



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement supérieure et de la Recherche Scientifique



Université Abbes Laghrour Khenchela

Faculté Science et Technologie

Département de Génie industriel

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme **de Master "LMD"**

Spécialité : **Commande Électrique**

Thème :

Extraction du maximum de puissance d'une chaîne de production à base d'une éolienne et une génératrice synchrone à aimant permanent

Présenté par :

- **BARROUKI Idris**
- **AIB Salim**

dirigé par :

- **Mr. REZZAK Daoud**

Soutenue le 18 /06/ 2023 devant le jury composé de :

Année Universitaire
2022/2023

Dédicace

*À mes parents qui me sont les plus chers au monde et à qui je dois
ce que je suis et ce que je serai.*

A mes chers frères et sœurs,

A Monsieur REZZAK Daoud,

A toute la famille et à mes amis.

Remerciements

Au terme de cette étude, je remercie avant tout Dieu le Tout Puissant, de m'avoir donné la foi et le courage et de m'avoir guidé pour l'accomplissement de ce travail.

Nous souhaitons exprimer nos remerciements à mon directeur de recherche Monsieur **Rezzak Daoud**, Maitre de Conférences au département de Génie Industriel à l'université de **Khenchela** d'avoir accepté la direction de cette thèse.

Nos remerciements les plus chaleureux vont également aux membres du jury de soutenance de cette thèse.

Nos remerciements à tous Les amis, collègues, l'ensemble des personnels administratifs et enseignants du Département de Génie Industriel de l'Université de Khenchela pour leurs encouragements, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail puisse voir le jour.

Résumé

L'énergie éolienne est actuellement introduite comme source d'énergie. Ce travail décrit un système éolien basé sur une génératrice synchrone à aimants permanents. Pour de telles applications, l'utilisation de ce système est un choix naturel.

Dans ce travail de recherche, on étudie un système de production éolien pour mettre l'accent sur l'effet de la vitesse du vent sur ce dernier, parce que la vitesse de génératrice est une fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de puissance. Le système proposé contient une GSAP, redresseur MLI.

La modélisation d'une chaîne de conversion éolienne utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) est présentée. L'utilisation du générateur synchrone à aimants permanents rend les systèmes de production d'énergie éolienne à cause de la possibilité d'extraction optimale de l'énergie dans les différentes conditions de fonctionnement. A cause de la nature fluctuante du vent qui provoque une variation fréquente de la fréquence à la sortie du GSAP, il est nécessaire de lier ce dernier avec la charge via des convertisseurs statiques.

La stratégie de commande propose la maximisation de la puissance MPPT pour contrôler la vitesse de la GSAP, la commande de la tension du bus continu, une technique de commande est appliquée pour réajuster la vitesse de la génératrice : la commande vectorielle.

Mot clés : énergie éolienne, GSAP, MPPT, commande vectorielle.

ملخص:

يتم تقديم طاقة الرياح حاليًا كمصدر للطاقة. يصف هذا العمل نظام الرياح القائم على مولد متزامن مغناطيسي دائم. بالنسبة لمثل هذه التطبيقات، يعد استخدام هذا النظام اختيارًا طبيعيًا.

في هذا العمل البحثي، ندرس نظام إنتاج الرياح للتأكيد على تأثير سرعة الرياح على الأخير، لأن سرعة المولد هي دالة لسرعة الرياح لاستخراج أقصى طاقة. يحتوي النظام المقترح على المولد

يتم تقديم نماذج من دائرة تحويل طاقة الرياح باستخدام مولد المغناطيس الدائم متزامن. استخدام توربينات الرياح المغناطيس الدائم متزامن يجعل أنظمة تحويل طاقة الرياح أكثر جاذبية بسبب إمكانية استخراج الطاقة الأمثل في ظروف التشغيل المختلفة. وذلك راجع للطبيعة العشوائية للرياح التي تسبب في التغيير المتكرر في تردد المخرج للمولد، فمن الضروري ربط الحمولة عن طريق محولات ثابتة.

تقترح استراتيجيات التحكم تعظيم قدرة MPPT للتحكم في سرعة GSAP، والتحكم في جهد ناقل التيار المستمر، ويتم تطبيق تقنية تحكم لإعادة ضبط سرعة المولد: التحكم في القوة الموجهة.

Abstract:

Wind energy is currently being introduced as a source of energy. This work describes a wind system based on a permanent magnet synchronous generator. For such applications, the use of this system is a natural choice.

In this research work, we study a wind production system to emphasize the effect of the wind speed on the latter, because the generator speed is a function of the wind speed to extract the maximum of power. The proposed system contains a GSAP, PWM rectifier.

Modeling of a wind power conversion chain using a permanent magnet synchronous generator (GSAP) is presented. The use of permanent magnet synchronous generator makes wind power generation systems because of the possibility of optimal extraction of energy in different operating conditions. Due to the fluctuating nature of the wind which causes a frequent variation of the frequency at the output of the GSAP, it is necessary to link the latter with the load via static converters.

The control strategy proposes the maximization of the MPPT power to control the speed of the GSAP, the control of the DC bus voltage, a control technique is applied to readjust the speed of the generator: the vector control.

Key Words: Wind energy, GSAP, MPPT, Vector control.

Table des matières

Table of Contents

Remerciements	ii
Résumé	iii
Table des matières	v
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Introduction Générale	1
I.1 Introduction	3
I.2 Historique	3
I.3 Présentation de system éolien	4
I.3.1 La production éolienne	4
I.3.2 Définition du système éolien.....	5
I.3.3 Mode d’installation et les différents types des turbines éoliennes.....	6
I.3.4 Aérogénérateurs à axe vertical (VAWT).....	7
I.3.5 Aérogénérateurs à axe horizontal (HAWT).....	7
I.3.6 Dégérente types d’éoliennes à axe horizontal	8
I.4 Les principaux composants d’un système éolien :	9
I.4.1 Tour ou mât	9
I.4.2 Le rotor (moyeu et pales)	9
I.4.3 La Nacelle	10
I.5 Classement des éoliennes	11
I.5.1 Les éoliennes à vitesse fixe	12
I.5.2 Les éoliennes à vitesse variable.....	12
I.6 Énergie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique	14
I.6.1 Loi de Betz	14
I.7 Estimation de la source de vent à Khenchela	16
I.7.1 INTRODUCTION.....	16
I.7.2 METHODOLOGIE.....	16
I.7.3 Méthode d’extrapolation	17
I.8 Conclusion	19
Chapter II: Modélisation d’un système de production éolienne basé sur une GSAP	20
II.1 Introduction	20
II.2 Modélisation de l’éolienne	21
II.2.1 Modélisation de la partie mécanique	21
II.2.2 Évaluation des ressources éoliennes :	22
II.2.3 Modélisation de la turbine	25
II.2.4 Modèle du multiplicateur	28
II.2.5 Modèle de la charge (MCC)	28
II.3 Modélisation de la partie électrique	32
II.3.1 Modélisation de la génératrice synchrone a aiment permanent (GSAP)	32
II.3.2 Principe de fonctionnement d’une génératrice synchrone	39
II.4 Modélisation des convertisseurs statique associer avec l’éolienne	43

II.4.1	La commande M.L.I.....	43
II.4.2	Modèle du redresseur MLI	44
II.4.3	Modélisation du bus continu	46
II.5	Conclusion	47
<i>Chapter III: Commande vectorielle de la GSAP</i>		48
III.1	Introduction.....	48
III.2	Modèle de la machine synchrone à aimants permanents.....	49
III.3	Modélisation de convertisseur pour la GSAP	50
III.4	La stratégie de commande vectorielle de la GSAP	51
III.4.1	Principe et structure de la commande	52
III.5	Architectures de puissance et gestion d'énergie.....	56
III.5.1	Technique de la maximisation de la puissance produite.....	57
III.5.2	Optimisation électronique de la conversion énergétique	57
III.6	Résultat de simulation et interprétation	58
III.6.1	Simulation du système éolienne avec MPPT pour $V_{\text{égal}}$ à 7 m/s :	59
III.6.2	Simulation du système éolienne avec MPPT pour $V_{\text{égal}}$ à 13 m/s :	60
III.7	Conclusion	61
<i>Conclusion générale</i>		62
<i>References</i>		64

Liste des Symboles

C_p	Coefficient de puissance
P	Masse volumique de l'air
S	Surface active de l'éolienne
V_v	Vitesse du vent
Ω	Vitesse angulaire de rotation
λ	Rapport de la vitesse périphérique en bout de pale
R	Rayon de la surface balayée en m
Ωt	Vitesse de la turbine
J	L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.
C_{em}	Couple électromagnétique développé par la génératrice.
C_r	Couple résistant
C_g	Couple issu du multiplicateur.
a_k	Amplitude de l'harmonique de l'ordre K
F	Coefficient de frottement total du couplage mécanique
ω_n	Pulsation propre
λ_m	Flux inducteur
i_d	Courant statorique selon l'axe d
i_q	Courant statorique selon l'axe q
P	Nombre de paires de pôles
R_s	Résistance d'une phase d'enroulement statorique
G	Gain du multiplicateur
C	Condensateur du bus continu
J_t	Moment d'inertie de la turbine
λ_{opt}	Valeur optimale de la vitesse relative
v_d, v_q	Tensions statoriques de la MSAP dans le repère de Park
V_{dc}	Tension redressée
L_d	Inductance statorique sur l'axe d
L_q	Inductance statorique sur l'axe q
e_d	F.e.m de la machine sur l'axe d
e_q	F.e.m de la machine sur l'axe q
$P(\theta)$	Transformation de Park
P	Nombre de paires de pôles de la machine
A	Matrice d'évolution du système
A_m	Matrice d'évolution du modèle de référence
B	Matrice de commande du système
B_m	Matrice de commande du modèle de référence
E	Erreur de sortie
I	Matrice identité
R	Entrée de référence u Loi de commande
Ω_{ref}	Vitesse angulaire de référence
Ω	Vitesse angulaire de la génératrice
ψ	Flux statorique de référence
ρ	Densité de l'air

X	Vecteur d'état du système
X_m	Vecteur d'état du modèle de référence
Y	Sortie du système
M	Masse de l'air
P_m	Puissance mécanique
C_t	Couple de la turbine
C_{mec}	Couple mécanique
C_g	Couple de la génératrice
θ	Angle entre le repère statorique et le repère rotorique
$T_{de\ detent}$	Le couple de détente
$T_{hybride}$	Le couple hybride
T_t	Le couple total
$T_{relucant}$	Le couple réluctant
u_{sabc}	Tensions du GSAP dans le repère (abc)
u_{abc}	Tensions statoriques dans le repère (abc)
u_{re}	La tension de référence
u_{sdq}	Tensions statoriques dans le repère (dq)
ω_r	Vitesse électrique de rotor
ω_g	Vitesse de rotation de la GSAP
ω_t	Vitesse de calage des pales

Abréviations

GSAP	Génératrice Synchrone à Aiment Permanent.
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.
MCC	Machine à Courant Continue.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
PI	Proportionnel Intégral.
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
FEM	Force électromotrice.
AC	Alternative Current.
DC	Direct Current.

Liste des figures

Figure(I. 1) : Principe de conversion d'énergie.	5
Figure(I. 2) : Les parcs éoliens offshores et onshores.....	6
Figure(I. 3) : Exemple des constructions VAWT.	7
Figure(I. 4) : Configuration à axe horizontal.	8
Figure(I. 5) : Puissance suivant le diamètre de l'éolienne.....	10
Figure(I. 6) : Eléments d'une nacelle.	11
Figure(I. 7) : Éolienne directement connectée au réseau.	12
Figure(I. 8) : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone.	12
Figure(I. 9) : Éoliennes à vitesse variable.....	13
Figure(I. 10) : Puissance totale générée mesurée en fonction de la vitesse du vent.	14
Figure(I. 11) : Tube de courant autour d'une éolienne.	15
Figure(I. 12) : Coefficient de puissance.....	16
Figure(I. 13) : Représentation des points de mesure utilisés dans l'étude.	17
Figure(I. 14) : Caractéristiques des sites et stations étudiés.....	18
Figure(I. 15) : Variation des vitesses moyennes mensuelles des vents (Station de Khenchela –1990/2014) (source O.N.M).....	19
Figure(II. 1) : Synoptique du système de production d'énergie éolienne à base de la GSAP.....	20
Figure(II. 2) : Schéma de la turbine éolienne.....	21
Figure(II. 3) : Modèle mécanique simplifié de la turbine.	21
Figure(II. 4) : Histogramme des fréquences et la courbe de Distribution real.....	23
Figure(II. 5) : Histogramme des fréquences et la courbe de Wei bull pour khenchela...	24
Figure(II. 6) : Turbine éolien.	25
Figure(II. 7) : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.....	26
Figure(II. 8) : Caractéristique coefficient de puissance/vitesse spécifique de vitesse pour différents angles d'inclinaison des pales.	27
Figure(II. 9) : Modèle mécanique du multiplicateur.....	28
Figure(II. 10) : Schéma d'une machine CC.	29
Figure(II. 11) : Représentation schématique d'une MCC à aimant permanente.....	30
Figure(II. 12) : Le courant d'induit et la vitesse de rotation de la MCC.....	31
Figure(II. 13) : Les couples de la MCC.	31
Figure(II. 14) : Positionnement des aimants au rotor.....	33
Figure(II. 15) : Le système triphasé dans le plan complexe.	35
Figure(II. 16) : Schéma équivalent en mode génératrice de la machine PMSG dans le plan dq.....	39
Figure(II. 17) : Bloc de simulation GSAP.	40
Figure(II. 18) : GSAP à vide.	41
Figure(II. 19) : GSAP sur une charge séparée.	43
Figure(II. 20) : Topologies de base d'un redresseur de tension.	45
Figure(II. 21) : Schéma électrique du bus continu.	46
Le schéma bloc de la commande est représenté par la figure (II. 22). [27].	46
Figure(III. 1) : Transformation de Park: repère a, b, c et repère d, q de Park.....	49
Figure(III. 2) : Redresseur de tension associer avec la GSAP.	51
Figure(III. 3) : Commande vectorielle de la GSAP.	52
Figure(III. 4) : Boucles de courant.....	53
Figure(III. 5) : Boucles de courant simplifiées.	54
Figure(III. 6) : Boucles de vitesse. ^{IX}	54

Figure(III. 7) : Analyse de la stabilité des boucles de courant isq et de vitesse.....	55
Figure(III. 8) : Puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent.	56
Figure(III. 9) : Principe de fonctionnement du MPPT à vitesse variable du vent.	57
Figure(III. 10) : Représentation de la commande de Vitesse de la GSAP d'un système éolien.	58
Figure(III. 11) : Schéma du système complet sous Simulink.	58
Figure(III. 12) : Vitesse de rotation et puissance de la turbine éolienne pour $v=7\text{m/s}$	59
Figure(III. 13) : Le courant de démarrage et la puissance de la MCC pour $v=7\text{m/s}$	59
Figure(III. 14) : La vitesse de rotation et la puissance de la turbine éolienne pour $v=13\text{m/s}$	60
Figure(III. 15) : Le courant de démarrage et la puissance de la MCC pour $v=13\text{m/s}$	60

Liste des tableaux

Tableau(I. 1) : Vitesse moyenne des vents (Station de Khenchela – 1990/2014) source O.N.M.	19
Tableau(II. 1) : Paramètres d'éolien de 50 kW.	25
Tableau(II. 2) : Paramètres de la machine CC à aimant permanent.....	30
Tableau(III. 1) : Paramètres de la GSAP.	50
Tableau(III. 2) : Paramètre des contrôleurs PI.	55

Introduction Générale

L'énergie électrique est un facteur important dans le développement et l'évolution de la société humaine, qu'il s'agisse d'améliorer les conditions de vie ou de développer des activités industrielles. Elle est devenue une énergie incontournable en raison de la souplesse de son utilisation et de la variété des domaines d'activité qui lui imposent de jouer un rôle plus important. [1]

En effet, la souplesse de son utilisation et la diversité de ses domaines d'activité, si vous l'augmentez, il jouera un rôle plus important. C'est une source d'énergie essentielle pour la vie humaine. Selon les perspectives internationales sur le développement énergétique, la consommation mondiale d'électricité devrait continuer d'être la forme d'énergie qui connaît la croissance la plus rapide et atteindre des proportions énormes, en particulier dans les pays en voie de développement.

Face à cela et à la raréfaction des réserves mondiales d'hydrocarbures et surtout à la crainte grandissante d'une pollution invasive et destructrice de l'environnement, les pays industrialisés se sont massivement tournés vers les centrales nucléaires. Contrairement aux centrales thermiques traditionnelles, cette source d'énergie a l'avantage indéniable de ne pas produire de pollution atmosphérique, mais le risque d'accidents nucléaires (comme la catastrophe de Tchernobyl en Ukraine le 26 avril 1986), l'élimination des déchets et le remplissage L'enfouissement est un problème bien réel rendant cette source d'énergie peu attrayante pour les générations futures. [2]

Aujourd'hui, la plupart des éoliennes sont de grandes centrales électriques industrielles, des centrales électriques connectées au réseau qui produisent de l'électricité directement à partir du vent. D'autre part, il existe également des petites centrales électriques, l'un des secteurs les plus dynamiques, bien que beaucoup moins rentables que l'éolien industriel. Les petites éoliennes individuelles (systèmes domestiques) sont souvent utilisées pour fournir de l'énergie électrique avec des besoins énergétiques réduits.

L'objectif de cet article est de contribuer à l'étude des systèmes de contrôle des chaînes de production d'énergie éolienne basés sur des génératrices synchrones à aimants permanents

(GSAP). Ce choix est justifié par l'intérêt des chercheurs et des industriels pour ce type de construction d'éoliennes. En fait, les générateurs synchrones à aimants permanents dans diverses structures deviennent de plus en plus courants que les autres machines électriques. Cette évolution s'explique par les propriétés des aimants permanents fonctionnant avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui les rend intéressants pour les applications éoliennes. L'utilisation de l'énergie éolienne nous amène à considérer une chaîne de production composée d'un GSAP et des convertisseurs statiques.

Pour entamer cette étude, notre travail a donné lieu à trois chapitres, résumés comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de système éolienne, on a mis l'accent sur les travaux qui se penchent sur les chaînes de production d'énergies éoliennes basées sur la GSAP et on aborde les différents types d'éoliennes (à axe vertical, horizontal).

Le deuxième chapitre consiste en la modélisation d'un système éolien : turbine, génératrice synchrone à aimant permanents GSAP, la modélisation de différentes parties constituant une chaîne de production d'énergie éolienne basée sur une GSAP. Commencant par la modélisation du système de production éolienne, ensuite la description du GSAP par sa structure, Ce chapitre terminera par la présentation du principe de fonctionnement et la modélisation du convertisseur statique, A la fin de ce chapitre, une simulation à l'aide de logiciel Matlab-Simulink est décrite, et plusieurs résultats de simulation sont illustrés et commentés.

Le troisième chapitre aborde la commande vectorielle de la GSAP ainsi que la mise en œuvre de la stratégie du MPPT en vue de l'extraction du maximum de puissance. (Maximum Power Point Tracking).

Finalement, Ce travail est clôturé par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche envisagées.

CHAPITRE I

Généralités sur les éoliens

CHAPITRE I : Généralités sur les éoliens

I.1 Introduction

Actuellement, la production d'énergie électrique se base principalement sur des combustibles fossiles et fissiles (nucléaire), parce ces dernières permettent d'avoir un faible coût de production, néanmoins il est clair que notre dépendance aux ces types d'énergies ne peut continuer indéfiniment, ce choix est limité avec la limite de la réserve mondiale de ces sources. D'une autre coté, les carburants fossiles conduisent à un dégagement massif de gaz polluant et de gaz à effet de serre (l'origine de la plupart des émissions mondiales de CO₂). De même, L'énergie d'origine nucléaire qui ne rejette pas directement de gaz carbonique mais le traitement des déchets issus de ce mode de production est très coûteux (la radioactivité des produits traités reste élevée durant de nombreuses années) et encore, les conséquences d'un accident liés à leur exploitation seraient désastreuses bien que le risque d'un accident est très faible. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique en assurant, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour améliorer l'énergie du vent et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes.

Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique en assurant, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour améliorer l'énergie du vent et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes.

I.2 Historique

L'énergie éolienne est l'une des premières formes d'énergie utilisée par l'humanité. Il a été utilisé pour propulser des navires, puis utilisé dans les moulins à céréales. La première utilisation connue de l'énergie éolienne remonte à 2000 av. Les Babyloniens ont conçu tout le projet d'utiliser le vent pour irriguer la Mésopotamie. Les moulins à vent n'ont été introduits en Europe qu'au Moyen Âge, où ils ont été utilisés aux Pays-Bas pour moudre le blé et drainer les terres inondées. [3]

La crise pétrolière de 1973 a alerté les états non producteurs d'énergie fossile sur la nécessité du développement de l'énergie éolienne. En 2006 l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf. Elle aura une puissance de 50

MW et, d'ici 2015, 5% des besoins algériens en électricité seront assurés par les énergies renouvelables dont l'énergie éolienne [3].

Paul La Cour a jeté les bases des éoliennes modernes grâce aux recherches effectuées dans les souffleries aérodynamiques. Les éoliennes à rotation rapide avec un nombre limité de pales produisent plus de puissance [4].

L'industrie aérospatiale a amené l'énergie éolienne dans le ciel, pour ainsi dire. En 1983, l'ingénieur français Georges Darrieus développe la première éolienne à axe vertical. Sa théorie de l'effet de la portance sur une aile d'avion. Ainsi, les éoliennes Darrieus fonctionnent quelle que soit la direction du vent [4].

La transition énergétique nécessite des sources d'énergie fiables et viables pour réduire notre empreinte énergétique. L'Europe a une avance significative dans cette bataille, notamment en ce qui concerne la production d'électricité en mer. [4]

La Commission européenne souhaite également multiplier par 5 la capacité actuelle d'ici 2030 et par 25 d'ici 2050. La France vise une capacité installée de 2,4 GW d'ici 2028 et de 5 GW d'ici 2028.

Vous l'aurez compris :

L'éolien est au cœur des enjeux mondiaux de la transition écologique. Si l'éolien se positionne comme l'un des piliers de la transition énergétique, c'est en partie parce qu'il présente de nombreux atouts. Cette source d'énergie : [4].

- Est renouvelable et non polluante
- Permet de diversifier les ressources énergétiques
- Facilite la réutilisation des sites de production.

I.3 Présentation de system éolien

I.3.1 La production éolienne

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" (non exploitée), dispersée géographiquement et largement saisonnière (l'énergie électrique est beaucoup plus demandée en hiver, lorsque les vitesses moyennes du vent sont souvent les plus élevées). De plus, c'est une énergie qui n'émet pas dans l'atmosphère et ne produit pas de déchets radioactifs.

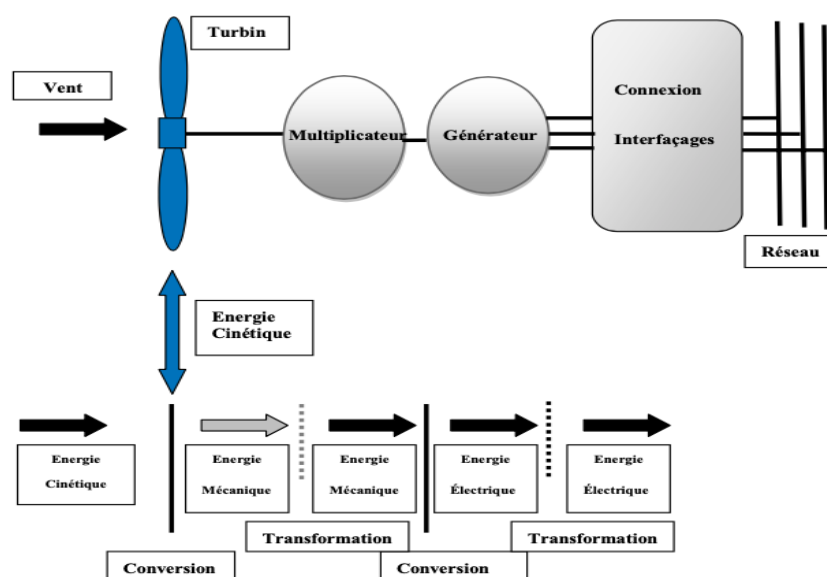
Les ressources éoliennes sont d'origine solaire, dérivées du mouvement des masses d'air indirectement causé par le rayonnement solaire de la Terre. Lorsque certaines régions de la terre se réchauffent et que d'autres se refroidissent, des différences de pression se créent, provoquant un mouvement constant des masses d'air. Cette énergie oubliée est utilisée depuis l'Antiquité mais a connu un développement sans précédent depuis une trentaine d'années, notamment lors des premiers chocs pétroliers [5].

I.3.2 Définition du système éolien

Un système éolien ou avec un autre terme un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique. Telle peut être utilisée de deux manières : directe et indirecte.

Direct : Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule, pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail).

Indirect : Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour générer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.



Figure(I. 1) : Principe de conversion d'énergie.

Le fonctionnement général est illustré par la figure (I.1). L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou automatique [6].

I.3.3 Mode d'installation et les différents types des turbines éoliennes

Généralement, il existe deux types d'éoliennes :

Les éoliennes qui ne sont pas connectées à un réseau « individuel » sont installées dans des endroits isolés. Le second mode concerne les éoliennes regroupées sous forme de parcs éoliens onshore ou de plus en plus offshore avec des parcs éoliens « offshore » où le vent est plus régulier. Les fermes « offshore » réduisent les nuisances sonores et améliorent l'esthétique [7].

Les parcs éoliens sont naturellement situés là où il y a suffisamment de vent toute l'année pour permettre une production maximale. Les côtes, les rivages et les plateaux offrent des conditions de vent intéressantes, mais leur impact sur le paysage doit également être pris en compte. Pour ces raisons, des parcs éoliens en mer sont construits partout où c'est possible (540 MW ont été installés en mer en Europe fin 2003). Cela comprend des dizaines d'éoliennes, comme le montre le schéma.



Figure(I. 2) : Les parcs éoliens offshore et onshores.

Du point de vue structure, on distingue deux grands types d'éoliennes qui sont celles à axe vertical et celles à axe horizontal [7].

I.3.4 Aérogénérateurs à axe vertical (VAWT)

Ces capteurs de vent sont les premières structures développées pour générer de l'électricité avec leur axe de rotation perpendiculaire et perpendiculaire à la direction du vent. Cette espèce est extrêmement rare et peu connue. Ils peuvent présenter un intérêt dans certains domaines d'application. Il existe principalement trois technologies VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) [8].

Une turbine Darrieus classique ou à aubes droites (type H) et une turbine Savonius comme le montre la figure (I.3). Toutes ces lames ont deux ou plusieurs lames [9].



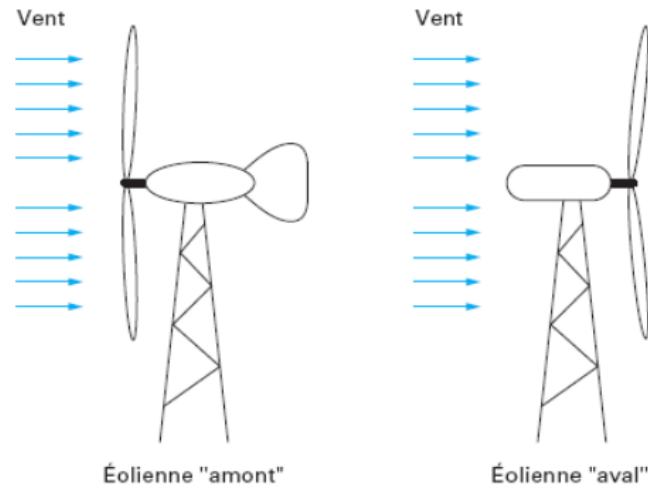
Figure(I. 3) : Exemple des constructions VAWT.

Pour ces capteurs de vent, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Ce type est très peu répandu et assez mal connue. Elles peuvent avoir un intérêt dans certains secteurs d'applications. Il existe principalement trois technologies VAWT (Vertical Axis Wind turbine) : les turbines Darrieus classique ou à pales droites (type H) et la turbine de type Savonius, comme montré à la figure (I.3), toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales [10].

I.3.5 Aérogénérateurs à axe horizontal (HAWT)

Une autre famille d'éoliennes est basée sur des pales de rotor à axe horizontal, qui sont aujourd'hui les plus courantes. Ses composants sont montés sur des pylônes et équipés d'un système d'orientation. On parle d'éolienne à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal et parallèle à la direction du vent. Divers modèles d'éoliennes utilisent deux, trois pales (les plus courantes) et plusieurs pales [10].

On peut distinguer deux types de capteurs de vent où l'hélice est en amont du vent (hélice au vent, UPWIND) et les capteurs de vent où l'hélice est en aval du vent. (hélice sous le vent, downwind) (Figure (I.4)) [10].



Figure(I. 4) : Configuration à axe horizontal.

I.3.6 Différents types d'éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à basse vitesse ont un grand nombre de pales (entre 20 et 40).

Eoliennes lentes Du fait de leur forte inertie, les diamètres sont généralement limités à environ 8 m. Leurs coefficients de performance atteignent rapidement un maximum lors des augmentations de vitesse, mais diminuent ensuite rapidement. Ces éoliennes multipales sont particulièrement adaptées aux vents légers. Ils démarrent à vide avec un vent d'environ 2-3 m/s et le couple de démarrage est relativement élevé [10].

Cependant, ils sont moins efficaces que les éoliennes à grande vitesse et sont principalement utilisés pour le pompage de l'eau. La puissance maximale que vous pouvez attendre de ce type de machine peut être calculée en fonction du diamètre à l'aide de la formule suivante :

$$P = 0.15 * D^2 * V^3 \quad (I. 1)$$

La puissance étant exprimée en Watts, le diamètre en mètre et la vitesse du vent en m/s. Les éoliennes à grande vitesse ont un nombre relativement faible de pales de rotor, variant généralement entre 2 et 2. et 4 lames. Ils sont le plus couramment utilisés dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (plus légers que les éoliennes à basse vitesse de puissance comparable) et de leur rendement élevé. Cependant, il a l'inconvénient d'avoir du mal à démarrer. Leur vitesse est nettement supérieure à celle de la machine précédente, avec moins de couteaux à des vitesses plus élevées [10].

Une formule pratique pour une éolienne à axe horizontal à grande vitesse considérant un rendement moyen :

$$P = 0.2 * D^2 * V^3 \quad (I. 2)$$

I.4 Les principaux composants d'un système éolien :

Comme déjà mentionné, il existe deux types de systèmes éoliens. Il existe de nombreux systèmes d'axes verticaux et horizontaux, mais dans ce rapport, je ne m'intéresse qu'au système d'axes horizontaux.

Une éolienne couplée à un générateur ou à une dynamo produit un courant continu (le courant alternatif est obtenu grâce à un onduleur) qui peut être alimenté par une batterie ou connecté au réseau, et s'appelle une éolienne. [11]

Une éolienne se compose de trois éléments principaux :

Mât (tour ou pylône), rotor (moyeu et pales) et nacelle.

I.4.1 Tour ou mât

Le mât est généralement en tube d'acier. La hauteur est importante et la vitesse du vent augmente à mesure que vous montez. Il existe trois principaux types de poteaux sur le marché. Haubans, poteaux en treillis ou poteaux tubulaires. Cette dernière est toujours la question la plus fréquemment posée. Généralement, le mât est légèrement plus grand que le diamètre des pales du rotor [12].

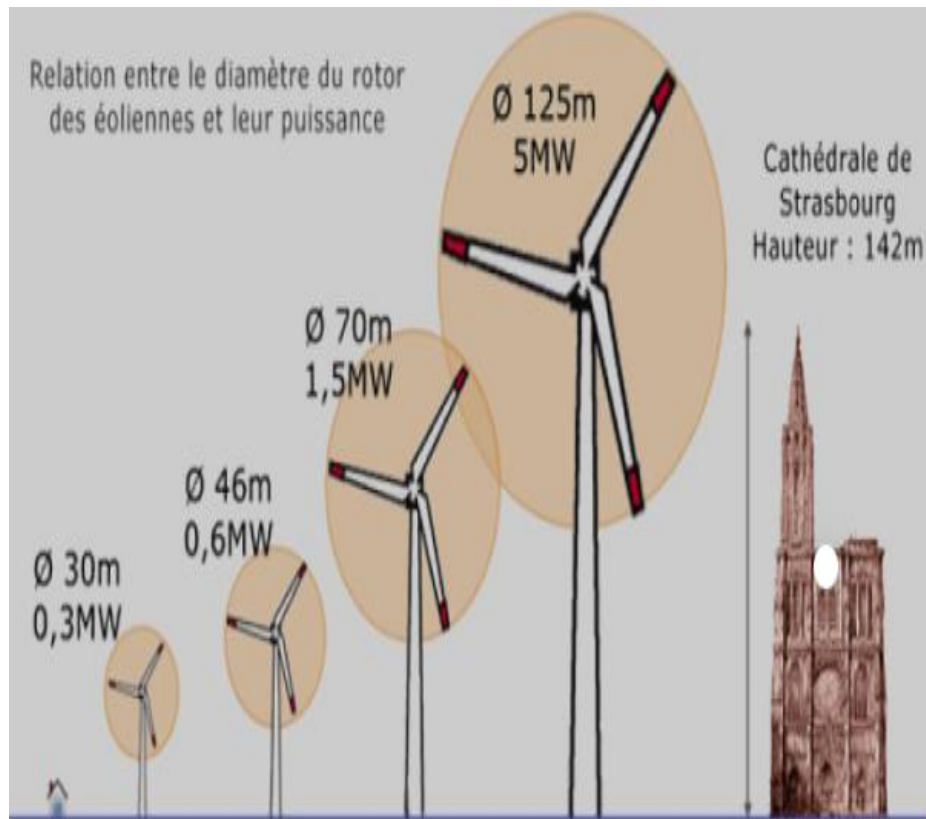
I.4.2 Le rotor (moyeu et pales)

Couper des tuyaux en acier dans lesquels sont disposés les câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de commande, la technique de raccordement au réseau de distribution et les échelles aux cages [12]. Son rôle est, d'une part, de supporter l'ensemble (rotor, nacelle) pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor suffisamment haut pour améliorer l'absorption d'énergie. Faites-le aussi haut que possible pour éviter les interférences près du sol.

La quantité de matériau utilisée est un facteur de coût important et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à choisir une taille de mât légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'éolienne. Il se compose de pales fixées au moyeu et au nez de l'éolienne et constitue la partie mobile du système.

Il convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, la couple à une pompe ou à un générateur et la relie à la nacelle par l'intermédiaire d'un moyeu. Le diamètre du cercle formé

par les pales du rotor détermine la quantité d'énergie qui peut être extraite du vent et donc la puissance qui peut être produite par la turbine.



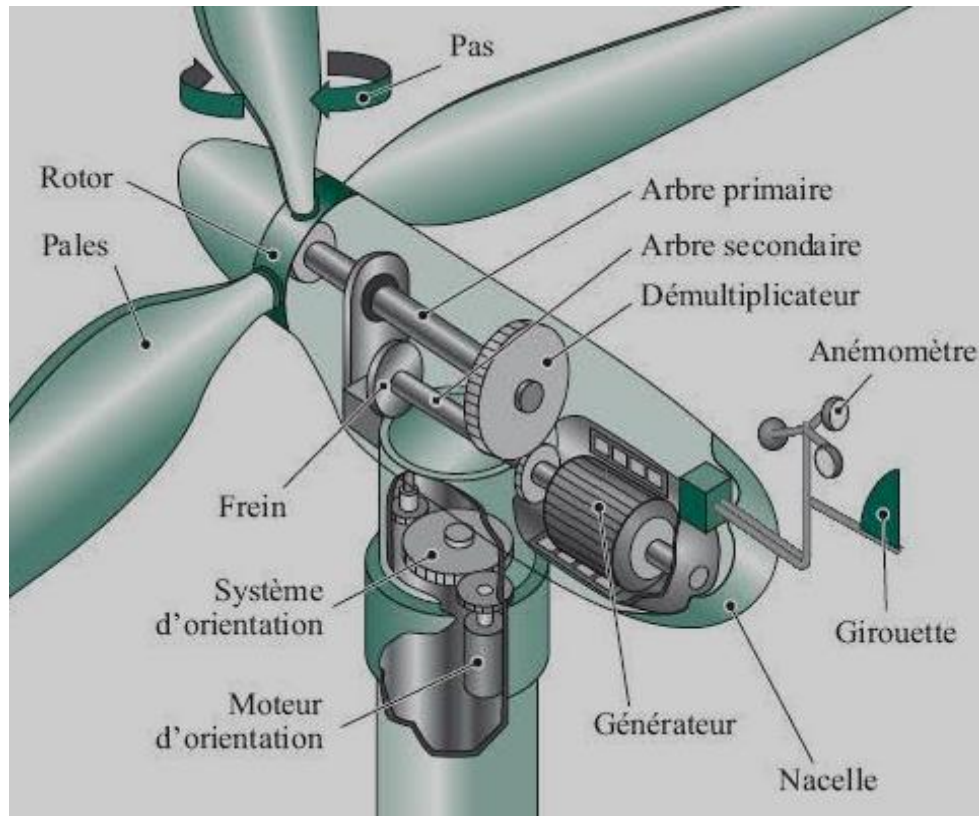
Figure(I. 5) : Puissance suivant le diamètre de l'éolienne.

Le moyeu est en général une pièce d'acier moulée, il reçoit les pales sur des brides normalisées et se monte sur l'arbre lent (primaire) du multiplicateur. Sa conception utilise les éléments finis. Il est souvent protégé par une coupe en polyester forme d'obus qui lui donne une forme aérodynamique (plus esthétique que fonctionnelle).

Les pales sont une partie très importante des éoliennes, le nombre de pales influence directement l'efficacité de conversion du rotor, plus le nombre de pales est élevé, plus le couple transmis à l'arbre du rotor sera grand [13].

I.4.3 La Nacelle

Celui qui relie le mât et le rotor. Abrite des composants électriques et électroniques et, dans les grandes éoliennes, abrite un ordinateur qui peut faire tourner le rotor de l'éolienne ou modifier le pas des pales en fonction de la direction du vent, et de petites éoliennes comme une girouette.



Figure(I. 6) : Eléments d'une nacelle.

L'arbre primaire (ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur, le multiplicateur : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire. L'arbre secondaire : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vent violents [13].

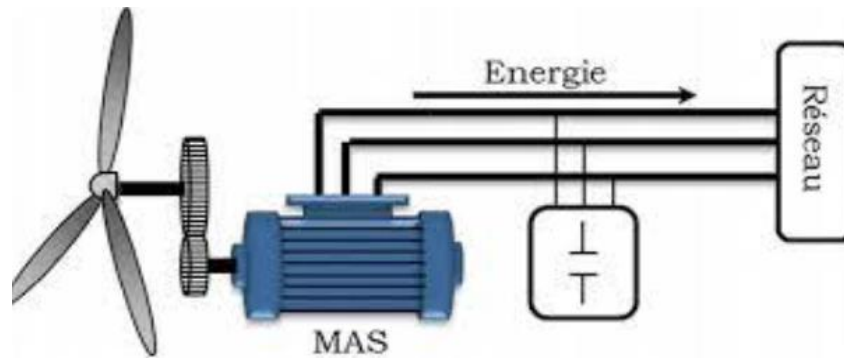
Le système d'orientation de la nacelle : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein. Le système de refroidissement : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice. Les outils de mesure du vent : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande. Voir annexe A pour la composition de la nacelle [13].

I.5 Classement des éoliennes

Il existe essentiellement deux technologies pour les éoliennes : la vitesse constante et la vitesse variable. La partie suivante explique en termes très généraux le fonctionnement de ces deux processus [13].

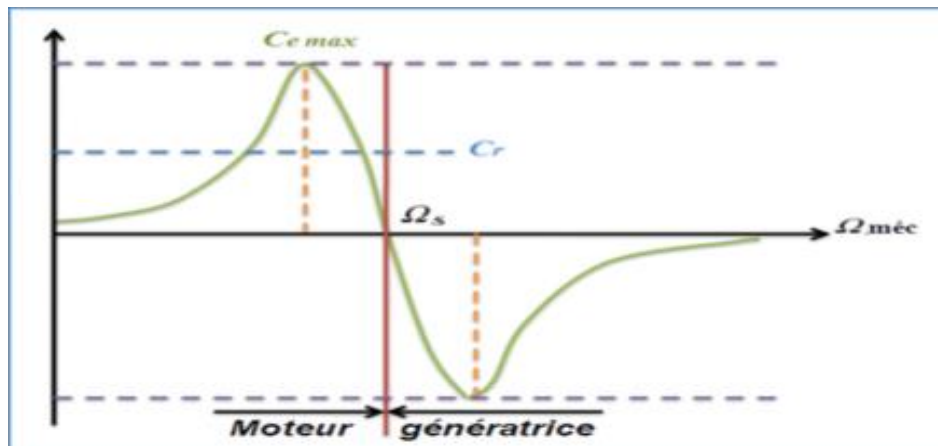
I.5.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe ont été développées en premier. Avec cette technologie, les générateurs asynchrones sont directement connectés au réseau sans dispositifs électroniques de puissance [14]. (Figure (I.7)).



Figure(I. 7) : Éolienne directement connectée au réseau.

Le couple mécanique moteur (produit par la turbine) tend à augmenter la vitesse du générateur. Ce dernier fonctionne en mode super-synchrone et produit de l'énergie électrique sur le réseau. Pour un générateur à deux paires de pôles standard, la vitesse mécanique Ω_{mec} est légèrement supérieure à la vitesse synchrone $\Omega_s = 1500$ tr/min, et un multiplicateur doit être ajouté pour faire correspondre le générateur à la vitesse du rotor. [15]



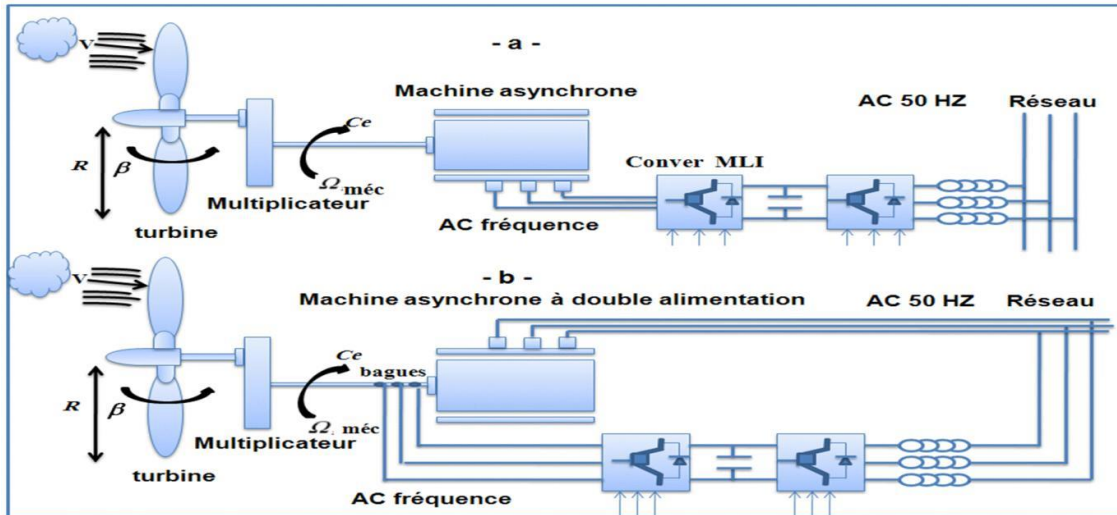
Figure(I. 8) : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone.

I.5.2 Les éoliennes à vitesse variable

Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont ils sont constitués (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique)

I.5.2.1 Principe de fonctionnement

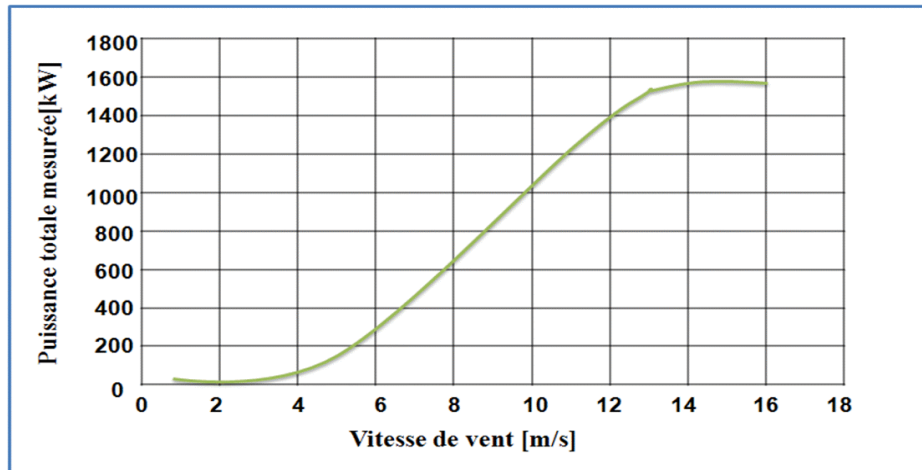
Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la figure (I.9) [16].



Figure(I. 9) : Éoliennes à vitesse variable.

La configuration de la figure (I.9.b), est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique [16].

Nous présentons sur la figure (I.10) la caractéristique de la puissance mesurée en fonction de la vitesse du vent d'une éolienne réelle de Schelle de 1.5 MW basée sur une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné. On constate à partir de cette figure que la puissance est limitée à sa valeur nominale pour une vitesse du vent de 12.5 m/s. L'orientation des pales est parfaitement réalisée dans ce cas [16].



Figure(I. 10) : Puissance totale générée mesurée en fonction de la vitesse du vent.

I.6 Énergie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique

I.6.1 Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (I.11) sur lequel on a représenté la vitesse du V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval en supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 , la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)}{2} \quad (I.3)$$

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

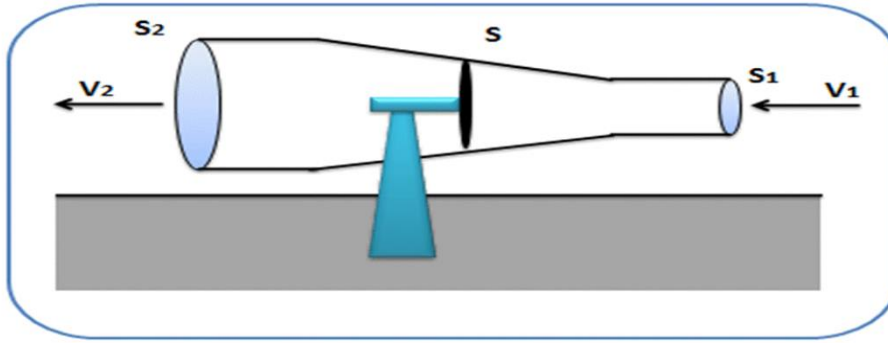
$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (I.4)$$

Soit en remplaçant m par son expression donc :

$$P_m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (I.5)$$

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

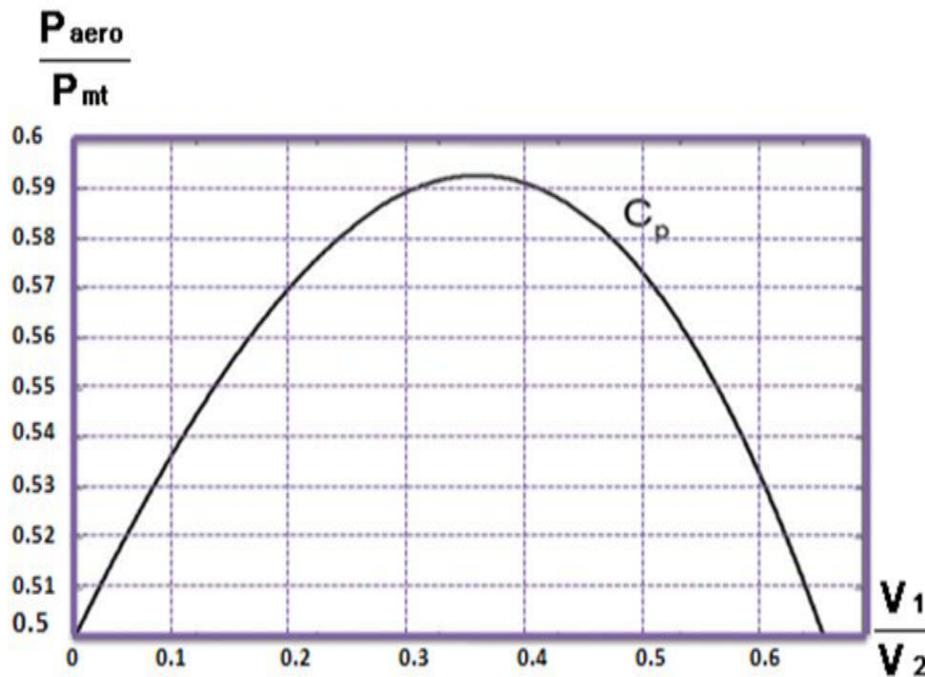
$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (I.6)$$



Figure(I. 11) : Tube de courant autour d'une éolienne.

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left[1 + \frac{V_1}{V_2}\right] \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right]}{2} \quad (I.7)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure I.12), on s'aperçoit que le ratio P_m / P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative l représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [16].



Figure(I. 12) : Coefficient de puissance.

I.7 Estimation de la source de vent à Khenchela

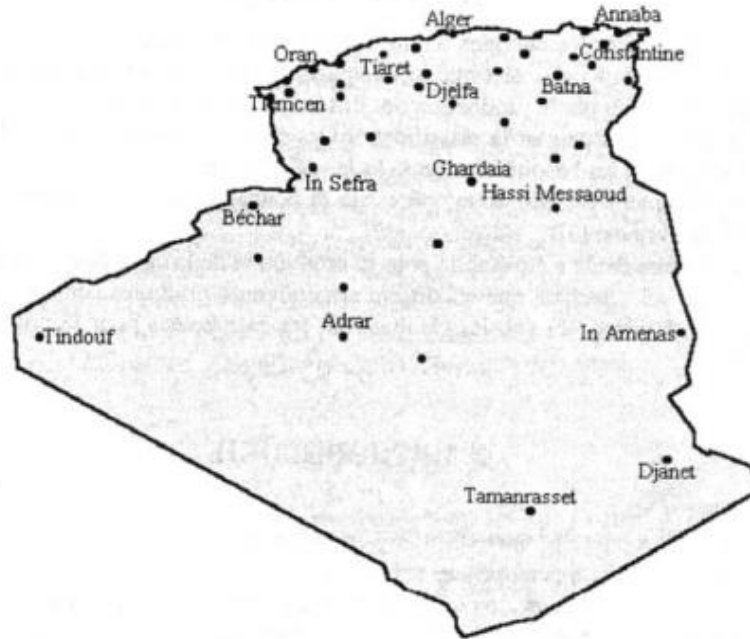
I.7.1 INTRODUCTION

Dans ce cadre, la présente étude a été établie pour la production de la carte des vents de l'Algérie à la hauteur standard de 10 mètres du sol. Sachant que les différentes éoliennes produites sont généralement à des altitudes supérieures ou égales à 25 mètres du sol, les résultats ont été extrapolés pour la production de la carte à une hauteur de 25 mètres [17].

I.7.2 METHODOLOGIE

Les données de la vitesse du vent, relatives à 26 stations, représentant en moyenne, une dizaine d'années de mesures, ont été traitées et les vitesses moyennes annuelle déterminées. Par ailleurs, afin d'augmenter la densité des points de mesure et afin d'augmenter la fiabilité des résultats, les vitesses moyennes annuelles du vent, produites par l'Office National de la Météorologie, ont été incluses, afin d'affiner le tracé des cartes. Les caractéristiques des sites de mesure.

En figure (I.13), sont représentés tous les points de mesure, utilisés pour la production des cartes du vent de l'Algérie, à une altitude 10 mètres du sol. A l'aide du logiciel Surfer, une interpolation des points de mesure et effectuée, pour la détermination de vitesses du vent à intervalle égal à 0,5 de longitude et de latitude [17].



Figure(I. 13) : Représentation des points de mesure utilisés dans l'étude.

I.7.3 Méthode d'extrapolation

La mesure de la vitesse du vent est effectuée généralement à des hauteurs manométriques égales à 10 mètres du sol. Toutefois, il est souvent intéressant de pouvoir les produire à des altitudes dignes d'intérêt telles que les hauteurs des éoliennes. Plusieurs auteurs ont proposé des formules empiriques permettant l'extrapolation verticale de la vitesse du vent. La plus connue est la loi de la puissance de Mikhaïel et al. Toutefois, ayant montré que pour des hauteurs inférieures à 100 m, l'effet de rugosité du sol ne peut être négligé lors de l'extrapolation de la vitesse du vent, Mikhaïel et al ont développé une seconde formule empirique, nommée la loi de puissance modifiée. Soit une vitesse V_1 est extrapolée d'une altitude Z_1 vers une altitude Z_2 , suivant la formule suivante [17] :

$$V_2 = V_1 \left[\frac{Z_2}{Z_1} \right]^{\alpha_1} \quad (I. 8)$$

L'exposant α_1 est sous la forme :

$$\alpha_1 = \frac{1}{\ln \frac{\bar{Z}}{Z_0}} - \left\{ \frac{0.0881}{1 - 0.0881 \ln \frac{Z_1}{10}} \right\} \ln \left(\frac{V_1}{6} \right) \quad (I. 9)$$

Avec

$$\bar{Z} = \exp \frac{[\ln(Z_1) + \ln(Z_2)]}{2} \quad (I.10)$$

Z0, la rugosité du sol. Les vitesses du vent, dont la rugosité du lieu est disponible, ont été extrapolées de la hauteur de 10 mètres à une altitude de 25 mètres. Ceci a permis l'obtention de 35 points de mesure, pour le territoire national [17].

N°	Nom	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Rugosité (m)	V (m/s)
1	Adrar *	0.28	27.82	0.01	5.9
2	Alger	3.25	36.72	0.01	3.2
3	Annaba *	7.82	36.82	0.01	2.4
4	Batna *	6.18	35.55	0.01	4.2
5	Béchar *	-2.23	31.62	0.03	3.6
6	Béjaia *	5.6	36.72	0.03	4.2
7	Beni Abbès	-2.10	30.08	/	1.7
8	Ben Saf *	-1.35	35.3	0.02	2.8
9	Biskra *	5.73	34.8	0.02	4.1
10	Bordj Bou Arreridj	4.67	36.07	0.01	3.4
11	Chlef	1.33	36.10	0.01	2.8
12	Constantine	6.62	36.10	0.01	2.6
13	Djanet	9.28	24.33	/	2.3
14	Djelfa	3.25	34.68	0.08	2.7
15	El Bayadh	1.00	33.67	0.01	3.9
16	El Goléa	2.87	30.57	/	3.0
17	El Kheiter *	4.70	34.15	0.08	4.6
18	El Oued	6.78	33.50	0.01	3.7
19	Ghardaia *	3.80	32.40	0.03	4.6
20	Guelma	7.43	36.47	/	1.8
21	Hassi Messaoud *	6.15	31.67	0.00	4.1
22	In Amenas	9.63	28.05	/	4.3
23	In Oussera	2.52	35.55	0.08	3.0
24	In Salah	2.47	27.20	/	4.4
25	In Sefra	-0.60	32.75	/	3.0
26	Ksar El Chellala	2.32	35.17	0.08	3.4
27	Maghnia *	-1.78	34.82	0.01	2.7
28	Mascara	0.15	35.22	0.05	2.4
29	Mechria	-0.27	33.55	/	3.8
30	Miliana	2.23	36.30	0.5	2.6
31	Mostaganem *	0.12	35.83	0.01	1.0
32	M Sila *	4.50	35.67	0.03	4.1
33	Oran	-0.62	35.63	0.01	4.1
34	Oum El Bouaghi	7.11	35.87	/	2.1
35	Saida *	0.15	34.87	0.01	2.6
36	Sétif	5.25	36.18	0.01	3.1
37	Skikda	6.90	36.88	0.01	2.9
38	Tamanrasset *	5.52	22.78	0.10	2.9
39	Tébessa	8.12	35.42	0.03	2.8
40	Tiaret	1.47	35.37	0.02	4.7
41	Timimoun *	0.28	29.25	0.01	5.1
42	Tindouf *	-8.10	27.67	0.00	4.6
43	Tlemcen	-1.28	34.95	0.01	2.3
44	Touggourt *	6.13	33.12	0.04	3.3

Figure(I. 14) : Caractéristiques des sites et stations étudiés.

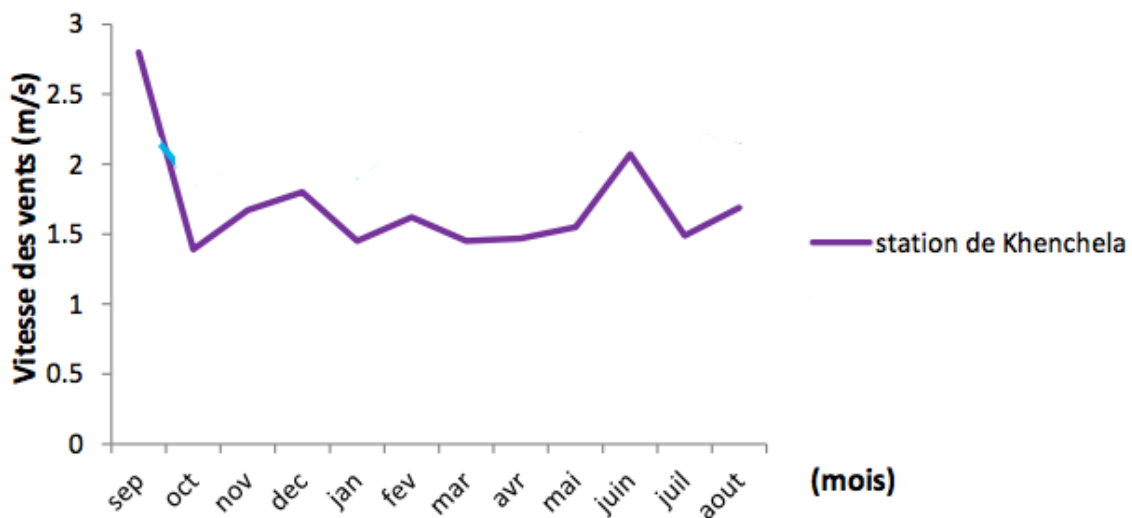
Le vent est l'air en mouvement défini par sa direction, sa vitesse, son intensité et ses aspects locaux. Il élève l'évapotranspiration potentielle et par conséquent accentué la sécheresse. Sur la région d'étude, Les vents dominants sont ceux d'Ouest et du Nord - Ouest. Ces derniers amènent l'humidité de l'atlantique du Nord (en hiver). Outre ces vents fréquents, en hivers il y a aussi les vents du Nord qui sont souvent secs et froids. En été les vents du Sud sont chauds et secs parfois chargés de sable (vents de sable) [18].

Le tableau (II.1) et la figure (I. 15) donnent un aperçu sur la vitesse des vents calculés :

Mois	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	juil	aout
Khenchela	2.08	1.39	1.67	1.80	1.45	1.62	1.45	1.47	1.55	2.07	1.49	1.69

Tableau(I. 1) : Vitesse moyenne des vents (Station de Khenchela – 1990/2014) source O.N.M.

La variation saisonnière de la vitesse du vent durant la période d’observation est assez constante avec une valeur maximale de 2,07 m/s observée pendant le mois de juin, alors que la valeur minimale 1,39m/s est enregistrée au mois d’Octobre [18].



Figure(I. 15) : Variation des vitesses moyennes mensuelles des vents (Station de Khenchela – 1990/2014) (source O.N.M).

I.8 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur le système éolien. Nous avons également présenté une estimation de la source de vent à khenchela. Nous avons également consacré ce chapitre à la description d’une éolienne, les principaux composants de l’éolienne, le classement des éoliennes.

Au chapitre suivant, nous allons nous intéresser à la modélisation des différentes parties constituant une chaîne de production d'énergie éolienne basée sur une GSAP, ainsi que la modélisation des convertisseurs statiques

CHAPITRE II

Modélisation d'un système
de production éolienne basé
sur une GSAP

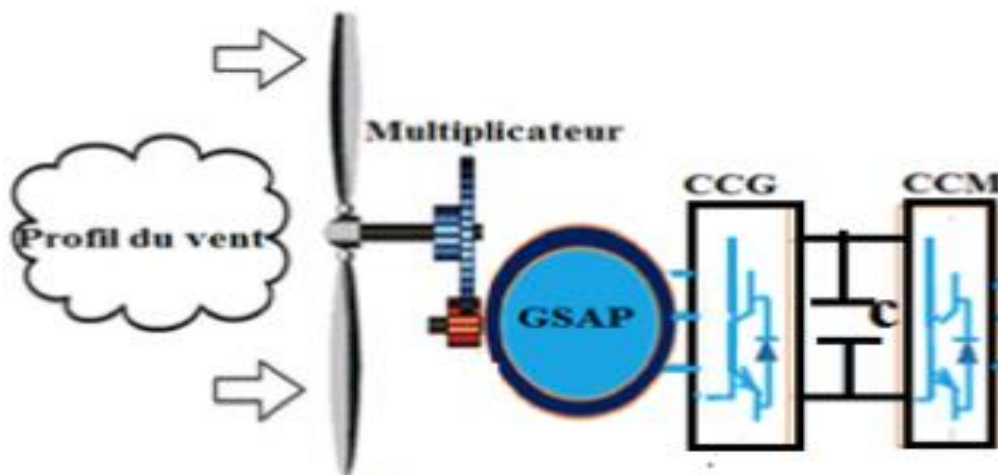
Chapter II: Modélisation d'un système de production éolienne basé sur une GSAP

II.1 Introduction

Les turbine et les génératrices sont les éléments les plus importants dans la chaîne de production éolienne, parce que la turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique pour faire tourner le rotor du générateur et ce dernier est le responsable qui assure une bonne production éolienne.

Après l'étude du principe de fonctionnement d'une chaîne de production éolienne, ce chapitre est consacré à la modélisation mathématique du système de production éolienne adoptée dans notre étude est illustrée sur la figure (II. 1), Il est constitué d'une turbine éolienne à trois pales, une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), un bus continu (DC), deux convertisseurs statiques de puissance [19].

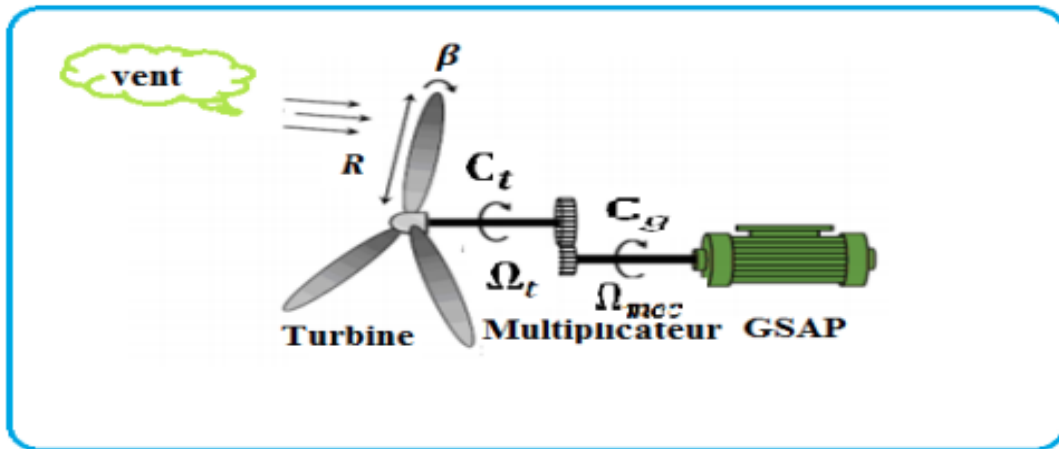
L'idée est de décrire un modèle de turbine et multiplicateur ainsi GSAP. Afin de donner au lecteur des connaissances de base importants, ce chapitre commence par une description générale sur la turbine et sur le multiplicateur, ensuite on va introduire le concept du système triphasé et de vecteurs spatiaux ainsi le modèle mathématique complexe du GSAP, et on termine par la modélisation des convertisseurs statiques [19].



Figure(II. 1) : Synoptique du système de production d'énergie éolienne à base de la GSAP.

II.2 Modélisation de l'éolienne

II.2.1 Modélisation de la partie mécanique



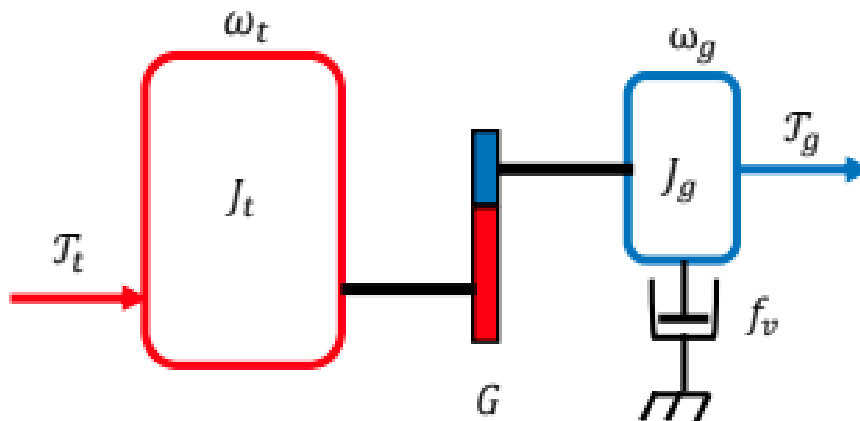
Figure(II. 2) : Schéma de la turbine éolienne.

- **Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine**

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes [20]:

- les pales sont considérées à conception identique avec les mêmes paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement ;
- les coefficients de frottements des pales par rapport à l'air et par rapport au support sont très faibles et peuvent être ignorés ;
- la vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.

On obtient alors un modèle mécanique simple (figure II.3).



Figure(II. 3) : Modèle mécanique simplifié de la turbine.

Avec :

$-J_t$: le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne.

$-J_g$: le moment d'inertie de la GSAP.

$-f_v$: le coefficient dû aux frottements visqueux de la GSAP.

$-T_g$: le couple mécanique sur l'arbre de la GSAP.

$-\omega_g$: la vitesse de rotation de la GSAP [5].

II.2.2 Évaluation des ressources éoliennes :

II.2.2.1 Origine du vent et mesure de sa vitesse :

Tout commence, comme d'habitude, grâce au soleil ! Cela provoque le réchauffement des mers et des continents, ce qui entraîne un réchauffement de l'air au-dessus d'eux. Ainsi, le volume d'air chauffé augmente, devient plus léger et monte dans le ciel. Cet air chaud qui monte rencontre l'air froid qui descend. C'est cette différence de température entre ces deux masses d'air qui crée le vent.

Ces mouvements sont influencés par la force de Coriolis qui agit perpendiculairement à la direction du mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère [21].

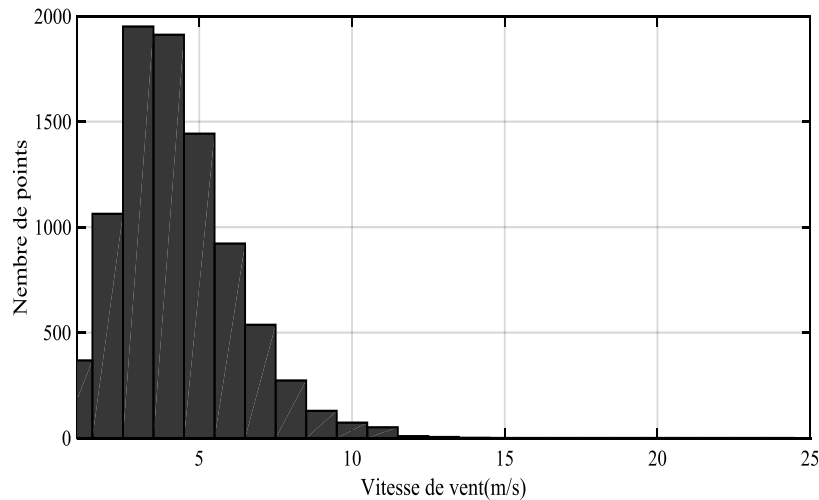
Elle peut être mesurée par girouette, anémomètre, thermomètre et/ou baromètre et/ou hygromètre [21].

II.2.2.2 La puissance du vent :

La puissance du vent P est la vitesse V à laquelle l'énergie est disponible, ou la vitesse à laquelle l'énergie traverse une surface S par unité du temps :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot S \cdot V^3 \quad (II.1)$$

Elle est proportionnelle à la densité de l'air instantanée, à la surface de captation du vent et au cube de la vitesse du vent.



Figure(II. 4) : Histogramme des fréquences et la courbe de Distribution real.

II.2.2.3 Distribution de Weibull :

Un outil très utilisé pour déterminer le potentiel énergétique en un point géographique est la distribution suivant la loi de probabilité de Weibull. Cette distribution permet de tracer la densité de probabilité de l'occurrence d'une valeur de vitesse de vent sur une période de temps (année, mois...).

Comme il est ardu de manipuler l'ensemble des données relatives à une distribution de la fréquence du vent, il serait plus convenable pour des considérations théoriques, de modéliser l'histogramme des fréquences des vitesses du vent par une fonction mathématique continue que par une table de valeurs discrète.

On peut donc opter pour le modèle de Weibull. En effet, pour des périodes allant de quelques semaines jusqu'à une année, la fonction de Weibull représente raisonnablement les vitesses observées, Il s'agit d'une fonction de densité de probabilité, s'exprimant sous la forme [22]:

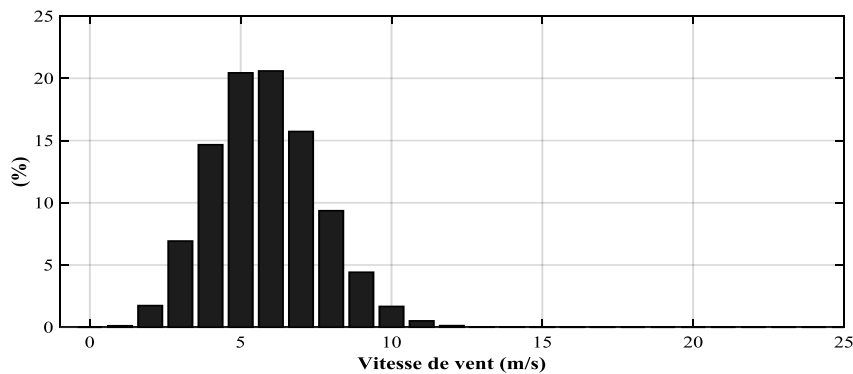
$$F(v) = \frac{K_v}{C_v} \left(\frac{K_v}{C_v}\right)^{K_v-1} e^{-\left(\frac{v}{C_v}\right)^{K_v}} \quad (II.2)$$

L'expression (II.14) présente la fonction de distribution statistique de Weibull. Les paramètres k_v et C_v sont respectivement le facteur de forme (sans dimension) et le facteur d'échelle en [m/s] [18].

A partir des données mesurées, dans le site de nasa, les résultats de l'ajustement par la distribution de Weibull et les valeurs des paramètres de Weibull ont été calculés dans MATLAB par l'application de distribution fitting à 10 m du sol avec une vitesse moyenne du vent de $V_v=3.032\text{m/s}$.

Les valeurs du ($K_v=2.15574$ et $C_v=4.0699\text{m/s}$) sont calculées par la fonction du MATLAB en utilisant des mesures de vitesse de vent journalier à 10 m de hauteur pour une année.

La représentation de cette distribution sous MATLAB permet d'obtenir le graphe suivant :



Figure(II. 5) : Histogramme des fréquences et la courbe de Wei bull pour khenchela.

La (figure II. 5) montre une courbe de distribution réelle tracée à l'aide de la vitesse du vent horaire historique pour le site de la NASA (khenchela), Alors que la (figure II. 8) montre la courbe de distribution de Wei bull ajustée avec $c = 4.0699\text{m/s}$, $k = 2.15574$

Dans une comparaison entre les deux figures, on remarque que la vitesse du vent ne diffère pas beaucoup entre elles.

L'ajustement de la courbe de Weibull est utilisé pour obtenir les facteurs d'amplitude et de forme à l'aide de données historiques sur la vitesse du vent. Comme le montre la figure, la distribution de Weibull ajustée est un modèle probabiliste approprié pour les données de vitesse du vent [23].

II.2.2.4 Calcule de l'énergie du vent annuelle du site étudié :

Pour déterminer la densité d'énergie éolienne disponible, il suffit de multiplier l'énergie éolienne P par la fonction de distribution du vent $f(V)$. Par la suite, le potentiel d'énergie éolienne E pendant la période de temps T (en ignorant le temps de maintenance) est déterminé par l'intégration suivant [24]:

$$E = T \int_{v_1}^{v_0} P(V) f(V) dV \quad (II.3)$$

Pour une période d'un an, $T = 365 * 24\text{h}$ et en utilisant n points de données du vent, on peut déterminer l'énergie captée en utilisant la méthode des trapèzes :

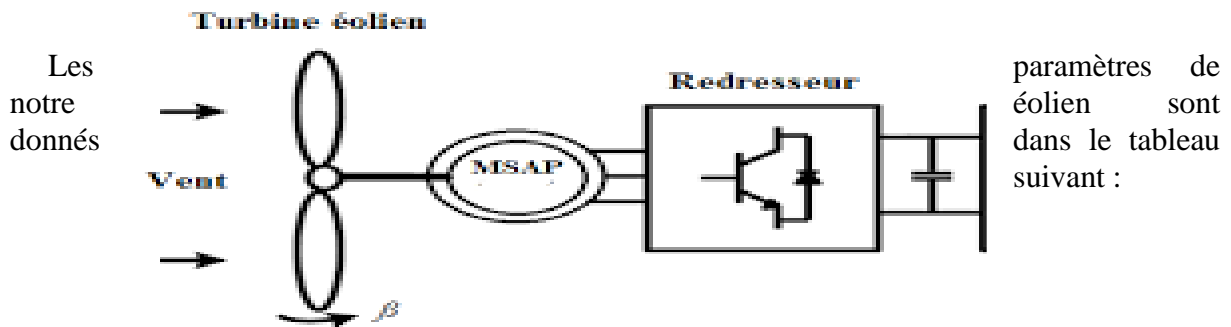
$$E = T \frac{\sum_{i=1}^n [P(V_{i+1})f(V_{i+1}) + P(V_i)f(V_i)](V_{i+1} + V_i)}{2} \quad (II.4)$$

En appliquant la méthode vue précédemment à la vitesse du vent dans le logiciel MATLAB pour calculer l'énergie éolienne annuelle générée par une surface de 1m^2 , les résultats sont les suivants :

$$E = 401 \text{ KWh /m}^2\text{/an}$$

II.2.3 Modélisation de la turbine

Le modèle de la turbine éolienne doit représenter l'ensemble des éléments du système aérogénérateur. (La figure II.6) représente une éolienne avec une génératrice de type synchrone à aimants permanents similaire celle que nous avons utilisé dans notre travail. Les éoliennes les plus utilisées sont généralement constituées de trois pales qui pivotent sur leur axe avec un angle d'inclinaison β [25].



Figure(II. 6) : Turbine éolien.

P_{eol}	50 KW
R	5 m
$C_{p_{max}}$	0,48
β_{max}	0°
C_1	0,5176
C_2	116
C_3	0,4
C_4	5
C_5	21
C_6	0,0068

Tableau(II. 1) : Paramètres d'éolien de 50 kW.

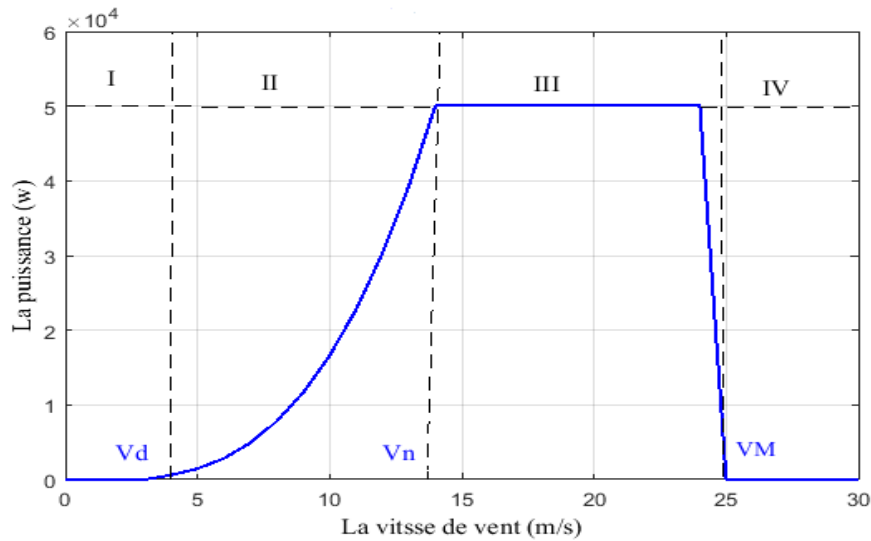
II.2.3.1 La puissance aérodynamique

La puissance théorique appliquée à la turbine est donnée par l'équation (II.5). Où ρ est la masse volumique de l'air, S est la surface circulaire balayée par la turbine ; β est l'angle de calage des pales, v est la vitesse du vent en [m / s], [26].

$$P = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S v^3 \quad (II.5)$$

Dans notre travail nous avons simulé une éolienne qui a les caractéristiques suivantes :
1-puissance nominales.

2-vitesse de vent.



Figure(II. 7) : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

La courbe donnant la puissance aérodynamique de l'aérogénérateur que nous avons simulé, fonctionnant à vitesse variable, en fonction de la vitesse de vent est illustrée par la figure (II.7).

A partir de la figure (II.7) nous avons tiré les points remarquables qui caractérisent notre éolienne :

v_D : La vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, v_D varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

v_n : La vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, v_n varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

v_M : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, v_M vaut 25m/s.

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones [16] :

- la zone (I) où $P_{\text{turbine}} = 0$ (la turbine ne fournit pas de puissance).
- la zone (II) dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent v .
- la zone (III) où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P_{turbine} fournie reste sensiblement égale à P_n .
- la zone (IV) dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

II.2.3.2 Le coefficient de puissance

Le ratio de vitesse λ est défini comme le rapport entre la vitesse angulaire de la turbine Ω_t et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit [27] :

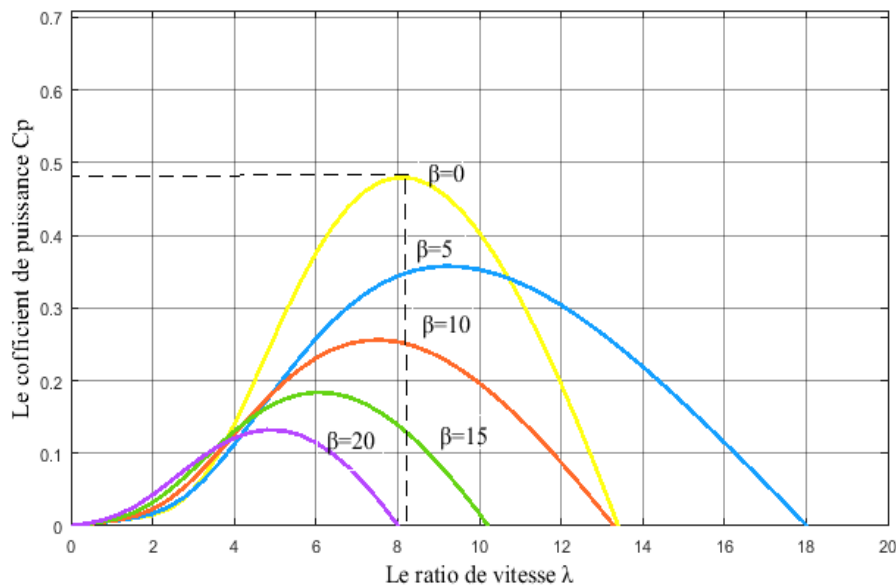
$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (II.6)$$

Dans la littérature, des expressions approchées du coefficient de puissance pour les turbines des éoliennes sont proposées [27] :

$$C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left(\frac{-21}{\lambda_i}\right) 0.0068\lambda_i \quad (II.7)$$

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.003\beta} - \frac{0.035}{\beta^2 + 1}} \right) \quad (II.8)$$

La figure (II.8) montre les courbes du coefficient de puissance en fonction de λ pour différentes valeurs de β . Nous avons obtenu un coefficient de puissance maximum de 0.48 pour un ratio de vitesse λ qui vaut 8.1 (λ_{opt}). En fixant β et λ respectivement à leurs valeurs optimales, le système éolien fournira une puissance électrique optimale [27].



Figure(II. 8) : Caractéristique coefficient de puissance/vitesse spécifique de vitesse pour différents angles d'inclinaison des pales.

II.2.4 Modèle du multiplicateur

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

$$C_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_t} \quad (II.9)$$



Figure(II. 9) : Modèle mécanique du multiplicateur.

Le couple et la vitesse de la turbine se sont rapportés au côté du générateur par :

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (II.10)$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.11)$$

Où :

C_g : est le couple de générateur ;

Ω_t : est la vitesse de rotation du générateur ;

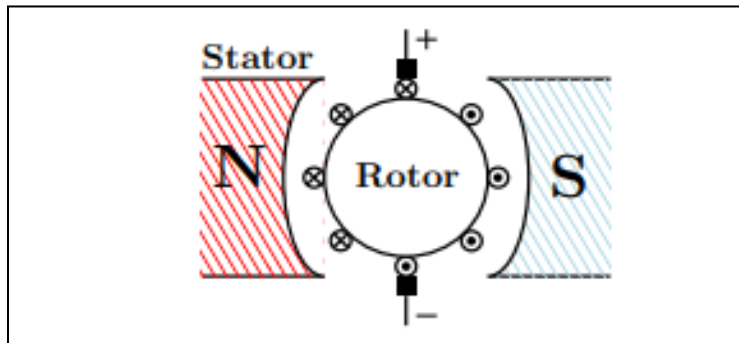
G : c'est le multiplicateur.

II.2.5 Modèle de la charge (MCC)

Les machines CC sont les premières à apparaître parmi les machines électriques. Leur principe de fonctionnement est le suivant : le stator (inducteur) fournit un champ magnétique de direction et sens constants dans l'entrefer (via un électro-aimant ou un aimant permanent) [28].

Le rotor (induit) est équipé d'un certain nombre d'électro-aimants (spires) dont la polarité est inversible par un système mécanique de balais-collecteurs figure I.20 ; la polarité de chaque

spire est inversée une fois par demi-tour de façon à créer un champ magnétique induit en quadrature avec le champ inducteur pour produire un couple électromagnétique [28].



Figure(II. 10) : Schéma d'une machine CC.

Suivant la configuration des bobinages statorique et rotorique, il existe 5 sous-catégories de machines DC [28] :

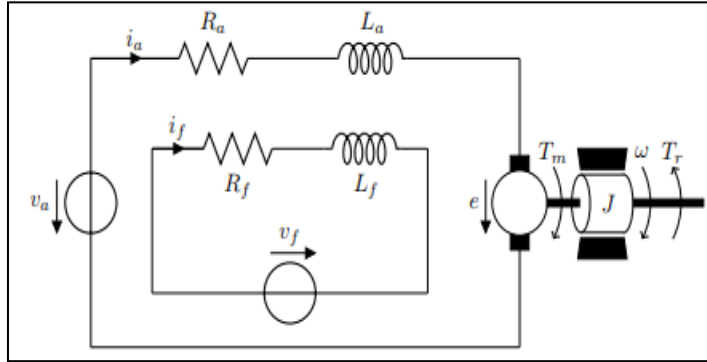
- **Machine à excitation séparée** : le stator et le rotor sont séparément alimentés.
- **Machine série** : les enroulements statorique et rotorique sont montés en série.
- **Machine shunt ou à excitation parallèle** : les enroulements inducteur et induit sont montés en parallèle.
- **Machine à excitation composée** : une partie du stator est montée en série avec le rotor et un autre est de type shunt.
- **Machine à aimant permanent** : l'inducteur est un aimant permanent.

II.2.5.1 Avantages et inconvénients

Les machines DC sont plus faciles à commander que les machines AC. En revanche, elles ont un rapport puissance/volume inférieur à celui des machines AC, et la présence d'une commutation mécanique raccourcit la durée de vie de ces machines (entretien nécessaire) et limite leur utilisation dans certains lieux vulnérables aux étincelles générées par le système de commutation [28].

II.2.5.2 Machine à aimant permanent

En effet on s'intéresse à la machine CC à aimant permanent, dont le bobinage inducteur est remplacé par un aimant de flux ψ .



Figure(II. 11) : Représentation schématique d'une MCC à aimant permanente.

Les équations de cette machine s'écrivent [20] :

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e \quad (II. 12)$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r - f_v \Omega \quad (II. 13)$$

Avec

$$e = K_e \Omega \quad (II. 14)$$

$$C_m = K_e i_a \quad (II. 15)$$

$$K_e = K \psi \quad (II. 16)$$

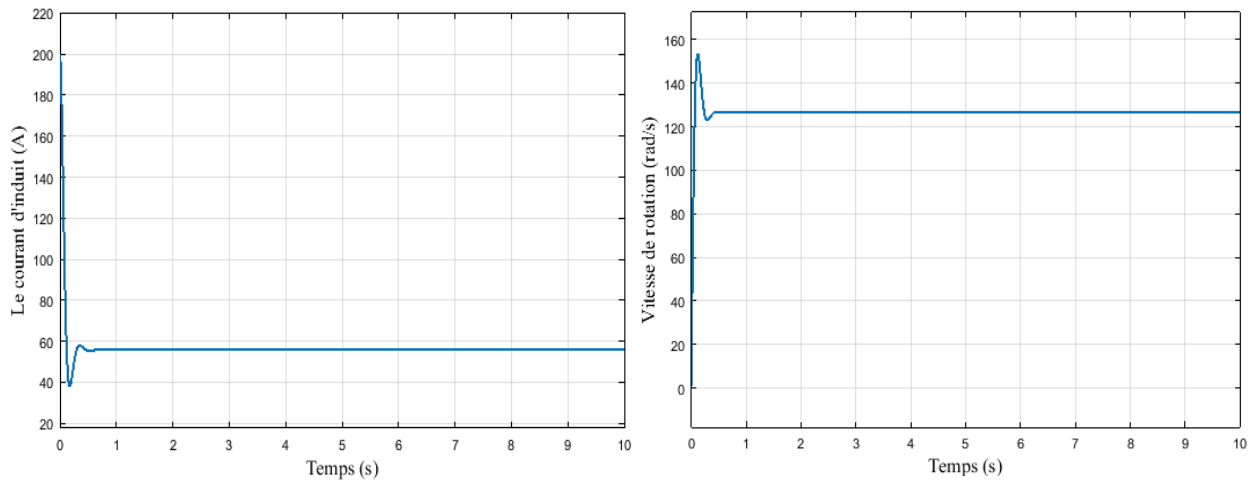
Les paramètres de notre machine sont donnés dans le tableau suivant :

I_{nm}	50 A
U_{nm}	240 V
R_a	0.5 Ω
L_a	0.05 H
T_m	1.3694 N.m/A
J	0.08 Kg.m ²

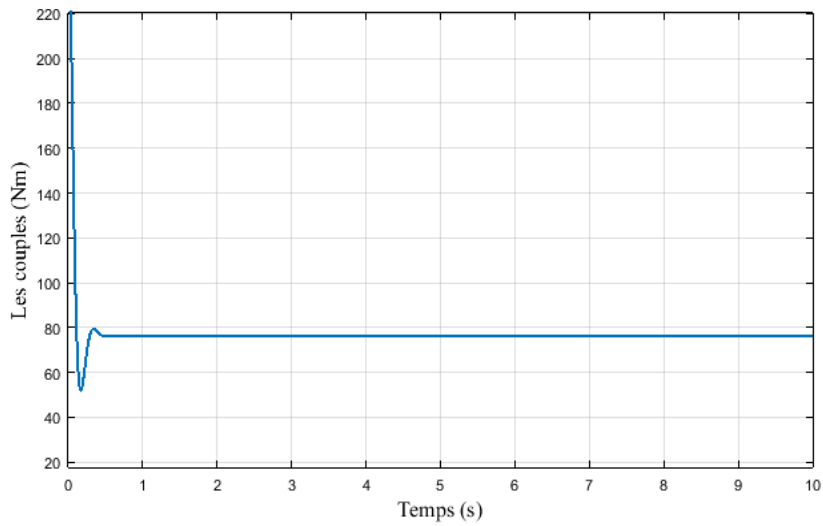
Tableau(II. 2) : Paramètres de la machine CC à aimant permanent.

II.2.5.2.1 Simulation de la machine à aimant permanent

Les figures suivantes illustrent les résultats de simulation de notre moteur à courant continu à aimant permanent sous MATLAB/SIMULINK pour une tension nominale égale 240 V et un couple résistant égale à 76. N.m. [29]



Figure(II. 12) : Le courant d'induit et la vitesse de rotation de la MCC.



Figure(II. 13) : Les couples de la MCC.

II.3 Modélisation de la partie électrique

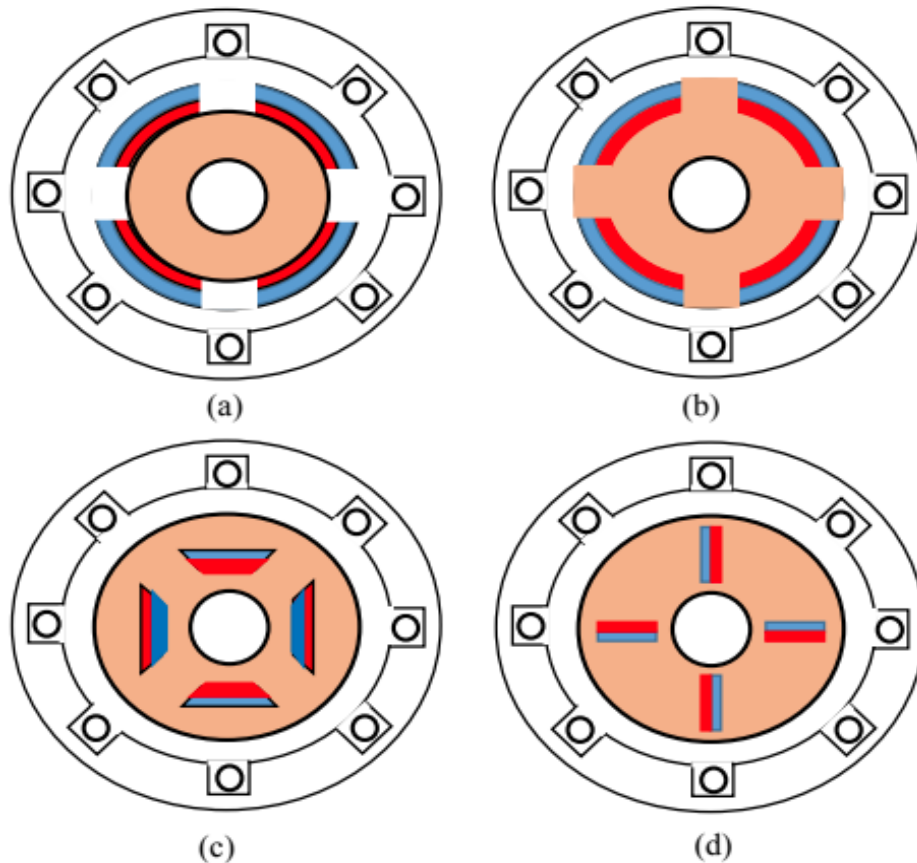
II.3.1 Modélisation de la génératrice synchrone a aimant permanent (GSAP)

II.3.1.1 Généralité sur la génératrice synchrone a aimant permanent (GSAP)

La Génératrice Synchrone à Aimants Permanents (GSAP) est une machine synchrone régulière, où le circuit d'excitation à courant continu a été remplacé par des aimants permanents. En absence de balais et des bagues de collecteur, la taille physique de cette machine s'est vue réduite considérablement tout en assurant une fiabilité plus élevée avec un bon rapport densité de puissance sur volume. Aussi, par l'utilisation d'aimants permanents les pertes électriques au rotor sont éliminées [30].

En raison des avantages mentionnés, les GSAP deviennent une solution intéressante pour de multitudes applications notamment celles de production d'énergie électriques éoliennes. Toutefois, les inconvénients de l'excitation par aimants permanents sont d'abord les coûts élevés pour les matériaux et leur fabrication qu'ils soient à base d'alliages métalliques ou de terre rares [30].

La GSAP peuvent être classés en fonction du montage des aimants dans le rotor. Ainsi les aimants peuvent être montés en surface ou dans la profondeur du rotor. Dans la figure (II.14) nous illustrons des exemples de montage d'aimants superficiels et enterrés [30] .



Figure(II. 14) : Positionnement des aimants au rotor.

II.3.1.1.1 Localisation des aimants au rotor

La position des aimants au rotor influe considérablement le fonctionnement de la machine. Ces derniers peuvent-être positionnés à la surface du rotor ou bien à l'intérieur du rotor. La figure (II.14) illustre les différentes possibilités du positionnement de ces aimants [31] .

Le couple instantané dans n'importe quelle machine est la somme de trois couples élémentaires.

$$\mathcal{T}_{total} = \mathcal{T}_{reluctant} + \mathcal{T}_{hybride} + \mathcal{T}_{de\ detente} \quad (II. 17)$$

Le couple réluctant est lié à la variation de la réluctance du circuit magnétique, vue par le flux statorique, en fonction de la position du rotor. Le couple hybride résulte lui de l'interaction du flux statorique avec le flux rotorique. Enfin, le couple de détente est lié à la variation de la réluctance du circuit magnétique, vue par le flux rotorique, en fonction de la position du rotor. Ce dernier possède une valeur moyenne nulle, mais il peut être responsable d'ondulations de couple gênantes [32] .

a. Configurations à aimants déposés en surface

Le couple réluctant est nul, le rotor ne présentant aucune saillance quand il tourne, cette machine est dite à pôles lisses. En raison de leurs aimants qui sont disposés directement sur la

périphérie du rotor (noyau ferromagnétique lisse) figure II.6 (a). La topologie à rotor interne est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et son faible coût de fabrication [33].

Cependant elle présente quelque inconvénient. En effet, les aimants permanents sont exposés aux champs de démagnétisation. Les inductances d'axes « d » et « q » sont relativement proches et la capacité de défluxage (régime de désexcitation) pour augmenter la vitesse de rotation est très limitée. De plus, l'inertie du rotor et le risque du détachement des aimants (forces centrifuges), apportent des limites de fonctionnement à hautes vitesses [33].

b. Aimants insérés

Comme des machines avec aimants en surface, les aimants du type insérés sont aussi montés sur la surface du rotor, Toutefois, les ouvertures entre les aimants permanents sont partiellement remplies avec le fer, comme montré sur la figure II.6 (b). Le fer entre les aimants permanents crée une saillance et donne une somme d'un couple hybride, d'un couple de détente et d'un couple réluctant. La réactance synchrone de l'axe q est légèrement supérieure à celle dans l'axe d .

c. Aimants enterrés

Ces machines sont dites à pôles saillants en raison de leurs aimants qui sont intégrés dans le rotor figure (II.6 (c)) et aimantés radialement. Du fait que la surface du pôle magnétique est plus petite que celle du rotor, l'induction dans l'entrefer est plus faible que l'induction dans l'aimant. La réactance synchrone dans l'axe d est plus petite que celle de l'axe q . Les aimants de cette configuration sont très bien protégés contre les forces centrifuges ainsi que le couple réluctant n'est pas nul. Cette configuration du rotor est recommandée pour les applications à grandes vitesses.

d. Aimants à concentration de flux

Une autre façon de placer les aimants permanents dans le rotor et de les enterrer profondément à l'intérieur du rotor. Ici, les aimants sont aimantés dans le sens de la circonférence figure (II.6 (d)). Les pôles magnétiques se forment alors au niveau des parties ferromagnétiques du rotor par concentration de flux provenant des aimants permanents.

L'avantage de cette configuration par rapport aux autres est la possibilité de concentrer le flux généré par les aimants permanents dans le rotor et d'obtenir ainsi une induction plus forte dans l'entrefer. Comme les machines à aimants intérieurs, les aimants permanents de cette dernière sont aussi bien protégés contre la désaimantation et les contraintes mécaniques. Le couple réluctant n'est pas nul, ainsi $L_{sq} > L_{sd}$ [34].

La solution la moins coûteuse reste néanmoins la solution à aimants en surface, car le rotor semble plus difficile à réaliser dans les autres cas.

II.3.1.2 Modélisation mathématique de GSAP

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (robustesse, maintenance, prix), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne.

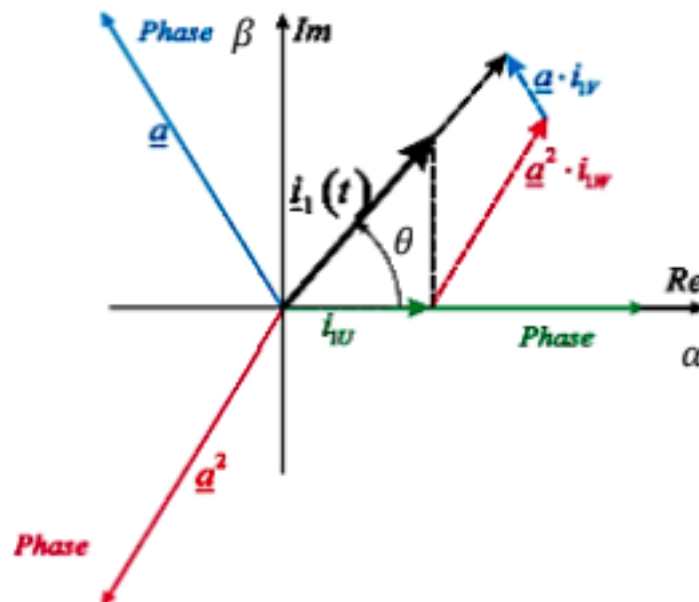
Hypothèses simplificatrices

Le modèle mathématique de la machine synchrone électrique obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de la **FEM** créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligé avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L'effet d'encoche est négligeable [35].

II.3.1.3 Description mathématique de GSAP

Avant de modéliser la GSAP on donne une généralité sur le système triphasé avec les nombres complexes (suivant le phaseur).



Figure(II. 15) : Le système triphasé dans le plan complexe.

La figure (II.15) illustre les trois courants. Nous avons un vecteur complexe qui circule avec la fréquence du stator ω_s qui est une projection des trois courants de phase.

Les autres quantités triphasées sont obtenues de manière similaire en introduisant des vecteurs spatiaux. La relation entre les courants triphasés et le vecteur spatial est la suivante :

$$\underline{i}_s^s = \frac{3}{2} (\underline{i}_a + \underline{a}i_b + \underline{a}^2i_c) \quad (II.18)$$

L'opérateur spécial, où $\underline{a} = e^{j2\pi/3}$, le vecteur spatial sera alors :

$$I_s^s = I_s e^{j\omega t + \psi m} \quad (II.19)$$

Avec :

$$\theta_s = \int_0^t \omega_s dt \quad (II.20)$$

L'équation (II.19) pour la transformation (d, q) est donnée par :

$$i_s = i_s^s e^{-j\theta(t)} = i_{sd}(t) + j i_{sq}(t) \quad (II.21)$$

Et pour la transformation inverse en coordonnées (α, β) est alors :

$$i_s^s = i_s e^{j\theta(t)} = i_{s\alpha}(t) + j i_{s\beta}(t) \quad (II.22)$$

Et la même chose pour l'équation de la tension [36].

Lorsque la génératrice débite sur une charge, les tensions disponibles à la sortie s'expriment par les relations (II.23). La réaction magnétique d'induit, est évoquée lorsque les enroulements stator sont parcourus par un courant. Une distorsion magnétique due à l'entrefer et à ces courants statoriques provoque une déformation du champ tournant initial. Nous supposons que la répartition de l'entrefer est uniforme, que la machine est parfaitement symétrique et négligeons les distorsions magnétiques [37].

La tension du stator de GSAP a pôle lisse est donnée par :

$$u_s^s = R_s i_s^s + \frac{d\varphi_s^s}{dt} \quad (II.23)$$

L'équation du flux de stator est écrite par :

$$\varphi_s^s = L_s i_s^s + \varphi_m^s \quad (II.24)$$

Le flux de rotor est donné par :

$$\varphi_m^s = \varphi_m e^{j\theta_r} \quad (II.25)$$

La dérivée de flux statorique est donnée par :

$$\frac{d\psi_s^s}{dt} = L_s \frac{di_s^s}{dt} + j\omega_r \varphi_m e^{j\theta_r} \quad (II.26)$$

Avec ω_r la vitesse angulaire électrique, on remplace l'équation (II.26) dans (II.23) on trouve :

$$L_s \frac{di_s^s}{dt} = u_s^s - R_s i_s^s - j\omega_r \varphi_m e^{j\theta_r} \quad (II.27)$$

En supposant une orientation de champ parfaite, l'équation (II.27) dans les coordonnées (d, q) est alors [38]:

$$L_s \frac{di_s}{dt} = u_s^s - (R_s + j\omega_r L_s) i_s^s - j\omega_r \varphi_m \quad (II.28)$$

Le principe du passage des composantes triphasées aux composantes de Park liées au rotor. L'avantage principal de cette transformation est que, lorsque les grandeurs de la machine sont sinusoïdales et équilibrées, leurs valeurs dans ce référentiel sont constantes. Cette méthode constitue un outil fort commode pour l'étude des régimes permanents et transitoires ainsi qu'un excellent moyen de modélisation en vue de la commande [39].

Fractionner l'équation (II.28) dans les directions (d, q) donne :

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{-R_s}{L_{sd}} i_{sd} + \omega_r \frac{L_{sq}}{L_{sd}} i_{sq} - \frac{1}{L_{sd}} u_{sd} \quad (II.29)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{-R_s}{L_{sq}} i_{sq} - \omega_r \left(\frac{L_{sd}}{L_{sq}} i_{sd} + \frac{1}{L_{sq}} \varphi_m \right) - \frac{1}{L_{sq}} u_{sd} \quad (II.30)$$

Le couple électromagnétique suivant l'axe (d, q) est écrit par la formule suivante :

$$\mathcal{T}_{em} = \frac{3n_p}{2} [\varphi_m i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq}] \quad (II.31)$$

L'équation mécanique peut être écrite :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3n_p}{2} [\varphi_m i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq}] - \frac{f_v}{j} \omega_r - \frac{\mathcal{T}_t}{j} \quad (II.32)$$

L'équation (II.27) dans les coordonnées (α, β) est alors :

$$L \frac{di_s}{dt} = -R_s i_s + \hat{\omega}_1 \varphi_m (-\sin \theta + j \cos \theta) - u_s \quad (II.33)$$

Le passage du repère triphasé statorique au repère diphasé (α, β) lié au stator est effectué en utilisant la matrice restreinte de Concordia T_1 hh

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}}_{T_1} \begin{bmatrix} i_{sa}(t) \\ i_{sb}(t) \\ i_{sc}(t) \end{bmatrix} \quad (II.34)$$

Cette dernière est orthonormée et conserve la puissance. L'intérêt de cette transformation réside dans la réduction de 3 à 2 l'ordre du système. En prenant l'axe de symétrie de la phase 1 comme origine (voir figure II.15) [40].

Le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents dans l'axe de repère lié au stator (α, β), peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = -R_s i_{s\alpha} - L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + E_{s\alpha} \\ u_{s\beta} = -R_s i_{s\beta} - L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + E_{s\beta} \end{cases} \quad (II.35)$$

Où

$u_{s\alpha}, u_{s\beta}$: sont les tensions statoriques.

R_s : est la résistance statorique.

L_s : est l'inductance statorique.

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$: sont les courants statoriques.

Et $E_{s\alpha}, E_{s\beta}$: sont les forces électromotrices qui peut être donné par :

$$\begin{cases} E_{s\alpha} = -\omega_r \varphi_m \sin \theta \\ E_{s\beta} = \omega_r \varphi_m \cos \theta \end{cases} \quad (II.36)$$

Avec

ω_r : est la vitesse rotorique.

θ : la position de rotor.

φ_m : le flux magnétique.

Le couple électromagnétique suivant l'axe (α, β) est écrit par la formule suivante :

$$T_{em} = n_p K_e (i_{s\beta} \cos \theta - i_{s\alpha} \sin \theta) \quad (II.37)$$

L'équation mécanique suivant (α, β) peut être écrite :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = n_p K_e (i_{s\beta} \cos \theta - i_{s\alpha} \sin \theta) - \frac{f_v}{j} \omega_r - \frac{T_t}{j} \quad (II.38)$$

$K_e = \sqrt{\frac{3}{2}} \varphi_m$ est le constant de FEM et n_p est le nombre de pair de pôle [41].

La puissance apparente totale δ fournie par la génératrice dans le repère (d, q) est :

$$\delta = \frac{3}{2} (u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) + j \frac{3}{2} (u_{sd} i_{sd} - u_{sq} i_{sq}) \quad (II.39)$$

L'expression de la puissance transmise est donnée par :

$$P(t) = \frac{3}{2} (u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) \quad (II.40)$$

En remplaçant u_{sd} et u_{sq} par leurs expressions dans (II.36), on obtient :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[-R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) - \left(i_{sd} \frac{d\psi_d}{dt} + i_{sq} \frac{d\psi_q}{dt} \right) + \frac{d\theta_r}{dt} (\psi_d i_{sq} - \psi_q i_{sd}) \right] \quad (II.41)$$

$\frac{3}{2} R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2)$: c'est la puissance dissipée par l'effet de Joule.

$\frac{3}{2} \left(i_{sd} \frac{d\psi_d}{dt} + i_{sq} \frac{d\psi_q}{dt} \right)$: est la variation de l'énergie emmagasinée dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \frac{d\theta_r}{dt} (\psi_d i_{sq} - \psi_q i_{sd})$: représente la puissance électromagnétique (P_{em}) [42].

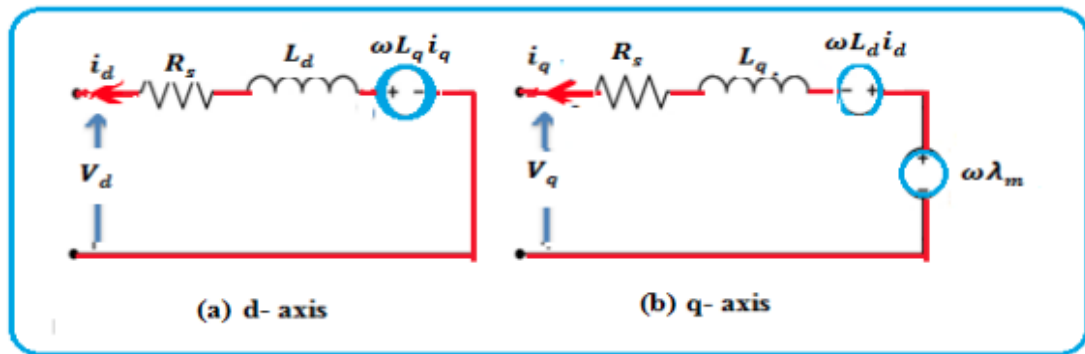
II.3.2 Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone

L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les f.e.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.

Alors les équations électriques des trois phases de la machine synchrone à aimants permanents dans le référentiel synchrone « d et q » peuvent être écrites en tenant compte un mode de fonctionnement :

II.3.2.1 Mode génératrice

Comme la machine est actionnée en mode génératrice, les courants dans l'enroulement du stator sont en sens inverse [43]. Selon le repère d_q , le schéma équivalent de la machine en mode génératrice est représenté par la figure (II.16).



Figure(II. 16) : Schéma équivalent en mode génératrice de la machine PMSG dans le plan dq.

Les équations de tension selon le repère d_q de Park en mode génératrice de la machine, PMSG peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{cases} V_d = -R_s \cdot i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + \omega \cdot L_q \cdot i_q \\ V_q = -R_s \cdot i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - \omega \cdot L_d \cdot i_d + \omega \cdot \lambda_m \end{cases} \quad (II. 42)$$

Les équations de la f.é.m. selon le repère d_q de Park en mode génératrice de la machine sont exprimées par :

$$E_d = \omega \cdot L_q \cdot i_q \quad (II. 43)$$

$$E_q = -\omega \cdot L_d \cdot i_d + \omega \cdot \lambda_m \quad (II.44)$$

Le couple électromagnétique est formulé par la relation suivante :

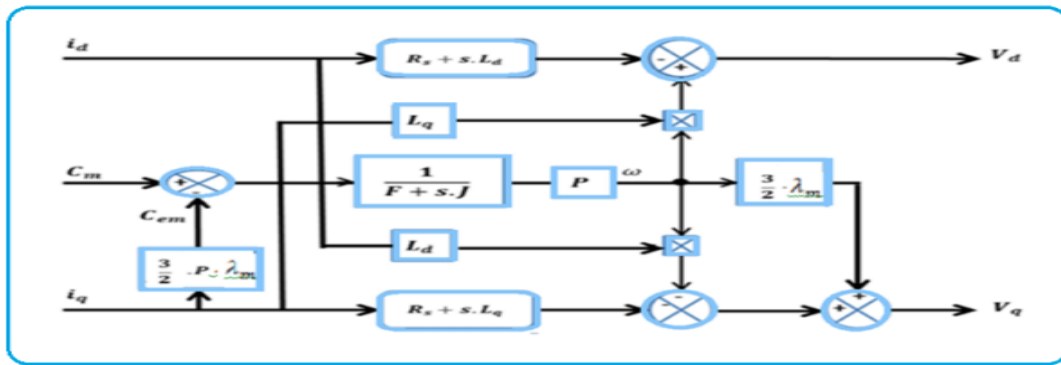
$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\lambda_m \cdot i_q - (L_q - L_d) i_d \cdot i_q) \quad (II.45)$$

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - f \cdot \Omega \quad (II.46)$$

C_m : le couple moteur appliqué sur la génératrice.

D'après ces équations, on aboutit au schéma bloc ci-dessous :



Figure(II. 17) : Bloc de simulation GSAP.

II.3.2.2 Simulation de la GSAP

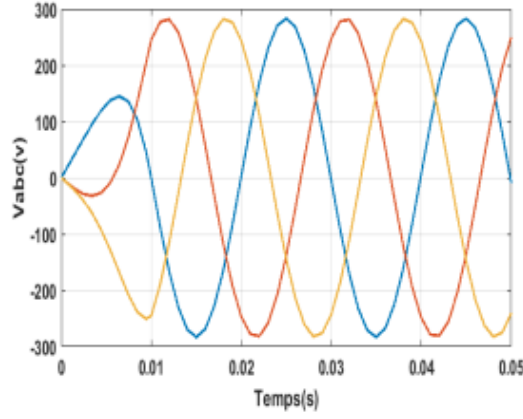
GSAP à vide :

$$\begin{cases} i_d = 0 \\ i_q = 0 \end{cases} \quad (II.47)$$

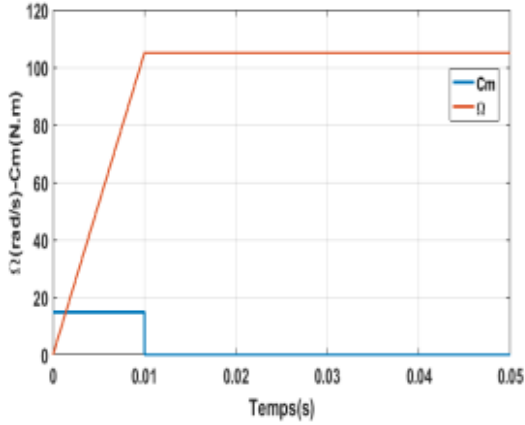
Les expressions des tensions et du couple deviennent

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = \omega \cdot \lambda_m \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad (II.48)$$

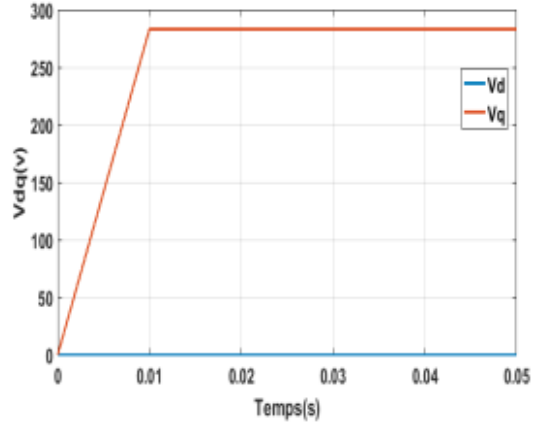
On fait lancer la génératrice par un couple moteur égale à 14.8 Nm pour une durée de 10(ms), puis, on la laisse tourner librement. Étant donné que le frottement considéré dans ce cas est nul, on constate sur la figure (II.18) que la vitesse est stabilisée à une valeur de 105 (rad/s), alors que les tensions des phases sont parfaitement sinusoïdales en régime stable, avec une valeur crête de 283 (v) et une fréquence de 50(HZ).



(a) : Tensions statoriques.



(b) : Vitesse de rotation et couple moteur.



(c) : Composantes V_d et V_q .

Figure(II. 18) : GSAP à vide.

$$R_s = 0.895\Omega ; L_d = 0.012H ; L_q = 0.0211H ; J = 0.00141kgm^2 ;$$

$$f = 0.001Nm/rd/s ; P = 3 ; \lambda_m = 0.9\omega b.$$

II.3.2.3 L'influence d'une charge séparée (R_{ch}, L_{ch})

La GSAP alimente une charge montée en étoile (R_{ch}, L_{ch}), le couple moteur initial est de 14.8 N.m et à 0.2 s il sera réduit à 6.2 N.m.

L'application des tensions sur la charge donne :

$$\begin{cases} V_d = R_{ch} \cdot i_d + L_{ch} \frac{di_d}{dt} + \omega \cdot L_{ch} \cdot i_q \\ V_q = R_{ch} \cdot i_q - L_{ch} \frac{di_q}{dt} - \omega \cdot L_{ch} \cdot i_d \end{cases} \quad (II. 49)$$

En remplaçant les expressions de V_d et V_q , dans (II-49), on obtient le système suivant :

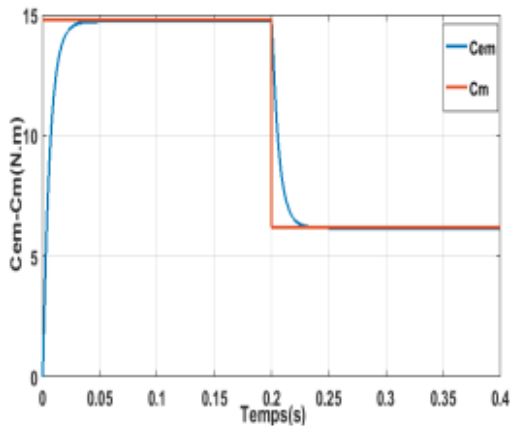
$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch})i_d - (L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} i_d + \omega (L_q + L_{ch}) i_q \\ 0 = -(R_s + R_{ch})i_q - (L_q + L_{ch}) \frac{d}{dt} i_q - \omega (L_d + L_{ch}) i_d + \omega \cdot \lambda_m \end{cases} \quad (II. 50)$$

Ou bien

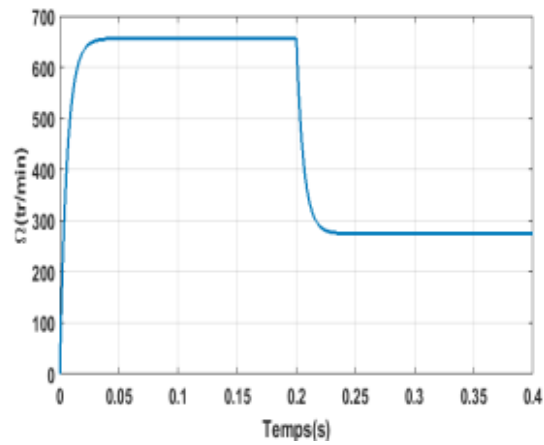
$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})i_d + \omega (L_q + L_{ch}) i_q] \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})i_q - \omega (L_d + L_{ch}) i_d + \omega \cdot \lambda_m] \end{cases} \quad (II.51)$$

Les équations (II-51) peuvent s'écrire sous la forme matricielle

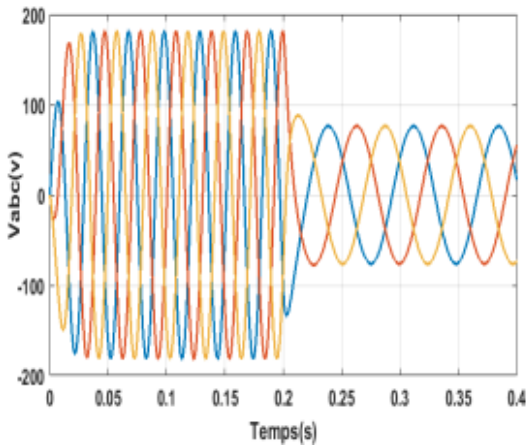
$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & \omega \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\omega \frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega \cdot \lambda_m}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \quad (II.52)$$



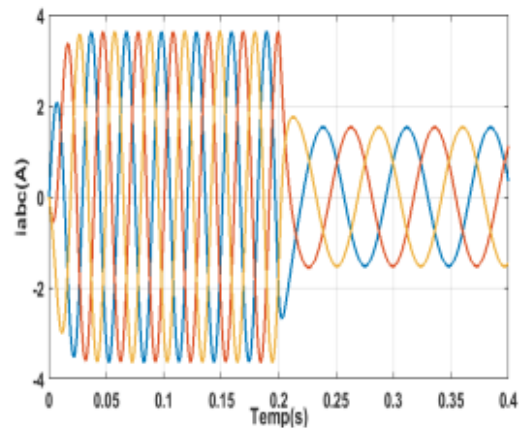
(a) : Couple électromagnétique et moteur.



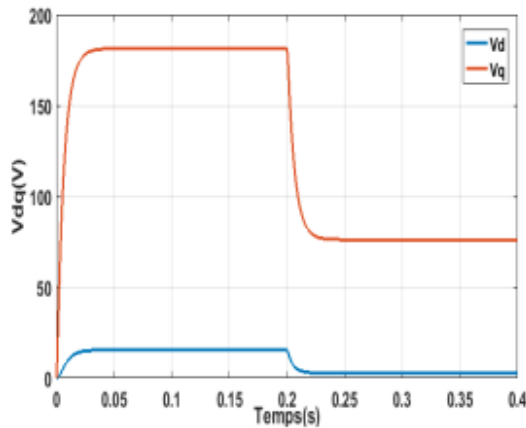
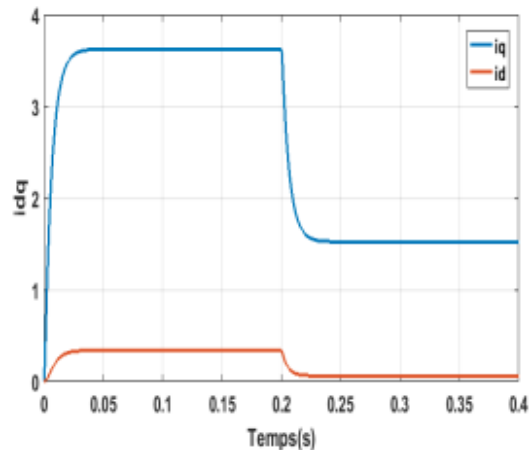
(b) : Vitesse de rotation.



(c) : Tension statorique v_{abc} .



(d) : Courant statorique i_{abc} .

(e) : Composantes Vd_q .(f) : Composantes id_q .**Figure(II. 19) :** GSAP sur une charge séparée.

$$R_s = 0.895\Omega ; L_d = 0.012 \text{ H} ; L_q = 0.0211 \text{ H} ; J = 0.00141 \text{ kgm}^2 ; \\ f = 0.001 \text{ Nm / rd / s} ; P = 3 ; \lambda_m = 0.9\omega b ; R_{ch} = 50 ; L_{ch} = 0.002 \text{ H}$$

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 (figure II.19.a). On constate sur la (figure II.19.b) que l'allure de la vitesse de rotation suit parfaitement celle du couple, en remarque aussi que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle de synchronisme, ce qui se traduit par des faibles fréquences de tension et courant représentés sur les (figures II.19.c et II.19.d). Ceci est expliqué par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant. En diminuant le couple moteur de 14.8 (N.m), à 6.2 (N.m), la vitesse mécanique varie de 656 (tr/min) jusqu'à 274 (tr/min). La tension et le courant diminuent respectivement de 181.5(v), à 76(v), et de 3.63(A) à 1.52(A). Il est clair donc, que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.

II.4 Modélisation des convertisseurs statique associer avec l'éolienne

II.4.1 La commande M.L.I

Le principe de la technique de modulation de largeur d'impulsion est basé sur la comparaison d'un signal dit la modulante et un autre dit la porteuse. La technique choisie pour la commande de nos convertisseurs est la M.L.I sinus-triangle car elle permet d'éliminer les harmoniques et l'obtention d'un bon rendement. Elle est basée sur la comparaison d'un signal triangulaire de grande fréquence et d'un signal sinusoïdal de la même fréquence que le signal de référence que l'on souhaite obtenir. Le signal triangulaire est appelé la Porteuse et le signal sinusoïdal est appelé la Modulante.

Ces signaux ont les propriétés suivantes :

-La modulante est une onde sinusoïdale $v_{ref}(t)$ d'amplitude u_r et de fréquence f_r

-La porteuse est une onde triangulaire ou en dents de scie $v_p(t)$, d'amplitude $|u_p| \geq |u_r|$, et d'une fréquence $f_p \geq f_r$.

-L'indice de modulation $m = \frac{f_p}{f_r}$

-Le coefficient de réglage en tension r , qui est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à celle de la porteuse $r = \frac{f_p}{f_r}$ [44].

Le principe de cette commande est que la valeur de la fonction F qui correspond à la première cellule de commutation soit égale à 1 si $u_p \geq u_r$ sinon elle prend la valeur zéro. La valeur des autres fonctions se déduit facilement par la complémentarité qui existe entre deux cellules d'un même bras et le décalage de $\frac{2\pi}{3}$ pour deux phases qui se suivent [45].

II.4.2 Modèle du redresseur MLI

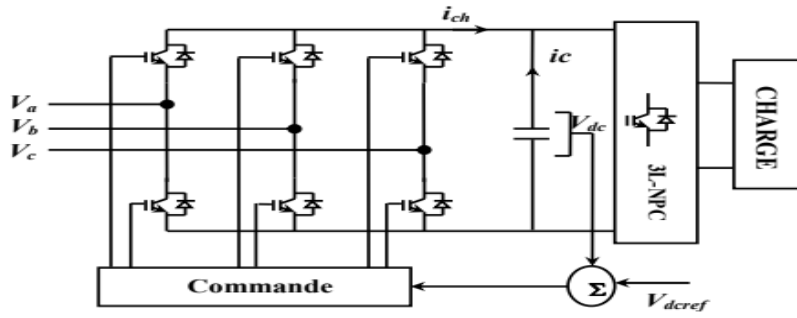
Avant de modéliser le redresseur à MLI, il est utile de rappeler qu'un redresseur est un convertisseur statique. Il sert comme son nom l'indique à redresser un signal alternatif et le transformer en un signal continu. Pour l'étude de l'ensemble (génératrice - redresseur MLI – onduleur - charge), on s'intéressera uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine [46].

Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, on modélise le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux : c'est à dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande (pas d'empîement).

Le redresseur à MLI est composé de six bras, dont chacun comporte deux cellules de commutation constituées d'une diode et d'un transistor en antiparallèle. Cette structure permet de passer le courant dans les deux sens.

Contrairement à un redresseur à diodes qui fournit une valeur de la tension égale à celle de la tension redressée (interrupteurs idéaux), le redresseur à MLI doit fournir une tension constante quel que soit la tension produite par la génératrice [47].

Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors bipolaires antiparallèles avec des diodes (figure II.20). Ces bras sont présentés comme des interrupteurs pouvant être commandés en ouverture '1' et en fermeture '0'. La tension redressée V_{dc} est en fonction des états de ces interrupteurs. La figure ci-dessous illustre le schéma d'un redresseur triphasé à IGBT.



Figure(II. 20) : Topologies de base d'un redresseur de tension.

II.4.2.1 Principe de fonctionnement

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture. Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée. Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu V_{dc} est capturée puis comparée avec une référence V_{dc-ref} , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture utilisant un contrôleur PI [48].

II.4.2.2 Modélisation mathématique du redresseur MLI

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

$$S = \begin{cases} +1, & \text{si } i_j = -1 \\ -1, & \text{si } i_j = +1 \end{cases} \quad (II.53)$$

$$j \in \{a, b, c\}$$

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

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (II.54)$$

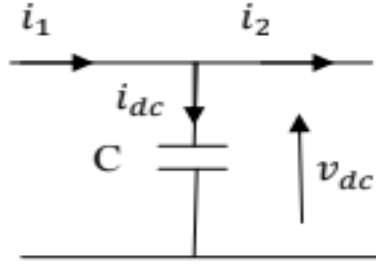
Les tensions d'entrée entre phases du redresseur MLI peuvent être décrites par

$$U_{sab} = (S_a - S_b).V_{dc}$$

$$U_{sbc} = (S_b - S_c).V_{dc}$$

$$U_{sca} = (S_c - S_a).V_{dc}$$

II.4.3 Modélisation du bus continu



Figure(II. 21) : Schéma électrique du bus continu.

Le schéma électrique de la figure (II.21) permet par la loi des mailles d'établir la relation suivante :

$$\frac{dV_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C} i_{dc}(t) \quad (II.55)$$

$$i_{dc} = i_1 - i_2 \quad (II.56)$$

i_{dc} : le courant de charge du condensateur.

i_1 : le courant redressé

i_2 : le courant ondulé

$$V_{dc} = \frac{1}{C} \int_{t_2}^{t_1} i_{dc} dt + V_{dc0} \quad (II.57)$$

Avec :

V_{dc0} : la valeur de la tension à l'instant initial $t=0$

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

Le schéma bloc de la commande est représenté par la figure (II. 22). [27].

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.58)$$

Avec :

$$u_{sa} = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} \cdot V_{DC} \quad (II.59)$$

$$u_{sb} = \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} \cdot V_{DC} \quad (II.60)$$

$$u_{sc} = \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} \cdot V_{DC} \quad (II.61)$$

Les équations précédentes dans les coordonnées d_q sont :

$$e_D = R. i_d + L. \frac{di_d}{dt} - \omega_s. L. i_q + U_{sd} \quad (II.62)$$

$$e_Q = R. i_q + L. \frac{di_q}{dt} - \omega_s. L. i_d + U_{sq} \quad (II.63)$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage entre côté alternatif et continu en fonction des fonctions d'état des interrupteurs par :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_l \quad (II.64)$$

i_l : le courant de charge du redresseur.

En appliquant la transformation de park à la relation (II.64) on aboutit à la relation (II.65)

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a. P. i_a + S_b. P. i_b + S_c. P. i_c - i_l \quad (II.65)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = S_d i_d + S_q i_q - i_l \quad (II.66)$$

Tout calcul fait, on obtient la relation (II.67) :

$$S_d = \frac{1}{\sqrt{6}} (2. S_a - S_b - S_c). \cos(\omega_s t) + \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c). \sin(\omega_s t) \quad (II.67)$$

$$S_q = \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c). \cos(\omega_s t) + \frac{1}{\sqrt{6}} (2. S_a - S_b - S_c). \sin(\omega_s t) \quad (II.68)$$

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation des éléments essentiels du système éolien, ce système basé sur la parties mécanique et électrique. Qu'il s'agit de la turbine éolienne, le multiplicateur mécanique ainsi que la GSAP. La modélisation de GSAP et le convertisseur statique a été faite dans le plan complexe.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude de la commande vectorielle de la GSAP et la commande en MPPT (maximum power point tracking).

CHAPITRE III

Commande vectorielle de la GSAP

Chapter III: Commande vectorielle de la GSAP

III.1 Introduction

Les méthodes de contrôle des moteurs à courant alternatif peuvent être largement classées en "contrôle scalaire" et "contrôle vectoriel". Il est facile d'implémenter un contrôle scalaire pour obtenir une réponse relativement stable. Cependant, la réponse dynamique fournie par le contrôle scalaire est faible, les algorithmes de contrôle scalaire contrôlant uniquement l'amplitude et les algorithmes vectoriels contrôlant à la fois l'amplitude et l'angle de déphasage [49].

Ces deux méthodes principales peuvent être divisées en plusieurs méthodes selon leur nature, et tout ça pour améliorer la précision et la dynamique, ainsi qu'une excellente vitesse de fonctionnement.

Le contrôle vectoriel permanent est de plus en plus utilisé avec une rétroaction en boucle fermée. Il existe quatre types de méthodes de contrôle utilisant le contrôle vectoriel : le contrôle orienté flux, le contrôle direct du couple (DTC), le contrôle non linéaire et le contrôle prédictif. Cette thèse de licence porte sur le contrôle de GSAP à l'aide de la commande vectorielle à flux orienté.

Après avoir étudié la modélisation des différents composants du système éolien.

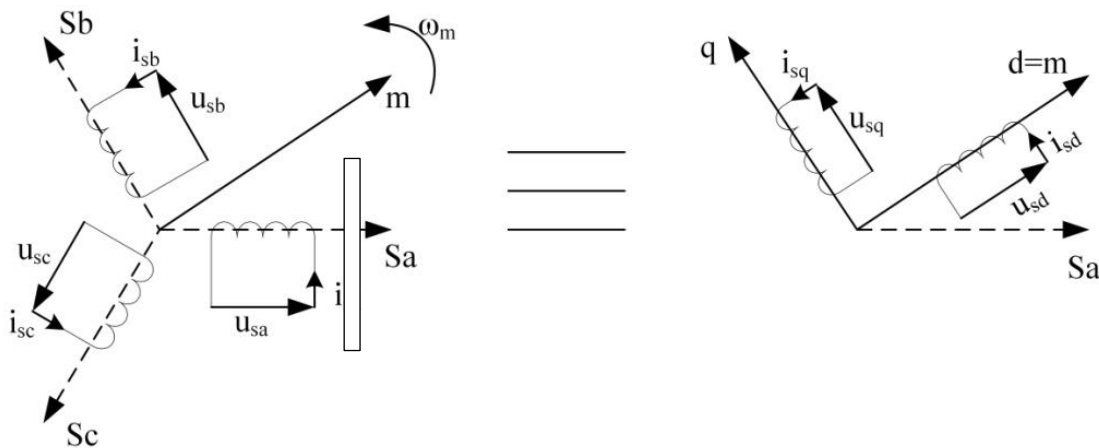
Ce chapitre décrit deux modes de contrôle : le contrôle vectoriel, nécessaire au contrôle de la vitesse et du courant et le contrôle MPPT, indispensable pour extraire la puissance optimale de l'éolienne.

La réalisation de tout système dans le domaine de la production ou de La distribution d'énergie électrique comporte des risques. Par conséquent, le logiciel empêche toute véritable manipulation par simulation. Dans ce chapitre, nous allons essayer de simuler différentes commandes du système éolien à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

III.2 Modèle de la machine synchrone à aimants permanents

Dans la traction de la production électrique par une turbine éolien, nous avons utilisé une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) triphasée à distribution sinusoïdale du flux, elle porte ce nom parce que le rotor tourne en synchronisme avec le champ tournant du stator [50].

Cette partie du chapitre est consacrée à la modélisation d'une GSAP par des équations électriques et mécaniques en utilisant la transformation de Park (figure III.1). Cette transformation permet de changer les tensions et les courants pour chaque bobine dans le référentiel (a, b, c) en deux composantes dans le référentiel (d, q, O) . De plus, cette représentation est inévitable car les modèles dynamiques des machines à courant alternatif sont relativement lourds et complexes. Afin de les simplifier, on procède à l'aide de cette transformation. Le nouveau référentiel (d, q, O) peut être stationnaire ou lié au champ tournant ; il est généralement choisi lié au champ tournant de telle sorte que les courants statoriques (i_{sd} et i_{sq}) soient constants.



Figure(III. 1) : Transformation de Park: repère a, b, c et repère d, q de Park.

Dans le repère de Park, les équations électriques de la GSAP sont les suivantes :

$$\psi_{sd} = L_{sd}i_{sd} + \Psi \quad (III. 1)$$

$$\psi_{sq} = L_{sq}i_{sq} \quad (III. 2)$$

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_r L_{sq} i_{sq} \quad (III. 3)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_r (L_{sd} i_{sd} + \Psi) \quad (III. 4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P [\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}] \quad (III.5)$$

Où ψ_{sd} , ψ_{sq} , u_{sd} , u_{sq} , i_{sd} et i_{sq} sont respectivement les flux, les tensions et les courants du moteur dans le repère $d-q$, ω_r est la vitesse angulaire électrique et T_e est le couple électromagnétique. Ψ est le flux des aimants permanents, P est le nombre de paires de pôles, R_s est la résistance du stator. Les inductances du stator peuvent être décomposées en deux composantes différentes L_{sd} et L_{sq} ; si le moteur a un rotor à pôle lisse, Les deux inductances ont des valeurs similaires et peuvent être considérées comme égales comme c'est le cas dans notre travail [51].

Le modèle est complété par les équations mécaniques définies comme suit [51] :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_l - \beta \omega_m \quad (III.6)$$

$$\omega_r = P \omega_m \quad (III.7)$$

Où, J est le moment d'inertie du moteur et la charge couplée, T_l le couple résistant, β le coefficient de frottement et ω_m la vitesse mécanique angulaire.

Les paramètres de la GSAP correspondent à celle utilisée dans notre travail présentée dans le tableau précédent :

R_s	0.005 Ω
L_{sd}	0.00395 H
P	4
Phi	0.192
J	0.25 ($Kg.m^2$)
f	0.005 ($N.m.s$)
T_f	4 (N.m)

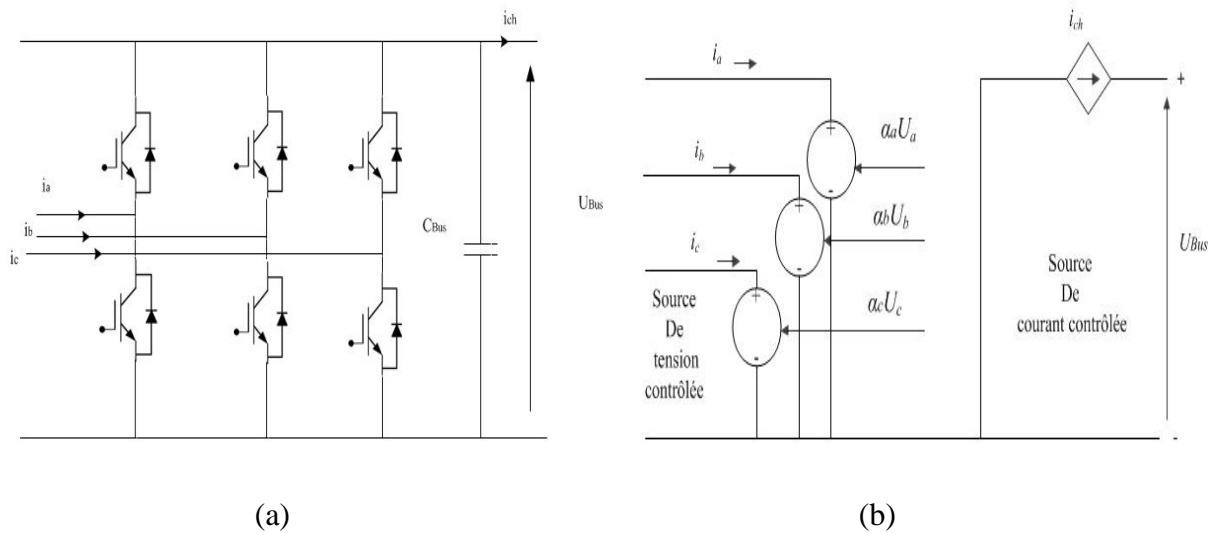
Tableau(III. 1) : Paramètres de la GSAP.

III.3 Modélisation de convertisseur pour la GSAP

On peut considérer que la chaîne de conversion électronique est composée d'un redresseur triphasé à deux niveaux permet de conversion les courants triphasés alternatifs en un

courant continu (figure III.2.a) qui est inséré entre le bus continu et la GSAP. Là encore, l'emploi d'un modèle à valeurs moyennes du redresseur.

Dans le modèle à valeurs moyennes du redresseur à deux niveaux que nous avons utilisé, nous considérons que le convertisseur est une source de courant parfaite, (figure III.2.b). Notons que ce modèle est utilisé dans un exemple de Simulink sous la dénomination « Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive » [52].



Figure(III. 2) : Redresseur de tension associé avec la GSAP.

Il est composé de trois sources de tension contrôlées au côté alternatif de la GSAP et d'une source de courant contrôlée du côté du Bus continu. La source à courant continu permet de représenter le comportement moyen du courant de charge fourni par la GSAP.

$$i_{ch} = \alpha_a i_a + \alpha_b i_b + \alpha_c i_c \quad (III. 8)$$

Où $(\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c)$ sont respectivement les rapports cycliques de la MLI des bras du redresseur a , b et c et (i_a, i_b, i_c) sont les courants triphasés correspondants. Les trois sources de tension à courant alternatif représentent les valeurs moyennes des tensions de du redresseur (u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}) en fonction de la tension du Bus continu u_{BUS} , donnée par l'équation suivante :

$$\begin{cases} u_{sa} = \alpha_a u_{BUS} \\ u_{sb} = \alpha_b u_{BUS} \\ u_{sc} = \alpha_c u_{BUS} \end{cases} \quad (III. 9)$$

III.4 La stratégie de commande vectorielle de la GSAP

La technique de la commande vectorielle est utilisée pour établir un modèle linéaire et transformer la machine synchrone à aimants en une structure équivalente à la machine à courant

continu à excitation séparée du point de vue couple, pour permettre un découplage du couple et du flux [53].

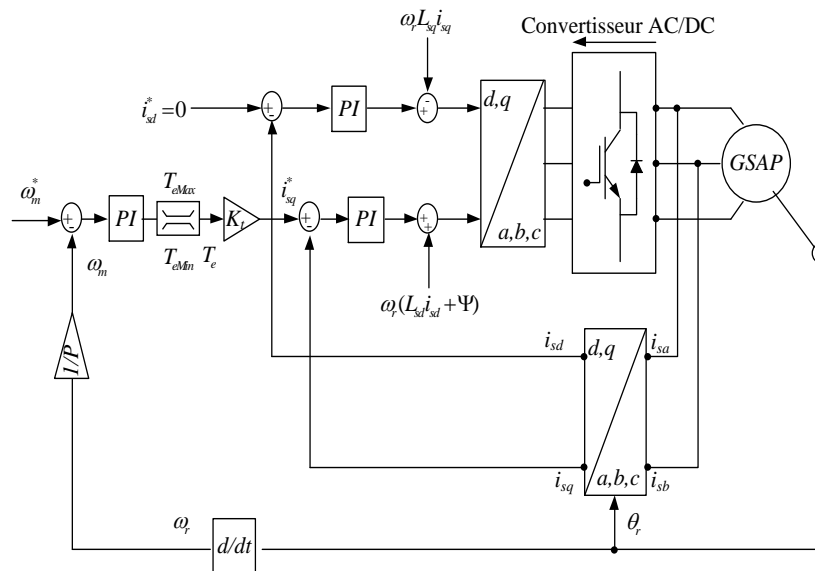
III.4.1 Principe et structure de la commande

Le principe de la commande vectorielle avec alimentation en tension et commande en courant permet d'imposer le couple. Or, quel que soit le but de la commande (régulation de couple, de vitesse ou de position), le contrôle des courants reste cependant nécessaire [54].

Dans le cas des machines à rotor lisse, la commande la plus fréquemment utilisée consiste à simplifier le contrôle en imposant au courant direct une valeur nulle. Dans ces conditions, la composante en quadrature du courant est une image du couple.

A cause du flux constant des aimants permanents, on n'a pas besoin de le générer au moyen du courant i_{sd} , ce dernier peut être maintenu à une valeur égale à zéro, qui à son tour permet d'augmenter l'efficacité de l'entraînement [55].

Le schéma de la commande vectorielle de la GSAP est représenté par la figure (III.3) :



Figure(III. 3) : Commande vectorielle de la GSAP.

Le système de commande est divisé en trois boucles différentes qui sont :

- La boucle de courant i_{sd} pour le contrôle du flux.
- La boucle de courant i_{sq} pour le contrôle du couple.
- La boucle de vitesse pour le contrôle de la vitesse de rotation du moteur.

Le fait que le couple peut être commandé par le biais de i_{sq} vient de la simplification des équations (III.1) et (III.5) lorsque i_{sd}^* est égal à zéro :

$$T_e = K_i * i_{sq} \quad (III. 10)$$

Où :

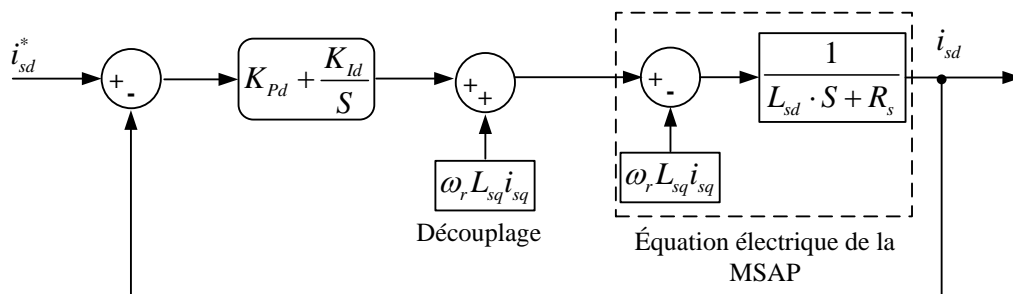
$$K_t = \frac{3}{2} \cdot P \cdot \Psi \quad (III. 11)$$

À partir des équations des tensions (III.3) et (III.4) de la GSAP, on peut voir que les axes d et q ne sont pas complètement indépendants et qu'il y a un terme de couplage qui dépend des courants des autres axes. Afin d'assurer une régulation complètement indépendante des courants i_{sd} et i_{sq} , il est nécessaire de compenser l'effet du terme de couplage à la sortie des correcteurs PI de ces derniers (équations III.12, III.13).

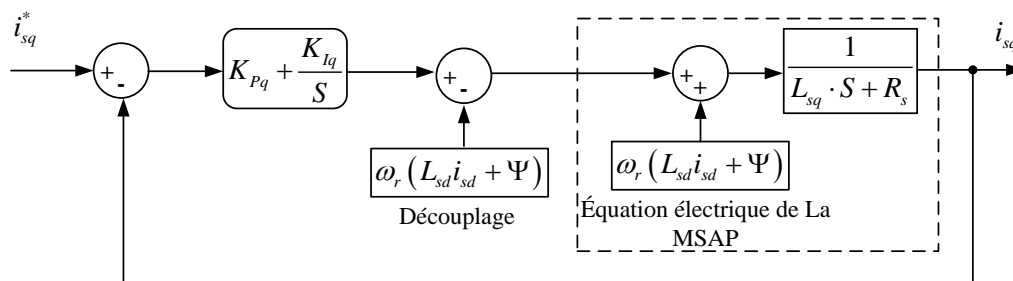
$$u_{sd} = \left(\overbrace{R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt}}^{\text{terme linéaire}} \right) - \overbrace{\omega_r L_{sq} i_{sq}}^{\text{terme de couplage (à compenser)}} \quad (III. 12)$$

$$u_{sq} = \left(\overbrace{R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt}}^{\text{terme linéaire}} \right) + \overbrace{\omega_r (L_{sd} i_{sd} + \Psi)}^{\text{terme de couplage (à compenser)}} \quad (III. 13)$$

Les figures (III.4.a) et (III.4.b) représentent les deux boucles de courant i_{sd} et i_{sq} dans le domaine de Laplace, un terme de découplage est ajouté pour compenser le couplage entre i_{sd} et i_{sq} , les boucles simplifiées obtenues sont données en (figure III.5.a) et (III.5.b), [55].

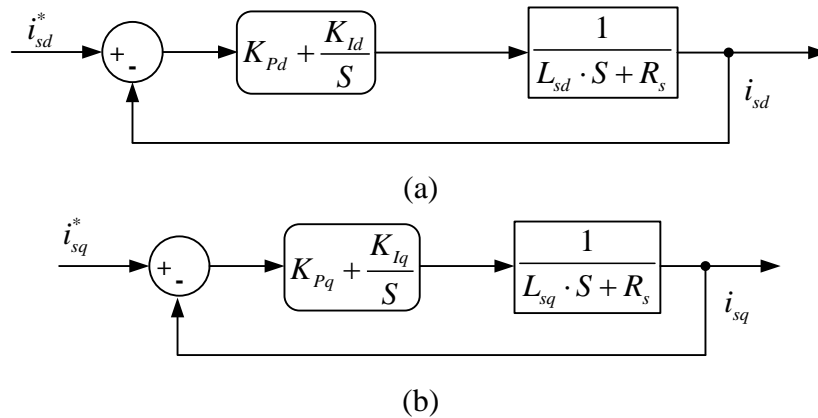


(a)



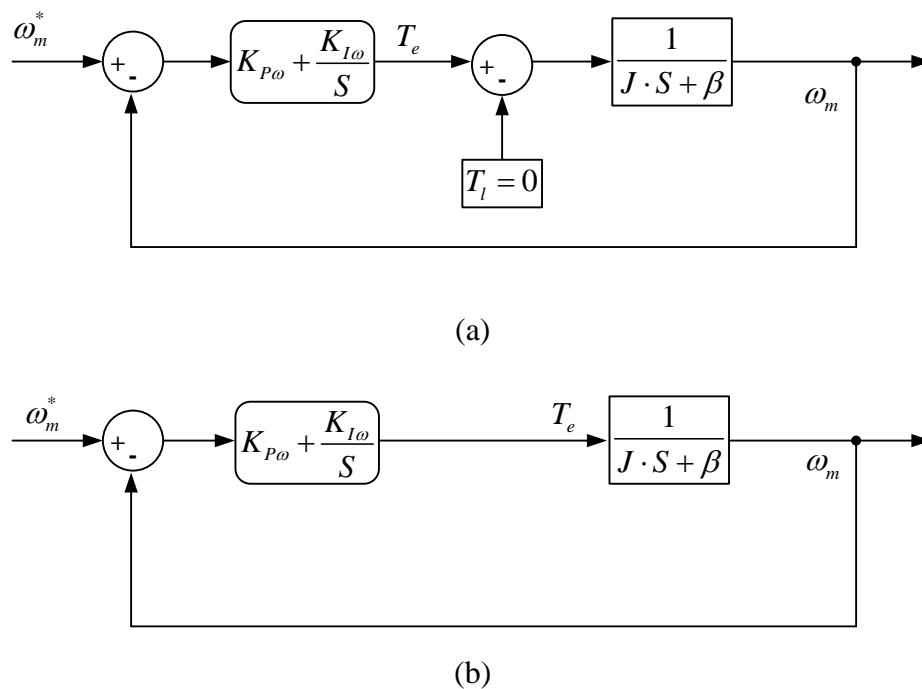
(b)

Figure(III. 4) : Boucles de courant.



Figure(III. 5) : Boucles de courant simplifiées.

En outre, en posant le couple résistant T_l égal à zéro, la boucle de vitesse dans le domaine de Laplace représentée par la figure (III.6.a) se simplifie pour donner la boucle de la figure (III.6.b).



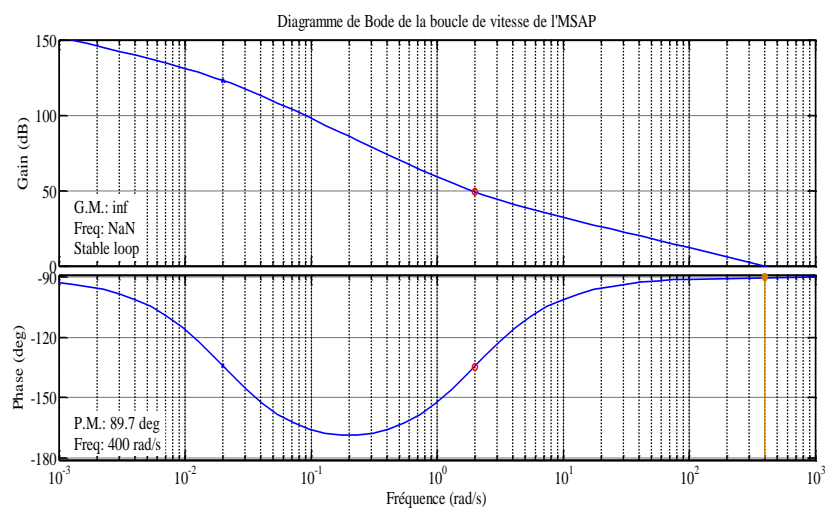
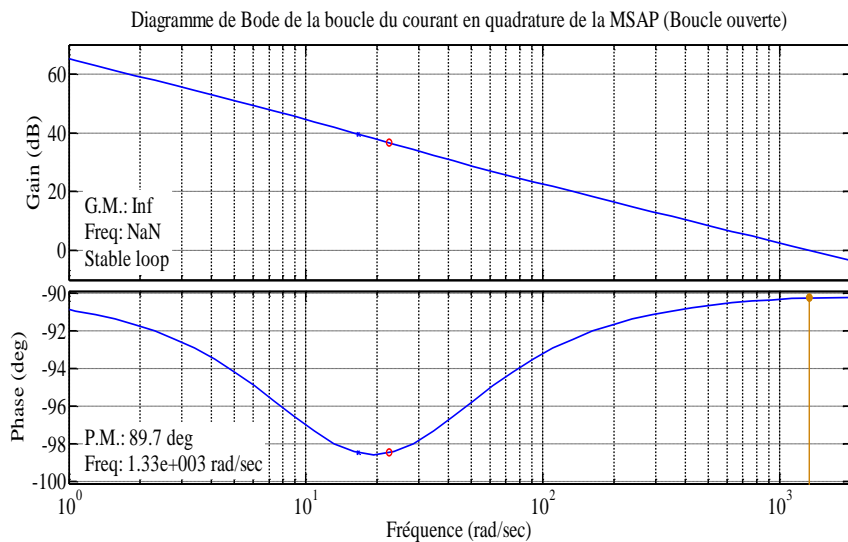
Figure(III. 6) : Boucles de vitesse.

Les contrôleurs PI sont dimensionnés pour achever une bonne dynamique et une grande précision avec une stabilité acceptable. Les paramètres sont préalablement calculés à l'aide de l'utilitaire SISOTOOL de MATLAB, ensuite nous avons procédé à un ajustement par la méthode dite « essais et erreurs » pour obtenir les performances recherchées, cette méthode est très adaptée pour les systèmes dont les paramètres ne sont pas connus avec une bonne précision. Les paramètres des contrôleurs PI sélectionnés sont donnés dans le tableau (III.2).

	Boucle de courant(i_{sd})	Boucle de courant(i_{sq})	Boucle de vitesse
Proportionnel (K_p)	0,4	0,4	100
Intégrale (K_I)	9	9	200

Tableau(III. 2) : Paramètre des contrôleurs PI.

En utilisant les paramètres des régulateurs sélectionnés dans le tableau (III.2), nous avons analysé la stabilité de la boucle de courant i_{sq} (identique à la boucle de courant i_{sd} car $L_{sd} = L_{sq}$) et la boucle de vitesse, à l'aide du diagramme de Bode tracé directement dans l'utilitaire SISOTOOL de MATLAB (figure III.7.a et figure III.7.b) ; nous avons trouvé que les deux boucles sont stables, avec des marges de phases acceptables : 90° pour chacune.

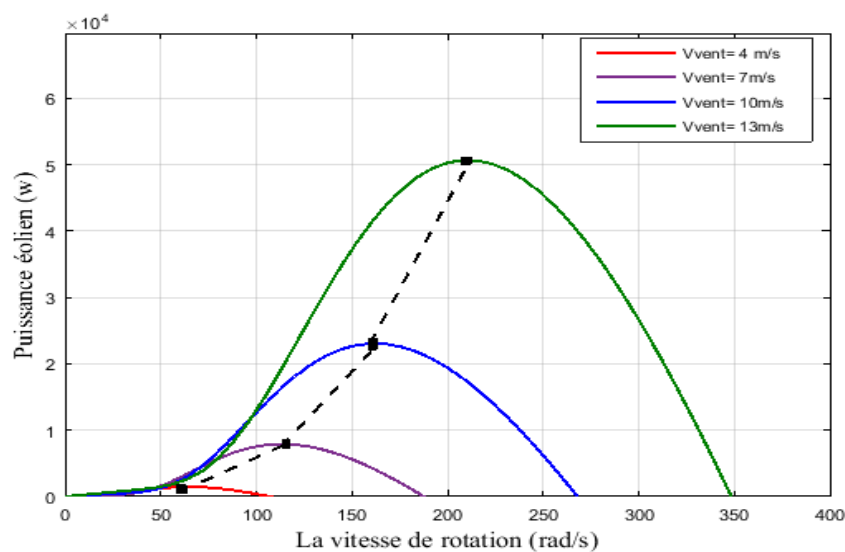


Figure(III. 7) : Analyse de la stabilité des boucles de courant i_{sq} et de vitesse.

III.5 Architectures de puissance et gestion d'énergie

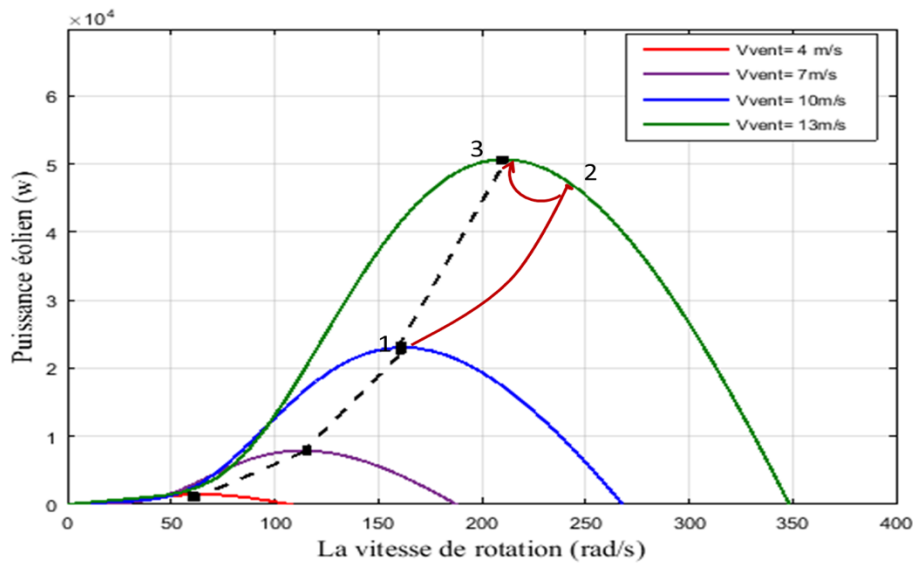
Nous avons vu qu'il est indispensable de réguler la puissance éolienne et que les courbes caractéristiques des voilures éoliennes ne sont pas linéaires, En ce qui concerne la puissance éolienne, elle résulte de la vitesse de rotation de l'arbre mécanique de l'éolienne et de la vitesse du vent (donc de la vitesse réduite) et de la caractéristique $C_p(\lambda, \beta)$.

Elle peut être optimisée dans le but de maximiser l'énergie captée par l'éolienne. La figure III.42 donne l'image de la famille des courbes de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent ainsi que la courbe optimale qui relie leurs sommets selon une fonction cubique de la vitesse (Équation I.3). En suivant cette courbe continuellement, la puissance éolienne recueillie sera toujours maximale. De nombreuses études ont montré l'intérêt de la vitesse variable en éolien sur le plan énergétique, y compris dans le petit éolien où le surcoût entraîné par la vitesse variable (du fait de l'électronique de puissance et de réglage supplémentaire) est compensé par le surplus de production.



Figure(III. 8) : Puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent.

La valeur de P peut aussi être petite où au contraire grande. A partir de ce jugement, la valeur de la consigne de vitesse est augmentée, ou diminuée, dans le sens qui permet d'augmenter la puissance [56]. Dans le cas d'un changement de la vitesse du vent, la recherche du point de puissance maximale s'effectue de la manière présentée sur la figure. (III.8) on constate que le même type de règles s'applique [56].



Figure(III. 9) : Principe de fonctionnement du MPPT à vitesse variable du vent.

III.5.1 Technique de la maximisation de la puissance produite

Les sommets de cette courbe sont équivalents à la puissance maximale « extractible » donc au point optimal. Il est caractérisé par la vitesse réduite optimale λ_{opt} égale à 8.1 et le coefficient de puissance maximal Cp_{max} . La valeur de la vitesse de rotation est égale à :

$$\Omega_T = \frac{\lambda V}{R} \quad (III. 14)$$

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

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \quad (III. 15)$$

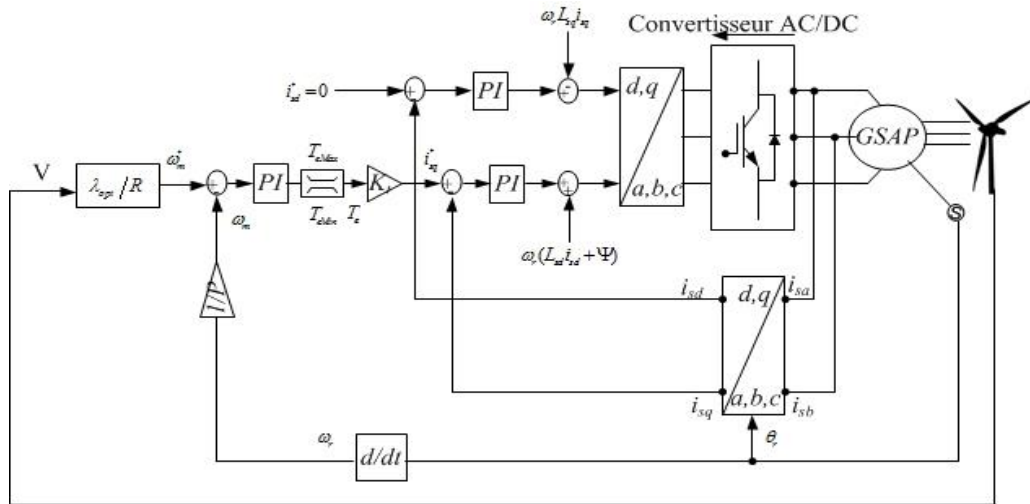
Cette boucle est munie d'un régulateur de vitesse afin de l'asservir à chaque fois à sa valeur de référence et d'atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

Plusieurs correcteurs de vitesse peuvent être envisagés dans ce but, mais nous sommes intéressés ici par un correcteur proportionnel intégral PI comme il est présenté dans la figure (III.6).

III.5.2 Optimisation électronique de la conversion énergétique

En partant de la boucle de la vitesse présentée dans la figure. III.40, on note que la machine synchrone n'agira dans le système que sous forme d'un couple d'inertie et d'un couple

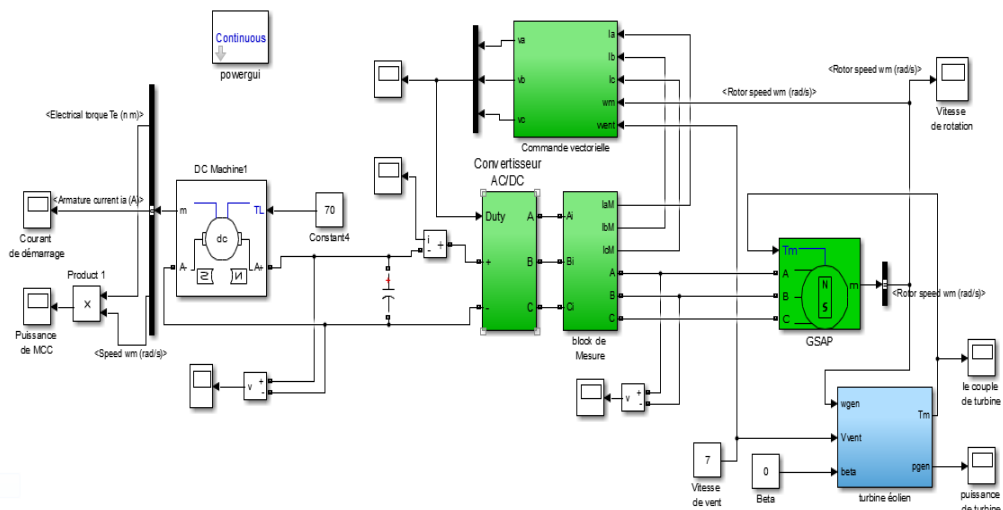
de frottement et ne présente pas une dynamique propre. Or, la GSAP comme toutes les machines électriques à besoin d'un temps de réponse suffisant pour que son système de commande électronique peut la ramener à la vitesse demandée par l'éolienne. Pour cette raison, on doit présenter la boucle de commande avec une manière différente pour montrer la boucle de commande à travers l'alimentation (figure.III.10).



Figure(III. 10) : Représentation de la commande de Vitesse de la GSAP d'un système éolien.

III.6 Résultat de simulation et interprétation

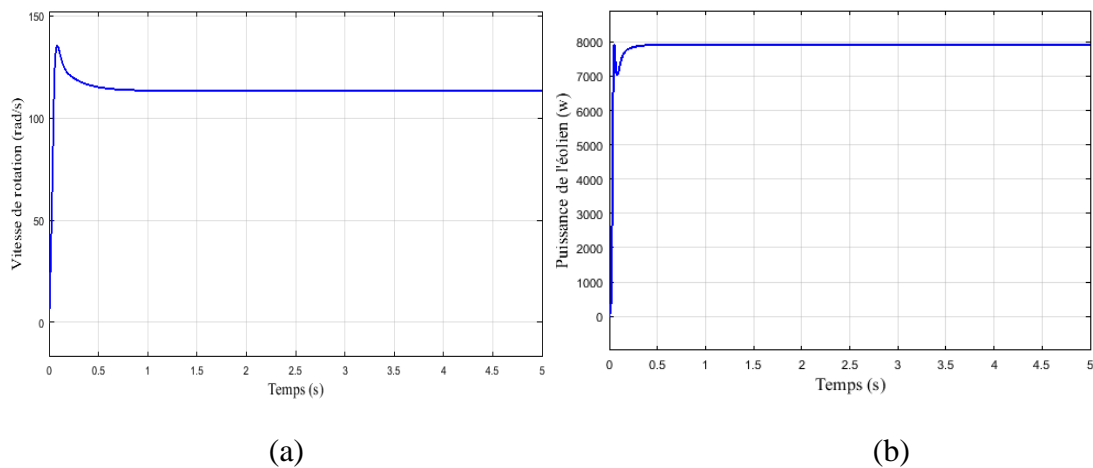
La figure (III.11) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système éolien adapté par la commande vectorielle de la GSAP et la commande MPPT avec le moteur à courant continue comme une charge.



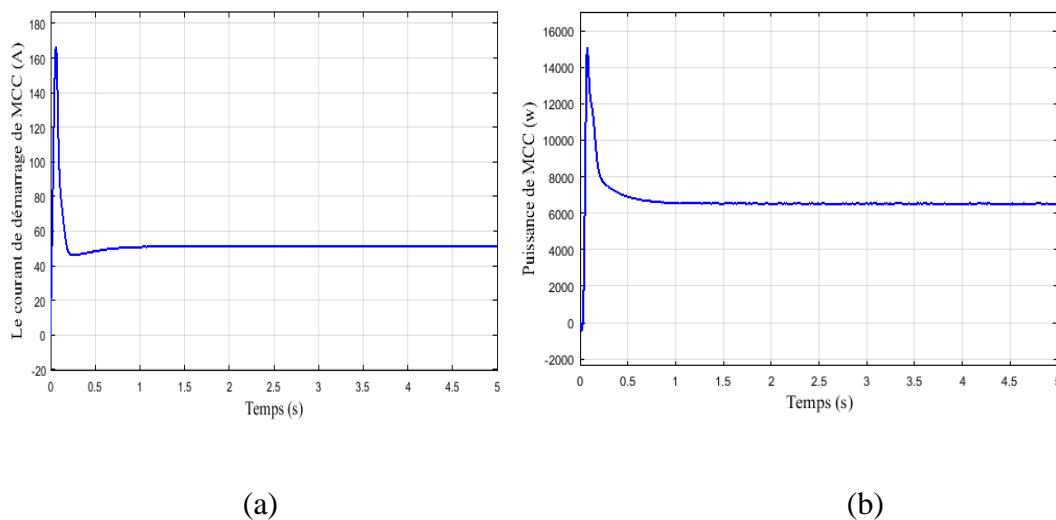
Figure(III. 11) : Schéma du système complet sous Simulink.

Les résultats de simulation du système éolien adapté pour la commande MPPT sont représentés par les figures suivantes. Ces figures représentent la puissance à la sortie du générateur éolien, la vitesse de rotation de la turbine, la puissance du moteur de la charge et ses courants de démarrage pour différentes vitesses du vent.

III.6.1 Simulation du système éolienne avec MPPT pour $V_{\text{égal}} \text{ à } 7 \text{ m/s}$:



Figure(III. 12) : Vitesse de rotation et puissance de la turbine éolienne pour $v=7\text{m/s}$.



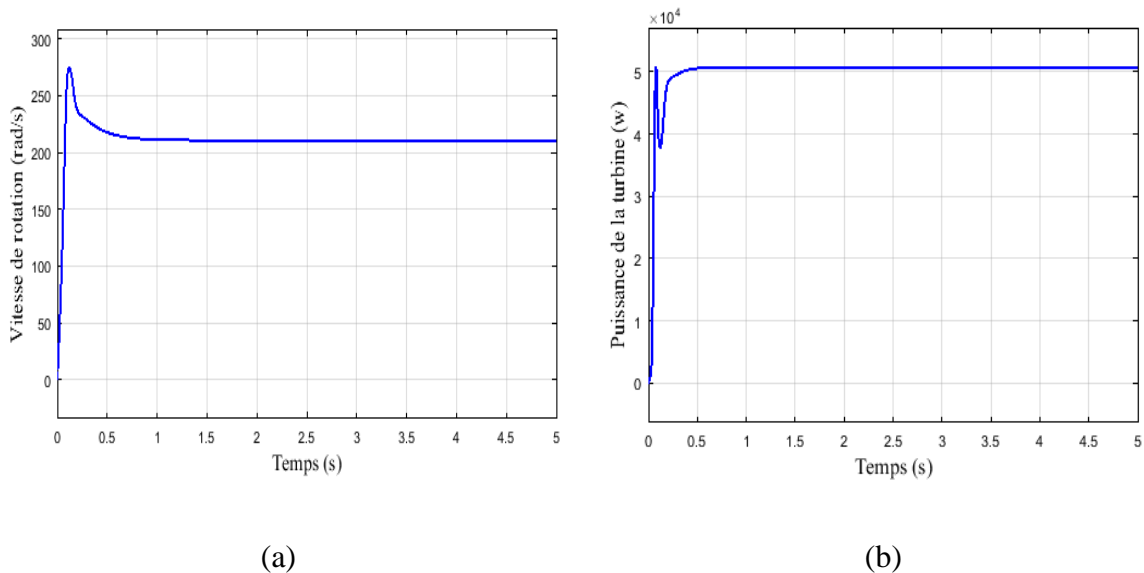
Figure(III. 13) : Le courant de démarrage et la puissance de la MCC pour $v=7\text{m/s}$.

Pour une vitesse moyenne annuelle de vent de notre site qui égal à 7m/s on remarque que notre système satisfaire les besoins énergétiques.

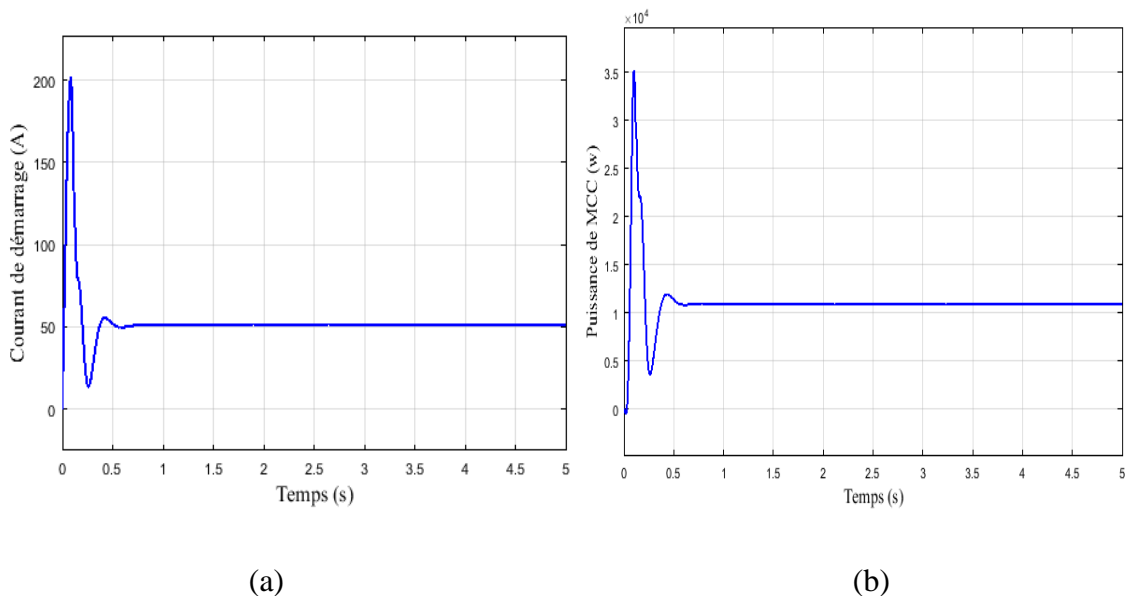
- La vitesse de rotation de la GSAP est l'image du vent entraînant l'éolienne, elle suit convenablement sa référence ou (Vitesse d'optimale) comme le montre la figure (III.12.a).
- La puissance éolienne capturée à sa référence optimale est égale 8000w , cette allure est conforme aussi à celle du couple éolien du côté de la GSAP La figure (III.12.b).

- On remarque que le moteur est alimenté par la turbine, il démarre avec une intensité du courant qui atteint une valeur max de 100 A qui fournit par la capacité (la figure III.13.a).
- On n'observe que la puissance de démarrage du moteur est plus grande que la puissance dans de régime dynamique celle et égale à la puissance max de la turbine (la figure III.13.b).

III.6.2 Simulation du système éolienne avec MPPT pour V égal à 13 m/s :



Figure(III. 14) : La vitesse de rotation et la puissance de la turbine éolienne pour $v=13\text{m/s}$.



Figure(III. 15) : Le courant de démarrage et la puissance de la MCC pour $v=13\text{m/s}$.

Pour une vitesse moyenne annuelle de vent de notre site qui égal à 13m/s on remarque que notre système fonction dans les conditions maximales.

- On remarque que la vitesse de vent influe beaucoup sur la vitesse de rotation de la GSAP, pour un vent égal à 13m/s la vitesse de la GSAP est supérieure que la vitesse de la génératrice à $V=7\text{m/s}$ (la figure III.14.a)
- On remarque que la vitesse de vent influe beaucoup sur la puissance mécanique de la turbine pour un vent constant la puissance mécanique est constante le système fonction à la puissance maximale qui est égal à 50 kw comme présenté dans la figure (III.14.b).
- On peut observer l'influence de la vitesse du vent sur les amplitudes de courants. Avec l'augmentation de la vitesse du vent, la valeur de courant de démarrage devient plus importante par rapport à l'amplitude de courante de démarrage pour $V=7\text{ms}$ (figure III. 15.a).
- Comme le courant de démarrage est augmenté la puissance de démarrage devient plus importante et la puissance dans le régime dynamique est égale à 10 kw (la figure III.15.b).

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a basé sur une commande vectorielle en vitesse de la génératrice synchrone à aimants permanents qui été présenté en deux parties :

Dans la première partie nous avons présenté le modèle de la machine ainsi que sa commande vectorielle en utilisant trois boucles de régulation : deux boucles pour les courants et une boucle pour la vitesse. Ensuite nous avons dimensionné les correcteurs PI utilisés dans les boucles de régulations puis nous avons analysé la stabilité de ces boucles.

Dans la deuxième partie nous avons illustré la stratégie de maximisation de puissance à la sortie de la turbine éolienne.

L'analyse des résultats obtenus dans ce chapitre montre clairement un degré d'efficacité acceptable de la régulation choisie qui fait ramener le système à son point optimal après une variation de la vitesse du vent.

Conclusion générale

Dans le cadre de la réalisation du mémoire de master, nous avons choisi de travailler sur le thème de la production de l'énergie éolienne. Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude et la simulation d'une chaîne de production éolienne constituée d'une turbine associée à une génératrice synchrone à aimants permanents. Cette étude est complétée par la mise en place des stratégies de commande nécessaires au bon fonctionnement de chaque partie.

Le premier chapitre a traité des généralités sur l'énergie éolienne. Puis nous avons parlé des différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal et les principes composants. Nous avons également sur l'estimation de la source de vent à kenchela ainsi que la modélisation de la machine à courant continu associé à l'éolienne.

Dans le chapitre deux, Nous avons donné des exemples sur des machines différentes du point de vue structurel avant de donner les équations électriques, mécanique et électrique régissant la GSAP. Nous avons ensuite modélisé la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude. La modélisation de GSAP dans les repères (naturel et Park) a été réalisée, cette dernière a été validée par simulation sous Matlab Simulink. Enfin, une modélisation a été élaborée dans la partie de convertisseur statique, suivi par une simulation de cette dernière en appliquant la commande MLI. Les résultats de simulation de chaque partie montrent l'efficacité de la modélisation réalisée et par conséquent prépare le chemin pour appliquer les différentes techniques de commandes dans le chapitre trois.

Le chapitre trois a été consacré aux stratégies de commande permettant d'atteindre plusieurs objectifs concernant la puissance. En vue de comprendre le comportement du système étudié. Nous avons élaboré une description globale du système et l'écriture des équations dans le repère de Park a été exploitée pour effectuer la commande vectorielle. La commande consiste à maximiser la production énergétique par l'introduction de l'algorithme (MPPT). Les techniques d'extraction du maximum de la puissance, l'analyse des méthodes de recherche du point maximum de puissance permet de démontrer l'intérêt de la mise en œuvre de cette commande, cette stratégie de commande fournit des bonnes performances dynamiques de manière à maintenir le coefficient de puissance à une valeur optimal.

Les résultats des simulations, développées sous environnement MATLAB/Simulink sont réalisées à partir des systèmes proposés, montrent clairement la validité des modèles choisis et les performances des stratégies de commande proposées.

Plusieurs perspectives peuvent être envisagées à cet égard, notamment :

- La validation expérimentale des structures proposées dans notre étude.
- L'utilisation d'autres convertisseurs statiques de niveaux supérieurs dans une chaîne de production éolienne.

- Faire une étude sur les stratégies de commande de cette chaîne pour les zones de fonctionnement qui ne sont pas traitées dans ce travail de thèse, ce qui permet d'extraction du maximum de la puissance.

References

- [1] A. Osmont, «La Banque mondiale et les villes: du développement à l'ajustement,» Karthala Editions, (1995).
- [2] N. Pompignan, «Océan alerte rouge: chroniques d'un désastre annoncé,» *Océan alerte rouge*, pp. 1-258., 2014.
- [3] A. Mirecki, « Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance (Doctoral dissertation).,» (2005).
- [4] «sirenergies,» 2022. [En ligne]. Available: <https://www.sirenergies.com/article/histoire-energie-eolienne/#xxe-si%3%A8cle-des-p%3%A2les-inspir%3%A9es-de-lindustrie-a%3%A9ronautique>.
- [5] N. HAMDI, « Modélisation et commande des génératrices éoliennes,» Thèse de Magister en Électrotechnique UNIVERSITÉ MENTOURI , CONSTANTINE, 2008.
- [6] S. METATLA, «ptimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA,» Ecole nationale polytechnique., 2009.
- [7] F. Collard, «Les énergies renouvelables,» *Courrier hebdomadaire du CRISP*, pp. 5-72., 2015.
- [8] A. Z. Z. O. U. Z. Tamaarat, « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA,» Université Mohamed Khider, Biskra., 2015.
- [9] K. & A. A. ELKHAD, «Modélisation Numériques 3D DE L'Écoulement autour d'un rotor d'une éolienne à axe vertical Savonius,» Doctoral dissertation, university of M'sila, M'sila, 2022.
- [10] D. MIDA, «Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Énergie Électrique Hybride «Éolien–Photovoltaïque,» Université Mohamed Khider, Biskra, 2019.
- [11] A. & A. S. Sadi Oufela, « Evaluation de la Puissance Aérodynamique d'une Éolienne à Axe Horizontal (Doctoral dissertation,» Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2014.
- [12] R. & O. Z. Drareni, «Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC (Doctoral dissertation),» (2009).
- [13] B. Beltran, «Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation: Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur (Doctoral dissertation,» Université de Bretagne occidentale, Brest, 2010.
- [14] I. Vechiu, «Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome (Doctoral dissertation,» Université du Havre, Havre, 2005.
- [15] F. & M. B. E. Boutria, «Etude, Modélisation et simulation des configurations de la cascade synchrone sans balais (Doctoral dissertation,» Université de Jijel, Jijel, 2019.
- [16] A. & B. M. Saki, «Etude d'un générateur asynchrone dans la production d'énergie électrique par éolienne (Doctoral dissertation),» (2006).

- [17] N. Merzouk, « Carte des Vents de l'Algérie-Résultats Préliminaires.,» *Revue Energ*, pp. 209-214., 1999.
- [18] A. & B. Y. Saoudi, «Spécificités géologiques et hydrogéologiques de la région des lacs et de la plaine de Remila et son impact sur le tracé routier.,» 2017.
- [19] N. RAHOUA, «Contribution aux Contrôles des Générateurs Synchrones à Aimants Permanents (Doctoral dissertation.,» Université Mohamed Khider, Biskra, 2021.
- [20] B. Toual, «Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation.,» application à un système éolien à vitesse variable, Batna, 2010.
- [21] M. Godron, «Ecologie et évolution du monde vivant: Le vie est une transmission d'information.,» *Ecologie et évolution du monde vivant*, pp. 1-612., 2012.
- [22] A. K. A. & D. Derai, «Etude de faisabilité technico-économique de fermes éoliennes en Algérie.,» *Journal of Renewable Energies*, pp. 693-712., 20 04 2017.
- [23] A. Ammar, «Modélisation et optimisation d'un générateur synchrone à double excitation de forte puissance.,» Ecole centrale de Lille, Lille, 2013.
- [24] F. & B. A. HADJ SOUDI, « Etude des paramètres énergétiques et aérodynamiques d'une petite éolienne (Doctoral dissertation.,» Université Ahmed Draïa, Adrar, 2016.
- [25] F. Poitiers, «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone a double alimentation reliée au réseau.,» Doctoral dissertation, Université de Nantes, Nantes, 2013.
- [26] M. M. A. K. M. N. & HAMZA, «Electrotechnique, M. Commande de la machine asynchrone à double alimentation–apport des techniques de l'intelligence artificielle».
- [27] R. Rouabhi, «Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée.,» Doctoral dissertation, Université de Batna 2, Batna, 2016.
- [28] M. (. Koteich, «Modélisation et observabilité des machines électriques en vue de la commande sans capteur mécanique.,» Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay (ComUE)., Paris, 2016.
- [29] B. Houara, «Commande DTC Prédictive de la MSAP.,» 2017.
- [30] H. & H. A. Mahdaoui, «Simulation et commande vectorielle MLI d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents GSAP.,» Doctoral dissertation, Université Ahmed Draïa-ADRAR)., ADRAR, 2017.
- [31] A. I. N. E. & R. A. E. Kimouche, «Etude magnétothermique d'une machine électrique à aimants permanents montés en surface.,» Doctoral dissertation, Université de Jijel)., 2018.
- [32] B. Nedjar, «Modélisation basée sur la méthode des réseaux de perméances en vue de l'optimisation de machines synchrones à simple et à double excitation.,» Doctoral dissertation, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan), Cachan, 2011.
- [33] M. A. N. S. O. U. R. I. Mohamed, «Commande d'une génératrice synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne (Doctoral dissertation.,» Université Ibn Khaldoun-Tiaret, Tiaret, 2020.
- [34] a. a. Nassim, «Etude Comparative des Machines Synchrones Excitées par Aimants et courants électriques.,» mémoire de Master, Université A. Mira , BEJAIA, 2014.
- [35] k. Khedidja, «Contribution à la commande sans capteur mécanique d'une machine synchrone à aimants permanents.,» Thèse de doctorat en science, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran -Mohamed Boudiaf, 2012.

- [36] g. Dissertation, «Finite Set Model Predictive Control of the PMSM with Sine- Wave Filter,» these de doctorat, Université de Siegen, 2015.
- [37] A. mesbahi, «contribution aux techniques d'estimation et d'observation appliquées aux machines asynchrones et synchrones a aimants permanents,» thèse de doctorat, Université de Hassan II, casablanca, 2013.
- [38] C. Perera, «Sensorless Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives,» thèse de doctorat, Université de Aalborg, Denmark, 2002.
- [39] L. Salah, «Commande à Structure Variable d'un Moteur Synchrone à Aimant Permanent (MSAP),» mémoire de magister, université de badji mokhtar-annaba, 2006.
- [40] L. Salah, «Commande à Structure Variable d'un Moteur Synchrone à Aimant Permanent (MSAP),» mémoire de magister, université de badji mokhtar-annaba, 2006.
- [41] M. G. J. P. B. a. M. N. A. D. Zaltni, «A HOSM Observer with an Improved Zero-speed Position Estimation Design for Surface PMSM Sensor-less Control, 2010 IEEE International Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-Conference on Systems and Control Yokohama, Japan,» pp. 2213-2218, 8-10 September 2010.
- [42] B. Karim, «Détection et localisation de défauts d'un système de conversion d'énergie éolienne,» Thèse de Doctorat, université m'hamed bougara-boumerdes, 2017.
- [43] Z. Z. W. Q. e. a. C. Wei, «An adaptive network-based reinforcement learning method for MPPT control of PMSG wind energy conversion systems IEEE Transactions on Power Electronics,» pp. 7837- 7848., 2016.
- [44] B. & H. B. Malika, «Commande d'une éolienne à base d'une Machine synchrone à aimants permanents (MSAP),» Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [45] M. S. Ait Cheikh, «Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques,» Doctoral dissertation, 2007.
- [46] L. Allali, «Commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents,» 2016.
- [47] B. & H. B. Bilal, «Modlisation et Simulation d'une Chaîne de Conversion Eolienne,» In 3eme confrence Internationale des nergies renouve lables CIER(pp. 1-6). IJSET., 2015.
- [48] F. N. K. L. K. & B. Kendouli, «Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation,» *Journal of Renewable Energies*, vol. 14(1), pp. 109-120., (2011).
- [49] H. C. B. & D. J. E. Templier, «Développement d'un banc de démonstration pour convertisseurs électromécaniques à finalité didactique».
- [50] N. RAHOUA, «Contribution aux Contrôles des Générateurs Synchrones à Aimants Permanents,» Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra, 2021.
- [51] K. & H. A. AMIROUCHE, «Modélisation et commande des machines synchrone à inducteur,» Doctoral dissertation, Université Ahmed Draia-ADRAR, 2017.
- [52] S. BAZI, «Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur,» Doctoral dissertation, Université de Batna 2, 2016.
- [53] B. Lahmar, «Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents,» 2017.

- [54] M. H. S. M. S. & C. A. Sebba, « Analyse et synthèse d'une structure de contrôle vectoriel simplifiée associée au couple de charge appliquée au moteur synchrone à aimant permanents,» Acta Electrotechnica, 50(2), 2009.
- [55] H. Amrous, «Commandes adaptatives d'une machine synchrone a aimants permanents,» Doctoral dissertation, Ecole nationale polytechnique, 2009.
- [56] S. & R. D. Lalouni, «Modélisation, Simulation et Gestion d'énergie d'un Système Hybride (Photovoltaïque/Eolien) avec Stockage d'énergie,» In Proceeding of the 2nd International Seminar on New and Renewable Energies, Ghardaïa–Algeria. , 2012.
- [57] J. F. GERBER, «Etudes courtes.».
- [58] F. Chellali, «"A contribution in the actualization of wind map of Algeria."», Chellali, Farouk, chicago, (2011): 993-1002..
- [59] F. Chellali, «"A contribution in the actualization of wind map of Algeria." Renewable and Sustainable Energy Reviews 15.2,» Adballah Khellaf. , chicago, (2011): 993-1002..