

Résumer

Cet mémoire traite l'utilisation d'une Génératrice Synchrones à Aimant Permanent pour la production d'énergie éolienne et l'injection de l'énergie électrique produite dans un réseau.

Dans les éoliennes à vitesse variable l'amélioration du rendement énergétique nécessite des techniques de contrôle sophistiqués et robustes pour surmonter diverses contraintes, afin d'obtenir une conversion optimale de l'énergie aérodynamique. En raison de la nature changeante et instantanée du vent, la puissance de sortie d'un système de conversion de l'énergie éolienne est maximisée si le rotor est entraîné à une vitesse de rotation optimale pour chaque vitesse de vent. Ce résultat est obtenu avec un contrôleur de suivi du point de puissance maximale (MPPT).

L'objectif est d'effectuer la modélisation et la simulation du système de production d'énergie éolienne en tenant compte des problématiques des variations de la vitesse du vent et d'entretien de la génératrice afin d'obtenir un rendement énergétique maximal. Pour montrer les performances des méthodes utilisées, les résultats des simulations du système global réalisées sous environnement MATLAB/Simulink sont présentés et analysés.

Mot clé : MPPT GSAP simulenk eolienne vent puissance

ABSTRACT

Abstract

This paper deals with the use of a Permanent Magnet Synchronous Generator for the production of wind energy and the injection of the produced electrical energy in a network.

In variable speed wind turbines, improving energy efficiency requires sophisticated and robust control techniques to overcome various constraints in order to achieve optimal aerodynamic energy conversion. Due to the changing and instantaneous nature of wind, the power output of a wind energy conversion system is maximized if the rotor is driven at an optimal speed for each wind speed. This is achieved with a maximum power point tracking (MPPT) controller.

The objective is to model and simulate the wind energy production system taking into account the problems of wind speed variations and generator maintenance in order to obtain maximum energy efficiency. To show the performance of the methods used, the results of the simulations of the global system carried out under MATLAB/Simulink environment are presented and analyzed.

Key words : MPPT GSAP simulenk eolien wind power

REMERCIEMENT :

En préambule à ce mémoire nous remerciant **ALLAH** qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous tenons à remercier sincèrement **MONSIEUR A.BELABBES** qui, en tant qu'encadrant de mémoire, et aussi **YACHIR.A** toujours montré l'écoute et la disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire

Nous adressons nos remerciements aux membres du jury qui ont accepté de faire soutenir ce mémoire.

Nous souhaitant adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire. Merci à toutes et à tous.

Nous adressons nos remerciements à **Mr. Ali Amer** qui nous ont apporté leur aide

DEDICACE

DEDICACE

Je dédie ce mémoire :

A mes chers parents ma MAMAN adorée et mon PAPA pour leur patience, leur amour, leur soutien et leur encouragement.

A mes frères MOURAD et ABDELKARIME et ma sœur

A mes tantes et oncles

A ma chère grande mer

A mes cousins et mes cousines

A mes amis en particulier MEHDI , WALID , YASSINE ,
BAHAA et D53

A toute personne qui nous a aidés

A mon chère ami et binôme NADIR

DEDICACE

DEDICACE

Je dédie ce mémoire :

A mes chers parents Mon père mon héros adoré rebbi
Yrahmah et Ma Mère pour leur patience, leur amour,
leur soutien et leur encouragement.

A mes chères Sœurs avec Mounira ouali bien sûr

A mes tantes et oncles

A mes cousins et cousines en particulier AHMED
BOHO

A mes amies en particulier KABILAT TWASWIS et
D53

A INES et ma chère amie MOUNIRA

A MASTERMINDS family

A toute personne qui nous a aidés

A mon chère ami et binôme MOKHTARE

NADIR

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Résumer.....	I
Abstract	II
REMERCIEMENT :	III
DEDICACE.....	IV
DEDICACE.....	V
SOMMAIRE	VI
Liste des abréviations	XII
Introduction general	1
Chapitre I :GENERALITE ET ETAT DE L'ART SUR L'ENERGIE EOLIENNE.	3
I.1 Introduction:.....	3
I.2 Principes physiques de la conversion d'énergie éolienne :	3
I.2.1 Quelques notions surle vent.....	3
I.2.2 Direction et vitesse du vent.....	4
I.2.3 L'énergie disponible dans le vent	5
I.3 Etat de l'art et situation de l'éolien dans le monde actuel :	6
I.3.1 L'énergie éolienne en chiffres :	6
I.3.2 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne :.....	10
I.4 Production d'énergie éolienne :	11
I.4.1 Définition de l'aérogénérateur :.....	11
I.4.2 Principe de Fonctionnement d'éoliennes :.....	12
I.4.3 Les déférents types des éoliennes :	12
I.5 Zones de fonctionnement de l'éolienne:.....	18
I.6 Modes d'exploitation de l'énergie éolienne:.....	18
I.6.1 Les éoliennes à vitesse fixe«FSWT» :.....	18
I.6.2 Les systèmes à vitesse variable « VSWT » :	19
I.6.3 Intérêt de la vitesse variable :.....	19
I.7 Les différents systèmes utilisés pouR l'exploitation de l'énergie éolienne :.....	20
I.7.1 Génératrice asynchrone :.....	20
I.7.2 Génératrice synchrone :	22
I.8 Avantages et inconvénients de GSAP :.....	23

SOMMAIRE

I.9 Eolienne isolée (autonome) :.....	24
I.9.1 Les systèmes de stockage de l'énergie éolienne :.....	25
I.9.2 Eolien urbain :.....	25
I.10 Conclusion :.....	26
Chapitre II MODELISATION DE LA CHAINE GLOBALE.....	27
II.1 Introduction:	27
II.2 Énergie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique :.....	27
II.2.1 Lois de béz :.....	27
II.2.2 Puissance aérodynamique :.....	29
II.2.3 Coefficient de puissance aérodynamique :.....	31
II.2.4 Couple aérodynamique :.....	31
II.3 Turbine :.....	32
II.4 Modèle de la turbine :.....	33
II.5 Principe de fonctionnement d'une machine synchrone :.....	33
II.5.1 Avantages :.....	33
II.5.2 Inconvénients :.....	34
II.6 Domaine d'application :.....	34
II.7 Description de la machine synchrone à aimant permanent : *	35
II.8 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent :.....	35
II.8.1 Hypothèses simplificatrices :.....	36
II.8.2 Mise en équation de la machine synchrone dans le repère (a-b-c) :.....	36
II.8.3 Equation de flux :.....	37
II.8.4 Equations électrique :.....	38
II.8.5 Equations mécanique :.....	38
II.8.6 Transformation de park :.....	39
II.8.7 Modèle de la machine synchrone dans le repère (d-q) :.....	40
II.9 Modélisation des convertisseurs :.....	44
II.9.1 Modèle d'onduleur MLI :.....	44
II.9.2 La commande modulation de largeur d'impulsion (MLI) sinus-triangle :.....	46
II.9.3 Modèle du redresseur MLI :.....	47
II.10 Conclusion :.....	50

SOMMAIRE

Chapitre III COMMANDE DE LA CHAÎNE DE CONVERSION ÉOLIENNE.....	51
III.1 Introduction:	51
III.2 Commande de convertisseur côté générateur :.....	51
III.2.1 Contrôle de MPPT :.....	52
III.2.2 Description du système global:	52
III.3 Contrôle de la connexion au réseau :.....	53
III.4 Objectif de commande :	54
III.5 STRATÉGIES DE CONTRÔLE DU SYSTÈME DE PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE :.....	54
III.5.1 Références des puissances injectées au réseau :.....	55
III.5.2 Contrôle de la tension du bus continu	55
III.6 Références des courants injectés au réseau :.....	57
III.6.1 Référence de la composante :.....	57
III.6.2 Référence de la composante <i>I_{qr}</i> :	58
III.7 Les résultats de simulation de la chaîne de conversion.....	60
III.7.1 Vitesse de vent constante	60
III.7.2 Vitesse de vent variable.....	63
III.8 Conclusion.....	70
Conclusion Générale	71
References	LXXII
ANNEXES	LXXVI

Liste des figures

Figure I-1 vents locaux à travers le monde	4
Figure I-2 Appareil utilisés pour la mesure du vent: a- Anémomètre à rotation , b- Anémomètre à pression, c- Girouette	5
Figure I-3 courbe de puissance energetique d'une eolienne en fonction de vitesse de vent	6
Figure I-4 Évolution mondiale de la capacité installée	8
Figure I-5 La capacité d'énergie éolienne de meilleur 10 pays	8
Figure I-6: Eolienne de 100 kW de Grand Vent	9
Figure I-7 Conversion de l'énergie cinétique de vent	12
Figure I-8 Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus)	13
Figure I-9 Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius).....	14
Figure I-10 Aérogénérateur à axe horizontal	15
Figure I-11 Eolienne Amont.....	16
Figure I-12 Eolienne Aval	16
Figure I-13 architecture d'éolienne d'axe horizontale.....	17
Figure I-14 un éolien à vitesse fixe	18
Figure I-15 un éolien à vitesse variable par PMSG.....	19
Figure I-16 système éolien basé sur une machine asynchrone à case à fréquence variable	21
Figure I-17 Génératrice asynchrone a double alimentation	21
Figure I-18 des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive	22
Figure I-19 système éolien basé sur une machine synchrone à aimant permanent	23
Figure I-20 machine à flux radiale et axial.....	23
Figure I-21 vertical layers of the atmosphere.....	26
Figure II-1 Tube de courant autour d'une éolienne	28
Figure II-2 Coefficient de puissance	29
Figure II-3 Coefficient C_p en fonction de λ pour différents types d'éoliennes	29
Figure II-4 Variation de la puissance en fonction de la vitesse du rotor.....	30
Figure II-5 Caractéristique $C_p(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β [78].....	32
Figure II-6 Schéma bloc du modèle de la turbine	33
Figure II-7 Représentation de la machine synchrone à aimants permanents.	37

Liste des figures

Figure II-8	Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park	39
Figure II-9	Passage de repère naturel du stator au repère (d, q) de Park.....	39
Figure II-10	Représentation du moteur synchrone à aimants dans le repère d-q et α - β	40
Figure II-11:	Schéma de l'onduleur de tension.....	45
Figure II-12	Le principe de base de la commande par MLI.....	46
Figure II-13	Schéma de principe du redresseur MLI.	48
Figure II-14	Structure du redresseur triphasé.....	49
Figure III-1	Système de production d'énergie.....	51
Figure III-2	Commande de convertisseur côté générateur.	52
Figure III-3	Contrôle de la connexion au réseau	54
Figure III-4	Stratégie de contrôle des puissances active et réactive injectées dans le réseau.....	55
Figure III-5	Schéma électrique du bus continu.....	56
Figure III-6	Principe de la régulation de la tension du bus continu.....	56
Figure III-7 :	Schéma bloc du correcteur PI.....	59
Figure III-8	profil du vitesse du vent constante	60
Figure III-9	La vitesse de rotation de turbine	60
Figure III-10	Les tension de réseau abc.....	61
Figure III-11	Les courants du réseau abc.....	61
Figure III-12	La tension de bus continue.....	62
Figure III-13	puissance active et réactive	62
Figure III-14	profile de vitesse du vent variable.....	63
Figure III-15	La vitesse de rotation de turbine	64
Figure III-16	Les tension de réseau abc.....	64
Figure III-17	Les courant de réseau abc	65
Figure III-18	La tension de bus continu.....	65
Figure III-19	puissance active et réactive	66
Figure III-20	Profil de vent instable	67
Figure III-21	La vitesse de rotation de turbine	67
Figure III-22	La tension au réseau abc	68
Figure III-23	Le courant du réseau abc.....	68
Figure III-24	La tension de bus continu.....	69

Liste des figures

Figure III-25 puissance active et réactive	69
---	----

Liste des abréviations

MSAP : Machine Synchrone à Aimant Permanent

MLI : Modulation de largeur d'impulsion

PID : Régulateur proportionnel intégrateur.

PLL : Boucle de verrouillage de phase.

λ : la vitesse spécifique

V : la vitesse du vent.

ρ : la masse volumique de l'air

R : le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

Cp: est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine

P_{tr}: Puissance aérodynamique de la turbine

C_{em}: Le couple électromagnétique

C_r: Le couple résistant

j: L'inertie des parties tournantes

Ω : La vitesse de rotation

d, q : Indice des composantes orthogonales directs et en quadrature

R_s : Résistance d'un enroulement statorique .

L_s: L'inductance propre d'une phase statorique.

I_{abc}:Les courants des phases statoriques a, b, c.

V_{abc}:Les tensions des phases statoriques.

$\Omega = \omega_r / p$: Vitesse de rotation de la machine.

J: Moment d'inertie.

C_{em}: Couple électromagnétique

C_r: Couple résistant.

ω_r : Vitesse électrique du rotor.

f_c: Coefficient de frottement.

p: Nombre de paires de pôles.

θ : représente la position du rotor

V_{dq}: Les tensions statoriques dans le repère (d, q).

Liste des abréviations

i_{dq} : Les courants statoriques dans le repère (d, q).

\varnothing_{dq} : Les flux statoriques dans le repère (d, q).

\varnothing_f : Flux induit par les aimants permanents.

$L_d L_q$: Inductance cyclique statorique d'axe direct 'd' et l'axe transverse 'q'.

$W_r \varnothing_f$: Force électromotrice induite seulement sur l'axe «q».

U_r : Tension de référence.

U_p : Tension de porteuse.

$S(t)$: Est le signal MLI résultant.

V_p : Valeur de crête de la porteuse.

V_m : Valeur maximale de la tension de référence.

Introduction générale

Introduction general

La demande en électricité augmente à un rythme effréné dans le monde entier. A présent l'accès à l'énergie électrique, est synonyme de meilleures conditions de vie (transport, santé et éducation) et le facteur essentiel pour tout développement industriel, économique et politique

Aujourd'hui plus de 80% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel.

Alors, on a besoin de chercher d'autres solutions alternatives aux énergies fossiles pour produire l'électricité avec des sources renouvelables non polluantes et économiques en exploitant bien les éléments de la nature comme l'eau, le soleil et le vent.

L'énergie éolienne est l'une des plus importantes et les plus prometteuses des sources d'énergie renouvelable à travers le monde en termes de développement.

Le développement durable et les énergies éoliennes suscitent aujourd'hui l'intérêt de plusieurs Laboratoires de recherches et plusieurs pays industrialisés. Ainsi, le développement des Éoliennes représente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique.

De nombreux travaux de recherche sur le contrôle et la commande d'éoliennes ont été menés. Grâce à ces recherches, les dernières générations d'éoliennes fonctionnent à une vitesse variable sans multiplicateur de vitesse. Ce type d'éoliennes permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. Il est ainsi possible de modifier la vitesse de rotation de la turbine, permettant alors de maximiser la Puissance extraite à chaque vitesse de vent. Néanmoins, il reste encore à introduire plus d'intelligence dans le fonctionnement et le contrôle des aérogénérateurs. Pour cela, on sera amené à utiliser de plus en plus les techniques de l'automatique avancée et robuste (modes glissant, logique flou, entre autres).

L'énergie éolienne présente de nombreux avantages par rapport autre énergie comme C'est une énergie renouvelable propre, L'éolienne peut être reliée à un réseau électrique pour fonctionner de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou une batterie couplée à un onduleur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif et L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à moindre coût à la réalisation des objectifs que s'est fixée l'Union Européenne pour 2020: 20% d'énergies renouvelables (éolienne et autres) dans la consommation globale d'énergie.

Ainsi, l'objectif principal de nos travaux de thèses est d'étudier les techniques de commande modernes et efficaces appliqués aux éoliennes à vitesse variable à base de GSAP, pour atteindre plusieurs objectifs (maximisation, optimisation et gestion de la

Introduction générale

production d'énergie de vent). Par optimisation, nous entendons non seulement l'amélioration de la qualité de l'énergie produite et le rendement énergétique mais aussi l'assurance d'une injection efficace de la puissance électrique vers le réseau. Ce qui aurait pour conséquence de rendre possible la fabrication des aéro-turbines plus légères améliorant de ce fait la productivité. Pour ce faire, le mémoire sera organisé en trois chapitres comme suit :

Le premier chapitre est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens et leur fonctionnement. Ces rappels sont suivis par une l'état de l'art et Quelques chiffres nous montrons l'importance et l'évolution dans le temps de la production renouvelable mondiale et quelques projets de recherche et de production intégrant l'éolien en Algérie, puis une définition de l'énergie éolienne de manière général et les différentes technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal). Ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens et les convertisseurs qui leur sont associés.

Le second chapitre comporte trois parties. La première partie est dédié à l'étude et la modélisation de la turbine éolienne, La deuxième sera consacré à la modélisation détaillée de la machine synchrone à aimant permanent cette étape est primordiale. La troisième partie on présente la modélisation de redresseur et l'onduleur et sa commande MLI.

Le troisième chapitre traite du contrôle coté génératrice, coté réseau et de contrôle de la puissance active et réactif injecté aux réseaux ; et le contrôle de la tension du bus continue. Nous avons simulé la chaine de conversion éolienne avec déférentes état de vent (constante, variable, instable) les résultats a été simuler à travers le logiciel Matlab-Simulik.

Chapitre I :GENERALITE ET ETAT DE L'ART SUR L'ENERGIE EOLIENNE.

I.1 INTRODUCTION:

L'énergie éolienne est la forme principale de production d'énergie électrique renouvelable. L'énergie éolienne est obtenue par la conversion de la force des vents soit en énergie mécanique, soit en énergie cinétique. Cette forme d'énergie fut maîtrisée par l'homme, notamment grâce aux moulins à vent pour pomper l'eau ou moulin du grain, et cela depuis les Perses. Les hommes utilisent donc depuis de nombreux siècles l'énergie éolienne, notamment comme une force motrice pour le déplacement de voiliers et des moulins à vent. Les aérogénérateurs actuels sont des dispositifs électromécaniques qui consistent d'une turbine à vent accouplée à un générateur à courant alternatif permettant de convertir directement l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

Cette énergie offre deux grands avantages, puisqu'elle est totalement propre et renouvelable. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet (pas d'effet de serre ou de pluies acides) et aucun déchet.

Dans ce chapitre traite du rôle du vent dans la production d'énergie éolienne, et on discutera sur le développement de l'énergie éolienne dans le monde aussi on s'intéresse essentiellement aux éoliennes à vitesse variable et à axe vertical avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'aux différents types de générateurs utilisés dans cette chaîne de conversion d'énergie, finalement on a découvert Production d'énergie éolienne.[1]

I.2 PRINCIPES PHYSIQUES DE LA CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE :

I.2.1 QUELQUES NOTIONS SURLE VENT

Du fait que la terre est ronde, le rayonnement solaire absorbé diffère aux pôles et à l'équateur. En effet, l'énergie absorbée à l'équateur est supérieure à celle absorbée aux pôles. Cette variation entraîne une différence de température en deux points qui induit des différences de densité de masse d'air provoquant leur déplacement d'une altitude à une autre. Ces déplacements sont influencés par la force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère sud. On pourrait aisément prévoir la direction des vents dominants si elles n'étaient pas perturbées par les orages, les obstacles naturels ou les dépressions cycloniques. [2]

Les études de modélisation de la distribution des vitesses du vent ont été orientées vers des modèles associant puissance et exponentielle. Les modèles usuels étant :

la distribution de Weibull.

la distribution hybride de Weibull.

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

et la distribution de Rayleigh

I.2.2 DIRECTION ET VITESSE DU VENT

Direction :

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire (Fig. I.1)

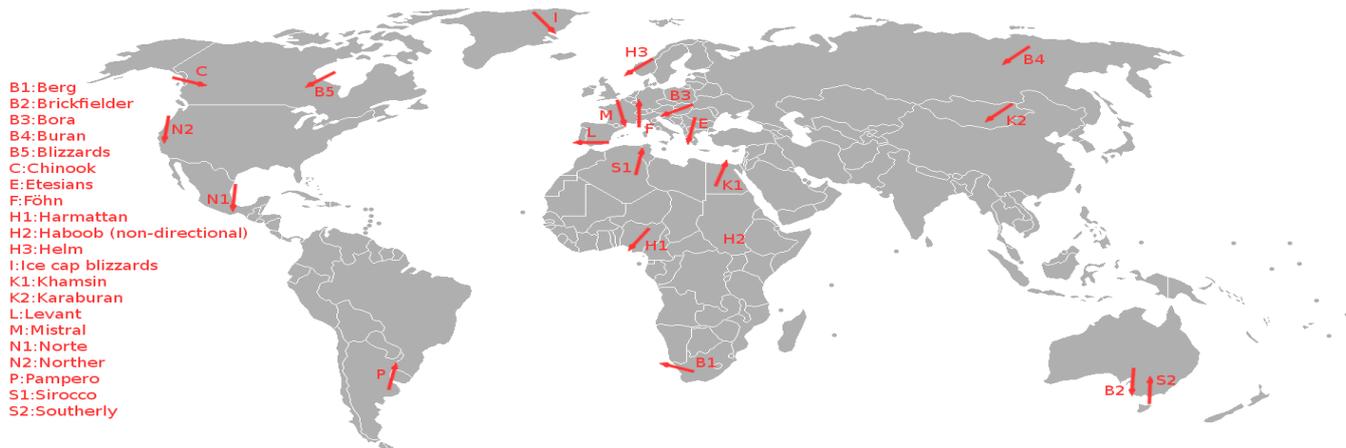


Figure I-1 vents locaux à travers le monde

Vitesse de vent

En réalité, le vent est mesuré par un anémomètre complété par une girouette qui génère les grandeurs fondamentales que sont la vitesse et la direction (Fig. I.2). Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression).

Les signaux électroniques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de contrôle de l'éolienne pour démarrer celle-ci lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25m/s afin d'assurer la protection de l'éolienne.

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

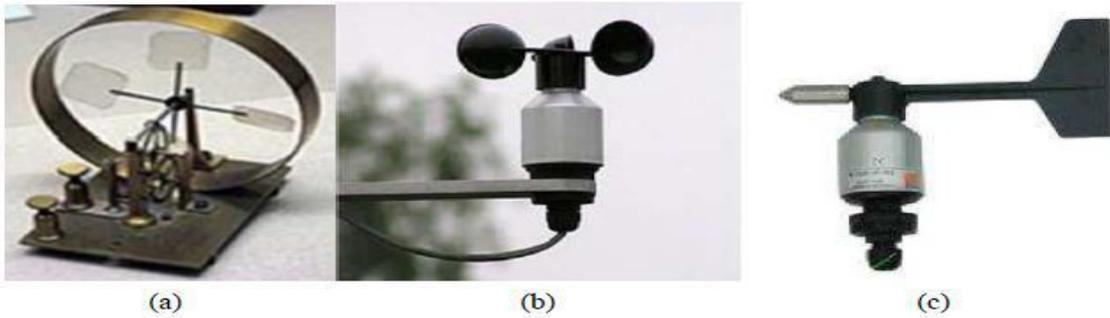


Figure I-2 Appareil utilisés pour la mesure du vent: a- Anémomètre à rotation , b- Anémomètre à pression, c- Girouette

Une graduation a été établie, selon l'échelle de Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques-unes au tableau 1 :

Degrés beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse de vent (km/h)	Pression sur surface plane (daN/m ²)	Description générale
0	0 à 0.4	< 1	-	calme
3	3.5 à 5.5	12 à 19	3.2 (5m/s)	Petite brise
4	5.5 à 8	20 à 28	6.4(7m/s)	jolis
6	11.4 à 13.9	39 à 49	22(13m/s)	Vent frais
8	17.4 à 20.4	62 à 74	52(20m/s)	Coup de vent
11	28.4 à 32.5	103 à 117	117(30m/s)	Violente tempête
17	54.1 à 60	202 à 220	470(60m/s)	cyclone

Tableau 1 Echelle de Beaufort.

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne.

Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude.

Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10m/s

I.2.3 L'ENERGIE DISPONIBLE DANS LE VENT

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air m_a , qui se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2} m_a v^2$$

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

L'énergie fournie par le vent est une énergie cinétique, en fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si on considère que la masse volumique de l'air (masse de l'air par unité de volume) est constante, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est en fonction de sa vitesse .

Pour commencer à produire de l'énergie, une éolienne exige une vitesse de vent minimale, dite vitesse de démarrage. Pour la plupart des éoliennes modernes, cette vitesse de vent est de 3 m/s. Quand le vent augmente, la production augmente avec le cube de la vitesse du vent. Pour une certaine vitesse de vent (dite vitesse nominale), la puissance qui arrive sur la génératrice est égale à la puissance maximale de cette génératrice.

Il faut donc limiter la puissance pour éviter que la génératrice ne soit détruite, quand le vent est trop violent (tempête), l'éolienne doit être arrêtée : c'est la vitesse d'arrêt. Pour les vitesses de vent comprises entre la vitesse nominale et la vitesse d'arrêt, la production est constante, égale à la puissance de la génératrice. La puissance est régulière au niveau du rotor. Alors Chaque éolienne admet trois paramètres techniques donnés par le constructeur qui sont les vitesses essentielles pour son exploitation Figure I.3[3]

- La vitesse de démarrage V_D : la vitesse ou l'éolienne commence à produire l'énergie
- La vitesse moyenne nominale V_n : la vitesse ou l'éolienne produite une énergie maximale
- La vitesse seuil V_M : vitesse ou l'éolienne s'arrête.

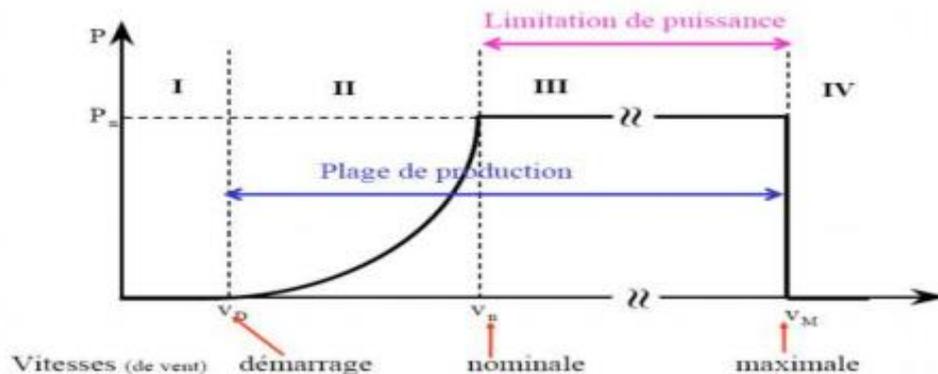


Figure I-3 courbe de puissance énergétique d'une éolienne en fonction de vitesse de vent

I.3 ETAT DE L'ART ET SITUATION DE L'EOLIEN DANS LE MONDE ACTUEL :

I.3.1 L'ENERGIE EOLIENNE EN CHIFFRES :

I.3.1.1 La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne :

La tendance récente indique que l'énergie éolienne jouera un rôle majeur pour atteindre l'objectif énergétique futur dans le monde entier, afin de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et de minimiser l'impact négatif de l'énergie éolienne. D'énergie

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

dans le monde entier, afin de réduire la dépendance à l'égard des combustibles fossiles et de minimiser l'impact négatif du changement climatique. L'énergie éolienne est la technologie de production qui connaît la croissance la plus rapide parmi les sources d'énergie renouvelables.

L'énergie éolienne est l'option la plus économique pour les nouvelles capacités de production d'énergie dans un nombre croissant de régions, et de nouveaux marchés ont continué de fleurir en Afrique, en Asie et en Amérique latine. L'Asie est restée le plus grand marché au monde pour la septième année consécutive, sous le leadership de la Chine, et a dépassé l'Europe en termes de capacité totale. Les États-Unis sont au premier rang mondial pour la production d'énergie éolienne. L'énergie éolienne a assumé plus de 20 % de la demande en électricité de plusieurs pays tels que le Danemark, le Nicaragua, le Portugal et l'Espagne .[4]

Après plusieurs années d'exploitation à perte, la plupart des fabricants de turbines ont retrouvé la voie des bénéficiaires et les dix premiers d'entre eux ont même battu des records en termes d'installations. La conception des turbines destinées à être utilisées sur terre et en mer a continué d'évoluer en vue d'améliorer la réalité économique de l'énergie éolienne dans un plus large éventail de régimes de vent et de conditions de fonctionnement.[5]

La production des éoliennes a atteint 20,7 TWh en 2016, en recul de 1,8 % par rapport à 2015 du fait de conditions météorologiques moins favorables, les mois de septembre et décembre ayant été peu venteux ; elle a représenté 3,9 % de la production de la France nette d'électricité ; sa part dans la production d'électricité renouvelable a été de 20,4 %

À la fin 2016, le total mondial de la puissance installée éolienne atteignait 486,7 GW

(432,7 GW fin 2015), en augmentation de 54,6 GW en un an contre 63,0 GW en 2015, soit 12,6 % après 17 % en 2015, 16,2 % en 2014 et 12,4 % en 2013). La Chine a installé à elle seule 23,3 GW, soit 42,7 % du total 2016 (48,4 % en 2015, 45,2 % en 2014), et représente 34,7 % du parc mondial fin 2016 contre 33,6 % fin 2015 et 31 % fin 2014. En 2016, le marché éolien mondial a ralenti sa croissance avec 54 GW installés dans l'année ; la Chine est restée en tête avec 23,3 GW contre 30 GW en 2015, année marquée par un rush avant la mise en place de réductions des tarifs garantis ; aux États-Unis, les 8,2 GW mis en service portent le parc à 82 GW ; l'Union européenne a installé 12,5 GW, dont 5,4 GW en Allemagne et 1,5 GW en France .[6]

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

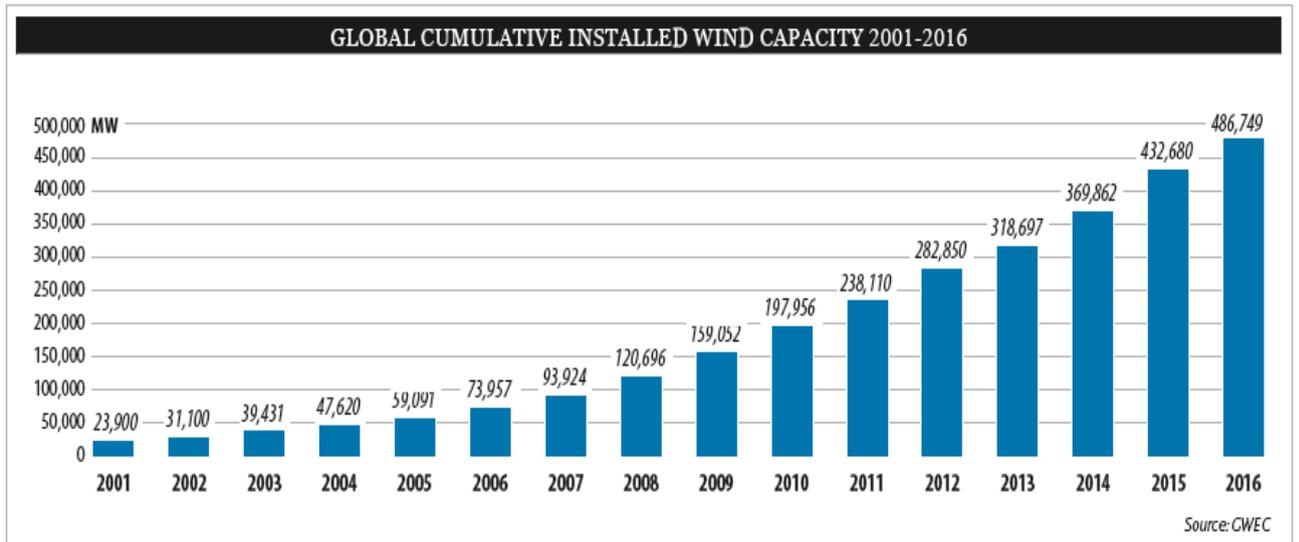


Figure I-4 Évolution mondiale de la capacité installée

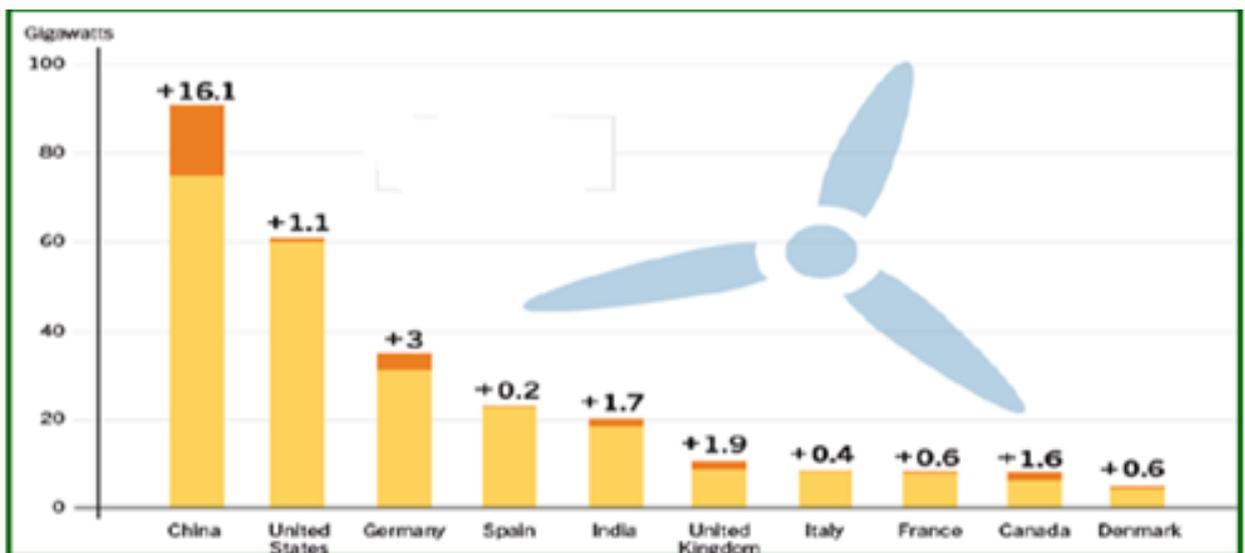


Figure I-5 La capacité d'énergie éolienne de meilleur 10 pays

I.3.1.2 Potentiel éolien en Algérie

Les pas de l'Algérie dans le domaine des énergies éoliennes restent toujours réservés ou encore très lents comparant par le développement rapide connue dans le monde. Cependant, l'Algérie dispose de tous les nécessaires pour le développement des énergies éoliennes, elle présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique. En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique le 1957, avec une installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger) présenté sur la figure (I.6) ; conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable, de 30 m de hauteur et

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

d'un diamètre de 25 m racheté par Electricité et Gaz d'Algérie puis démonté et installé en Algérie.



Figure I-6: Eolienne de 100 kW de Grand Vent

La stratégie de développement des énergies renouvelables en Algérie vise à porter la part des énergies renouvelables, à l'horizon 2015, à environ 5% de la production nationale d'électricité. Pour atteindre cet objectif, plusieurs projets sont à développer et à réaliser dans ce domaine. Parmi ces projets on trouve les projets d'implantation de fermes éoliennes dans le sud du pays. Ces dernières années l'Algérie a suivi une politique pour l'encouragement et le développement de l'utilisation des énergies renouvelables comme un complément à l'électrification rurale pour l'alimentation en l'électricité des sites isolés.

Hybridation de centrales diesel existantes ou nouvelles par des systèmes photovoltaïques ou éoliens. Un grand projet lancé en 2010 d'une ferme éolienne de 10 MW a 70 km d'Adrar ville et un autre à Tindouf figure (I.6), ainsi que d'autres éoliennes de pompage dans plusieurs régions isolées

Des projets d'études sur les programmes exécutifs seront réalisés dans la période de 2016 à 2030 pour une puissance d'environ 1 700 MW.

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées. Les éoliennes peuvent être installées pour produire de l'électricité, que ce soit raccorder à des réseaux électriques ou pour des sites isolés. Pour optimiser le rendement des éoliennes il est nécessaire d'étudier l'intensité, la vitesse, la fréquence et la direction du vent.

I.3.1.3 Programme de l'énergie éolienne en Algérie :

Les énergies éoliennes se placent au politiques énergétique et économique menées par l'Algérie : d'ici 2030, environ 40% de la production d'électricité destinée à la consommation algérienne sera d'origine renouvelable et 13% sera d'énergie éolienne. L'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

l'électricité à partir du solaire photovoltaïque et d'énergie éolienne qui seront les moteurs d'un développement économique. L'objectif de l'efficacité énergétique est de produire les mêmes biens et services en utilisant un minimum d'énergie possible. L'Algérie Dans la première phase, entre 2015 et 2020, a atteint une capacité de production de 1010MW Et il veut atteindre dans la seconde période entre 2021 et 2030 une capacité de production de 4000MW

Ce programme contient des actions qui privilégient le recours aux formes d'énergies qui sont les mieux adaptées aux différents usages et nécessitant la modification des comportements et l'amélioration des équipements.[7]

Ce plan d'action se présente comme suite :

- 1- L'isolation thermique des bâtiments.
- 2- Développement du chauffe-eau ;
- 3- Généralisation d'usage des lampes à basses consommations ;
- 4- Introduction de la performance énergétique dans l'éclairage public ;
- 5- Promotion de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel ;
- 6- Promotion du Gaz Pétrole Liquéfié Carburant (GPL/C) ;
- 7- Promotion du Gaz Naturel Carburant (GN/C)

I.3.2 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE :

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après. [8]

I.3.2.1 Avantages :

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de NO₂. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie à ces pays pour se développer.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà

I.3.2.2 Inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit, il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.
- L'impact sur les oiseaux, certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs.
- la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne.

I.4 PRODUCTION D'ENERGIE EOLIENNE :

I.4.1 DEFINITION DE L'AEROGENERATEUR :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice Figure I.7.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.[8]

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

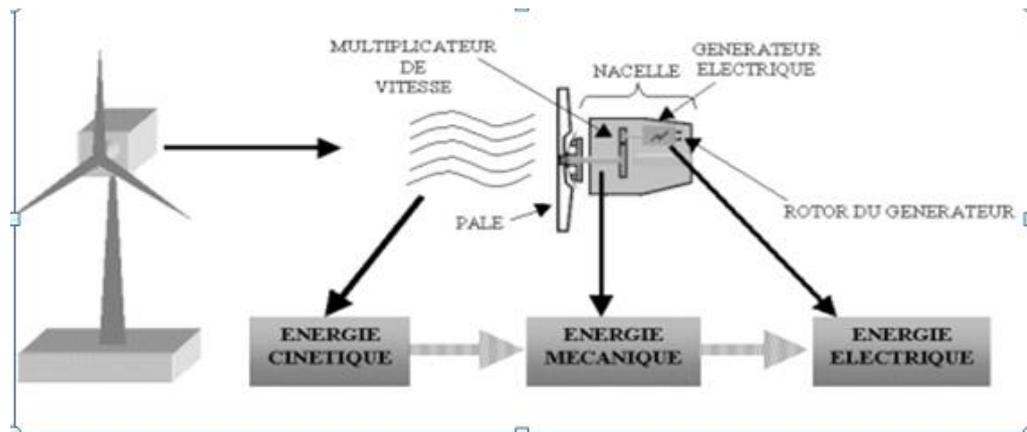


Figure I-7 Conversion de l'énergie cinétique de vent

I.4.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'EOLIENNES :

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui convertie l'énergie cinétique en énergie mécanique en utilisant des profils aérodynamiques. Cette conversion se fait en deux niveaux[9] :

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

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants... La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs[10]

I.4.3 LES DEFERENTS TYPES DES EOLIENNES :

On classe les éoliennes en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical et les Éoliennes à axe horizontal.[11]

Les éoliennes peuvent être classées aussi on trois catégories selon leur puissance nominale comme il est indiqué sur le tableau suivant

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

Echelle	Diamètre des pales	Valeurs de puissance
Petite puissance	<12m	< 40 KW
Moyenne puissance	12 à 45m	40 KW à 1 MW
Grand puissance	> 46 m	> 1 MW

Tableau 2 - Les catégories des éoliennes selon leurs puissances

I.4.3.1 Eoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts.

Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre.[12]

Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles [13]

- Les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance : Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus.
- Les aérogénérateurs conçus sur la base de la traînée : Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924.



Figure I-8 Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus)



Figure I-9 Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius)

Avantages et inconvénients des aérogénérateurs à axe vertical

Les avantages théoriques d'une éolienne à axe vertical sont les suivants[14][15] :

- Permet de placer la génératrice, le multiplicateur, à terre (il n'y a pas besoin de munir la machine d'une tour).
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- Les vents sont plus faibles à proximité de la surface du sol.
- Un inconvénient, pour certaines VAWT, est de nécessiter un dispositif auxiliaire de démarrage.
- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas satisfaisante.
- D'autres VAWT utilisent la poussée (drag) plutôt que la portance aérodynamique (lift, effet qui permet à un avion de voler), ce qui se traduit par une réduction du coefficient de puissance et un moindre rendement.

I.4.3.2 Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus utilisées.

Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales. Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol[16]



Figure I-10 Aérogénérateur à axe horizontal

Les éoliennes en amont :

L'arbre du générateur est positionné horizontalement, et le vent frappe la lame avant la tour. Les aubes de turbine sont tendues rigides pour empêcher les pales d'être poussées dans la tour par des vents violents, et les pales sont placées à une distance considérable dans l'axe de la tour et sont parfois légèrement inclinées.[17]

Les éoliennes en aval :

L'arbre du générateur est positionné horizontalement, et le vent frappe d'abord la tour puis la pale. IL n'a pas besoin de mécanisme supplémentaire pour en le gardant aligné avec le vent, et par vent fort, les pales peuvent être autorisées à se plier, ce qui réduit leur surface balayée et donc leur Résistance au vent. L'éolienne horizontale sous le vent est également exempte de turbulences problèmes.[17]

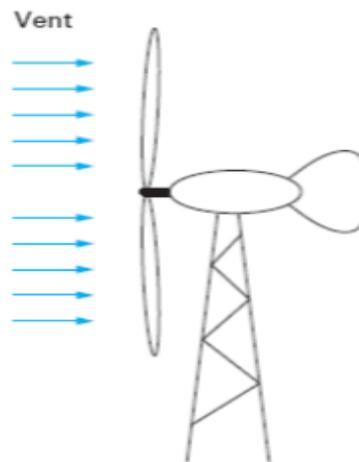


Figure I-11 Eolienne Amont

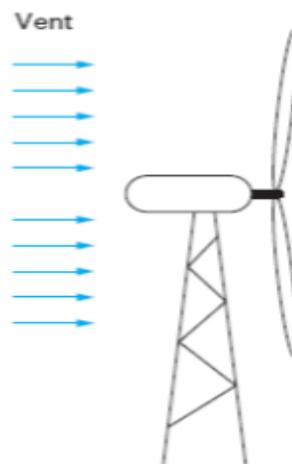


Figure I-12 Eolienne Aval

Avantage d'éolienne à axe horizontal :

Les éoliennes généralement utilisées pour la production d'électricité sont des éoliennes rapides à 2 ou à 3 pales, ceci pour plusieurs raisons[18] :

- Elles sont légères et donc moins chères
- Elles tournent plus vite car le multiplicateur utilise présente un rapport demultiplication moins important d'où sa légèreté et des pertes réduites.
- Le couple nécessaire pour la mise en route de ce type d'aérogénérateur est très faible et donc un fonctionnement à faible vitesse de vent.

Architecture d'éolienne à axe horizontal

L'éolienne à axe horizontal comporte généralement des éléments mécaniques et électriques :

- **Le mat ou la tour :** c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

consiste généralement à prendre une tour (mât) de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre de 80m, mât 90m) [19]

➤ **Le rotor** : formé par des pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept Danois) étant le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

➤ **Le système d'orientation des pâles** : qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique). En plus de ces éléments, la turbine est munie des pâles fixes ou orientables et qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/min.

➤ **L'arbre** : Il relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

➤ **Le multiplicateur** : sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.

➤ **L'aérogénérateur** : C'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW.

➤ **La nacelle** : Elle regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne.

➤ **Le système de refroidissement** : Généralement, il se compose d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

➤ **Le système de commande** : Il contrôle, en permanence, le bon fonctionnement de l'éolienne et intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter..

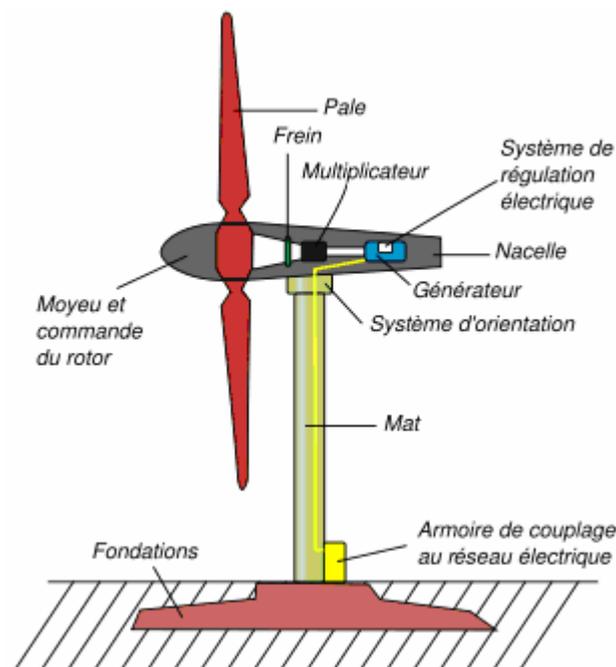


Figure I-13 architecture d'éolienne d'axe horizontale

I.5 ZONES DE FONCTIONNEMENT DE L'EOLIENNE:

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

- la zone I, où $P=0$ (la turbine ne fournit pas de puissance) ;
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent .
- la zone III, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P fournie reste sensiblement égale à P_n .
- la Zone IV, le système d'orientation « yaw control », pour les vents supérieurs à V_{max} (vent élevée), un dispositif oriente automatiquement la nacelle face au vent grâce à une mesure de la direction du vent effectuée par la girouette située à l'arrière de la nacelle, ce qui annule toute conversion d'énergie.

I.6 MODES D'EXPLOITATION DE L'ENERGIE EOLIENNE:

Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. [6]

Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes

I.6.1 LES EOLIENNES A VITESSE FIXE «FSWT» :

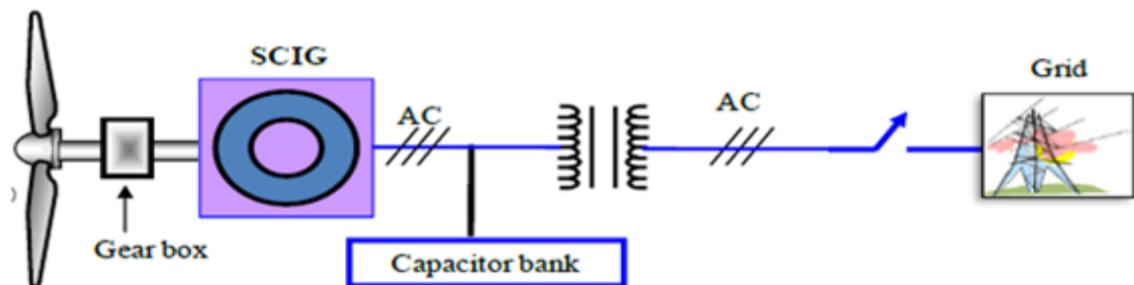


Figure I-14 un éolien à vitesse fixe

La figure 15 montre l'éolienne à vitesse fixe qui utilise un générateur à induction à cage d'écureuil (SCIG) directement connecté au réseau par un transformateur de couplage

(SCIG) directement connecté au réseau par un transformateur de couplage . Une batterie de condensateurs est nécessaire pour compenser la puissance réactive requise par le générateur à induction. Les problèmes associés aux éoliennes à vitesse fixe basées sur un générateur à induction sont les suivants

la consommation de puissance réactive, les contraintes mécaniques et la mauvaise qualité du courant. Dans une éolienne à vitesse fixe, les fluctuations de la vitesse du vent sont transmises sous forme de fluctuations du couple mécanique, ce qui entraîne des

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

fluctuations de la puissance réactive. Couple mécanique, ce qui entraîne des fluctuations de la puissance électrique . Les fluctuations de la puissance peuvent également entraîner d'importantes fluctuations de tension dans un système de réseau faible [4]. Cette configuration ne permet aucun contrôle de la vitesse, elle nécessite un réseau rigide et sa construction mécanique doit être capable de tolérer de fortes variations du couple. Construction mécanique doit être capable de tolérer des contraintes mécaniques élevées.

I.6.2 LES SYSTEMES A VITESSE VARIABLE « VSWT » :

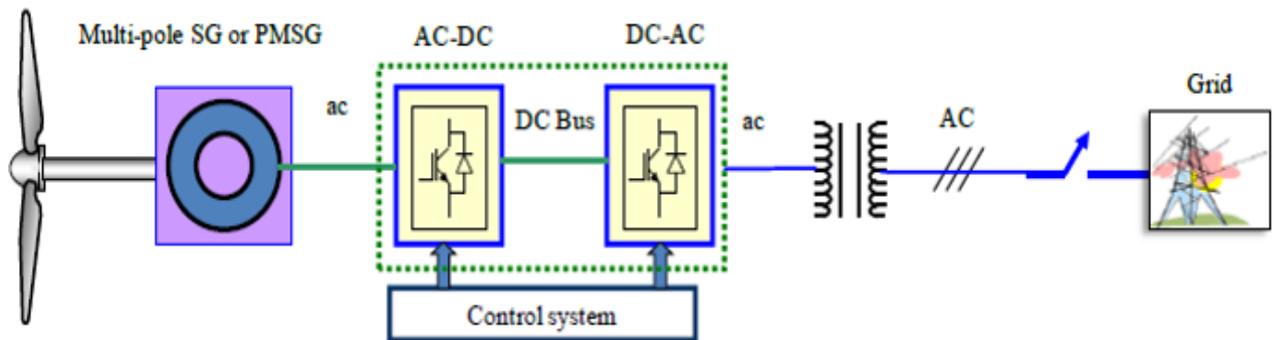


Figure I-15 un éolien à vitesse variable par PMSG

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut-être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques dues à l'orientation des pales, et limite la plage de vitesses de vent exploitable.

Ces deux principaux inconvénients peuvent, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent. Dans ce cas une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statiques. Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire. Cette interface est constituée de deux convertisseurs un redresseur et un onduleur connecté par l'intermédiaire d'un étage à tension continue.

I.6.3 INTERET DE LA VITESSE VARIABLE :

Actuellement, les technologies de turbine éolienne à vitesse variable sont très populaires en raison de leurs avantages tels que l'augmentation de la capture d'énergie, l'extraction de puissance maximale, un plus grand rendement plus élevé et une meilleure qualité de l'énergie

La plupart des turbines actuellement installées utilisent des éoliennes à vitesse variable basées sur un générateur à induction doublement alimenté (DFIG) avec une boîte de vitesses,

L'avantage de cette technologie est qu'elle nécessite un convertisseur de puissance à capacité réduite (30% de la pleine

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

capacité) car le convertisseur est connecté au circuit du rotor au lieu du circuit du stator [4]. Dans cette configuration, le stator est directement connecté au réseau et le rotor est connecté au réseau par le biais d'un convertisseur de puissance.

Pour contrôler la fréquence et la vitesse du rotor. En fonction de la taille du convertisseur de fréquence (généralement évalué à environ 30% de la puissance nominale du générateur), cette technologie peut fonctionner dans une large gamme de vitesses. En règle générale, la plage de vitesse variable est de $\pm 30\%$ autour de la vitesse synchrone. Autour de la vitesse synchrone, ce qui rend ce concept attractif et populaire d'un point de vue économique. Lorsque le générateur fonctionne à la vitesse super synchrone, l'énergie électrique est injectée dans le réseau. Puissance électrique est injectée dans le réseau par le rotor et le stator.

Lorsque le générateur fonctionne à une vitesse sous-synchrone, l'énergie électrique est fournie au rotor par le réseau [6]

I.7 LES DIFFERENTS SYSTEMES UTILISES POUR L'EXPLOITATION DE L'ENERGIE EOLIENNE :

I.7.1 GENERATRICE ASYNCHRONE :

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douée grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction. Dans les années 90 les Danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. L'introduction de convertisseurs de puissance entre la machine et le réseau permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant. Comme pour les machines synchrones- il existe différents types de machine asynchrones, qui associées à divers convertisseurs de puissance, fonctionnent avec des domaines de variation de vitesse de rotation plus ou moins grands. Deux des désavantages principaux des machines à induction sont la consommation de puissance réactive et le courant élevé au démarrage, mais ces problèmes peuvent être résolus par l'utilisation d'éléments d'électronique de puissance [8]. La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent. L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille.[20]

I.7.1.1 Génératrice asynchrone a cage:

La machine asynchrone à cage peut être utilisée, pour un fonctionnement à vitesse variable en utilisant un variateur de fréquence comme il est montré sur la Figure 2-7

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

Le dimensionnement du variateur de fréquence doit être à 100% du nominale de la machine, pour cette raison cette configuration est rarement exploitée, car elle n'est pas concurrentielle avec les autres machines notamment la génératrice asynchrone à double alimentation[20]

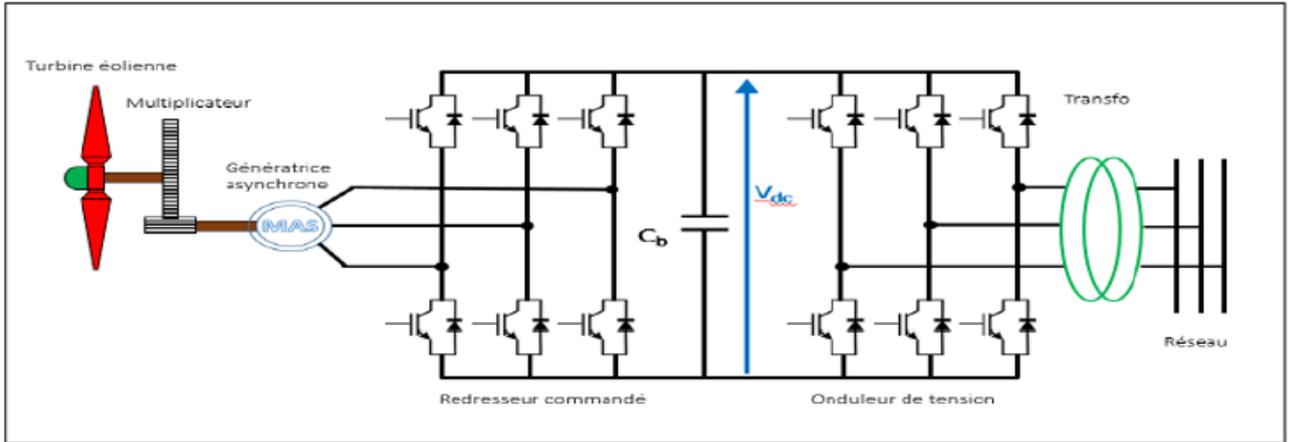


Figure I-16 système éolien basé sur une machine asynchrone à case à fréquence variable

I.7.1.2 Génératrice asynchrone a double alimentation (GADA) :

Les systèmes éolien à vitesse variable proposé dans cette section , basé sur la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA) , est illustré à la Figure (1.18) . La turbine , Via un multiplicateur ,entraîne la GADA , la quelle est raccordée au réseau électrique directement par la stator mais également à travers les convertisseurs statiquetriphasés à IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) par le rotor . Celui-ci est muni des systèmes bagues / balais . Ces Convertisseurs Côtés Machine et Réseau , noté respectivement Convertisseur Coté Machine (CCM) et Convertisseur Coté Réseau (CCR) son commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)[21]

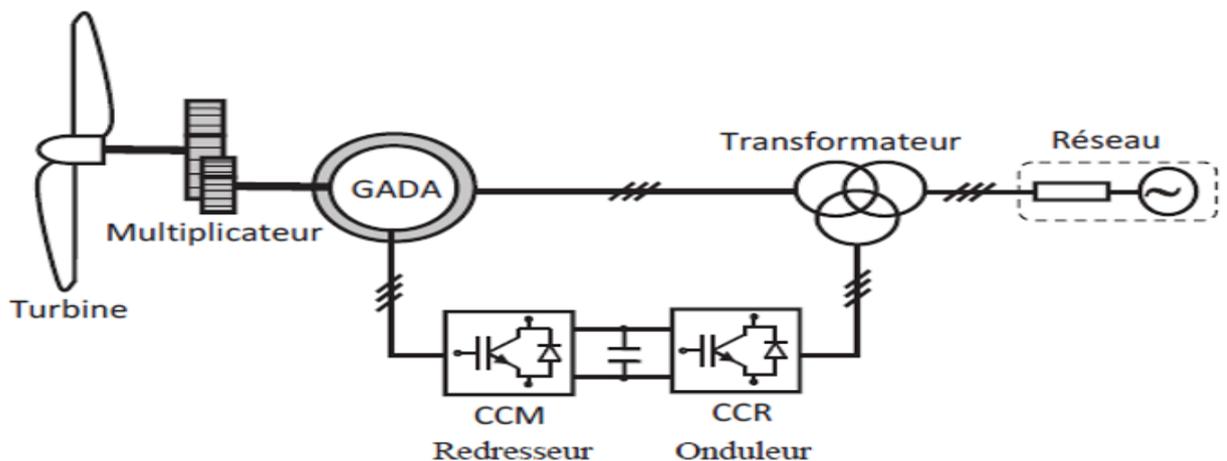


Figure I-17Génératrice asynchrone a double alimentation

I.7.2 GENERATRICE SYNCHRONE :

L'ensemble des génératrices (ou moteurs) triphasées utilisent un champs magnétique tournant. Si l'on dit que le moteur est synchrone, c'est parce que l'aimant au centre tourne à une vitesse constante qui est synchrone avec la rotation du champ magnétique [14], [39]. Le principe de fonctionnement est basé sur la création d'une variation de flux magnétique par la rotation d'un aimant (nommé rotor) passant devant les faces de trois bobines fixes (appelées stator) alimentées par le réseau (figure II-5). Cette variation provoque l'apparition d'une force électromotrice d'induction dans chacune des bobines, créant ainsi un courant triphasé. Dans ce type de générateur, la rotation de l'aimant, entraîné par le rotor de l'éolienne, doit être synchrone avec l'excitation des bobines, d'où son appellation[20].

I.7.2.1 Génératrice synchrone à rotor bobine :

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor. Les constructeurs préfèrent donc employer des générateurs synchrones à électroaimants, qui sont alimentés en courant continu obtenu après redressement du courant alternatif du réseau et transmis au rotor par l'intermédiaire d'un système de collecteur tournant [39]. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive[8]

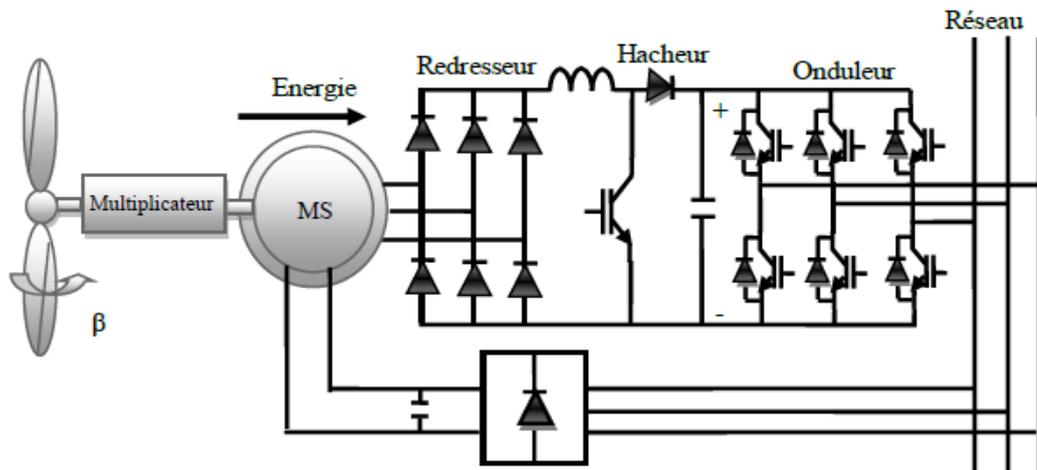


Figure I-18 des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive

I.7.2.2 Génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) :

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation[22]

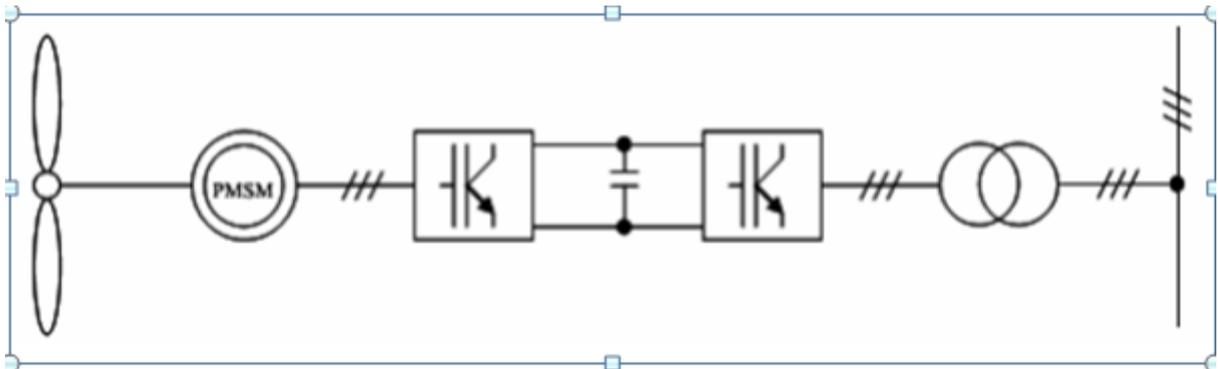


Figure I-19 système éolien basé sur une machine synchrone à aimant permanent

Les principales raisons pour choisir ce type de machine sont: rendement très élevé, grande puissance massique, simplicité du contrôle. Dans la pratique, des génératrices synchrones à aimants permanents sont très peu utilisées. Il y a plusieurs raisons pour cela : d'abord, les aimants permanents tendent à se démagnétiser lorsqu'ils travaillent dans les champs magnétiques puissants à l'intérieur de la génératrice. En plus, les aimants forts (fabriqués de métaux rares tels que le néodyme) coûtent assez chers, malgré la baisse des prix qui a eu lieu dernièrement [12]. En effet, son rotor est plus léger, permet la régulation de la tension, et son bobinage est facilement modifiable. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur[22]

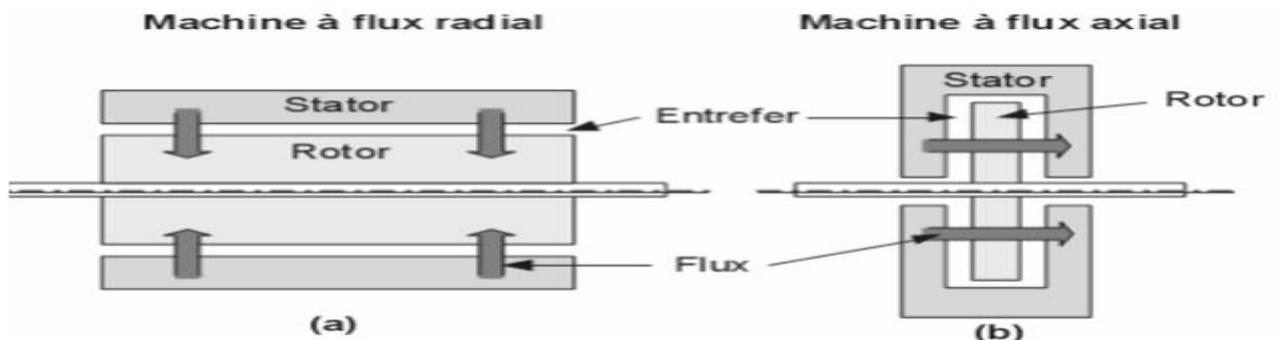


Figure I-20 machine à flux radiale et axial

I.8 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE GSAP :

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

Les Avantages	Les inconvénient
<p>-L'utilisation des aimants permanents a été une vraie révolution dans le domaine de l'utilisation de ces machines, car elle a permis d'éliminer le bobinage rotorique et son excitation ainsi que les balais et les contacts glissants. Ce qui induit moins de maintenance et plus de robustesse pour la machine. Cet avantage a couvert le coût élevé des aimants.</p> <ul style="list-style-type: none">- Moins des pertes de cuivre, les pertes viennent surtout du stator.- Facteur de puissance et rendement du moteur est améliorés.- Une faible inertie et un couple massique élevé ce qui augmente sa fiabilité et sa densité de puissance par unité de volume.- Une meilleure performance dynamique.- Construction et maintenance plus simple.- Pas d'échauffement au rotor, et absence des pertes joules.	<ul style="list-style-type: none">-Coût des aimants élevé.- Démagnétisation des aimants.- Maintien des aimants sur le rotor.- Rotor complexe

I.9 EOLIENNE ISOLEE (AUTONOME) :

Un cas particulier de système éolien avec sortie électrique est celui où un dispositif de charge est directement connecté, tel qu'un système de pompage d'eau, entraîné par une induction. Directement connecté, tel qu'un système de pompage d'eau, entraîné par un moteur à induction. D'induction. La transmission de l'énergie électrique ("arbre électrique") permet d'ériger le système éolien à un endroit élevé approprié pour alimenter une pompe située plus profondément dans un puits.

L'arbre électrique permet d'ériger le système éolien dans un endroit surélevé approprié pour alimenter une pompe située plus en profondeur dans un puits.

Les caractéristiques d'une pompe centrifuge correspondent bien à celles du rotor éolien.

Les caractéristiques d'une pompe centrifuge correspondent bien à celles du rotor éolien, puisque pour les deux, le couple varie proportionnellement au carré de la vitesse. Des concepts de contrôle simples et spécifiques peuvent être utilisés

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

Dans la plupart des régions isolées et ventées, l'énergie éolienne constitue la principale source potentielle d'énergie électrique. La baisse continue des prix des aérogénérateurs et les développements technologiques de l'électronique de puissance, conjugués aux incitations gouvernementales, conduisent à une utilisation d'éoliennes autonomes de plus en plus courante dans ces régions isolées. La variabilité et les fluctuations des ressources (vent) ainsi que les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières, qui ne sont pas forcément corrélées avec les ressources, constituent encore des limitations à une exploitation plus large. [11]

La conception des petits systèmes éoliens est considérablement différente de celles des éoliennes connectées aux grands réseaux. En effet, le but de l'utilisation de ces petits systèmes n'est pas toujours la recherche de la conversion maximale de puissance éolienne mais la production de la quantité d'énergie électrique adéquate alliée à un prix d'installation et de maintenance le plus faible. Les systèmes éoliens dans les applications isolées et autonomes sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage à l'électrification complète de villages.

I.9.1 LES SYSTEMES DE STOCKAGE DE L'ENERGIE EOLIENNE :

Divers systèmes de stockage d'énergie prometteurs sont disponibles sur le marché d'énergie, comme le stockage d'énergie par super condensateur, le stockage d'énergie magnétique supraconducteur (SMES), le stockage d'énergie par volant d'inertie et le stockage d'énergie par air comprimé

L'énergie électrique dans un système à courant alternatif (CA) ne peut pas être stockée électriquement. Cependant, l'énergie peut être stockée en convertissant l'électricité CA et en la stockant de manière électromagnétique, électrochimique ou cinétique ou encore[11]

Les différents systèmes:

1. Stockage de l'énergie magnétique supraconductrice
2. Systèmes de stockage d'énergie par batterie
3. Condensateurs avancés
4. Stockage d'énergie par volant d'inertie (FES)
5. Stockage de l'énergie hydroélectrique par pompage
6. Batteries à flux
7. Stockage de l'énergie par air comprimé
8. Stockage d'énergie thermoélectrique
9. Systèmes hybrides de stockage d'énergie

I.9.2 EOLIEN URBAIN :

Les éoliennes urbaines montées sur des bâtiments se trouvent dans la couche de rugosité de surface, qui s'étend au-dessus des éléments de surface jusqu'à au moins 1 à 3 fois leur hauteur (voir Figure I.22). au moins 1 à 3 fois leur hauteur (voir Figure I.22). Cette couche est fortement influencée par les caractéristiques de la surface et l'écoulement de l'air

CHAPITRE I : Généralité et état de l'art sur l'énergie éolienne.

est très irrégulier. Région. Par conséquent, les vitesses de vent rencontrées par l'éolienne sont fortement influencées par les caractéristiques de la surface.

La recherche sur les climats de la couche limite dans les zones urbaines a été principalement motivée par un intérêt pour la dispersion de la pollution et, dans une moindre mesure, pour le confort des piétons. Dans une moindre mesure, le confort des piétons. Très peu de recherches ont été

Très peu de recherches ont été menées sur les vitesses de vent en milieu urbain en vue de l'application des éoliennes[23]

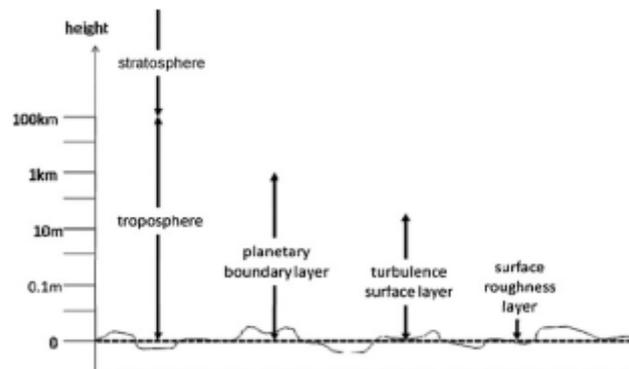


Figure I-21 vertical layers of the atmosphere

I.10 CONCLUSION :

Une brève description du domaine d'énergie et l'état de l'art sur l'énergie éolienne a été présentée dans ce chapitre. Dans ce contexte, quelques notions principales ont été données Sur le vent, le principe de fonctionnement et les différents types d'éoliennes, etc. Nos travaux portent une description les génératrices utilisées et leurs types avec une analyse détaillée sur le GSAP pratiques et industrielles de cette catégorie sont proposés. La turbine à axe vertical de type

Chapitre II MODELISATION DE LA CHAÎNE GLOBALE

II.1 INTRODUCTION:

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique.

Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la simulation du processus est nécessaire. Pour ce faire, on a besoin de modéliser la chaîne à étudiée. On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la chaîne de conversion globale. [24]

II.2 ÉNERGIE CINÉTIQUE DU VENT – CONVERSION EN ÉNERGIE MÉCANIQUE :

L'éolienne est un système complet permettant de convertir l'énergie (mécanique) du vent en énergie électrique

Le vent ne peut pas être représenté par des expressions exclusivement déterministes. La modélisation du vent n'est pas une chose aisée car les variations spatiales vont du kilomètre au centimètre et celles dans le temps de la seconde à des mois.

Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés.

L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent

Les études de modélisation de la distribution des vitesses du vent ont été orientées vers des modèles associant puissance et exponentielle. Les modèles usuels étant [24] :

- la distribution de Weibull.
- la distribution hybride de Weibull
- la distribution de Rayleigh.

II.2.1 LOIS DE BETZ :

Traisons l'énergie cinétique à travers la loi de Betz. Considérons un système éolien dont la vitesse du vent avant la turbine est notée V_1 et la vitesse V_2 après celle-ci. On suppose que la vitesse du vent au moment du passage dans le rotor vaut la moyenne de la vitesse du vent V_1 et la vitesse du vent après V_2 soit $(V_1+V_2)/2$, la masse d'air de densité ρ passant à travers la surface S des pales et ceci en une seconde est définie de la sorte [24]:

CHAPITRE II : La modélisation de la charge globale

$$m = \frac{\rho S(V_1+V_2)}{2} \quad \text{II.1}$$

On peut alors extraire la puissance P_m , à travers la deuxième loi de Newton :

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

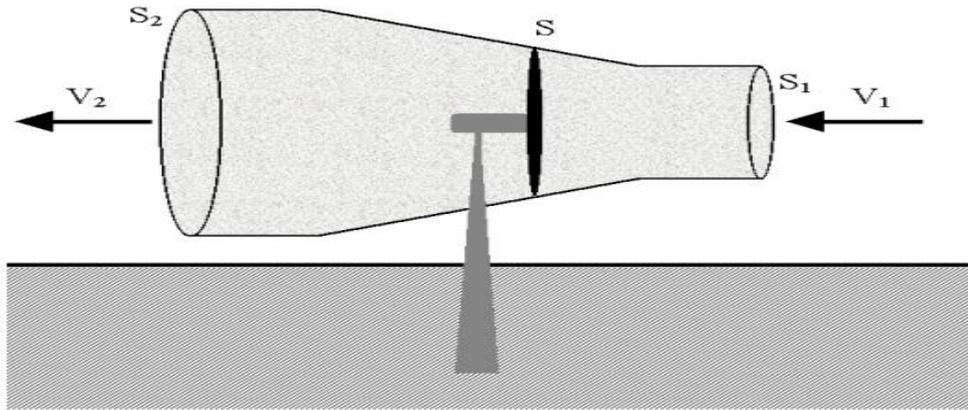


Figure II-1 Tube de courant autour d'une éolienne

Soit en remplaçant dans (1.1) on obtient:

$$P_m = \frac{\rho S(V_1+V_2)(V_1^2+V_2^2)}{4} \quad \text{II.3}$$

En théorie, le vent traversant la surface S constante, sa vitesse donc serait assimilable à V_1 sur l'ensemble du dispositif. La puissance P_{mt} se noterait donc :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad \text{II.4}$$

Le rapport entre puissance provenant du vent et puissance globale disponible en théorie est:

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad \text{II.5}$$

La courbe donnée à la Figure 1.3 correspond à l'équation (1.5), on s'aperçoit que le rapport

$C_p = P_m/P_{mt}$ passe par un maximum de 0,59. C'est la limite de Betz qui fixe la puissance maximale potentiellement récupérable pour une vitesse de vent fixée. Cette limite n'est jamais atteinte en pratique et toute éolienne est caractérisée par son propre coefficient de puissance fixé par le constructeur. La courbe de la caractéristique du coefficient C_p est représentée dans la figure ci-dessous.

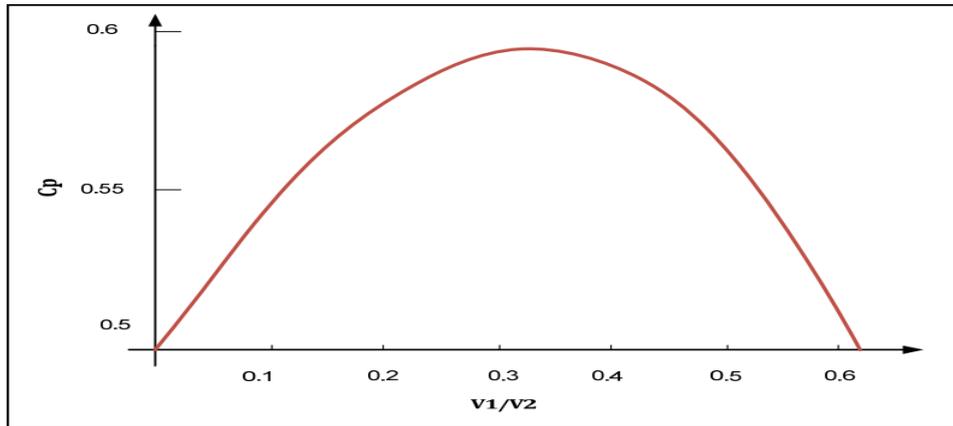


Figure II-2 Coefficient de puissance

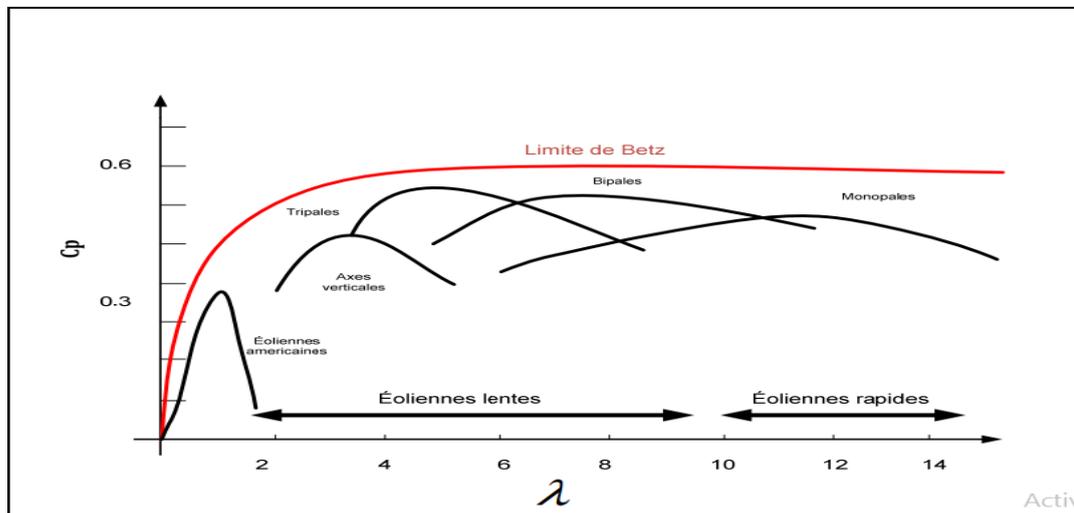


Figure II-3 Coefficient C_p en fonction de λ pour différents types d'éoliennes

II.2.2 PUISSANCE AERODYNAMIQUE :

La puissance aérodynamique P_{tr} extraite par la turbine en fonction du facteur de puissance

C_p qui dépend de l'angle de pales β et de la vitesse λ on a :

$$P_{tr} = \frac{1}{2} \rho S V_{vent}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad \text{II.6}$$

Alors la puissance mécanique d'une éolienne peut s'exprimer en fonction de la densité de l'air, du rayon des pales R_{pale} , et de la vitesse de vent V_{vent} :

$$P_m = C_p \lambda \Pi R_{pale}^2 V_{vent}^2 \quad \text{II.7}$$

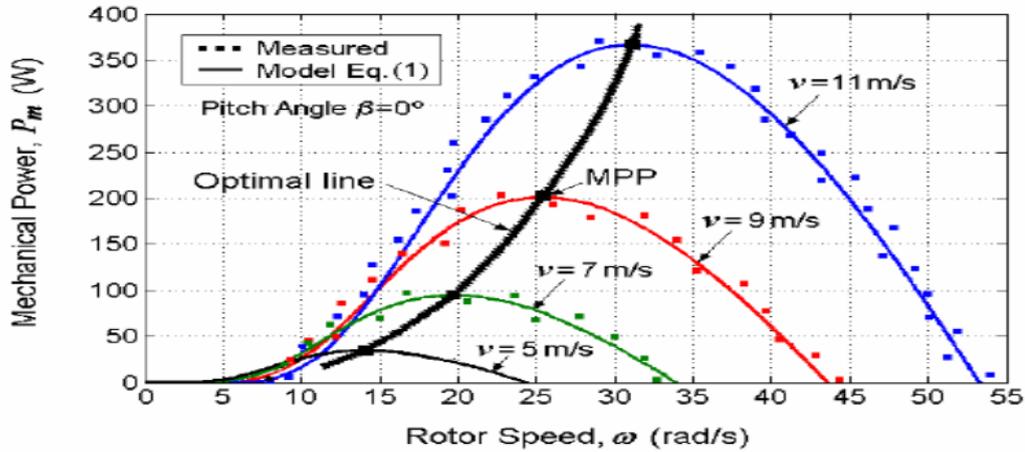


Figure II-4 Variation de la puissance en fonction de la vitesse du rotor.

On peut constater à partir de la figure II.4 que le maximum de la courbe de puissance, pour une vitesse de vent particulière se produit à une vitesse de rotor particulière. En raison des caractéristiques aérodynamiques d'une éolienne, une petite variation par rapport à la vitesse optimale du rotor entraînera une diminution importante de la puissance extraite du vent. Les éoliennes ne fonctionnent pas naturellement à la vitesse optimale pour une vitesse de vent donnée car la vitesse de leur rotor dépend de la charge du générateur ainsi que des fluctuations de la vitesse du vent. Pour ces raisons,

les stratégies de conversion non optimisée conduisent à des grands pourcentages d'énergie perdue. Plus l'énergie extraite du vent est importante plus l'énergie éolienne devient rentable. Ainsi pour maximiser la quantité de puissance captée par la turbine, des éoliennes à vitesse variable sont utilisées car elles permettent la variation de la vitesse de la turbine. Le principal défi des systèmes d'énergie éolienne est de pouvoir capter le plus d'énergie possible du vent dans les plus brefs délais. Du point de vue de l'électronique de puissance, cet objectif peut être atteint grâce à différentes topologies de convertisseur et aux algorithmes MPPT (Maximum Power Point Tracking)[25].

Le paramètre C_p est sans dimension, il exprime la capacité de l'éolienne à extraire l'énergie du vent. Ce paramètre caractéristique de l'aérogénérateur est une fonction de la vitesse spécifique λ et l'angle de calage β et est appelé coefficient de puissance. La vitesse spécifique est également appelée ratio de vitesse de bout de pale comme étant le rapport de vitesse tangentielle ($\Omega_{tr} \cdot R$) sur la vitesse instantanée du vent.

$$\lambda = \frac{\Omega_{tr} \cdot R}{V_{vent}} \quad \text{II.8}$$

R étant le rayon de l'aire balayé par les pâles et Ω_r la vitesse de rotation de la turbine.[26]].

II.2.3 COEFFICIENT DE PUISSANCE AERODYNAMIQUE :

Le coefficient de puissance $C(\lambda, \beta)$ exprime l'efficacité de la turbine dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Il se présente sous la forme d'une fonction non linéaire de la vitesse spécifique λ et e l'angle de calage β . La valeur maximale théorique du coefficient de puissance[23]

$$C_{pmax} = \frac{16}{29} \cong 0.5926$$

On peut trouver dans la littérature des équations non linéaires du coefficient de puissance qui modélisent sa variation par rapport à la vitesse spécifique et l'angle de calage des pâles [83].

$$\left\{ \begin{array}{l} C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left(\frac{151}{A} - 0.58\beta - 0.02\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{\frac{18.4}{A}} \\ A = \frac{1}{\frac{\lambda - 0.002\beta - \frac{0.003}{\beta^3 - 1}}{1}} \end{array} \right. \quad \text{II.9}$$

II.2.4 COUPLE AERODYNAMIQUE :

L'énergie cinétique captée par l'aéroturbine se transforme instantanément en puissance Mécanique P_{tr} qui développe un couple moteur C_{tr} faisant ainsi tourner le rotor à une vitesse

Ω_{tr} [25].

$$P_{tr} = C_{tr} \Omega_{tr} \quad \text{II.10}$$

Ou encore :

$$C_{tr} = \frac{P_{tr}}{\Omega_{tr}} \quad \text{II.11}$$

En substituant l'expression (II.6) de P_{tr} dans (II.11) et en tenant compte de (II.10), l'expression du couple aérodynamique peut être présentée sous la forme :

$$C_{tr} = \frac{1}{2} \rho \Pi R^3 V_{vent}^2 C_q(\lambda, \beta) \quad \text{II.12}$$

Avec :

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda}$$

Où $C_p(\lambda, \beta)$ est le coefficient du couple aérodynamique

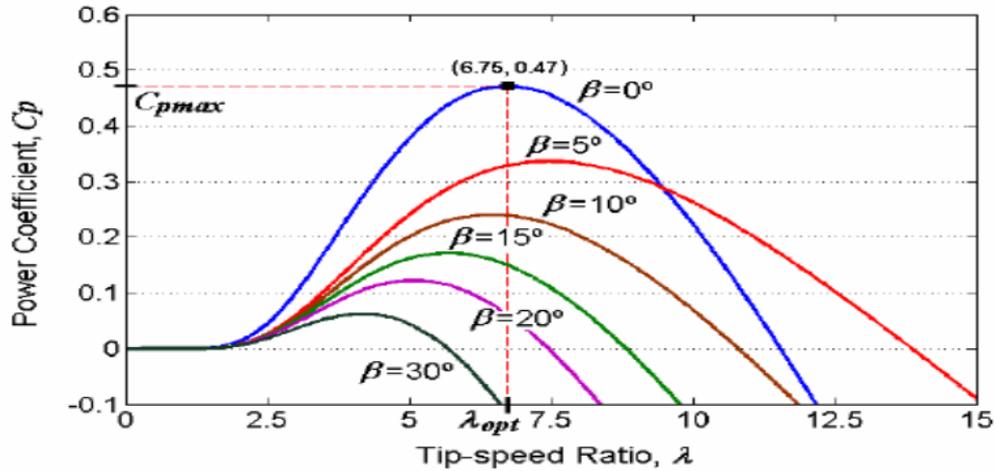


Figure II-5 Caractéristique $C_p(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β [78]

II.3 TURBINE :

La turbine retenue comprend trois pales orientales de longueur R , et chacune d'elle reçoit une force F_1, F_2, F_3 qui dépend de la vitesse du vent qui lui est appliquée. Elles sont fixées à travers un moyeu sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ωt . Cet arbre entraîne une génératrice synchrone à un grand nombre de pôles.

Les trois pales sont considérées identiques et possèdent donc :

- Le même moment d'inertie J_{pales}

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- Son moment d'inertie J_a

Le rotor de la génératrice possède :

- Un moment d'inertie J_g

Le rotor transmet un couple entraînant C_{tr} à la génératrice synchrone et tourne à une vitesse Ω_{tr} . En considérant que toutes les forces de poussée sont égales ($F_1 = F_2 = F_3$), nous pouvons considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique dont on peut simplifier la modélisation [27].

La transmission mécanique entre la turbine et la génératrice synchrone par le système d'équation ci-dessous :

$$\begin{cases} C_{tr} - C_{em} - f_v \Omega_g = J_t \frac{d\Omega_g}{dt} \\ \Omega_{tr} = \Omega_g \\ J_t = J_{pales} J_g J_{arbre} \end{cases} \quad \text{II.13}$$

Avec f qui représente le coefficient de frottements visqueux.

II.4 MODELE DE LA TURBINE :

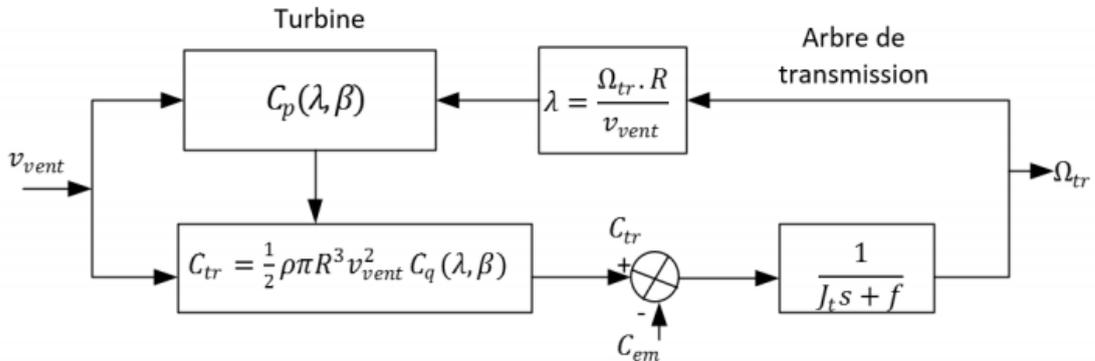


Figure II-6 Schéma bloc du modèle de la turbine

II.5 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE MACHINE SYNCHRONNE :

La machine étudiée est un moteur, il permet donc une conversion électromécanique de l'énergie. Le stator de celui-ci est alimenté par un réseau triphasé. Il produit ainsi un champ tournant qui entraîne le rotor. Plus le couple sur l'arbre est élevé plus l'angle de décalage polaire est plus grand. Le rotor décroche du flux tournant dès que cet angle dépasse 90°

. La vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de synchronisme. Elle est donc directement proportionnelle à la fréquence d'alimentation du stator.

Le fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents est beaucoup plus simple que celui du moteur à courant continu : le stator muni d'un enroulement polyphasé, triphasé dans la plus part des cas, est alimenté par un système de tensions et courants créant dans l'entrefer un champ d'induction tournante [28]

La MSAP à plusieurs avantages mais aussi elle a quelques inconvénients

II.5.1 AVANTAGES :

Avec l'avènement des matériaux à aimants permanents de haute énergie et les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les machines à aimants permanents (MSAP) ont connu ces dernières années un grand essor. Pour toutes ces applications, les machines à aimants permanents sont parfois préférables aux autres machines traditionnelles, telles que les machines à courant continu, les moteurs synchrones classiques et les moteurs asynchrones et en particulier pour les applications spécifiques [29]. quelques avantages des machines à aimants permanents, sont cités ci-dessous:

- L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes joules au niveau du rotor.

- Le couple volumique et la puissance massique importante permettent une meilleure compacité.
- L'absence des collecteurs et des balais simplifie la construction et l'entretien.

- La densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une très bonne performance dynamique.
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- Très bon rendement et un facteur de puissance élevé (proche de l'unité).
- Grande fiabilité.
- Fonctionnement à très haute vitesses

II.5.2 INCONVENIENTS :

- Coût élevé (à cause du prix des aimants).
- Problème de tenue en température des aimants
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.
- Impossibilité de régler l'excitation.
- Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes statoriques par effet Joule (fonctionnement moteur).
- La non-régulation de ce flux ne permet pas une souplesse de contrôle sur une très large plage de vitesse.
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- Pertes par courant de Foucault dans les aimants .

II.6 DOMAINE D'APPLICATION :

Il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges, et grâce au développement de l'électronique de puissance, l'association machine à aimants convertisseur de puissance a trouvé de nombreuses applications dans les domaines très divers tels que la robotique, la technologie de l'espace et dans d'autres applications plus particulières comme [29]comme :

- Les équipements domestiques (machine à laver le linge).
- Les automobiles.
- Les équipements de technologie de l'information (DVD drives).
- Les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements.
- Les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste).
- Les servomoteurs. * la production d'électricité.
- La propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins.

- Les machines-outils.

II.7 DESCRIPTION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANT PERMANENT : *

Les machines synchrones à aimants permanents se composent d'un stator comportant un bobinage qui est alimenté en triphasé et produit un champ magnétique tournant à la fréquence d'alimentation et d'un rotor où le champ magnétique est produit par des aimants permanents.1

La machine synchrone est constituée de deux parties, la partie mobile ou rotor constituant l'inducteur et une partie fixe ou stator portant les enroulements constituant l'induit, la mince zone entre les deux parties précédentes est appelée l'entrefer [30].

Le dispositif synchrone est une machine électrique dont les vitesses de rotation du rotor et du champ magnétique tournant du stator sont égales. Pour une telle opération, il faut créer un champ magnétique rotatif de deux manières différentes par aimant ou par circuit d'excitation. Ensuite, nous déterminons la position de ce champ pour le rotor, ce qui conduit à la synchronisation du champ magnétique du rotor fixe et du rotor. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques. [30][31]

- Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source, il est semblable au stator de toutes les machines électriques triphasées. Il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de. [8]
- Le rotor possède différentes configurations. La figure (I.1) montre trois cas typiques pour un rotor à quatre pôles. Une configuration du rotor à pôles saillants possédant des pièces polaires servant à la concentration du flux est montrée à la figure (I.1.a). Les aimants permanents sont magnétisés dans le sens radial.
- Une autre possibilité consiste à disposer les aimants permanents radialement (aimants noyés dans le rotor). Les aimants sont magnétisés tangentiellement comme le montre la figure (I.1.b).
- Enfin la figure (I.1.c) représente le cas où les aimants permanents sont distribués uniformément sur la surface cylindrique du rotor. L'aimantation des aimants est radiale.

II.8 MODELISATION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANT PERMANENT :

La modélisation des machines est essentielle aussi bien, pour le concepteur que pour l'automaticien. Elle est généralement utilisée pour l'analyse du comportement du système. Les machines à courant alternatifs sont en générale, modélisées par des équations non

linéaires (équation différentielles). Cette non linéarité est due aux inductances et coefficients des équations dynamiques qui dépendent de la position rotorique et du temps. Une transformation triphasé – biphasé nécessaire pour simplifier le modèle (réduire le nombre des équations)[31].

II.8.1 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES :

Le modèle de la machine synchrone à aimants est beaucoup plus complexe que celui des machines à courant continu, il nécessite l'utilisation des lois de commandes de plus en plus performantes, et par voie de conséquence leur commande se verra plus complexe, du fait que [32]:

- Les grandeurs sont alternatives, à fréquence fixe ou variable;
- Le système est non linéaire à coefficients variables et à entrées et sorties multiples

Le modèle établi au système lors de son fonctionnement, est basé sur des phénomènes physiques qui peuvent être partiellement ou totalement pris en compte. Le modèle sera plus simple pour un nombre d'hypothèses plus grand. Dans le cas de la MSAP, la modélisation est dépendante des hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'hystérésis, et l'effet de peau dans les parties magnétiques sont négligeables;
- Circuit magnétique est supposé non saturé;
- Harmoniques d'encoche et d'espaces ne sont pas prises en compte;
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices (F.m.m.) entrefer;
- Circuit magnétique est supposé parfaitement feuilleté.

II.8.2 MISE EN EQUATION DE LA MACHINE SYNCHRONE DANS LE REPERE (A-B-C) :

La structure du MSAP se comporte, comme une machine asynchrone. Le schéma de la MSAP peut être représenté par trois enroulements a, b et c au stator avec les aimants permanents au rotor. L'alimentation des enroulements statoriques donne naissance à une force magnétomotrice tournante à la vitesse angulaire ω_r ,

le rotor ou la roue polaire à aimants permanents dont le nombre de pôles est égal à celui du stator permet de produire la force magnétomotrice d'excitation, le schéma de la figure II.1 illustre la représentation de la MSAP.

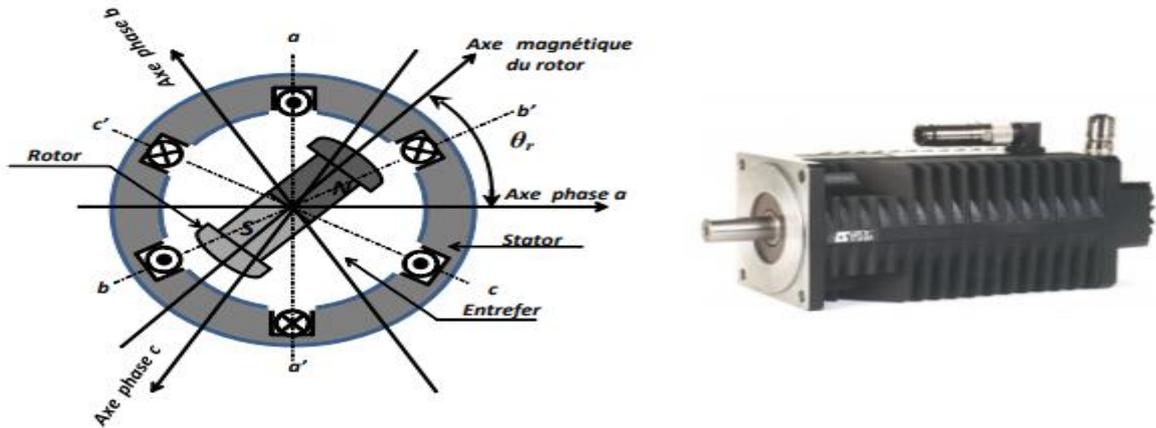


Figure II-7 Représentation de la machine synchrone à aimants permanents.

Les phases du stator et l'aimant permanent sont représentés par leurs axes. Les phases statoriques seront indiquées par a, b et c. Le flux du rotor sera désigné par f.

- L_{sa}, L_{sb} et L_{sc} : Les inductances propres respectivement des phases a, b, c;
- $M_{ab}, M_{ac}, M_{ba}, M_{ca}$ et M_{cb} : Les inductances mutuelles respectivement des phases a, b et c;
- L_{sf} : Inductance équivalente de l'aimant permanent;
- i_f : Courant équivalent de l'aimant permanent;
- l_{ls} : Inductance de fuite;
- L_{0s} : Terme constant de l'inductance propre d'une phase du stator;
- L_{2s} : Amplitude du premier harmonique de l'inductance propre d'une phase;
- R_s : Résistance d'une phase statorique;
- N_p : Nombre de paire de pôles;
- θ_m : Position mécanique réelle du rotor;
- $\Omega = \frac{d\theta_m}{dt}$: Vitesse angulaire mécanique réelle du rotor;
- θ_r : Position électrique du rotor $\theta_r = \theta_m N_p$;
- $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$: Vitesse angulaire électrique du rotor.

II.8.3 EQUATION DE FLUX :

Les flux totalisés $[\phi_s]$ des phases statoriques s'écrivent dans le repère lié au stator sous la forme matricielle suivante [32]:

$$[\phi_s] = [L_{ss}][i_s] + [\phi_{sf}] \quad \text{II.14}$$

Ou :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{SS} & M_s & M_s \\ M_s & L_{SS} & M_s \\ M_s & M_s & L_{SS} \end{bmatrix}, [\Phi_{sf}] = \Phi_{sf} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{II.15}$$

Avec L_{SS} et M_s représentent l'inductance propre et l'inductance mutuelle entre les enroulements statoriques.

II.8.4 EQUATIONS ELECTRIQUE :

Les équations électriques régissant le fonctionnement d'une machine synchrone dans un repère fixe lié au stator (a,b,c) s'écrivent sous la forme suivante :

$$[v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad \text{II.16}$$

Avec :

$$[v_s] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

- v_s : Vecteur des tensions statoriques;
- i_s : Vecteur des courants statoriques;
- Φ_s : Vecteur des flux statoriques;
- R_s : Matrice des résistances statoriques.

La substitution de l'équation (1.1) dans l'équation (1.2) donne :

$$[V_{abc}] = [R_s] \cdot [i_{abc}] + \frac{d}{dt} ([L][i_{abc}] + [\Phi_f]) \quad \text{II.17}$$

II.8.5 EQUATIONS MECANIQUE :

Si on néglige le frottement sec, le couple électromagnétique fourni est d'une part transmis à la charge et d'autre part sert à l'accélération du moteur et à la compensation du frottement visqueux[32].

Selon la loi de mouvement de Newton, l'équation fondamentale de la mécanique régissant un corps en mouvement est :

$$C_{em} - C_m - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{II.17}$$

- J : Moment d'inertie total de la machine.
- f : le coefficient de frottement visqueux;
- $f\Omega$:Le couple de frottement.
- C_m :Le couple moteur appliqué sur la génératrice.

II.8.6 TRANSFORMATION DE PARK :

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère.

Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor (Figure II.8-2)[29]

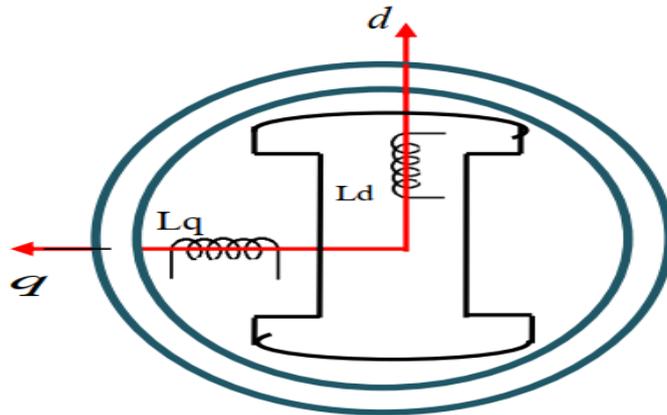


Figure II-8 Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park

Les deux bobines d et q, tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer de repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine

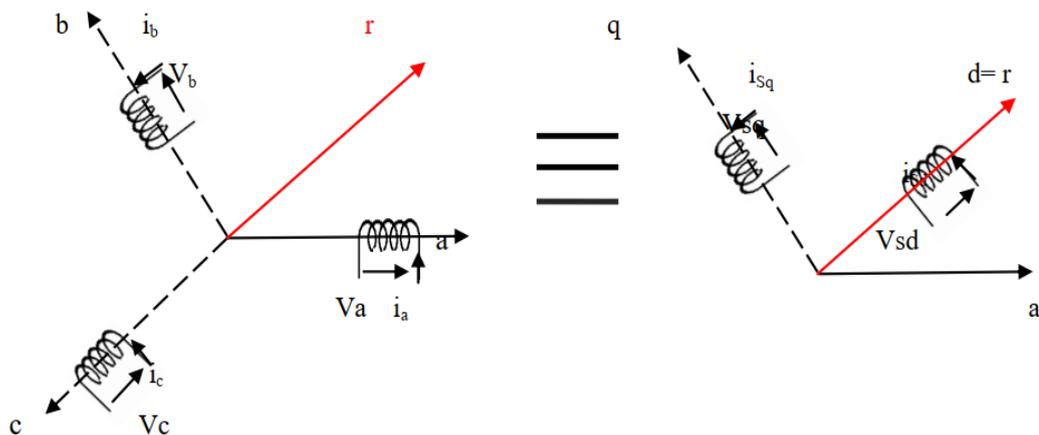


Figure II-9 Passage de repère naturel du stator au repère (d, q) de Park

A l'aide de transformation de Park on passe de grandeurs réelle (v_a, v_b, v_c) et (i_a, i_b, i_c) à leurs composantes (v_0, v_b, v_c) et (i_0, i_b, i_c)

La transformation de Park est définie comme suit :

$$[X_{dq0}] = [P] \cdot [X_{abc}] \quad \text{II.19}$$

Où X représente les grandeurs électriques (tensions, courants ou flux).

La matrice de transformation de Park s'exprime par :

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.20}$$

La transformation inverse de Park et donne par :

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.21}$$

II.8.7 MODELE DE LA MACHINE SYNCHROME DANS LE REPERE (D-Q) :

Le modèle de la machine synchrone le plus utilisé est basé sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park et qui permet d'obtenir un système équivalent formé de deux enroulements orthogonaux qui sont situés dans le même plan que les enroulements a, b et c. Avec cette transformation, nous pouvons passer d'une représentation dans le repère triphasé (a,b,c) à une représentation dans un repère cartésien d'axes (d, q) comme nous le montre la figure suivante :

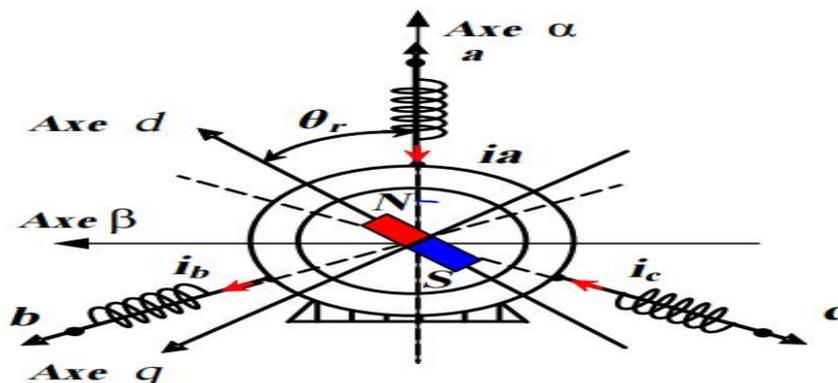


Figure II-10 Représentation du moteur synchrone à aimants dans le repère d-q et α - β

Pour exprimer l'ensemble des relations de la machine dans ce repère, nous allons appliquer la transformation orthogonale au stator et au rotor, en nous basant sur les hypothèses simplificatrices. La transformation de Park utilisée, conserve l'expression de la puissance instantanée, dans les deux repères[24]

II.8.7.1 Equations des flux :

les flux, $[\Phi_{dq}] = [P(\theta_r)][\Phi_{abc}]$, en multipliant l'équation (II.3) gauche et à droite par la matrice de Park $[P(\theta_r)]$.

nous obtenons:

$$\begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \end{bmatrix} = [P(\theta_r)] \begin{bmatrix} L_{sa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{sb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{bc} & L_{sc} \end{bmatrix} ([P(\theta_r)]^{-1}) \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} [P(\theta_r)] i_f \begin{bmatrix} L_{af} \\ L_{bf} \\ L_{cf} \end{bmatrix} = [P(\theta_r)] \quad II.22$$

Les flux totalisés dans chaque phase s'expriment comme suit : $\Phi_q = i_q L_q$

$$\begin{cases} \Phi_d = i_d L_d + K_e \\ \Phi_q = i_q L_q \end{cases} \quad II.23$$

Avec $K_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\Phi}_{fd}$

Où L_d, L_q sont respectivement les inductances directe et en quadrature.

Elles sont supposées indépendantes de la position θ_r , $\dot{\Phi}_{fd}$ valeur crête du flux généré par les aimants lorsque son axe longitudinal est aligné avec celui de l'un des enroulements statoriques (déterminé dans l'annexe).

II.8.7.2 Équations électrique :

à l'aide de l'équation (II.15), on peut déduire les équations de Park sous une forme vectorielle comme suit:

$$[v_{dq}] = [R_s][i_{dq}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{dq}] + P\omega_n[\Phi'_{dq}] \quad II.24$$

Tel que :

$$[V_{dq}] = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}, [i_{dq}] = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \text{ et } [\Phi_{dq}] = \begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \end{bmatrix}, [\Phi'_{dq}] = \begin{bmatrix} \Phi_d \\ -\Phi_q \end{bmatrix}, [R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix}$$

Après simplifications on aura :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \cdot \left(\frac{di_d}{dt}\right) - \omega_r L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \cdot \left(\frac{di_q}{dt}\right) + \omega_r L_q i_q + K_e \omega_r \end{cases} \quad II.25$$

II.8.7.3 Expression de la puissance et du couple électromagnétique :

Pour définir la nouvelle expression du couple dans le nouveau référentiel, nous effectuons le bilan énergétique du MSAP. La puissance fournie à la machine est donnée par l'expression suivante :

$$[v_d i_d + v_q i_q] = [R_s i_d^2 + R_s i_q^2] + \left[\frac{1}{2} L_d \left(\frac{d}{dt} i_d^2 \right) + \frac{1}{2} L_q \left(\frac{d}{dt} i_q^2 \right) \right] + [\omega_r \Phi_d i_q - \omega_r \Phi_q i_d]$$

$$P_{fm} = P_{js} + P_{ms} + P_{tr} \quad \text{II.26}$$

Où :

$$P_{fm} = v_d i_d + v_q i_q \quad \text{II.27}$$

Cela signifie que la quantité d'énergie consommée par la machine est convertie en énergie magnétique et mécanique. Le terme P_{js} représente la puissance perdue par effet joule au stator.

L'énergie magnétique emmagasinée par les inductances du stator est définie par le terme P_{ms} et le terme P_{tr} représente la puissance transmise au système mécanique du moteur.

Où :

$$P_{js} = (R_s i_d^2 + R_s i_q^2) \quad \text{II.28}$$

$$P_{ms} = \left[\frac{1}{2} L_d \left(\frac{d}{dt} i_d^2 \right) + \frac{1}{2} L_q \left(\frac{d}{dt} i_q^2 \right) \right] \quad \text{II.29}$$

$$P_{tr} = [\omega_r \Phi_d i_q - \omega_r \Phi_q i_d] = \omega_r (K_e i_q + (L_d - L_q) i_q i_d) \quad \text{II.30}$$

D'après l'équation précédente, le couple électromagnétique se décompose en deux termes :

$$C_{emp} = K_t i_q \quad \text{II.31}$$

$$C_{emr} = N_p (L_d - L_q) i_q i_d \quad \text{II.32}$$

où : $K_t = N_p K_e$ représente la constante de couple, C_{emp} représente le couple principal créé par l'aimant et C_{emr} est dû à l'anisotropie rotorique et représente le couple réactif dû à la saillance du MSAP. Dans le cas d'une machine à pôles lisses, le dernier terme est nul.

II.8.7.4 Equations mécaniques :

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

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{II.33}$$

Avec :

- C_m : Le couple moteur appliqué sur la génératrice
- $f\Omega$: Le couple de frottement.
- J : Moment d'inertie total de la machine.
- f : Coefficient de frottement visqueux.

II.8.7.5 Mise sous forme d'équation d'état :

Le modèle général d'entrée-sortie de la machine synchrone à aimants permanent, est lié au choix du vecteur d'état. Dans le cas des équations électriques du MSAP, dans le repère lié au rotor, les composantes du vecteur d'entrée de la machine sont les tensions v_d et v_q et les courants i_q et i_d statoriques sont les composantes du vecteur de sortie. Notre objectif dans ce qui suit est de mettre les équations sous la forme d'équation d'état suivante :

$$\frac{dX}{dt} = [A]X + [B][U] \quad \text{II.34}$$

$$Y = [C]X \quad \text{II.35}$$

Où X représente le vecteur d'état du système, Y le vecteur de sortie (les grandeurs mesurables), $[A]$ la matrice d'évolution, $[B]$ la matrice de commande, $[C]$ la matrice de sortie, et $[U]$ représente le vecteur de commande. Après simplification, les équations électriques de la MSAP peuvent être modélisées par une représentation d'état sous la forme suivante:

$$\frac{d}{dt} [i_{dq}] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_d} & \omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_r \frac{L_d}{L_q} & \frac{1}{\tau_q} \end{bmatrix} [i_{dq}] + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} [v_{dq}] + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_r K_e \end{pmatrix} \quad \text{II.36}$$

Où $\tau_d = \frac{L_d}{R_s}$ et $\tau_q = \frac{L_q}{R_s}$ sont respectivement les constantes de temps d'axe direct et en quadrature.

En appliquant le théorème du moment cinétique appliqué au rotor, nous en déduisons la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique dans les machines synchrones à aimants. Avec J le moment d'inertie des parties tournantes de l'ensemble machine-charge de celui-ci, il vient:

$$\begin{cases} \frac{J}{N_p} \left(\frac{d}{dt} \omega_r \right) + \frac{f}{N_p} \omega_r = C_{em} - C_r \\ \left(\frac{d}{dt} \omega_r \right) = \frac{N_p^2}{J} \{ K_t i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} - \frac{N_p}{J} C_r - \frac{f}{J} \omega_r \end{cases} \quad \text{II.37}$$

CHAPITRE II : La modélisation de la chqine globale

La régulation de la vitesse de rotation de la MSAP, du couple ou de position s'effectue par le vecteur d'état qui peut être constitué de quatre variables d'état. Pour une régulation du couple et de vitesse angulaire, le modèle non linéaire d'état dans le repère tournant $d - q$ est décrit par le système ci-dessous:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_d} & \frac{L_q}{L_d} \omega_r & 0 & 0 \\ -\frac{L_d}{L_q} \omega_r & -\frac{1}{\tau_d} & -\frac{K_e}{L_q} & 0 \\ N_p^2 \frac{L_d - L_q}{J} i_q & N_p \frac{K_t}{J} & -\frac{f}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{N_p}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ C_r \end{bmatrix} \quad \text{II.38}$$

Le couple résistant est considéré généralement comme une perturbation externe sur le système à compenser par le régulateur de vitesse.

Il s'agit d'un système différentiel non linéaire à cause des termes $i_d \omega_r, i_q \omega_r, i_d i_q$ et C_r qu'on peut intégrer numériquement pour déterminer les caractéristiques dans les régimes transitoires [Luu-00]. A partir du modèle dans les axes d, q de Park liés au rotor, nous pouvons définir le fonctionnement de la machine synchrone à aimants dans un régime quelconque.

II.9 MODELISATION DES CONVERTISSEURS :

Pour réaliser la régulation de la vitesse ou de la position des MSAP, il est indispensable d'utiliser un onduleur de tension qui est constitué d'une source de tension continue constante et de six interrupteurs de puissance avec des diodes en antiparallèle. Grâce à une séquence d'ouverture et de fermeture de ces interrupteurs, l'onduleur de puissance commute le courant dans les phases de la machine afin d'obtenir un système triphasé de tensions et de courants d'amplitude et de fréquence réglables.

II.9.1 MODELE D'ONDULEUR MLI :

L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commande et les grandeurs électriques de la partie alternative et continue de l'onduleur. Dans cette étude on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension qui est modélisé par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. Le schéma de cet onduleur est donné dans la Figure 11.

Sachant que dans un régime équilibré $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$, nous pouvons écrire [33] :

$$\begin{cases} v_{an} = v_{ao} + v_{on} \\ v_{bn} = v_{bo} + v_{on} \\ v_{cn} = v_{co} + v_{on} \end{cases} \quad \text{II.39}$$

En faisant la somme des équations du système, on obtient :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{on} \quad \text{II.40}$$

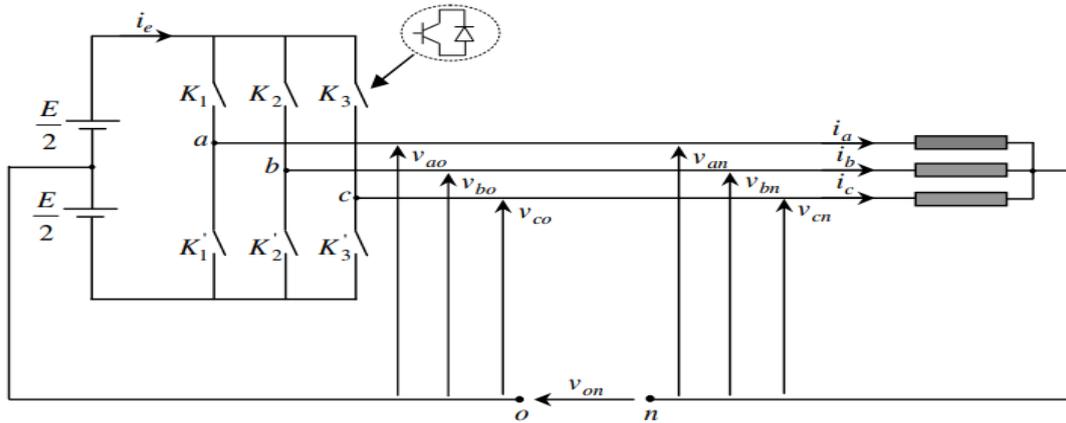


Figure II-11: Schéma de l'onduleur de tension

$$D'o\grave{u} : v_{ao} + v_{bo} + v_{co} = -3v_{on} \quad \text{II.41}$$

$$\text{Donc : } v_{on} = -\frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad \text{II.42}$$

En substituant l'équation (1.26) dans le système (1.23), il vient alors :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad \text{II.43}$$

Les deux interrupteurs de chaque branche de l'onduleur sont commandés de manière complémentaire, en appliquant une modulation de largeur d'impulsion. A partir du schéma de l'onduleur, les tensions fournies par les demi-ponts sont:

$$v_i - v_0 = \begin{cases} +\frac{E}{2} & \text{si } K_i: \text{ fermé} \\ -\frac{E}{2} & \text{si } K'_i: \text{ fermé} \end{cases} \quad \text{Avec } i = a, b, c \quad \text{II.44}$$

Les tensions aux bornes de la machine sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{II.45}$$

Avec S_i est l'état de l'interrupteur K_i , supposé parfait, tel que pour le $i^{\text{ème}}$ bras de l'onduleur ($i = a, b, c$) :

- $S_i = 1$ Si l'interrupteur en haut est fermé et l'interrupteur en bas est ouvert ;

- $S_i = 0$ Si l'interrupteur en haut est fermé et l'interrupteur en bas est ouvert ;

II.9.2 LA COMMANDE MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION (MLI) SINUS-TRIANGLE :

Le bloc de commande du convertisseur reçoit les tensions de référence pour les trois phases. Ces tensions sont comparées avec un signal triangulaire et, en fonction du signal d'erreur, on commande les semiconducteurs de l'onduleur. Le mode de fonctionnement est très simple :

- Si $v_{ref} > v_p$: l'interrupteur supérieur du bras de pont conduit ;
- Si $v_{ref} < v_p$: l'interrupteur inférieur du bras de pont conduit ;

où v_{ref} représente une des trois tensions de référence et v_p représente le signal triangulaire ou l'onde porteuse. Ce type de commande est appelé commande par modulation de largeur d'impulsion où commande MLI (PWM en anglais). La Figure 1.6 illustre le principe de base de cette technique.

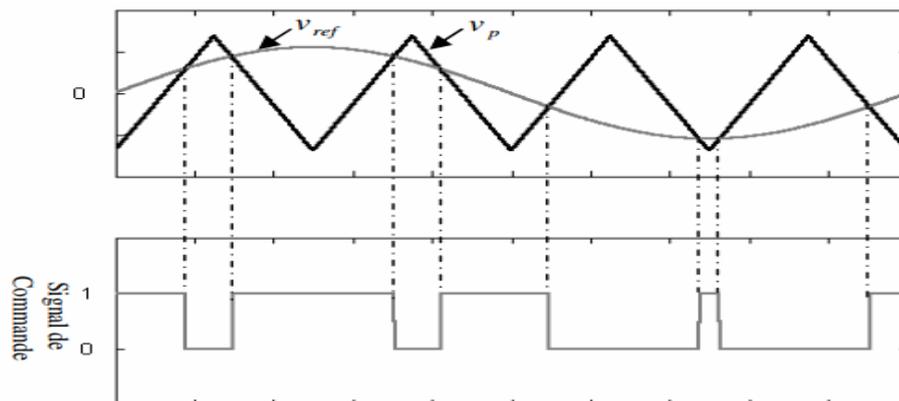


Figure II-12 Le principe de base de la commande par MLI.

II.9.2.1 Caractéristiques de la MLI sinus-triangle :

Si la tension de référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande : l'indice de modulation m et le taux de modulation r . [33]

- **Indice de modulation**

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad \text{II.46}$$

Où f_r est la fréquence de la tension de référence et f_p est celle de la porteuse.

- **Indice de modulation**

$$r_m = \frac{V_r}{V_p} \quad \text{II.47}$$

Où V_r est l'amplitude de la tension de référence et V_p est celle de la porteuse.

- **Equation de la porteuse**

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par sa fréquence f_p et sa valeur de crête V_p . On définit l'équation de la porteuse dans sa période $[0, T_p]$ par :

$$\begin{cases} v_p = V_p \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[0, \frac{T_p}{2} \right] \\ v_p = V_p \left(3 - 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p \right] \end{cases} \quad \text{II.48}$$

- **Equations des tensions de référence**

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude V_r et de fréquence f_r . En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par :

$$\begin{cases} v_{ref_a} = V_r \sin(2\pi f_r t) \\ v_{ref_b} = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{ref_c} = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{II.49}$$

- **Equations des états des interrupteurs**

La commande MLI sinus triangle utilise la comparaison avec les trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états S_a, S_b et S_c des interrupteurs de l'onduleur. Ceux-ci sont donnés par l'équation 1.35 suivante :

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_{ref_i} - v_p) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (v_{ref_i} - v_p) < 0 \end{cases} \quad \text{avec } i = a, b, c \quad \text{II.50}$$

II.9.3 MODELE DU REDRESSEUR MLI :

Avant 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.

II.9.3.1 Principe de fonctionnement

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseur 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 commutes, 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 est capturée puis comparée avec une référence, le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter lessix interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture.

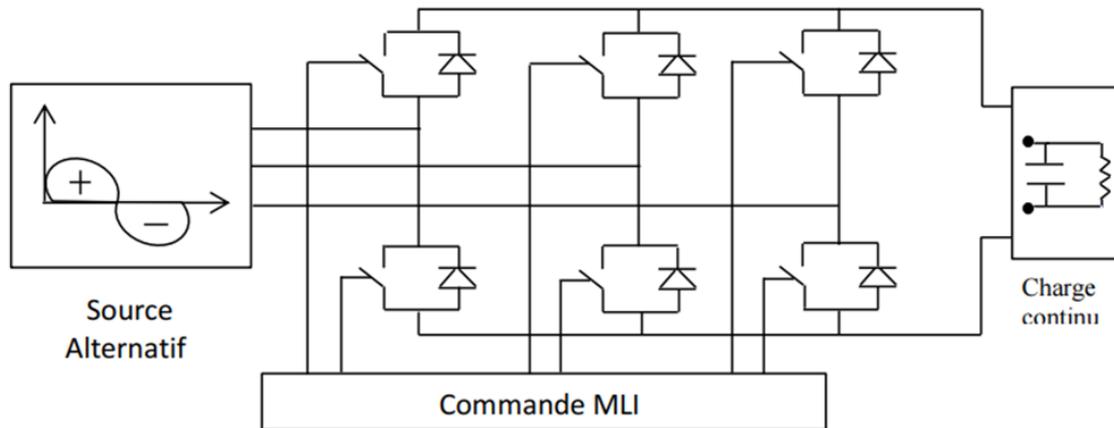


Figure II-13 Schéma de principe du redresseur MLI.

II.9.3.2 Modélisation du redresseur triphasé à MLI :

On peut faciliter la modélisation en appliquant les hypothèses suivantes : [33]

- Sources parfaites : la tension est constante et ne varie pas avec la puissance échangée
- Interrupteurs parfaites : la commutation des interrupteurs est instantanée la résistance nulle à l'état passant et infinie à l'état bloqué.

On peut faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation en modélisant le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux, ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante :

$$S_i = \begin{cases} +1, \bar{S}_i \\ -1, \bar{s}_i \end{cases} \quad \text{pour } i = a, b, c \quad \text{II.51}$$

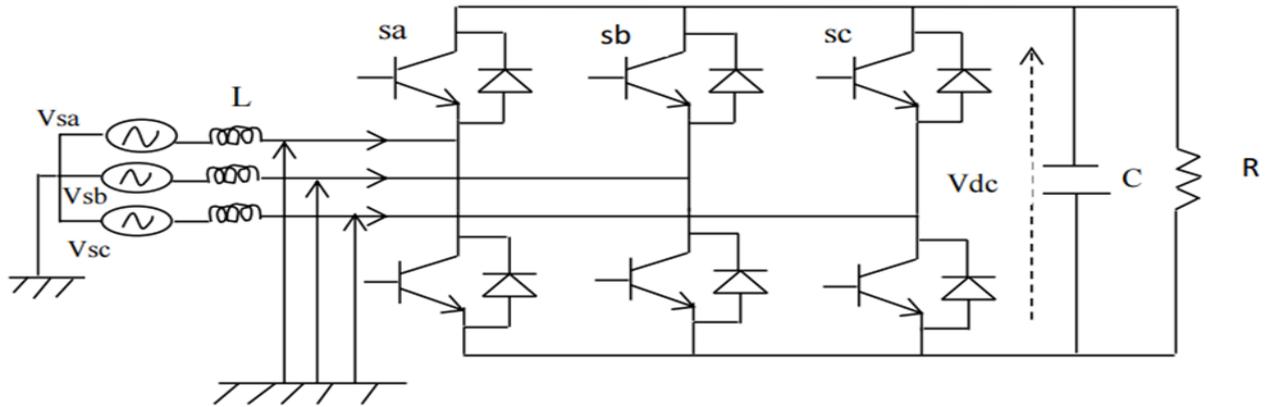


Figure II-14 Structure du redresseur triphasé.

Les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de S_i, V_{dc} et les courants d'entrée i_a, i_b, i_c .

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad \text{II.51}$$

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

$$\begin{cases} V_{sab} = (s_a - s_b)V_{dc} \\ V_{sbc} = (s_b - s_c)V_{dc} \\ V_{sca} = (s_c - s_a)V_{dc} \end{cases} \quad \text{II.52}$$

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

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{II.53}$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{sa} = \frac{2s_a - s_b - s_c}{3} V_{dc} \\ V_{sb} = \frac{2s_b - s_a - s_c}{3} V_{dc} \\ V_{sc} = \frac{2s_c - s_a - s_b}{3} V_{dc} \end{cases} \quad \text{II.54}$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage entre côtés alternatif et continu par:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_a s_a + i_b s_b + i_c s_c - i_1 \quad \text{II.55}$$

i_1 : Le courant de charge du redresseur.

II.9.3.3 Modèle du redresseur MLI dans le repère d, q :

$$\begin{aligned}
 e_d &= R i_d + L \frac{d i_d}{d t} - \omega . L . i_q + V_{s d} \\
 e_q &= R i_q + L \frac{d i_q}{d t} - \omega . L . i_d + V_{s q} \\
 C \frac{d v_{d c}}{d t} &= s_d i_d + s_q i_q - i_1 \quad \text{II.52}
 \end{aligned}$$

Avec :

$$S_d = \frac{1}{\sqrt{6}}(2 . s_a - s_b - s_c) . \cos(\omega_r t) + \frac{1}{\sqrt{2}}(s_b - s_c) . \sin(\omega_r t) \quad \text{II.53}$$

$$S_q = \frac{1}{\sqrt{2}}(s_b - s_c) . \cos(\omega_r t) - \frac{1}{\sqrt{6}}(2 . s_a - s_b - s_c) . \sin(\omega_r t) \quad \text{II.54}$$

II.10 CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons donné le modèle de la turbine éolienne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz)

Dans ce chapitre, on a présenté une brève d'étude la machine synchrone à aimant permanent. Pour ce dernier on a trouvé sa structure, son principe de fonctionnement etsa description ainsi que ses domaines d'application. On a aussi présenté le modèle de la machinedans le repère (a,b,c) auquel on a appliqué la transformation de Park pour le rendre linéaire et plus adapté à la commande. Ensuite, on a modélisé le système d'alimentation qui comporte l'onduleur, on a appliqué la technique de la MLI à hystérésis pour le commander. La modélisation de la GSAP et de son système d'alimentation a pour but de faciliter la mise en œuvre de la commande. La commande vectorielle sera le sujet du chapitre suivant.

Chapitre III COMMANDE DE LA CHAÎNE DE CONVERSION ÉOLIENNE

III.1 INTRODUCTION:

Actuellement, les génératrices les plus utilisées dans la production d'énergie éolienne sont basées sur la génératrice synchrone à aimant permanent, la génératrice synchrone à aimant permanent présente des avantages qui sont entre autre - l'absence de circuit d'excitation ; - l'absence de multiplicateur de vitesse ; - faible entretien.

Le système étudié qui est présenté par la figure III.1 comprend :

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne au moyen d'un arbre et d'un réducteur. Le générateur convertit cette énergie mécanique en énergie électrique. Ensuite, le convertisseur PWM côté générateur convertit cette énergie AC en courant continu, puis le convertisseur côté réseau convertit ce courant continu en courant alternatif et l'envoie au réseau. Un convertisseur statique du côté de la génératrice jouant le rôle de redresseur (CCM); un convertisseur statique du côté réseau jouant le rôle d'onduleur (CCR) et le réseau dans lequel est injectée l'énergie produite

Dans ce chapitre on a proposé la simulation comportementale d'un système de production des énergies électrique basé sur une machine synchrone à aimant permanent connecté au réseau. Les résultats des différentes simulations réalisées sous environnement Matlab/Simulink, ont permis d'évaluer les performances du système proposé

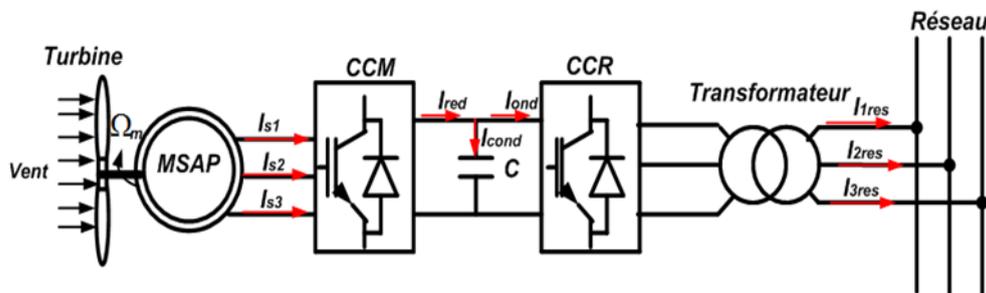


Figure III-1 Système de production d'énergie

III.2 COMMANDE DE CONVERTISSEUR COTE GENERATEUR :

Dans les systèmes éoliens à vitesse variable basés sur GSAP, trois variables de système doivent être strictement contrôlées :

- La puissance optimale extraite à chaque instant (convertisseur côté générateur).
- La tension du bus DC (convertisseur côté réseau).
- La puissance active et réactive injectée au réseau électrique (convertisseur côté réseau).

Le convertisseur côté générateur, commande la vitesse de rotation du générateur pour produire la puissance maximale de sortie par l'intermédiaire du contrôle du couple électromagnétique. La logique de commande proposée du convertisseur côté générateur est

représentée sur la Figure.III.2. La technique MPPT produit une vitesse de référence puis, une boucle de vitesse génère la composante de courant d'axe q pour commander le couple et la vitesse de la génératrice à différentes vitesses de vent via une estimation de la valeur de référence (I_{d-ref}, I_{q-ref}) comme le montre la Figure III.1.

Le contrôle de convertisseur côté générateur se compose en deux stratégies connexes:

- L'algorithme utilise un contrôleur MPPT pour générer une référence de vitesse optimale à chaque instant.
- La boucle de commande de vitesse sur la base de régulateur PI pour fournir un couple électromagnétique de référence pour la commande FOC de générateur.

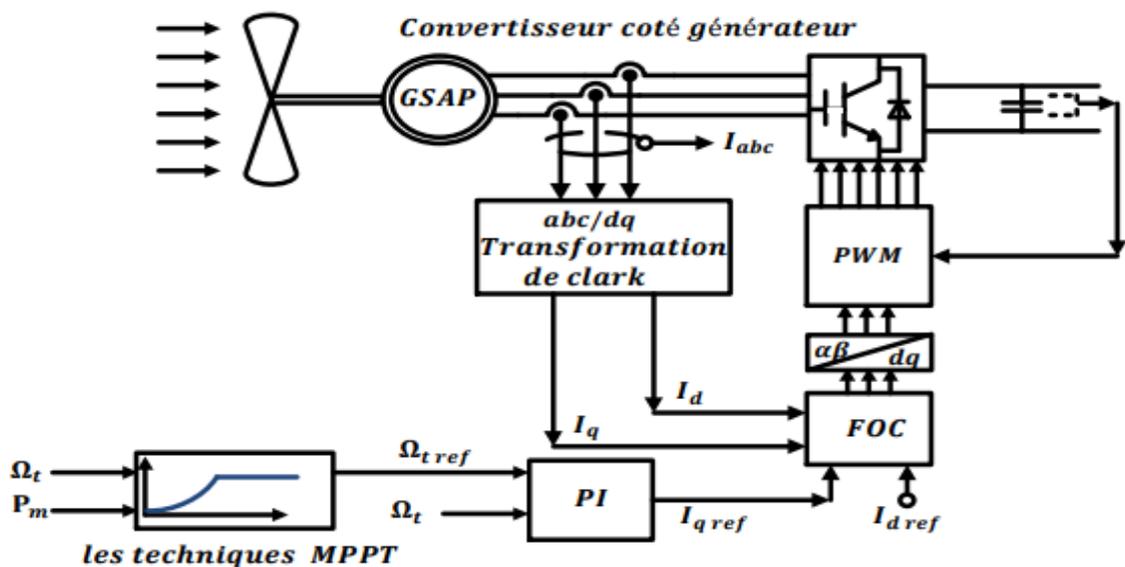


Figure III-2 Commande de convertisseur côté générateur.

III.2.1 CONTROLE DE MPPT :

Le MPPT est une méthode de contrôle qui régule la vitesse du rotor de l'éolienne en contrôlant le couple du générateur. L'entraînement du pas de la pale est un équipement mécanique qui a un retard dans le temps de réponse dans des conditions de vent changeant rapidement. Cependant, afin de maximiser la production d'énergie, la vitesse du rotor du générateur peut être contrôlée électriquement. Cela se fait généralement en adaptant la vitesse du rotor au rapport optimal de la vitesse de pointe

III.2.2 DESCRIPTION DU SYSTEME GLOBAL:

La structure de la commande est constituée de l'association d'une machine synchrones à aimant permanent dans le repère (d, q). La référence du courant direct I_{d-ref} est fixé à zéro et la sortie du régulateur de la tension du bus continu constitue la consigne du couple.

Le couple dépend seulement du courant I_q . Alors, on peut contrôler le couple uniquement par la composante I_d . Le courant de référence I_{q-ref} est obtenue dont le couple

de référence est issu de la régulation de la tension du bus continu. Les références des courant direct I_{d_ref} et I_{q_ref} sont comparées séparément aux courant réelle de la machine i_d et i_q les erreurs des courants sont appliquées à l'entrée des régulateurs classiques de type PI.

Un bloc de découplage génère les tensions de références V_d^* et V_q^* . Le système est muni d'une boucle de régulation de tension, qui permet de générer la référence de courant I_{q_ref} . Par contre, le courant I_{d_ref} est nul dans ce cas. Les sorties du bloc de découplage et V_d^* passent par une transformation biphasée vers triphasé ce qui nous donne les trois tensions de référence V_a^* , V_b^* et V_c^* de la commande MLI, et qui doivent être comparés avec porteuse triangulaire alternative pour générer les signaux logiques destinés à attaquer les semi-conducteurs du redresseur.

Le rôle du convertisseur MLI est de maintenir la tension du bus continu constante et le contrôle de la puissance réactive échangée avec le réseau, par le contrôle des courants $(I_{(abc)r})$ injectés au réseau via le filtre (R_f, L_f) .

Un contrôle des courants dans le repère de PARK a été réalisé en utilisant un repère synchronisé avec les tensions du réseau, cette fonction est assurée par une boucle de verrouillage de phase (Phase-Locked Loop, PLL), de plus la boucle PLL fixe la fréquence des courants injectés à la fréquence du réseau ($f_r = 50\text{Hz}$).

III.3 CONTROLE DE LA CONNEXION AU RESEAU :

L'ensemble de production d'énergie est connecté au réseau triphasé via un convertisseur MLI et un transformateur, entre les quels s'insère un filtre triphasé. Le rôle du convertisseur MLI est de maintenir la tension du bus continu constante quel que soit l'amplitude et le sens de la puissance. Le flux de la puissance du convertisseur côté réseau est contrôlé afin de maintenir la liaison de bus continu à une valeur de référence. Étant donné que l'augmentation de la puissance de sortie plutôt que de la puissance d'entrée au condensateur de circuit intermédiaire (puissance extraite) provoque une diminution de la tension de liaison - et vice versa. La puissance de sortie sera réglée à maintenir la tension de liaison - à peu près constante, la puissance réactive injectée dans le réseau a été contrôlée à la valeur zéro (facteur unitaire).

Généralement, la commande de la puissance active et réactive côté réseau est réalisée par la commande de courant direct et quadrature de réseau. Dans cette méthode, deux boucles de commande sont utilisées. Une boucle externe de régulation de tension - est utilisée pour définir la référence de courant d'axe d pour le contrôle de la puissance active. Une boucle de régulation interne est utilisée pour commander le courant direct et quadrature de réseau afin de générer des tensions de référence au convertisseur à MLI.

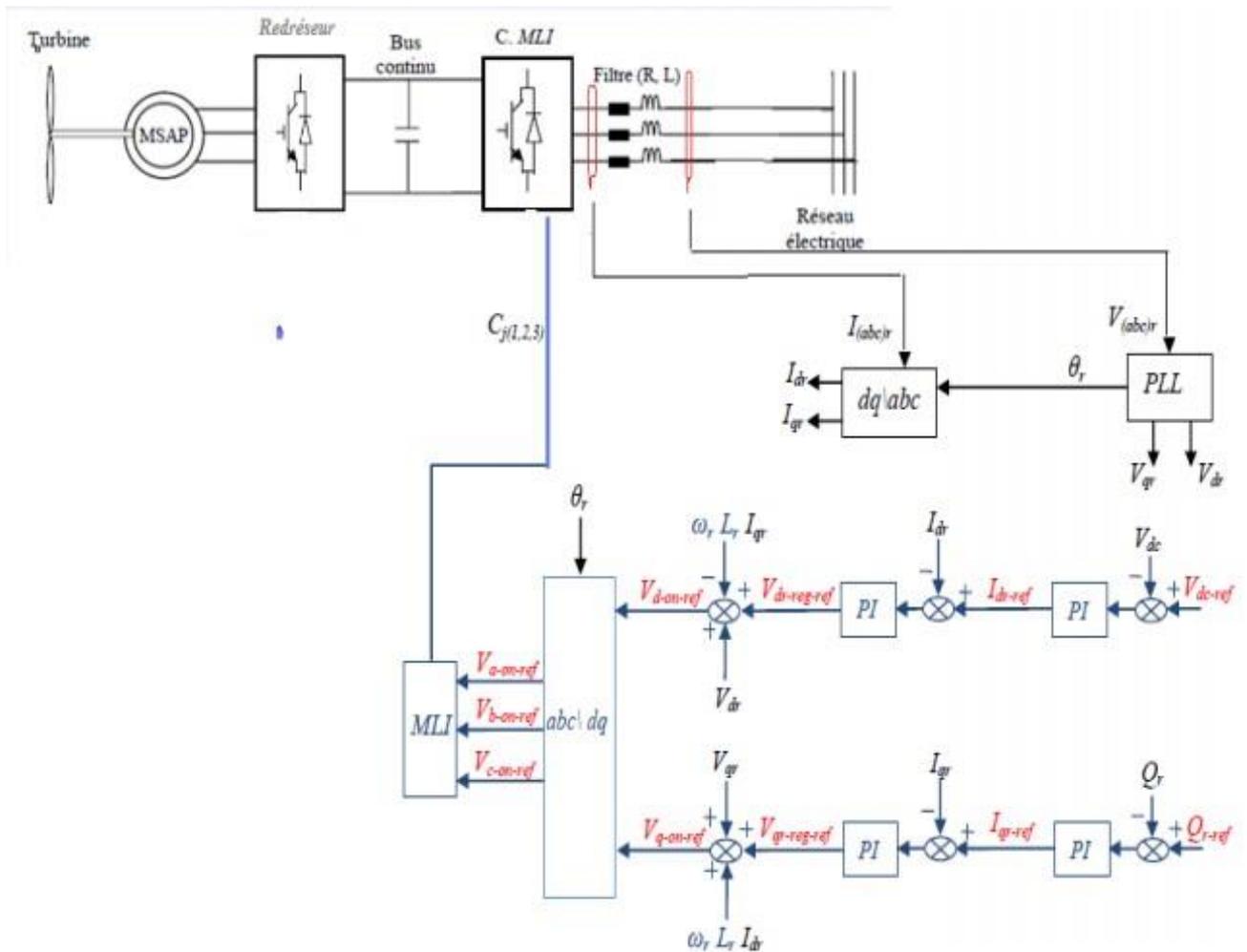


Figure III-3 Contrôle de la connexion au réseau

III.4 Objectif de commande :

Les objectifs de la commande de convertisseur côté réseau sont :

- La qualité de la puissance électrique injectée au réseau.
- La protection de réseau électrique.
- Le rendement énergétique.
- La robustesse des algorithmes de commande conçus.

III.5 STRATÉGIES DE CONTRÔLE DU SYSTÈME DE PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE :

Les stratégies de commande proposées comprennent: - le contrôle des puissances active et réactive ; - et le contrôle de la tension du bus continu.

Des stratégies semblables ont été utilisées dans pour piloter une machine synchrone a aimant permanent

III.5.1 REFERENCES DES PUISSANCES INJECTEES AU RESEAU :

La stratégie de contrôle des puissance active et réactive est présente par la figure III.4. La puissance active de référence est estimée par $C_p \max$

ou η est le rendement de la conversion mécanique.

$$P_{ref} = \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot C_{p \max} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad \text{III.1}$$

La puissance réactive de référence est choisie selon les trois critères suivants :

- Le système fournit au réseau la puissance réactive ($+Q_{ref}$)
- Le système absorbe la puissance réactive venant au réseau ($-Q_{ref}$)
- Le système fonctionne a facteur de puissance unitaire ($Q=0$)

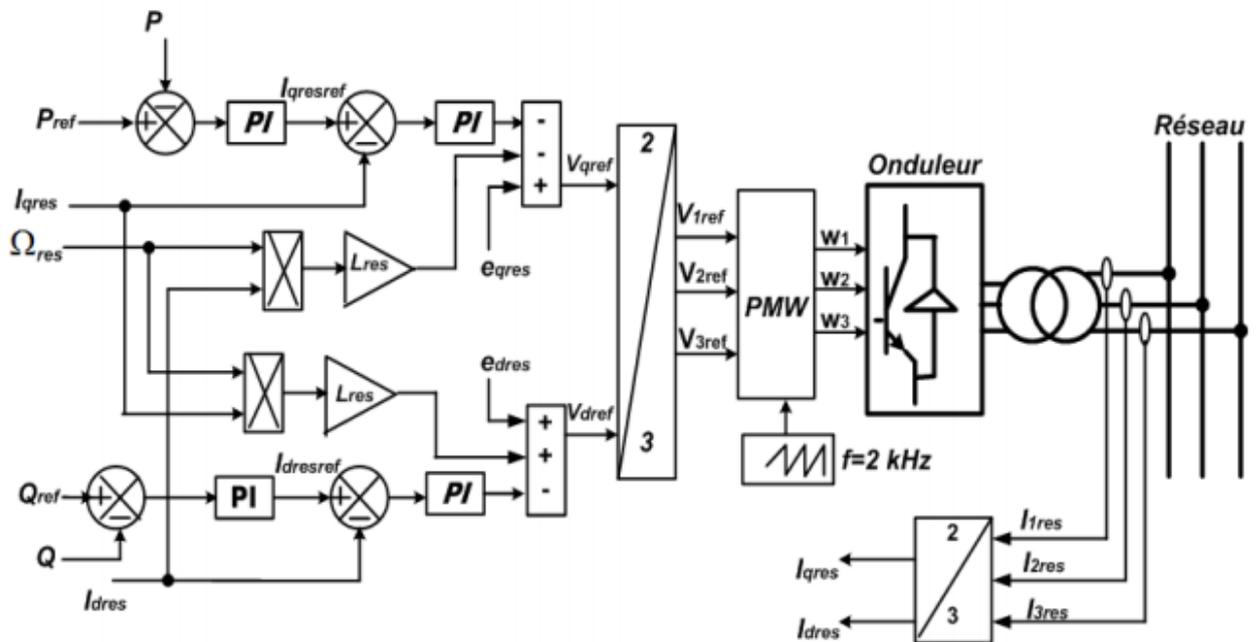


Figure III-4 Stratégie de contrôle des puissances active et réactive injectées dans le réseau.

III.5.2 CONTROLE DE LA TENSION DU BUS CONTINU

La stratégie de contrôle de la tension du bus continu est illustrée sur la Figure 5. En supposant que la tension sur l'axe d nulle ($V_d = 0$), la puissance réactive dépend du courant sur l'axe d ($Q_{ref} = V_q \cdot I_{d_ref}$). Pour obtenir un facteur de puissance unitaire, le courant Idref est choisi égal à zéro. Les paramètres du correcteur PI utilisé pour le contrôle de la tension du bus continu peuvent être estimés en utilisant les expressions présentées

$$K_{pdc} = 2 \cdot \varepsilon \cdot \omega_n \cdot C \quad \text{III.2}$$

$$K_{idc} = \omega_n^2 \cdot C \quad \text{III.3}$$

Avec :

$$\omega_n = \frac{5.8}{t_{sdc}}$$

III.4

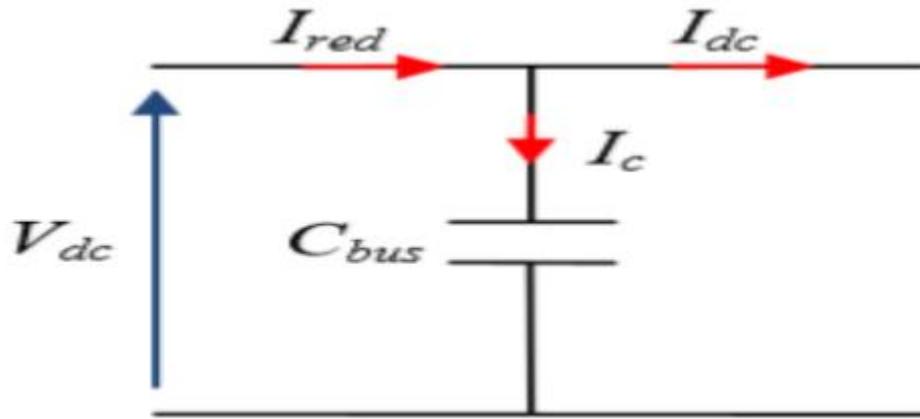


Figure III-5 Schéma électrique du bus continu.

$$\begin{cases} I_{dc} = I_{red} - I_c \\ I_c = C_{bus} \frac{dV_{dc}}{dt} \end{cases}$$

III.5

En utilisant les deux expressions, on définit la boucle de régulation de la tension continue en fonction du courant, comme le montre la figure III.6.

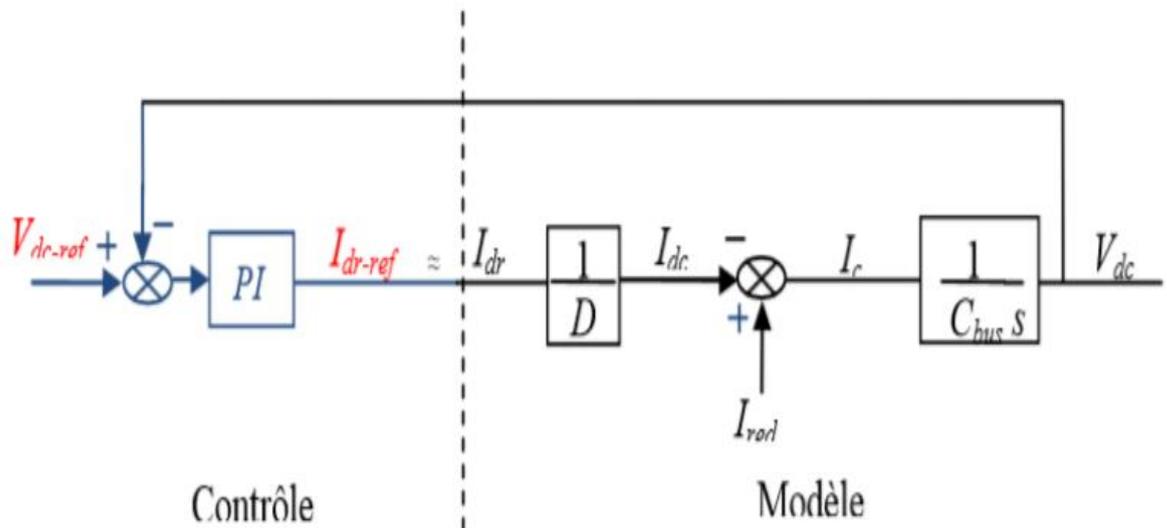


Figure III-6 Principe de la régulation de la tension du bus continu

ω_n : Constante du temps de la boucle de tension du bus continu.

ε : Coefficient d'amortissement.

C : Capacité du bus continu.:

III.6 REFERENCES DES COURANTS INJECTES AU RESEAU :

L'expression des puissances active et réactive échangées avec le réseau électrique est donnée par la relation (III.9), les deux puissances sont en fonction des courants I_{sd} et I_{sq} :

$$\begin{cases} P_r = \frac{3}{2}(V_{dr}I_{dr} + V_{qr}I_{qr}) \\ Q_r = \frac{3}{2}(V_{dr}I_{qr} - V_{qr}I_{dr}) \end{cases} \quad \text{III.6}$$

orientation du repère (d_q). Est assurée par la boucle de verrouillage de phase (PLL) rendant ainsi la composante quadrature de la tension du réseau V_{qr} égale à zéro, devient :

$$\begin{cases} P_r = \frac{3}{2}(V_{dr}I_{dr}) \\ Q_r = \frac{3}{2}(V_{dr}I_{qr}) \end{cases} \quad \text{III.7}$$

la puissance active peut être contrôlée uniquement par le courant I_{dr} et la puissance réactive uniquement par le courant I_{qr} . l'un des objectifs de la commande est d'assurer le contrôle de la tension du bus continu V_{dc} .

Pour cela on peut utiliser la relation entre la puissance transmise par le bus continu et la puissance active transférée au réseau électrique, cette relation est présente par l'équation (III.12). On peut noter que le contrôle de tension est réalisé en agissant sur la puissance active que l'onduleur échange avec le réseau.

III.6.1 REFERENCE DE LA COMPOSANTE :

Si on néglige onduleur, le bilan des puissances peut s'exprimer par la relation :

$$V_{dc}I_{dc} = \frac{3}{2}(V_{dr}I_{dr}) \quad \text{III.8}$$

Donc :

$$I_{dr} = \frac{2V_{dc}}{3V_{dr}}I_{dc} \quad \text{III.9}$$

On pose :

La figure (III.5) présente le modèle électrique du bus continu. La relation entre les courants et la tension du bus est donnée par l'équation.

$$\begin{cases} I_{dc} = I_{red} - I_c \\ I_c = C_{bus} \frac{dV_{dc}}{dt} \end{cases} \quad \text{III.10}$$

En utilisant les deux expressions, on définit la boucle de régulation de la tension continue en fonction du courant, comme le montre la figure III.18.

Les valeurs de K_{p-idqr} et K_{i-idqr} de des régulateurs de courants injectés au réseau sont obtenues d'après la synthèse de régulateur PI on remplace les valeurs de (a, b).

Les expressions des paramètres K_{p-dc} et K_{i-dc} du régulateur Proportionnel Intégral (PI) sont obtenues d'après la synthèse de régulateur PI on remplace les valeurs de (a=0, b= $D.C_{bus}$) alors il donne l'équation (III.15).

$$\begin{cases} K_{i-dc} = DC_{bus}\omega_{n-dc}^2 \\ K_{p-dc} = 2.\xi DC_{bus}\omega_{n-dc} \end{cases} \quad \text{III.11}$$

Avec :

$$\omega_{n-dc} = \frac{1}{\tau_{n-dc}} \quad \text{III.12}$$

τ_{n-dc} : Constate du temps de la boucle de tension du bus continu.

ξ : Coefficient d'amortissement.

C_{bus} : Capacité du bus continu.

III.6.2 REFERENCE DE LA COMPOSANTE I_{qr} :

La relation directe entre le courant I_{qr} et la puissance réactive est donnée par l'équation (III.15) que nous reprenons ci-dessous:

$$Q_r = \frac{3}{2}(V_{dr}I_{dr}) \quad \text{III.13}$$

$$\text{On pose : } g = \frac{3}{2}V_{dr} \quad \text{III.14}$$

H(s) Est la fonction du transfert qui représente la dynamique de l'onduleur .

$$H(s) = \frac{1}{1+\tau_{on}.s} \quad \text{III.15}$$

La boucle de régulation de la puissance réactive, présentée par le figure (III.13) est utilisée pour déterminer la fonction de transfert en boucle fermée,

Ces paramètres sont dimensionnés de telle façon que la dynamique du système soit prédéterminée. La fonction de transfert de notre système en boucle fermée sous la forme Figure (III.14) est du second ordre avec une pulsation naturelle ω_n et un coefficient d'amortissement ξ .

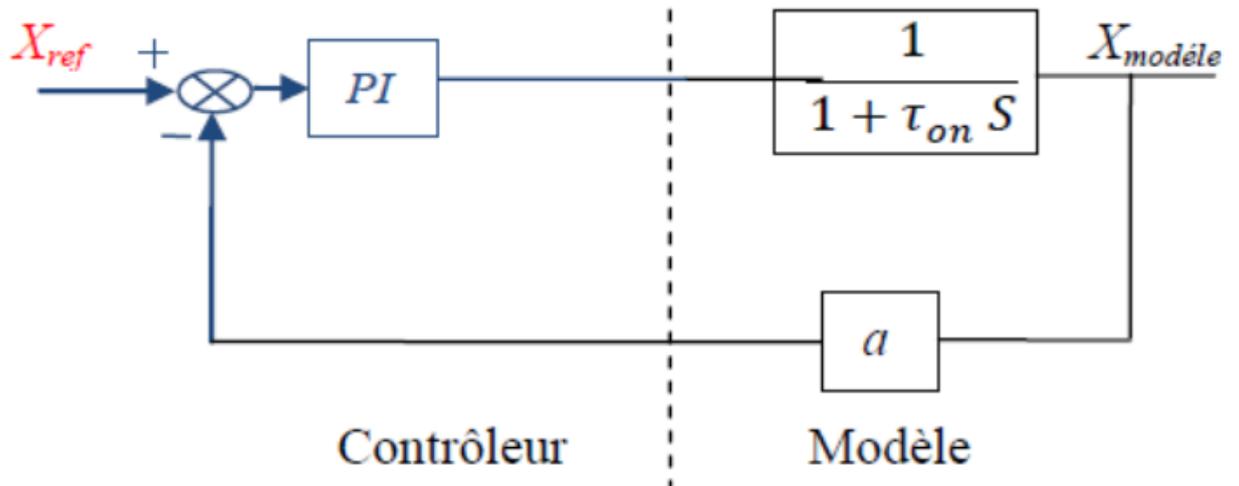


Figure III-7 : Schéma bloc du correcteur PI.

$$FTBF(S) = \frac{N(S)}{\frac{1}{\omega_n^2} S^2 + \left[\frac{2\xi}{\omega_n}\right] S + 1} \quad \text{III.16}$$

$$FTBF(S) = \frac{(K_p \cdot S + K_i)}{\left(\frac{\tau_{on}}{a \cdot K_i} S^2 + \left(\frac{a K_p + 1}{a \cdot K_i}\right) S + 1\right)} \quad \text{III.17}$$

D'où ;

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{a \cdot K_i}{\tau_{on}} \\ \frac{2\xi}{\omega_n} = \frac{a K_p + 1}{a \cdot K_i} \end{cases} \quad \text{III.18}$$

$$\text{L'expression finale est : } \begin{cases} K_i = \frac{\omega_{n-iqr}}{a} \\ K_p = \frac{2\xi}{a} - \frac{1}{a} \end{cases} \quad \text{III.19}$$

On remplace la valeur d'a par : $g = \frac{3}{2} V_{dr}$

Alors les paramètres K_{i-idqr} et K_{p-idqr} sont donnés par les relations suivantes:

$$K_{i-idqr} = \frac{\omega_{n-iqr}}{g} \quad \text{III.20}$$

$$K_{p-idqr} = \frac{2\xi}{g} - \frac{1}{g} \quad \text{III.21}$$

Avec :

$$\omega_{n-iqr} = \frac{1}{\tau_{on}} \quad \text{III.22}$$

ξ : Coefficient d'amortissement.

III.7 LES RESULTATS DE SIMULATION DE LA CHAINE DE CONVERSION

III.7.1 VITESSE DE VENT CONSTANTE

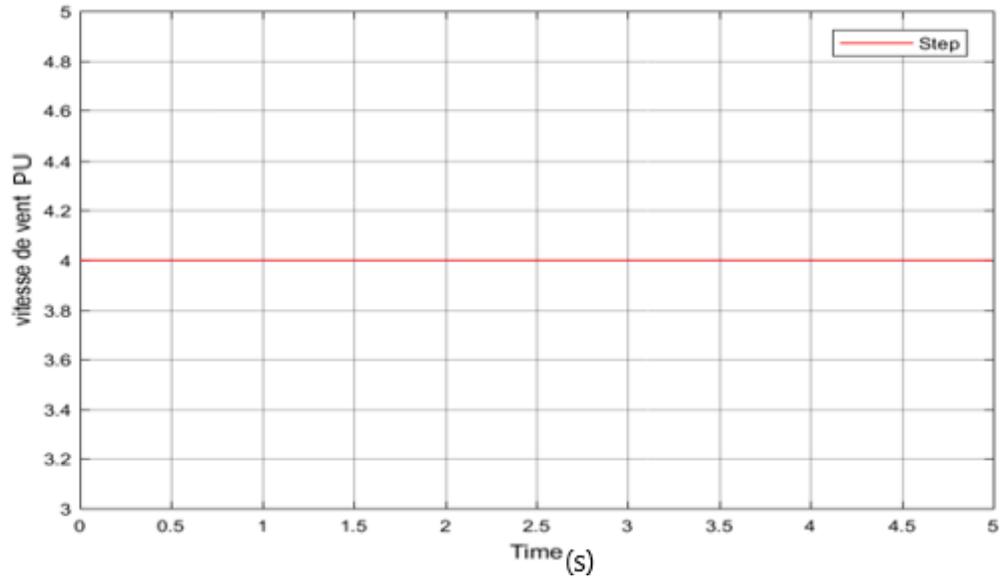


Figure III-8 profil du vitesse du vent constante

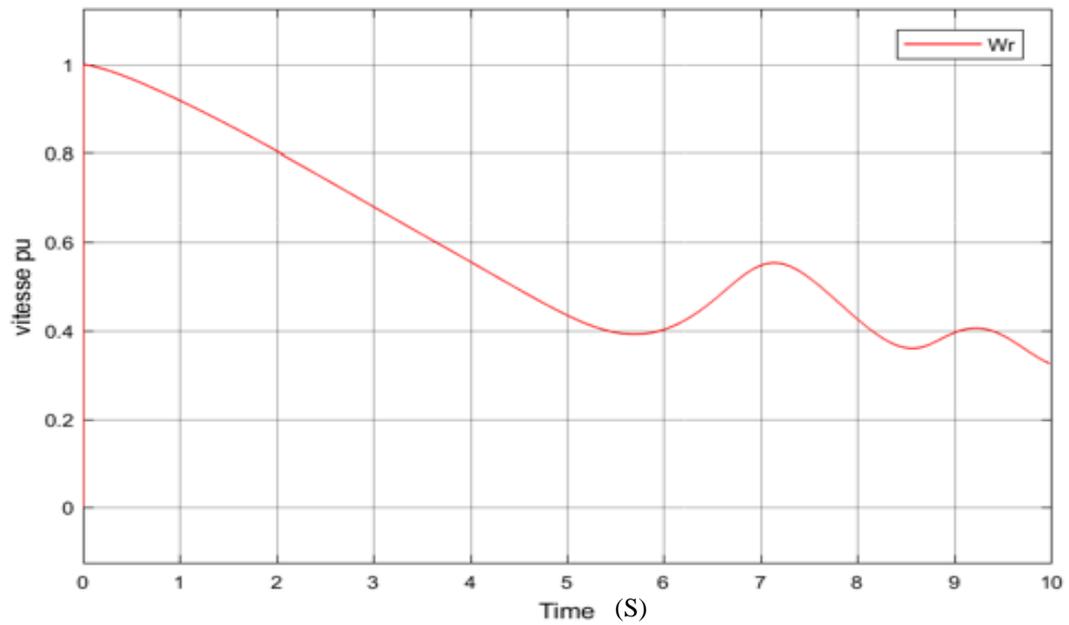


Figure III-9 La vitesse de rotation de turbine

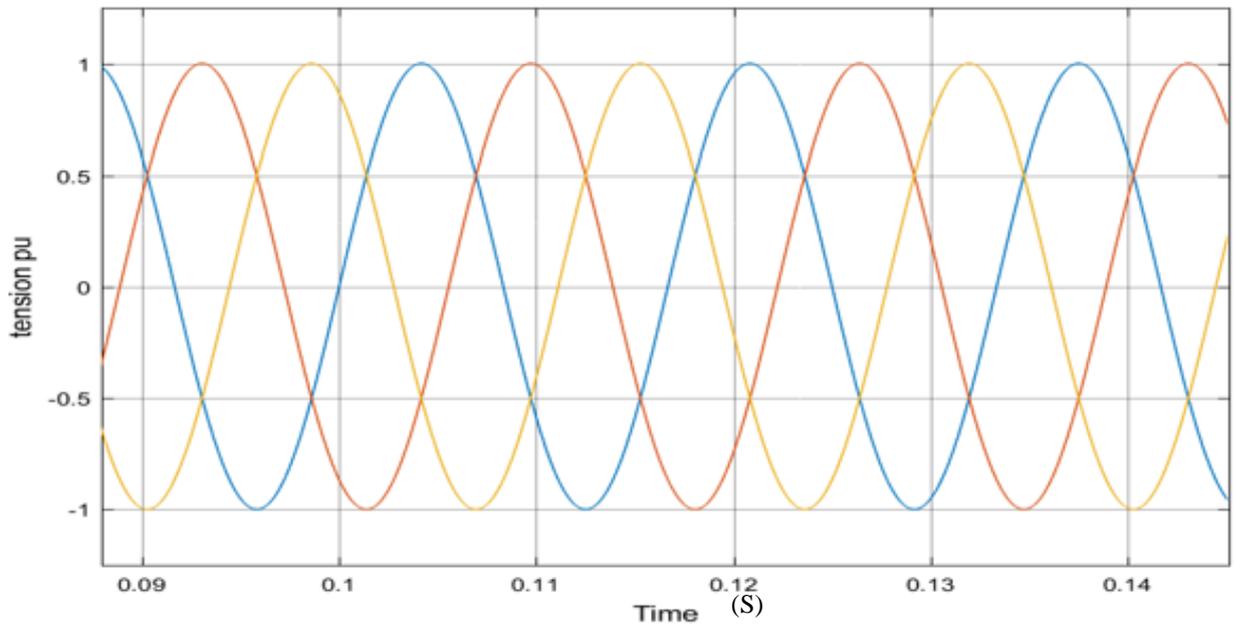


Figure III-10 Les tension de réseau abc

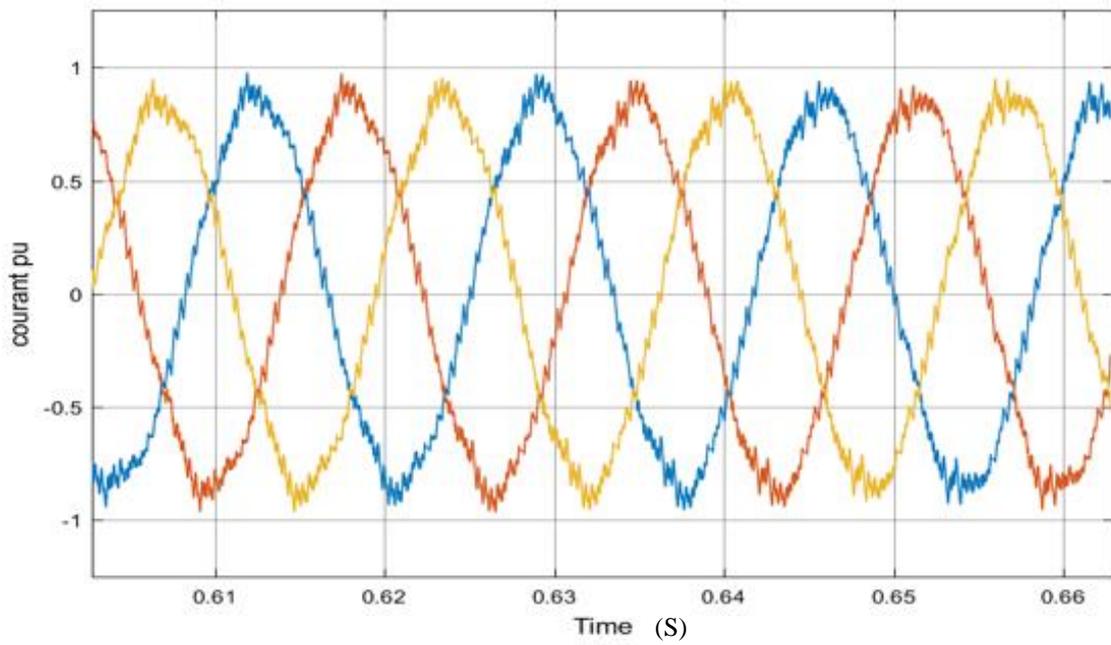


Figure III-11 Les courants du réseau abc

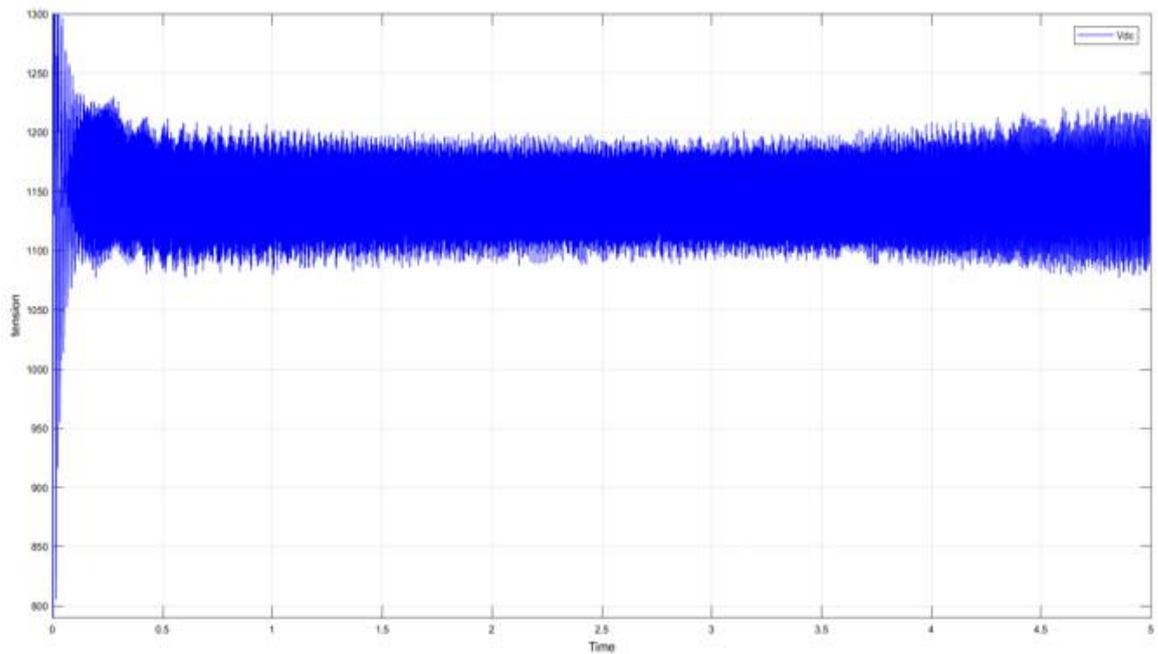


Figure III-12 La tension de bus continue

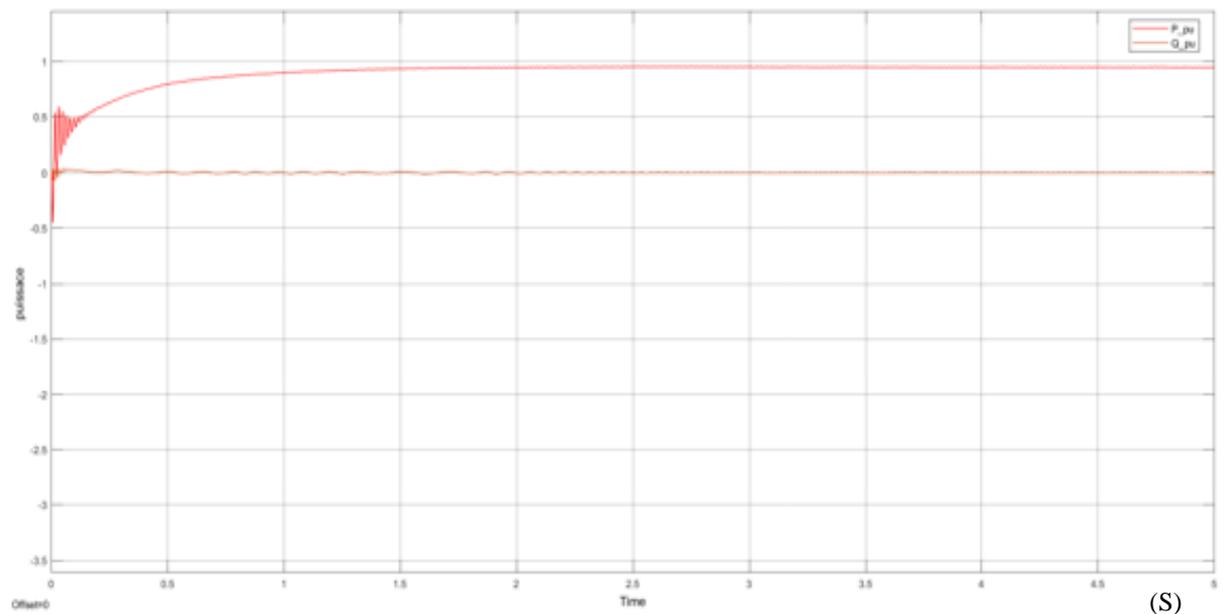


Figure III-13 puissance active et réactive

Dans la première partie de la simulation du système, nous avons injecté un vent fixe de 5m/s .

Nous avons connecté notre GSAP à une turbine à vitesse rotation variable, égale entre 1 et 0.4 après est stabilisé a la valeur 0.4 figure III.13

La tension est illustrée par la figure III.14. Elle est de forme sinusoïdale avec une amplitude de ± 1 avec une période 10 ms

L'allure du courant est illustrée par la figure III.15. Il est de forme sinusoïdale avec une amplitude de ± 0.7 , avec une période 10 ms

On remarque que la de tension de bus continu stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande.. On observe que cette tension a une valeur maximale, égale à 1180 V, figure III

la puissance active injectée au réseau suit la puissance du vent, et que la puissance réactive est presque nulle.

Dans la première partie de la simulation du système, nous avons injecté un vent fixe de 5m/s tout au long de la période de simulation, ce qui nous a permis de constater que la puissance active injectée au réseau suit la puissance du vent, et que la puissance réactive est presque nulle. Par ailleurs, la valeur de la tension est de 1200 V. la tension injectés dans le réseau est alternatif et sinusoïdales. Mais le courant n'est pas sinusoïdal.

III.7.2 VITESSE DE VENT VARIABLE

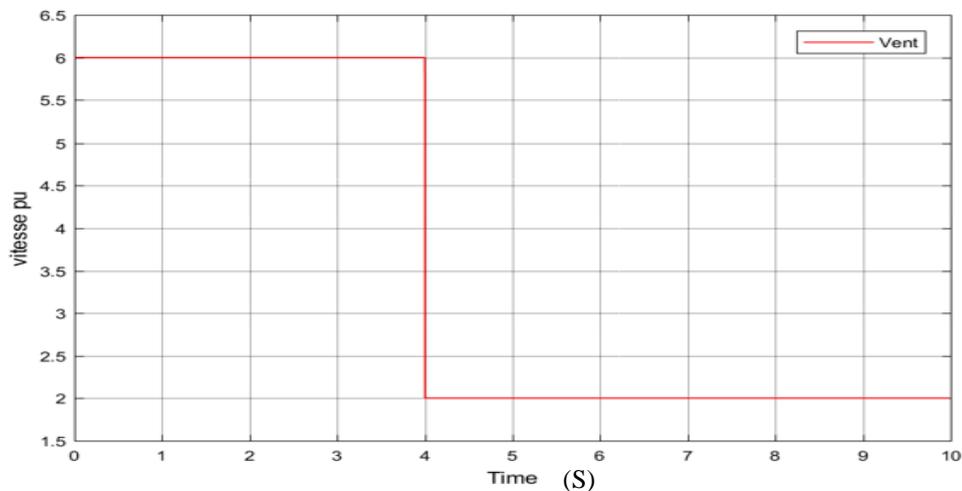


Figure III-14 profile de vitesse du vent variable

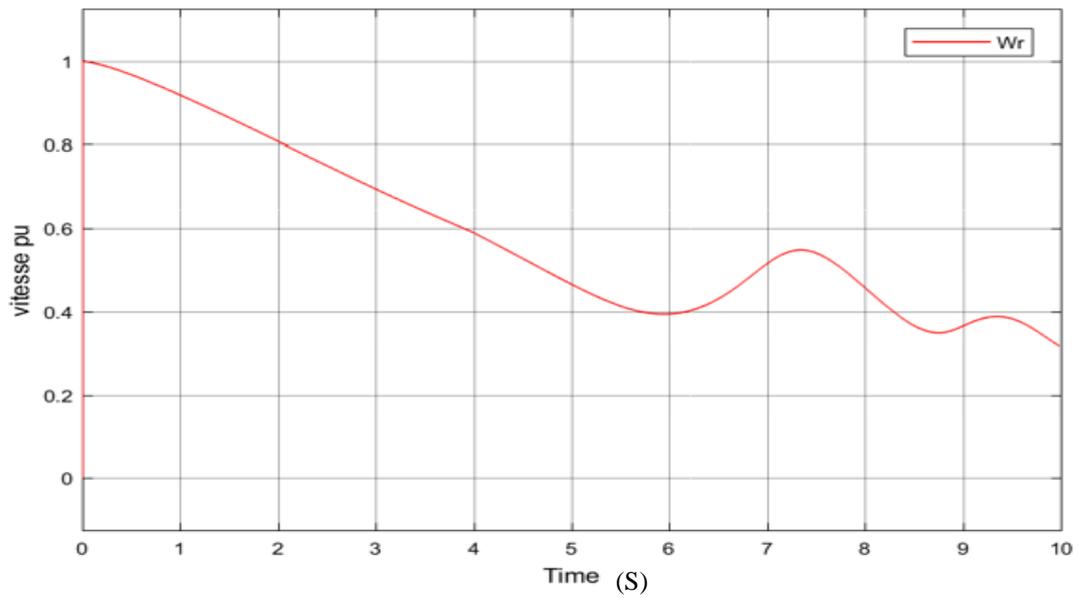


Figure III-15 La vitesse de rotation de turbine

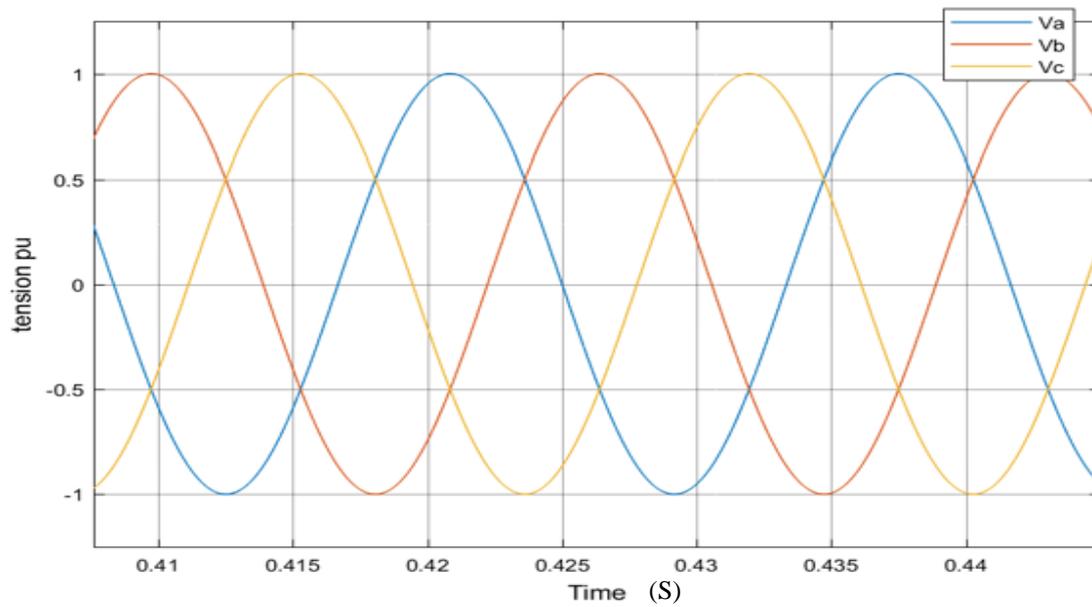


Figure III-16 Les tension de réseau abc

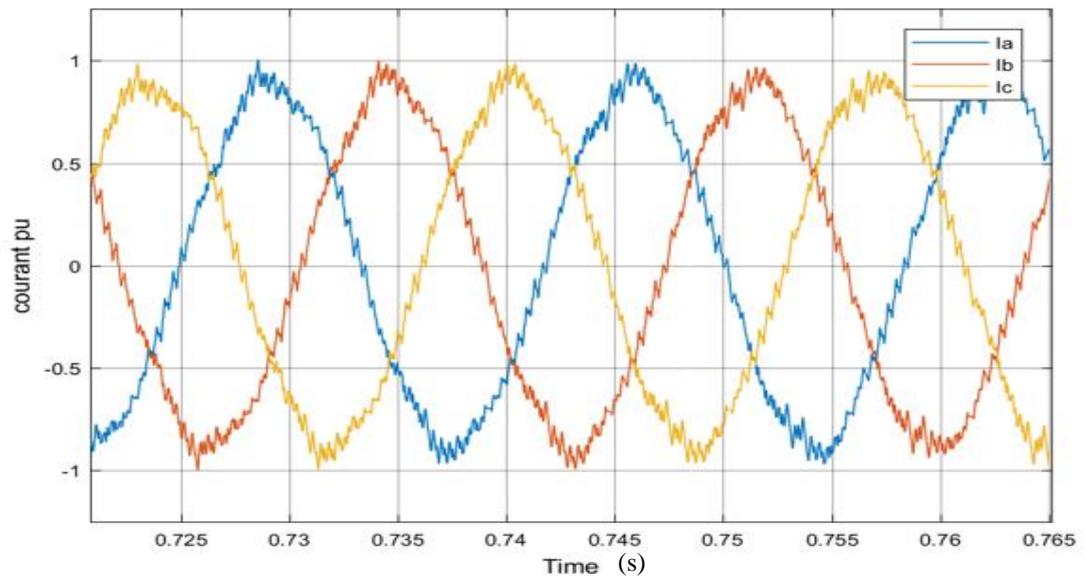


Figure III-17 Les courant de réseau abc

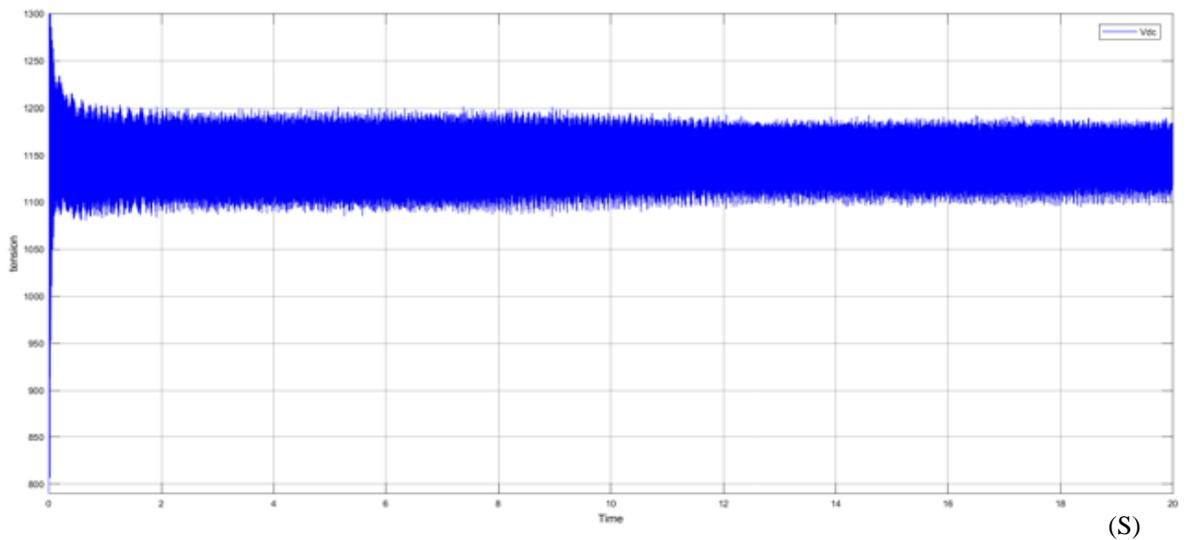


Figure III-18 La tension de bus continu

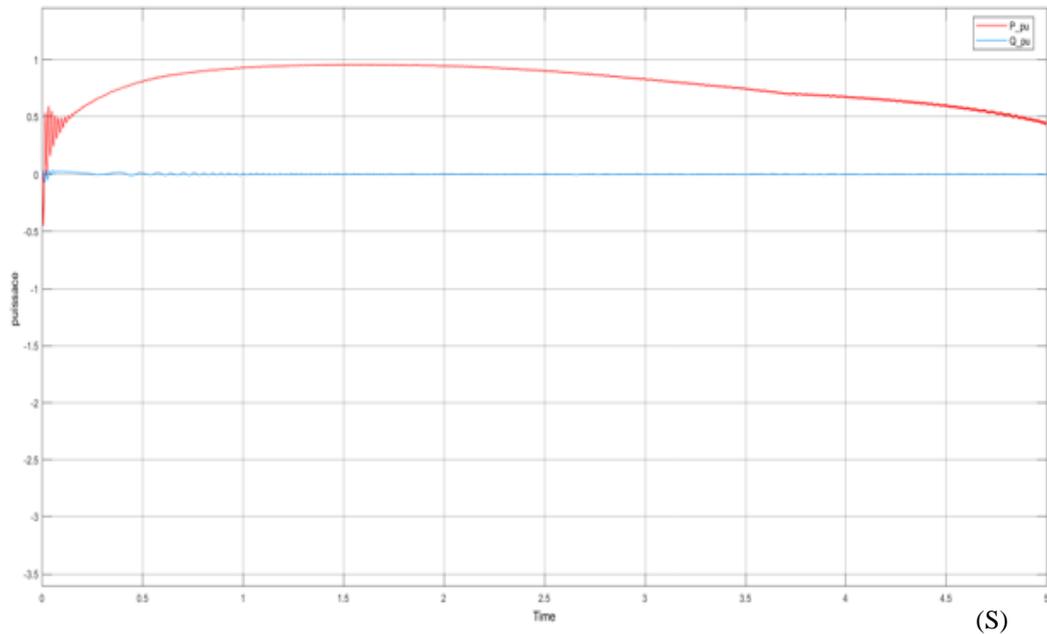


Figure III-19 puissance active et réactive

Dans la deuxième partie de la simulation, nous avons injecté un vent variable en deux étapes. La première est 6 m/s pendant 4 secs, et le deuxième est de 2 m/s pendant 4 secs, Nous avons connecté notre GSAP maintenant à une turbine à vitesse rotation variable, fluctuant entre 1 et 0.5 figureIII.19

Dans la figure III.21 on illustre l'allure du courant de phase résultant de la génératrice. C'est un courant de la forme sinusoïdale avec une variation de 0.9 et 0.7

La tension est illustrée par la figure III.20. Elle est de forme sinusoïdale avec une amplitude de ± 1 avec une période 10 ms

la puissance active injectée au réseau suit la puissance du vent, et que la puissance réactive est presque nullefigureIII.21

On remarque que la de tension de bus continu stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande.. On observe que cette tension a une valeur maximale, égale à 1200 V, figureIII.22

Vitesse de vent instable:

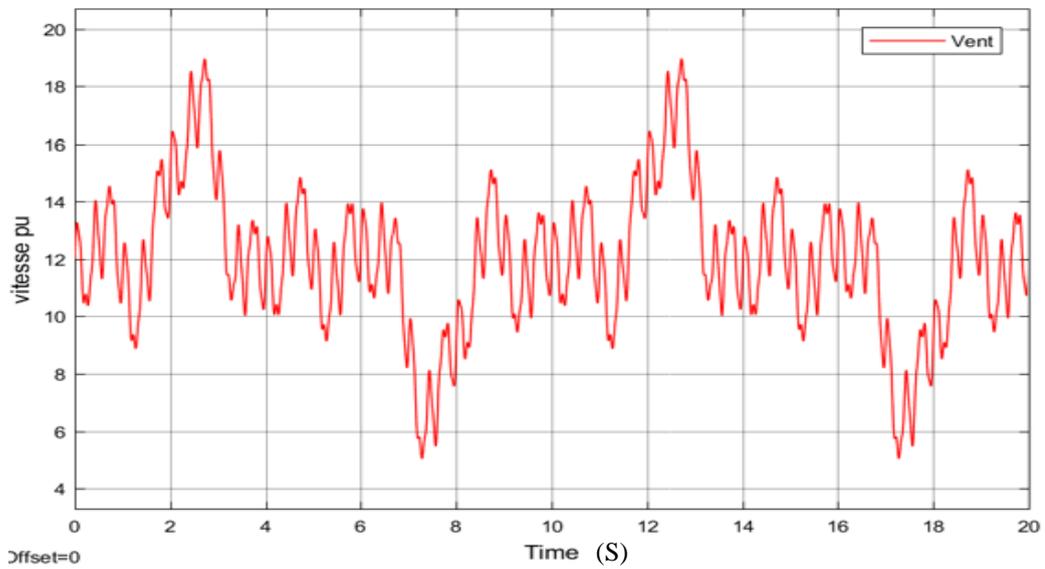


Figure III-20 Profil de vent instable

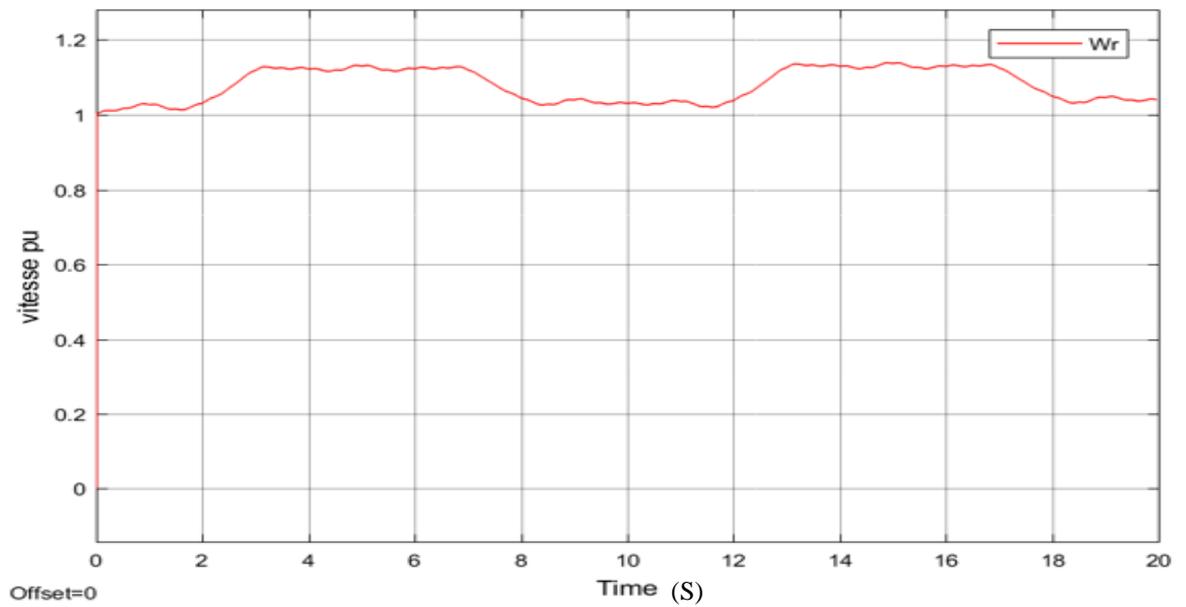


Figure III-21 La vitesse de rotation de turbine

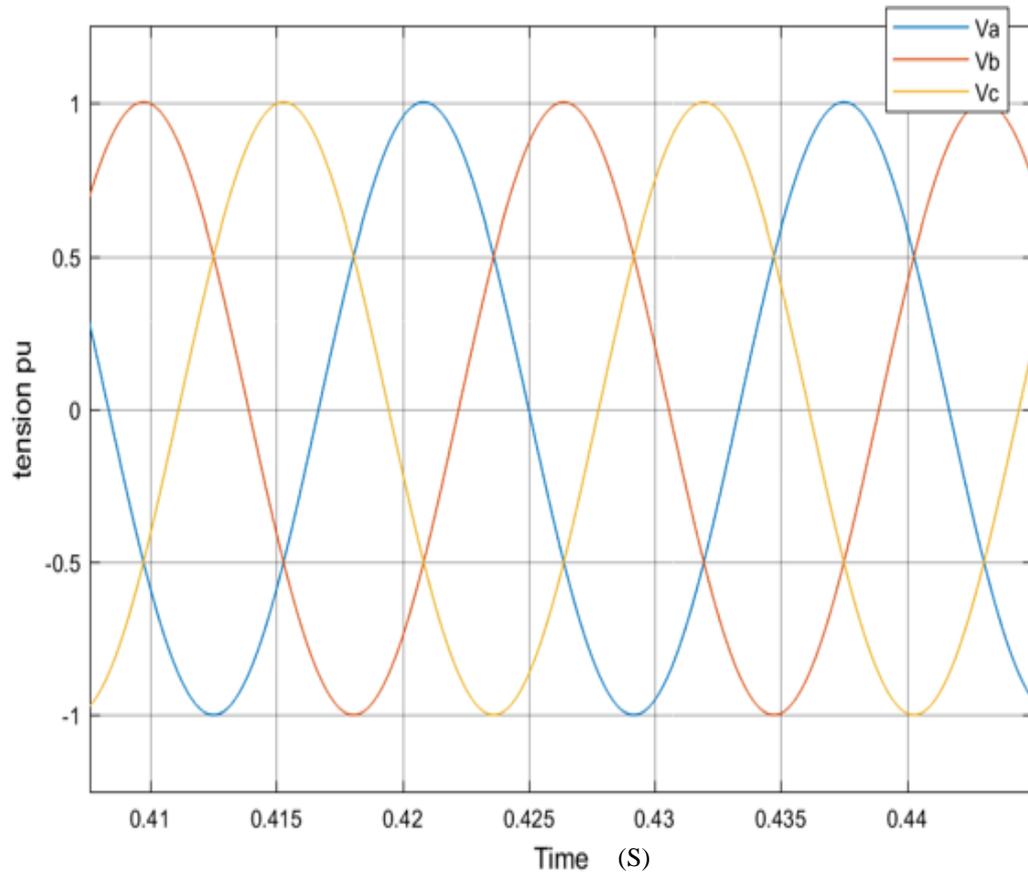


Figure III-22 La tension au réseau abc

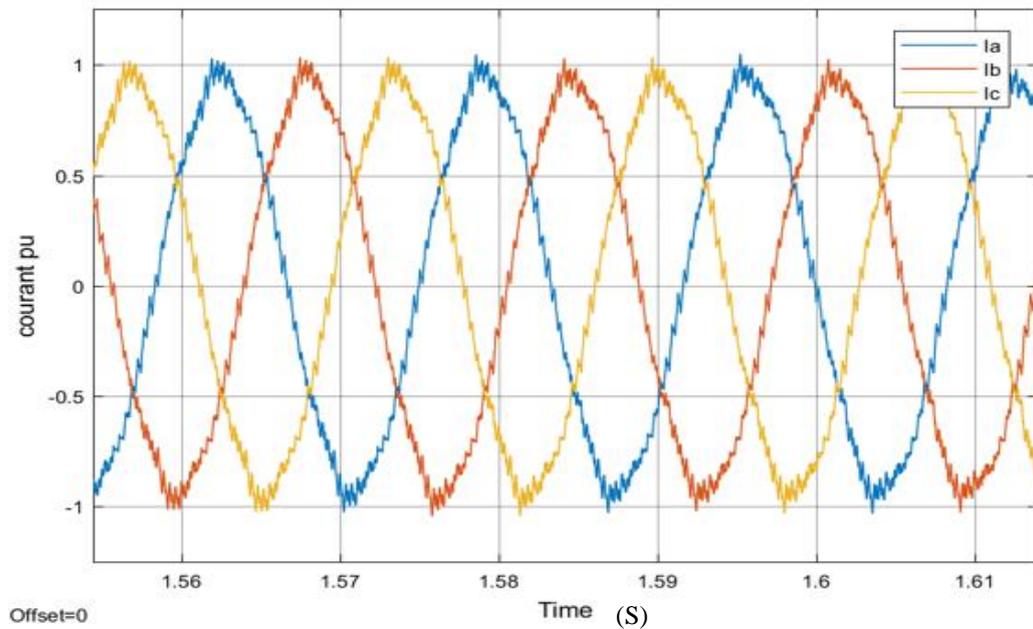


Figure III-23 Le courant du réseau abc

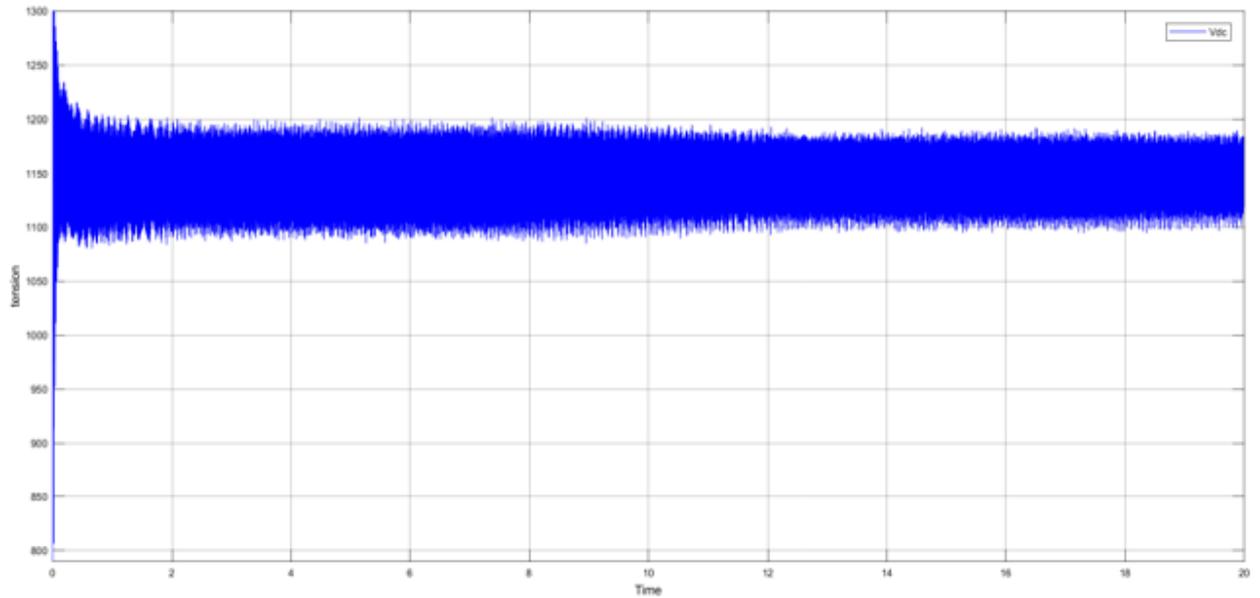


Figure III-24 La tension de bus continu

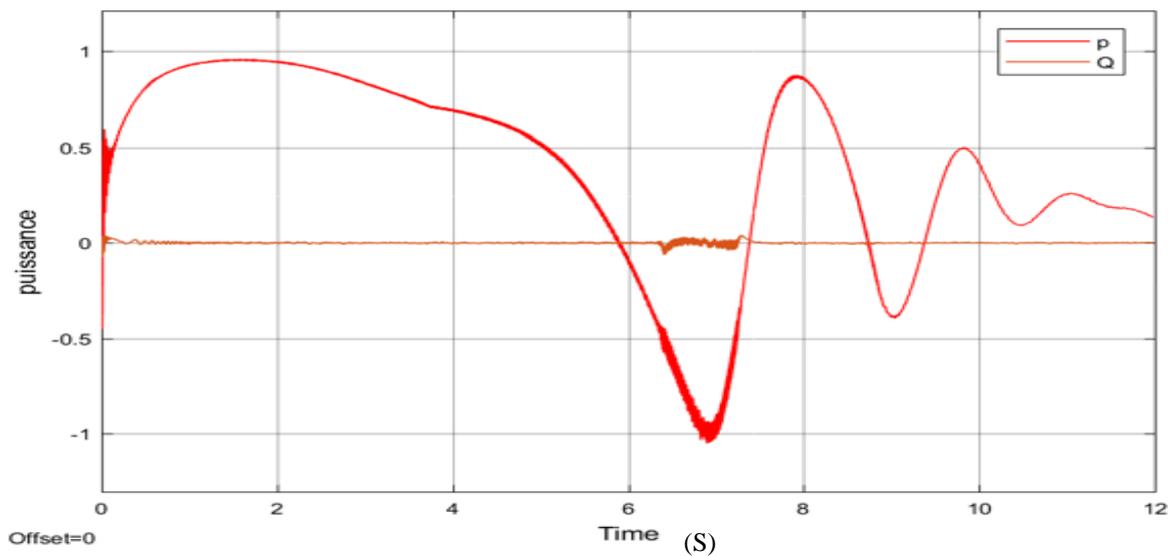


Figure III-25 puissance active et réactive

Dans la 3eme partie, nous avons injecté un vent variable instable, Dans la 3eme partie, nous avons injecté un vent variable instable, ce qui a engendré de multiples variations de la puissance active injectée au réseau. Néanmoins, la puissance réactive qui n'a pas été influencée par cette variation du vent, reste nulle telle qu'elle a été paramétrée dans la valeur de référence.

Nous avons connecté notre GSAP maintenant à une turbine à vitesse rotation instable, Il donne multiples variations figure III.25

Dans la figure III.27 on illustre l'allure du courant de phase résultant de la génératrice. C'est un courant de la forme sinusoïdale

La tension est illustrée par la figure III.26. Elle est de forme sinusoïdale avec une amplitude de ± 1 avec une période 10 ms.

On remarque que la tension de bus continu stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande. .. On observe que cette tension a une valeur maximale, égale à 1200 V, figure III.28

III.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté la commande du système éolienne global basé sur la GSAP.

Cette étude analyse les stratégies de contrôle de la chaîne de conversion d'énergie complète, l'éolienne à base de MSAP, redresseur et l'onduleur MLI avec des différents profils de vent. et simule l'ensemble du système autonome d'éolienne PMSG alimentant le réseau électrique en courant alternatif dans Matlab Simulink.

Les résultats de la simulation montrent que la combinaison, du contrôleur de redresseur côté générateur et du contrôleur de l'onduleur côté réseau présente de bonnes performances dynamiques et statiques car ils montrent une bonne concordance entre les grandeurs mesurées et les grandeurs de références.

Conclusion Générale

Vue la tendance de la majorité des pays vers les énergies renouvelables, le gisement éolien présente l'un des potentiels propres et un grand rendement par rapport à d'autre l'énergie.

Dans le cadre de la réalisation du mémoire de Master, nous avons choisi de travailler sur le thème de la production et conversion de l'énergie éolienne.

Pour cela, nous avons pris pour objectif l'utilisation de la machine synchrone à aimant permanent avec des convertisseurs statiques de puissance dans un système de conversion d'énergie éolienne. nous avons rappelé d'une manière succincte généralité de l'énergie éolienne en rendant compte de l'état actuel de l'exploitation mondiale et en Algérie, puis les différents types d'aérogénérateur avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement. Nous avons présenté, aussi, les différents types des machines électriques utilisées dans le domaine de l'énergie éolienne pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique, En a terminer par les avantages et les inconvénients d'énergie éolienne. nous a permis la modélisation et la simulation d'un système de conversion d'énergie éolienne. Nous avons commencé par la modélisation de la vitesse du vent appliqué, la turbine (les pales, l'arbre mécanique) et le coefficient de puissance, ensuite nous avons modélisé la machine synchrone à aimants permanents en évoquant les différentes équations électriques, magnétiques et mécanique dans le repère de Park dans le but de simplifier. A la fin de ce chapitre, nous avons terminé par la modélisation des convertisseurs.

Enfin, on a réservé à la commande et la simulation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne dans le but d'injecter au réseau électrique toutes la puissance active générée depuis la puissance du vent, et d'injecter une puissance réactive nulle au réseau électrique avec une tension du bus continu fixe. On a simulé notre système avec des différentes variations du vent, on a constaté qu'avec une certaine puissance du vent les régulateurs ne parviennent pas à réguler les courants ainsi les tensions et même la tension Vdc toutefois bien d'autres questions méritent d'être abordées et d'autres commandes d'être testées.

References

- [1] Meghni Billel, Contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne énergétique éolienne, Technique de l'ingénieur D 3 960. , Année 2015.
- [2] Bennour, C, Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation, Université Mohamed Khider – Biskra, 19/11/2012.
- [3] Mlle.ZERARI NAZIHA, Modélisation et optimisation multi objectifs d'une éolienne à axe horizontal d'un système de production éolien isolé de petite taille, 17 /09/ 2015.
- [4] WWEA «Rapport Mondial 2010 sur l'Energie Eolienne», Avril 2011..
- [5] TIR ZOHEIR, Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade, mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Setif, , 2010.
- [6] Mujaddid Morshed Chowdhury, Modelling and Control of Direct Drive Variable Speed Wind Turbine with Interior Permanent Magnet Synchronous Generator, University of Tasmania, June 2014.
- [7] Dr. BOUBOU-BOUZIANI Naima, «Potentiel et développement des énergies,» 16/09/2017.
- [8] Frédéric, P, Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne -Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 19 décembre 2003..
- [9] Mirecki, A, Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, Toulouse, France: Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005..
- [10] R. Swisher, C. Real de Azua, J. Clendenin, Strong winds on the horizon: wind power comes of age, proceedings of the IEEE, vol. 89, N°. 12, éd., December 2001, pp. 1757-1764..
- [11] MOHD HASAN ALI, WIND ENERGY SYSTEMS Solutions for Power Quality and

- Stabilization, 2011-12-08.
- [12] A JOHN WILEY & SONS, , POWER CONVERSION AND CONTROL OF WIND, the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2011.
- [13] Adjeroud, M et Boudjellaba, f, «Etude d'une éolienne en fonctionnement autonome, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2015.
- [14] TARAK GHENNAM, supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Ecole Centrale de Lille, , 29/09/2011.
- [15] MAYOUF MESSAOUD, contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone a aimants permanents, thèse magister, Université de Batna, 13/02/2008..
- [16] Poitiers, F, Etude et commande de génératrices asynchrones pour L'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Nantes, France: Thèse de Doctorat, Université de Nantes,, 2003..
- [17] KHALED FERKOUS, étude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne, Université Mentouri Constantine, 27 /05 / 2009..
- [18] énergie éolienne [http://www.energie-éolienne .com](http://www.energie-éolienne.com)..
- [19] Belgacem, K, Optimisation des performances des systèmes énergétiques dans la production d'énergie éolienne à vitesse variable, l'Université Djilali Liabes Sidi-Bel-Abbès, , 11/02/2014..
- [20] T. Ackermann,, Wind Power in Power Systems, Ed., ed. Stockholm, Sweden éd., S. Royal Institute of Technology Stockholm,.
- [21] K.D.E.Kerrouche, Application des FACTS pour améliorer les performances dynamiques d'un parc éolien raccordé au réseau électrique, ,thèse de DOCTORAT LMD en Electrotechnique,Université de Saida, 2016..
- [22] T. Wildi, Gilbert Sybille, Electrotechnique, 4ème édition éd., 2005.
- [23] Anup KCa,* , Jonathan Whalea, Urban wind conditions and small wind turbines in the

Références

- built environment, Western Australia: School of Engineering and Information Technology, 10 July 2018.
- [24] Colas CELLIER, «MÉMOIRE ÉTUDE ET SIMULATION D'UN SYSTÈME,» ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, 2012.
- [25] MAKANGA KOUMBA PAUL, CONTRIBUTION À L'ÉTUDE ET À LA COMMANDE DES GÉNÉRATRICES, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 2018.
- [26] B.MULTON, Production d'énergie électrique par sources renouvelables, 2008.
- [27] A. Abdelli, Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive, Toulouse, 2007.
- [28] A.AID, Synthèse de lois de commande non-linéaires pour un entraînement électrique à vitesse variable, Telemcen, 2013.
- [29] MERZOUGUI Theldja , Mémoire master Commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), 2019.
- [30] F.LOUAR, these de doctorat Modélisation et simulation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent, Anabba, 2016.
- [31] REDJEM Radia , Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, Costantine: UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE , 2009.
- [32] Amor KHLAIEF, Contribution à la Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP), tunisie, 2012.
- [33] Dr.HARTANI kada, «Cours: Commande vectorielle et Commande directe du couple appliquées à la machine synchrone à aimants permanents».
- [34] A. Benoît, «Le système visuel humain au secours de la vision par ordinateur,» Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2017.
- [35] Bergounioux.M, Introduction au traitement mathématique des images, Springer, 2015.
- [36] A. T. / . N. C. / . S. Soissons, «www.tsi.enst.fr,» 06 06 2021. [En ligne]. Available: <http://www.tsi.enst.fr/pages/enseignement/ressources/mti/egal-histo/index.html>.

- [37] B. Ali, «mise en oeuvre d'une technique automatique de segmentation de sillons corticaux,» Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister en Informatique 2011, 2011.
- [38] N. Babich, «www.xd.adobe.com,» 2020. [En ligne]. Available: <https://xd.adobe.com/ideas/principles/emerging-technology/what-is-computer-vision-how-does-it-work/>. [Accès le 09/06/2021].
- [39] G. Levin, Computer vision for artists and designers: pedagogic tools and techniques for novice programmers, 2006.
- [40] B. J. K. P. A. Z. & K. Erickson, Machine learning for medical imaging, Radiographics, 37(2), 505-515, 2017.
- [41] D. Nvidia, «Developer Nvidia,» 08 06 2021. [En ligne]. Available: <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano>.
- [42] G. Colaboratory., «Google Colaboratory.,» 08 06 2021. [En ligne]. Available: colab.research.google.com.
- [43] OpenCV, «[opencv](https://opencv.org),» 2021. [En ligne]. Available: <https://opencv.org/about/>.
- [44] Tensorflow, «[tensorflow.org](https://www.tensorflow.org),» [En ligne]. Available: <https://www.tensorflow.org/about>.
- [45] Keras, «deepai.org,» 2021. [En ligne]. Available: <https://deepai.org/machine-learning-glossary-and-terms/keras>.
- [46] Nvidia, «Developer.nvidia.com,» 2021. [En ligne]. Available: <https://developer.nvidia.com/tensorrt>. [Accès le 2021].
- [47] A. Uno, «components101,» 2018. [En ligne]. Available: <https://components101.com/microcontrollers/arduino-uno>. [Accès le 2021].
- [48] A. Mirecki,, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance," Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle, de l'ENSEEIH Institut National Polytechnique de TOULOUSE, , 2005..

ANNEXES

NOM	Abréviation	La valeur
Tension nominal(V)	V nom	575
Puissance nominal (W)	P nom	$2.50e^2$
Rated Frequency(Hz)	F nom	60
Tension de bus continu (V)	Vdc_nom	1200
Nombres de paires de pôles	Np	4
Capacité de bus continu (F)	C	$10000*10^{-6}$
Résistance au statorique (Ω)	Rs	0.6
Inductance statorique (H)	(Ld Lq)	0.3 0.003
Puissance apparente (VA)	S nom	$4e^6$