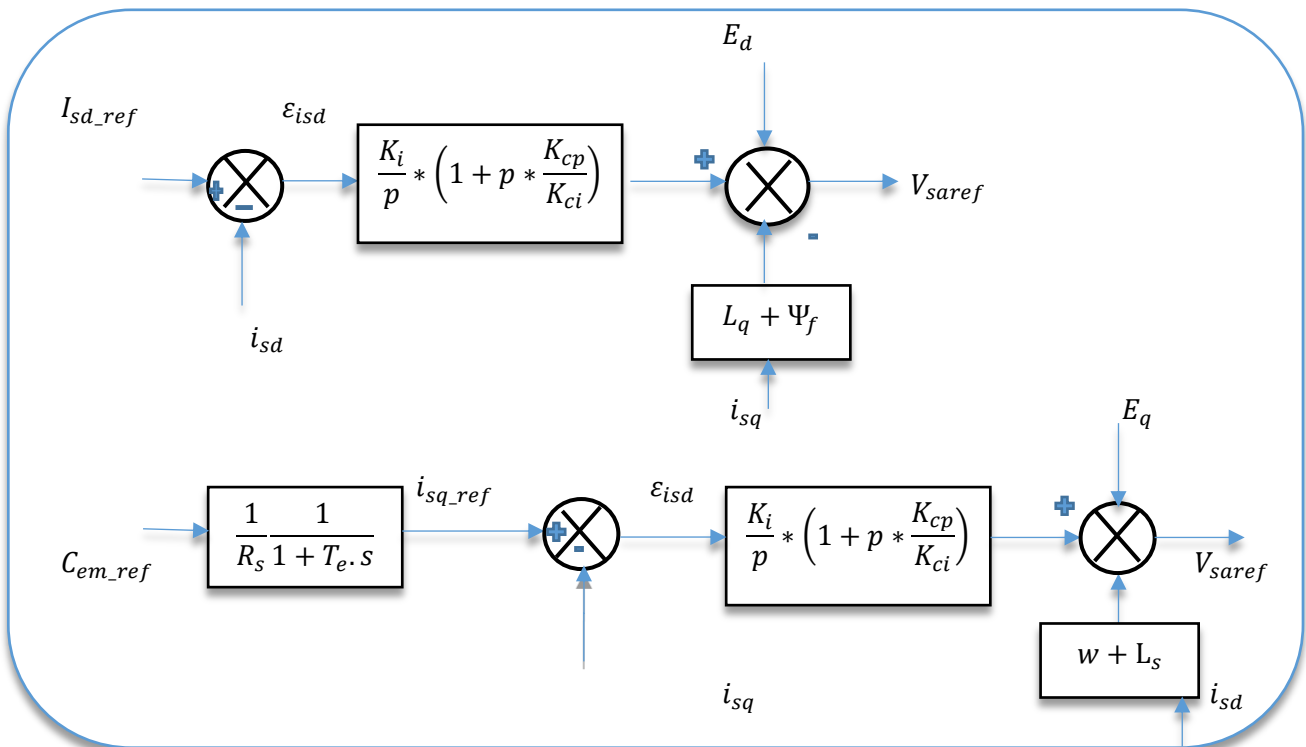


Figure IV.4: Boucle de régulation de courant.

En boucle ouverte la fonction de transfert est égale à :

$$G_0(p) = \frac{K_i}{K_p} \left(1 + \frac{K_p}{K_i} * p\right) * \frac{1}{R_s} * \frac{1}{1+T_e*p} \quad \text{IV.22}$$

Les paramètres du régulateur sont déterminés par la méthode de la compensation du pôle. En boucle ouverte, les constantes de temps sont égales à :

$$T_e = T_0 = \frac{K_p}{K_i} \quad \text{IV.23}$$

En boucle fermée la fonction de transfert devient :

$$G(p) = \frac{G_0(p)}{1+G_0(p)} = \frac{1}{1+\frac{R_s}{K_i}*p} = \frac{1}{1+T_f*p} \quad \text{IV.24}$$

En boucle fermée la constante de temps T_f est donc égale à :

$$T_f = \frac{R_s}{K_i} \quad \text{IV.25}$$

Alors :

$$K_i = \frac{R_s}{T_f} \quad \text{IV.26}$$

D'après l'expression (IV.22) le coefficient proportionnel K_p du régulateur est calculé :

$$K_p = \frac{L_s}{T_f} \quad \text{IV.27}$$

IV.8 Structure complète de contrôle vectoriel de GSAP

L'entrée de référence de la commande de la machine est le couple de référence A l'aide des étapes précédentes de modélisation, et des règles d'inversion, on propose la structure complète de la commande vectorielle de la GSAP

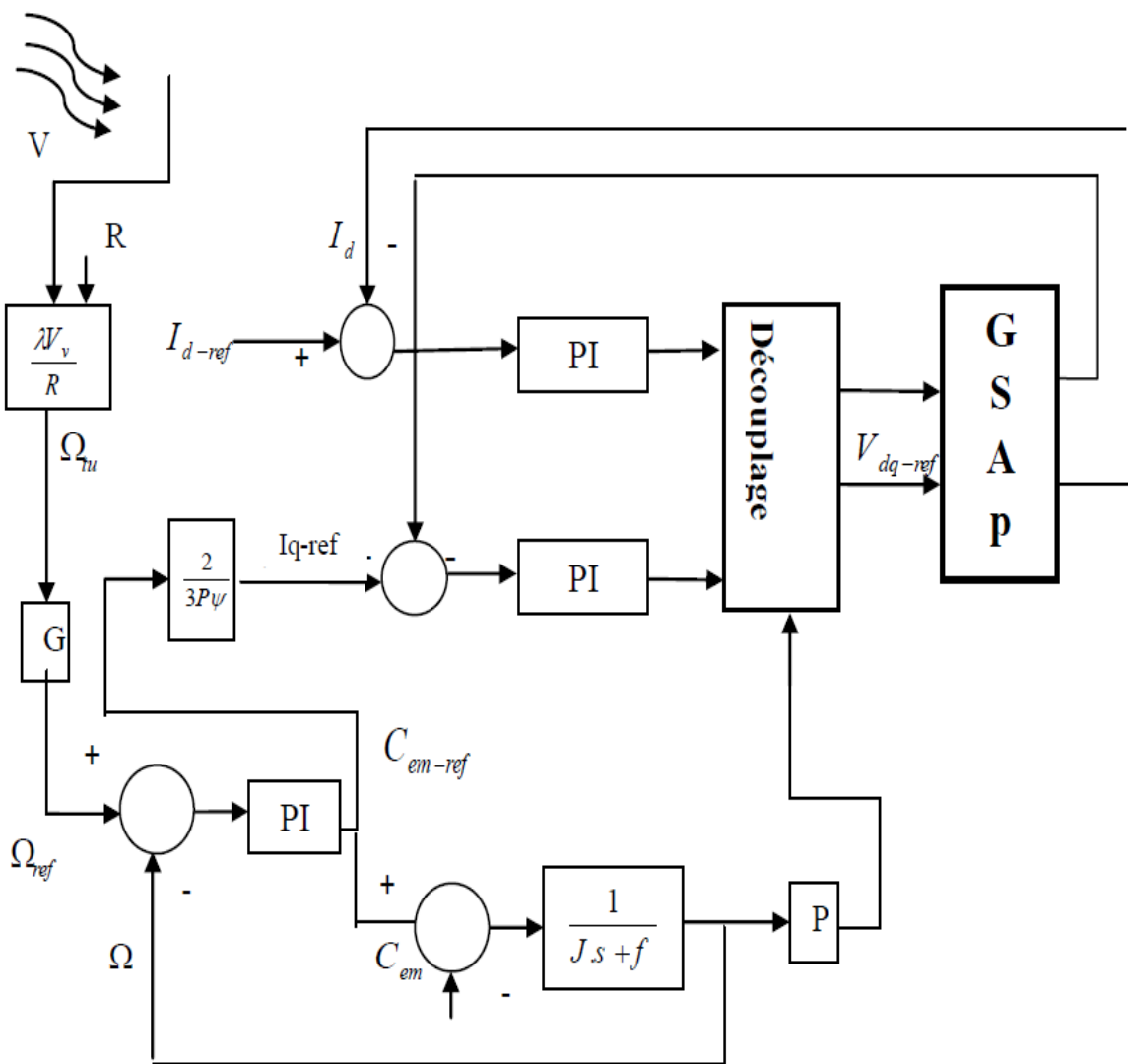


Figure IV.5 Schéma bloc de commande vectorielle de GSAP.

IV.9 Simulation et interprétation des résultats de la commande vectorielle de GSAP

Le schéma bloc de la commande vectorielle GSAP est représenté par la figure (IV.6).

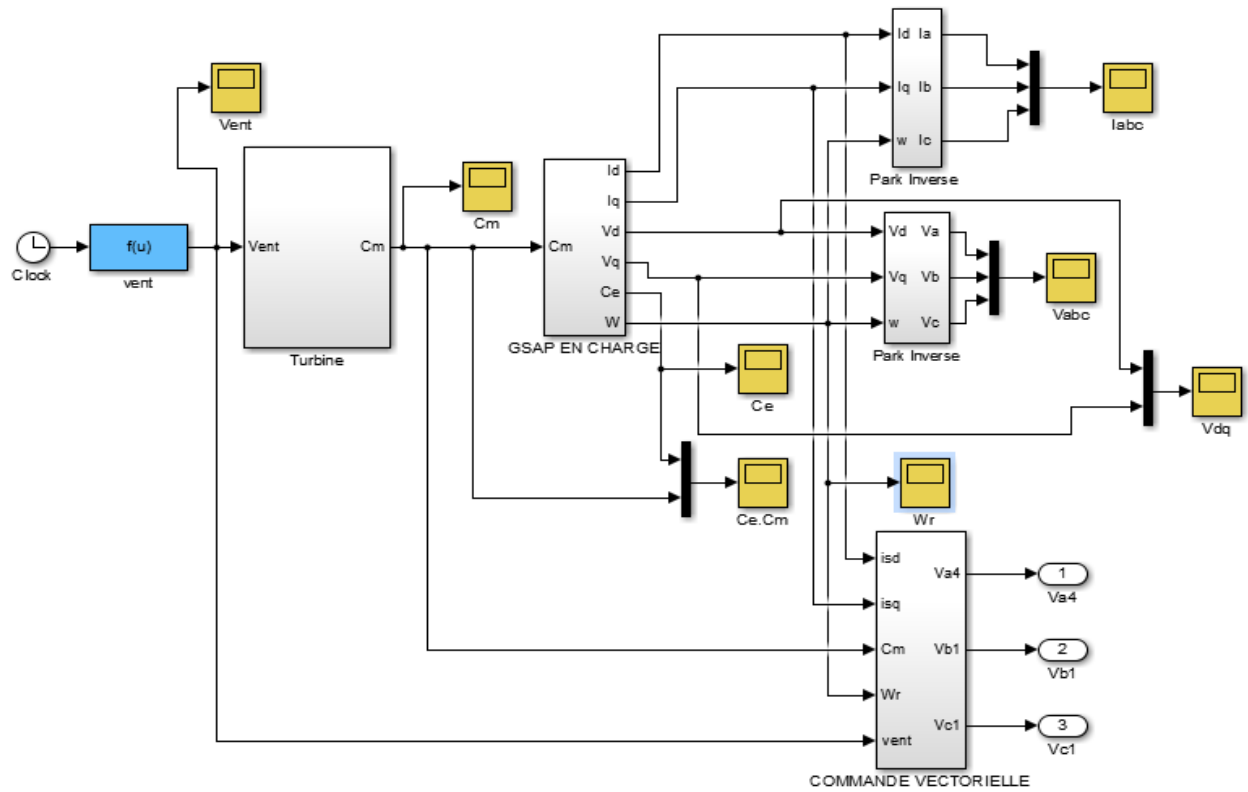
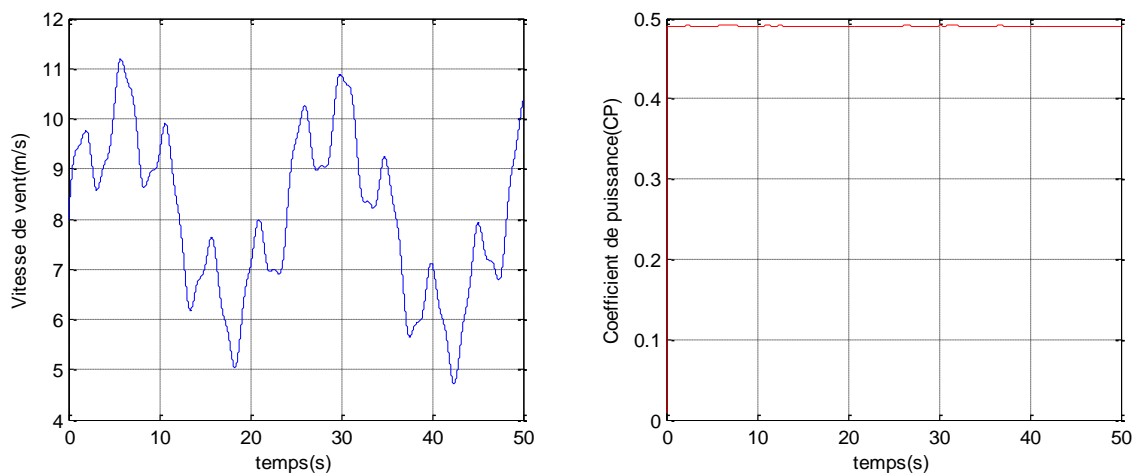


Figure IV.6 : Schéma bloc de la commande vectorielle GSAP.

Les résultats de simulation obtenus après l'introduction des modèles sous MATLAB/SIMULINK sont illustrés dans les figures suivantes :



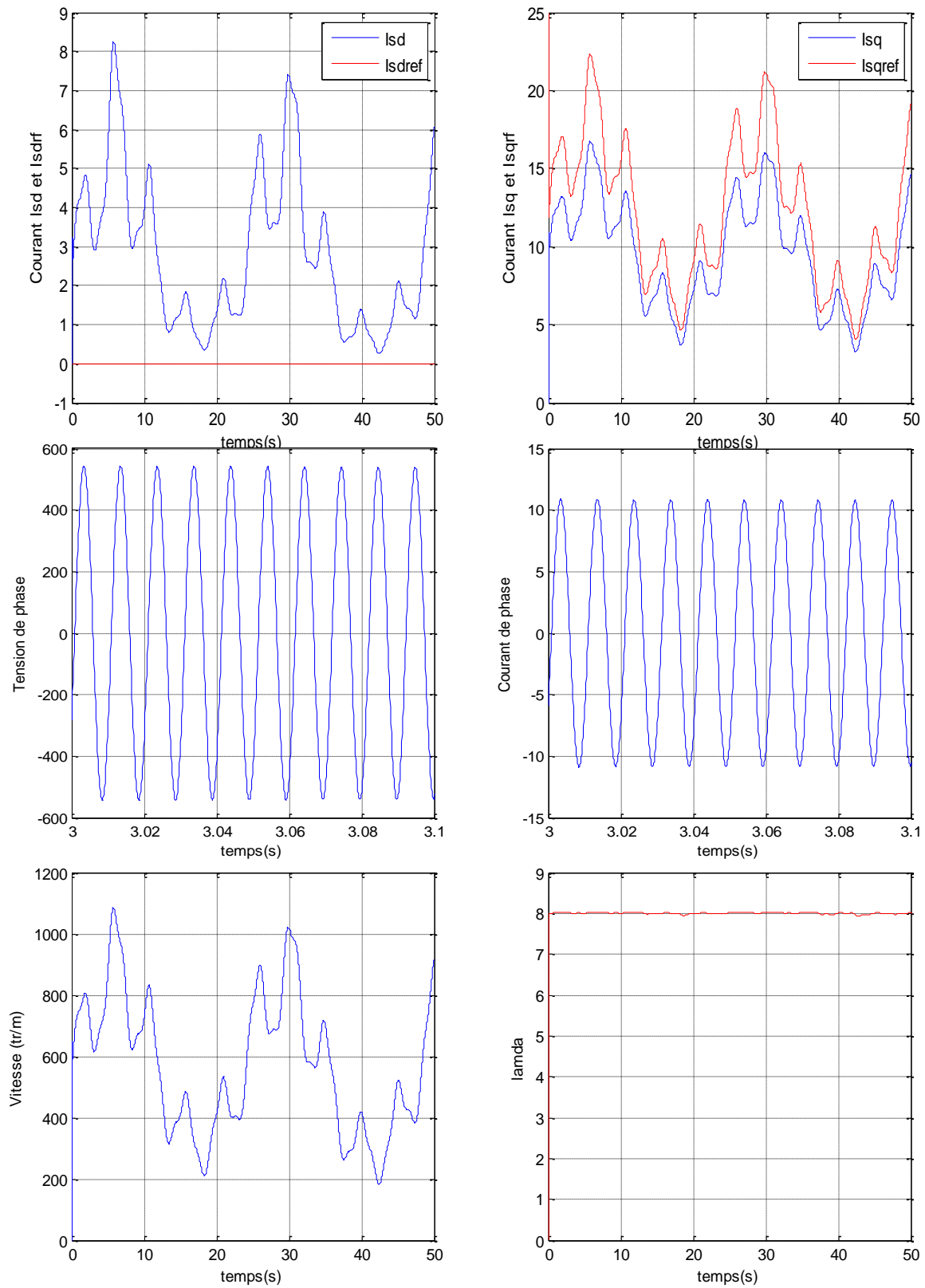


Figure IV.7 Résultats de simulation de la commande vectorielle de la GSAP

D'après les résultats de simulation obtenus, on constate que toutes les allures des grandeurs électriques sont affectées par le profil du vent, Les allures représentés dans la figure (IV.7) montre que la valeur de coefficient puissance (C_p) souhaitée est atteinte et égal à (0.48), La vitesse optimale est aussi maintenue à sa valeur (8) pour capter le maximum de puissance par la stratégie de maximisation de puissance (MPPT). Donc, ces deux constatations confirment sur la performance de la commande utilisée. Pour la vitesse électrique, elle suit sa référence convenablement, elle atteint une valeur de (800 tr/m) dans un laps de temps.

IV. 10 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons établi, la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents dans le repère de Park. Deux boucles de régulation ont été prévues pour la commande des courants. L'une de courant i_d pour commander le flux et l'autre pour le courant i_q pour commander le couple électromagnétique. Finalement, un schéma global pour le control de la chaine de conversion a été prévu et simulé sous MATLAB/SIMULINK pour une vitesse du vent donné.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'utilisation de la machine synchrone à aimant permanent dans un système de conversion d'énergie éolienne.

Dans un premier temps, une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

Et on peut dire aussi que la chaîne éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées car elle ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Vue l'importance de l'énergie éolienne, on s'intéressera dans les chapitres suivants à la conception et la simulation d'un modèle pédagogique d'une éolienne avec une génératrice synchrone à aimant permanent.

Dans un second temps, nous avons abordé la description des machines électriques (en s'intéresse à la machine synchrone à aimants permanents), on a passé en revue la machine synchrone et la modélisation des différents blocs de la chaîne de conversion, tels que la turbine et la machine synchrone à aimants permanents.

Dans un dernier temps, l'essentiel de notre contribution est abordé, à savoir la simulation de la chaîne de conversion.

Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier. Nous avons étudié la chaîne de conversion éolienne, décrit les différents constituants de la chaîne de conversion et présenter les résultats de simulation.

Le premier dispositif est basé sur la commande vectorielle de la génératrice pour pouvoir extraire la puissance maximale du vent, alors que le deuxième est consacré au contrôle de la liaison au réseau, avec la régulation du bus continu.

Les résultats de simulation pour deux vitesses différentes du vent ont permis d'envisager les objectifs fixés par ces stratégies de commande.

Suite aux travaux réalisés, on peut proposer quelques perspectives qui peuvent améliorer les performances de la chaîne de conversion proposée :

- Etude des systèmes de production éolienne tels que les systèmes (Les différentes formes de l'énergie renouvelable, et les type) ...etc.
- Étudiez (toutes les informations sur les génératrices synchrones à aimant permanent...). etc. et dans deux cas : à vide et en charge.
- Réduire les hypothèses simplificatrices de la turbine
- Application de plus de commandes pour l'énergie éolienne, par exemple, les modèles de simulation des aérogénérateurs.

BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] LATRECHE Mohammed Tahar <<Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien>>Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif UFAS, ALGERIE, soutenu le : 24 /06 /2012
- [2] Dione Fatou << Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne A base de machine synchrone à aimants permanents>> Mémoire De Master Université de Annaba soutenu le : Juin 2018
- [3] Nouari Aissa << Commande D'une MSAP Dédiée À Une Éolienne Par La Méthode De Backstepping >> Mémoire de Master é Akli Mohand Oulhadj Université Akli Mohand Oulhadj, Bouira, Soutenu le : 30/09/2018
- [4] Louar Fateh << Modélisation et simulation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent>> THESE DOCTORAT 3ème cycle, Université de Annaba soutenu le : 2016
- [5] Zeggai Sidi Mohammed << Commande non linéaire d'une génératrice synchrone à aimant permanent pour un système éolien>> Mémoire de Master Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen. Soutenu le : 2018/2019
- [6] Amoura Rabah <<Modélisation et Commande d'un Aérogénérateur Synchrone à Aimants Permanents à Attaque Directe>> Mémoire de Master Académique, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Soutenu le : 2012 -2013
- [7] Bensaadi Hacene << Contribution À La Commande D'un Aérogénérateur Basé Sur Un GSAP>> Thèse, Laboratoire d'Electrotechnique de Batna (LEB), Soutenu le 12 /09/2020
- [8] S. Belakehal << Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne >> Université Mentouri de Constantine, Soutenu le : 28/03/2010
- [9] Messadi Manal <<Modélisation et commande des éoliennes à vitesse variable>> Thèse De Doctorat, Université Mohamed Seddik Benyahia Soutenu le : 21/05/2017
- [10] Benyahia Hamidi Riadh <<Commande d'une Eolienne basée sur les modèles Flou de Takagi-Sugeno >> Mémoire De Master, Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, Soutenu le :2018/2019
- [11] Hamdi Naouel << Amélioration des performances des Aérogénérateurs>> Magister en Electrotechnique De l'université Constantine 1, Soutenu le :03/07/2013
- [12] Youcef Bekakra << Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation>> Thèse De Doctorat, Université Mohamed Khider.Biskra, Soutenu le : 21/10/2014
- [13] Hamecha Samira << Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents>> Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou, Soutenu le : 25/06/2013
- [14] Kouider Mahmoud Hakim << Commande d'une éolienne basée sur un Générateur Synchrone à Aimants Permanents>> Mémoire De Master, Université De Blida 1, Soutenu le :2014/2015

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [15] Boumaraf Farid << Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle>> Thèse Doctorat, Université de Batna, Soutenu le :24/06/2014
- [16] Mayouf Messaoud << Contribution A La Modélisation De L'aérogénérateur Synchrone A Aimants Permanents>> Mémoire de Magister, Université de Batna, Soutenu le :13/02/2008
- [17] Guillaume Pongo Nyoumea << Modélisation et Commande d'un Aérogénérateur Synchrone à Aimants Permanents >> Mémoire À L'université Du Québec En Abitibi, Soutenu le : Avril 2018
- [18] Belmenaouar Walid << Commande Dynamique en Mode Glissant De La Machine Synchrone A Aimants Permanents Alimentée en Tension>> Mémoire de Master, Université Mhamed Bougara Boumerdes, Soutenu le : 2017
- [19] Merzougui Theldja << Commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP)>> Mémoire De Master Académique, Université Mouahmed Boudiaf Msila, Soutenu le : 2018/2019
- [20] Sahli Arab << Reglage Et Contrôle De La Vitesse De La Machine Synchrone A Aimant Permanent >> Mémoire de Master en électrotechnique, Université Abderrahmane Mira De Bejaia, Soutenu le : 2014/2015
- [21] Zeghidi Tahar << Commande Directe De Couple De La Machine Synchrone A Aimants Permanents>> Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, Soutenu le : 25 Juin 2018
- [22] Mayouf Messaoud << Comparative Des Architectures Et Etude Stratégies De Contrôle D'un Aérogénérateur synchrone à aimant permanent >> Thèse Doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna, soutenue le :20 Avril 2014
- [23] Kadri Nadjib << Conception Et Commande D'un Moteur Synchrone A Aimants Permanents >> Mémoire MASTER ACADEMIQUE, Université Kasdi Merbah Ouargla, Soutenu le : 07/07/2019
- [24] salma el aimani << modélisation De Différentes Technologies D'éoliennes Integees Dans Un Réseau De Moyenne Tension >> Thèse Doctorat, Université des Sciences Et Technologies De Lille, soutenue le : 06/12/2004
- [25] S. Guedira << Commande d'une éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent avec convertisseur complet >> Université Mohammed V Souissi, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, Rabat, Maroc, reçu le 14 Février 2014 et accepté le 30 Décembre 2014

ANNEXE

ANNEXE

- Paramètres de la génératrice synchrone à aimants permanents étudiée en simulation sont les suivants :

Puissance nominale P_n	3 00KW
Résistance de phase R_s	0.895 Ω
Inductance cyclique sur l'axe directe L_d	0.012 H
Inductance cyclique sur l'axe transverse L_q	0.012 H
Nombre de paire de pôles P	3
Amplitude des flux des aimants permanents Φ_m	0.1546 Wb
Moment d'inertie J	5 Kg.m ²
Coefficient de frottement visqueux F_r	0.007 N.m / rad/s

THEME :**Commande vectorielle D'un Aérogénérateur À base d'une Machine synchrone à Aimants Permanents****Résumé**

Ce travail, présent la modélisation, le contrôle et la simulation d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une (GSAP). Après avoir présenté un état de l'art sur les éoliennes, la modélisation de la turbine éolienne et la modélisation dans le repère de Park de cette génératrice a été présentée, ainsi que sa commande vectorielle. Les résultats des différentes simulations de notre système éolien réalise via sur l'environnement Matlab/Simulink, on permet d'évaluer les performances du système propose.

Mots clés : Energies renouvelables - Turbine éolienne - GSAP - commande vectorielle - simulation - modélisation

.THEME:**Vector Control of a wind Generator based on a Permanent Magnet Synchronous Machine****Abstract**

This work presents the modeling, control and simulation of a wind energy conversion system based on a (PMSG). After presenting a state of the art on wind turbines, Wind Turbine Modeling and Park modeling of this generator was presented, along with its vector control. The results of the various simulations of our wind power system carried out via the Matlab/Simulink environment, we can assess the performance of the proposed system.

Keywords: Renewable energies - Wind turbine - PMSG - vector control - simulation - modeling.

العنوان :

التحكم الشعاعي لمولد الرياح استنادا على أساس آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم

ملخص

يقدم هذا العمل النمذجة والتحكم والمحاكاة لنظام تحويل طاقة الرياح استنادا على GSAP بعد تقديم نبذة على حالة توربينات الرياح ، تم تقديم نمذجة توربينات الرياح والنمذجة في معيار Park لهذا المولد ، بالإضافة إلى التحكم الشعاعي. نتائج عمليات المحاكاة المختلفة لنظام طاقة الرياح لدينا والتي تم إجراؤها عبر بيئة Matlab / Simulink ، يمكننا تقييم أداء النظام المقترح. **الكلمات المفتاحية:** الطاقات المتجددة - توربينات الرياح - GSAP - التحكم الشعاعي - المحاكاة - النمذجة