

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل
كلية العلوم والتكنولوجيا

Département D'Électrotechnique

Mémoire

présenté en vue de l'obtention du diplôme

Master en Electrotechnique

Option : Commande Electriques

Thème

**Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine
Synchrone à Aimant Permanent**

Par :

TEBBAL Abderezzak ET SEKHRI Miloud

Travail proposé et dirigé par :

Mr LAHLILI Djafer

Promotion 2019

Remerciements

Avant tous, il apparait opportun de commencer ce Mémoire par des remerciements à Allah puis à ceux qui nous ont beaucoup appris au cours de ce travail.

Nous tenons à remercier le promoteur Mr. Djaafer LAHLILI d'avoir accepté de nous encadrer et pour son support. Je le remercie pour sa disponibilité, pour ses éclaircissements scientifiques.

Nos remerciements vont aussi au président du jury et aux membres du jury examinateurs.

*Je tiens également à remercier tous les enseignants et les fonctionnaires du ministère de la Génie électrique de l'Université de MOHAMMED SEDDIK JIJEL pour leur et collègues de notre promotion (2018/2019), et spécialement 2eme année Master *Commande Electrique* qui nous a aidés à réaliser ce modeste travail.*

Table des matières

Remerciements	
Sommaire	
Liste des figures	

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

Introduction sur l'énergie éolienne et sa conversion

I.1. Introduction :.....	3
I.2. La production éolienne :	3
I.3 Définition de l'énergie éolienne :	3
I.4. Direction et vitesse du vent :.....	4
I.5. Aérogénérateur :	5
I.5.1 Principaux composants d'une éolienne.....	5
I.5.2 Types d'aérogénérateurs :	6
I.5.2.1 Eolienne à axe vertical.....	7
I.5.2.1.1 Eolienne à axe vertical de type Darrieus	7
I.5.2.1.2 Eolienne à axe vertical de type Savonius	8
I.5.2.2 Eoliennes à axe horizontale :.....	8
I.6. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne :	9
I.6.1. Générateurs asynchrones :	9
I.6.1.1 Machines asynchrones à double alimentation (MADA).....	10
I.6.1.2 Machine asynchrone à double stator	10
I.6.1.3 Machine Asynchrones à cage (MAS).....	11
I.6.2 Génératrices synchrones :.....	12
I.6.2.1 Machine synchrone à rotor bobiné	12
I.6.2.3 Machines synchrones à aimants permanents	13
I.7. Eoliennes à base de génératrice synchrone à aimant permanent en fonctionnement isolé et autonome	13
I.7.1 Structure avec redresseur à diodes :	13
I.7.2 Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur :	14
I.7.3 Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont :.....	14
I.7.4 Structure avec redresseur à MLI	15
I.8 Eoliennes à vitesse fixe et variable :	16

I.8.1 Eolienne à vitesse variable :	16
I.8.2 Eolienne à vitesse fixe :	16
I.9. Connexion au réseau :	16
I.10. Stockage d'énergie électrique	17
I.11. Avantages et inconvénients des énergies éoliennes :	17
I.12. Conclusion :	19

Chapitre II

Modélisation d'un système éolien

II.1 Introduction :	19
II.2 Modélisation de l'énergie du vent :	19
II.3 Le théorème de BETZ :	19
II.4 Modélisation de la turbine :	21
II.4.1. Modèle des pales :	22
II.4.2 Modèle du multiplicateur :	23
II.4.3 Équation mécanique de l'arbre :	23
II.5. Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents :	24
II.5.1. Hypothèses simplificatrices :	25
II.5.2. Mise en équations de la machine synchrone à aimants permanents :	25
II.5.3. Equations électriques :	25
II.5.3.1. Equations électriques dans le repère fixe (abc)	25
II.5.3.2. Equations électriques dans le repère de Park (d, q)	26
II.5.4. Equations magnétiques :	28
II.5.5. Equations du couple électromagnétique et d'équation mécanique :	28
II.6. Modélisation des convertisseurs :	29
II.6.1. Modélisation de redresseur triphasé double alternance à diodes :	29
II.6.2 Modélisation du bus continu :	29
II.6.3. Modélisation de l'onduleur de tension :	29
II.7 Modélisation du filtre.	31
II.8 Modélisation du réseau électrique :	34
Conclusion :	34

Chapitre III

Commande de la cascade de conversion

III.1. Introduction :	35
III.2. Description du schéma de commande :	35
III.3. Commandes-en MPPT (Maximum Power Point Tracking)	35
III.3.1 Différentes méthodes de MPPT :	36
III.3.1.1 MPPT par la méthode de lambda optimal (TSR) :	36
III.3.1.2 MPPT par la méthode de HCS :	37
III.3.1.3 MPPT par la méthode de contrôle optimale de couple (OTC) :	38
III.3.1.4 MPPT par la méthode de perturbation et observation (P&O) :	37
III.3.1.5 Méthode de maximisation par la méthode d'asservissement du signal de la puissance (PSF) :	39
III.4. Commande prédictive des puissances du réseau :	39
III.4.1 Expression des puissances :	40
III.4.2. Prédiction des puissances :	41
III.4.3. Erreur de puissance :	43
III.4.4. Algorithme du choix de l'état de l'onduleur :	43
III.5. Simulation numérique :	44
III.5.1 Paramètres du système :	46
III.5.2 Résultat de la simulation :	47
III.6. Conclusion :	53

Conclusions Générales

LISTE DES FIGURES

Figure.I.1: conversion de l'énergie cinétique du vent.....	4
Figure. I.2: Circulation du vent dans le monde.....	4
Figure.I.3: Correspondance taille-puissance des éoliennes.....	5
Figure.I.4: Constitution d'une éolienne.....	5
Figure.I.5: Différents types d'éoliennes.	7
Figure.I.6:rotor de Darrieus	8
Figure.I.7:rotor de Savonui.....	8
Figure.I.8:Eolienne à axe horizontale	9
Figure.I.9: Système éolienne basé sur la machine asynchrone a double alimentation.....	10
Figure. I.10: Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator.....	11
Figure. I.11: Génératrice asynchrone à cage intégrée dans une chaine éolienne.....	11
Figure. I.12: Machine synchrone à rotor bobiné.....	12
Figure. I.13: Machines synchrones à aimants permanents.	13
Figure. I.14 : Machine synchrone avec redresseur à diodes.	13
Figure. I.15: Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur.....	14
Figure. I.16: Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont.....	14
Figure. I.17: Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI.....	15
Figure II.1 : Tube de courant autour d'une éolienne.....	20
Figure II.2 : Coefficient de puissance pour les différents Types d'éoliennes.....	21
Figure II.3 : Schéma de la turbine éolienne.....	21
Figure II.4 : Coefficient de C_p en fonction de λ	22
Figure II.5. Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.....	23
Figure II.6 : Représentation symbolique de la machine synchrone.....	24
Figure II.7 : Représentation d'un GSAP dans le repère (d, q).....	26
Figure II.8 : Redresseur triphasé double alternance à diode.....	28

LISTE DES FIGURES

Figure II.9 : Schéma électrique du bus continu.....	29
Figure II.10 : Le schéma global d'un onduleur à MLI.....	30
Figure II.11 : Schéma électrique du filtre passif.....	31
Figure III.1 : Schéma global de la chaîne de conversion et de sa commande.....	34
Figure.III.2. Caractéristiques d'une éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation...	35
Figure III.3 Schéma block de la méthode de MPPT lambda optimal (TSR).....	36
Figure III.4 Caractéristiques de la puissance de sortie et de la vitesse du générateur.....	36
Figure III.5 Caractéristique de Puissance d'une éolienne en fonction de Tension.....	38
Figure III.6 : Le Block Diagramme de la méthode de retour de signal de puissance.....	38
Figure III.7 : Schéma bloc de la chaîne de simulation globale.....	44
Figure III.8 : Profil de la vitesse du vent.....	47
Figure III.9 : Couple de la turbine.....	48
Figure III.10 : Vitesse de rotation de la GSAP.....	48
Figure III.11 : Couple de la GSAP.....	48
Figure III.12 : Courant de sortie i_a de la GSAP.....	49
Figure III.13 : Zoom du courant de sortie de la GSAP.....	49
Figure III.14 : Tension de sortie v_a de la MSAP.....	49
Figure III.15 : Courant i_a et tension e_a du réseau.....	50
Figure III.16 : Tension composée de la sortie de l'onduleur.....	50
Figure III.17 : puissance active optimal et réelle.....	50
Figure III.18 : Zoom de la puissance active.....	51
Figure III.19 : Déphasage Courant i_a et tension e_a du réseau.....	51
Figure III.20 : Puissance réactive.....	51
Figure III.21 : Zoom de puissance réactive.....	52

LISTE DES FIGURES

Listes des symboles

MS:	Machine Synchronne.
MAS:	Machine Asynchronne.
MSAP :	Machine Synchronne à Aimants Permanent.
GSAP :	Génératrice Synchronne à Aimant Permanent.
ρ :	Masse volumique de l'air (en Kg/m ³).
$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$	Coefficients dépend de la turbine considérée.
P_m :	Puissance mécanique extraite de vent.
V_2 :	Représente la vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur.
V_1 :	Représente la vitesse du vent en amont l'aérogénérateur.
A :	La valeur moyenne de la vitesse du vent.
a_k :	Amplitude de l'harmonique de l'ordre k.
ω_k :	Pulsation de l'harmonique de l'ordre k.
i :	Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.
C_g :	est l'effet du couple de la turbine sur l'arbre de la génératrice.
G :	est le gain du multiplicateur.
f_v :	Coefficient de frottements visqueux dans la génératrice.
C_m :	Couple de frottement.
V_s :	Vecteur des tensions statoriques.
R_s :	Matrice des résistances statorique.
I_s :	Vecteur des courants statoriques.
φ_s :	Vecteur des flux statoriques.
φ_{abc} :	Les flux des axes (a, b, c).
φ_f :	Flux de l'aimant permanent.

Listes des symboles

L_s :	L'inductance propre des phases statorique.
L_q et L_d :	les inductances directe et en quadrature.
φ_f :	représente le flux des aimants.
Ω :	Vitesse mécanique
J_t :	Inertie de la turbine.
J :	Inertie de la machine.
p :	Nombre de pair de pole.
i_{abc} :	Courants des phases statoriques.
v_{abc} :	Tensions des phases statoriques.
θ :	Position statorique.
i_{dq} :	Courant statorique sur les axes d et q.
v_{dq} :	Tension statorique sur les axes d et q.
L_{dq} :	L'inductance statorique sur les axes d et q.
λ :	La vitesse spécifique ou normalisée.
Ω_t :	Vitesse de rotation avant multiplicatrice en rad/s.
R :	Rayon de la surface balayée en m.
C_p :	Le coefficient de puissance.
λ_{opt} :	Le coefficient de vitesse réduite optimale.
$P(\theta)$:	Transformation de Park.
$P(\theta)^{-1}$:	Transformation inverse de Park.
i_1 :	Le courant redressé.
i_2 :	Le courant à onduleur.
i_{dc} :	Le courant de charge du condensateur.
$V_{a,b,c}$:	Tensions à la sortie de l'onduleur

Listes des symboles

$e_{a,b,c}$	Tensions du réseau électrique.
R_t, L_t	Filtre triphase.
$i_{1,2,3}$	Courants injectés au réseau électrique.
v_{mq}, v_{md} :	Composantes de la tension à la sortie de l'onduleur dans le repère (dq) .
e_d, e_q :	Composantes de la tension du réseau dans le repère (dq) .
i_{tq}, i_{td} :	Composantes des courants injectés au réseau dans le repère (dq) .

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir ! [1]

Avec l'augmentation de la pollution à cause de l'industrialisation croissante de la majorité des pays, et la surpopulation sur l'ensemble du globe, la demande sur l'énergie électrique est de plus en plus croissante et les sources d'énergie traditionnelles de moins en moins abondantes. L'homme s'est alors orienté vers des énergies renouvelables mais surtout propres sans danger. [2]

Face à la flambée des prix pétrole et l'épuisement, à plus ou moins long terme, des sources d'énergies fossiles, différentes solutions de substitution ont été envisagées. Le début du 21^{ème} siècle a été marqué par une ruée spectaculaire vers les énergies renouvelables. L'ultime objectif est de s'affranchir de la dépendance vis-à-vis des sources conventionnelles d'énergies.

Récemment, cette tendance a été accrue, d'autant plus par des considérations d'ordre écologique. En effet, la consommation élevée des sources énergétiques fossiles traditionnelles cause de sérieux dommages environnementaux. Aussi, tous les pays sont appelés aujourd'hui à contribuer à l'effort international de lutte contre les changements.

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : d'origine mécanique (houle, éolien), d'origine électromagnétique (modules photovoltaïques) ou d'origine thermique (géothermie, solaire thermique,).

En particulier, l'énergie éolienne peut être convertie en énergie mécanique pour en énergie électrique par l'utilisation de générateurs appropriés. Cette forme de conversion s'est considérablement développée dans le monde, aussi bien à travers des applications domestiques ou bien industrielles en connexion avec de puissance électrique. [3]

On va utiliser la variation de puissance à l'aide du MPPT basé de MSAP (machine synchrone a aimant permanent). Pour ce faire, la mémoire sera organisée en trois chapitres comme suit :

Le premier chapitre qui traitera des généralités sur l'énergie éolienne, à commencer par quelques notions fondamentales sur l'énergie éolienne ainsi qu'un état de l'art sera présenté. Il s'agit d'une étude assez détaillée du système éolien et des différentes structures existantes (les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable et leur constitution). On aborde les différentes définitions des constituants qui rentrent en jeu ainsi que les différents types des génératrices utilisées dans la chaîne de conversion. [5]

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié la modélisation des éléments de la chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimant permanent, ces éléments sont modélisés par des équations mathématiques.

Dans le troisième chapitre, sera consacré à la commande de la cascade de conversion en appliquant la commande prédictive. Cette commande a pour but de pouvoir capturer le maximum de puissance possible du vent et fait une comparaison entre les puissances optimales et les puissances réelles.

I.1. Introduction :

Les besoins énergétiques de la planète s'amplifient à une vitesse croissante dans toutes les régions du monde. La dépendance excessive vis-à-vis des importations d'énergie en provenance d'un petit nombre de pays, pour la plupart instables politiquement, et la volatilité des prix du pétrole et du gaz se traduisent par une situation chancelante de l'approvisionnement énergétique qui représente déjà un lourd fardeau pour l'économie mondiale. D'autre part les effets néfastes des combustibles fossiles sur l'environnement ajoutent une autre dimension de ce problème. Les usines d'énergie chargent l'atmosphère en gaz qui génèrent les effets de serre et des particules créant ainsi des îlots de chaleur, cause principale des changements du climat. La génération et la consommation d'énergie sont responsables de 50 à 60 pour cent des gaz à effets de serre émis dans l'atmosphère. L'utilisation intense d'énergie augmente la pollution atmosphérique ce qui laisse penser la croissance supplémentaire dans le proche avenir. Delà vient l'importance de soutenir des sources d'énergie comme celle du vent [6].

Dans ce chapitre, on s'intéresse aux différents types d'éoliennes avec leur constitution et leurs principes de fonctionnement, en plus d'étudier l'énergie cinétique du vent et différents types de générateurs.

I.2. La production éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps été oublié, cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 30 ans un développement sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. [7]

I.3 Définition de l'énergie éolienne :

Un générateur d'air est un dispositif qui convertit une partie de l'énergie éolienne (fluide de mouvement) en énergie mécanique disponible sur un pôle de transport, puis en énergie électrique via un générateur.

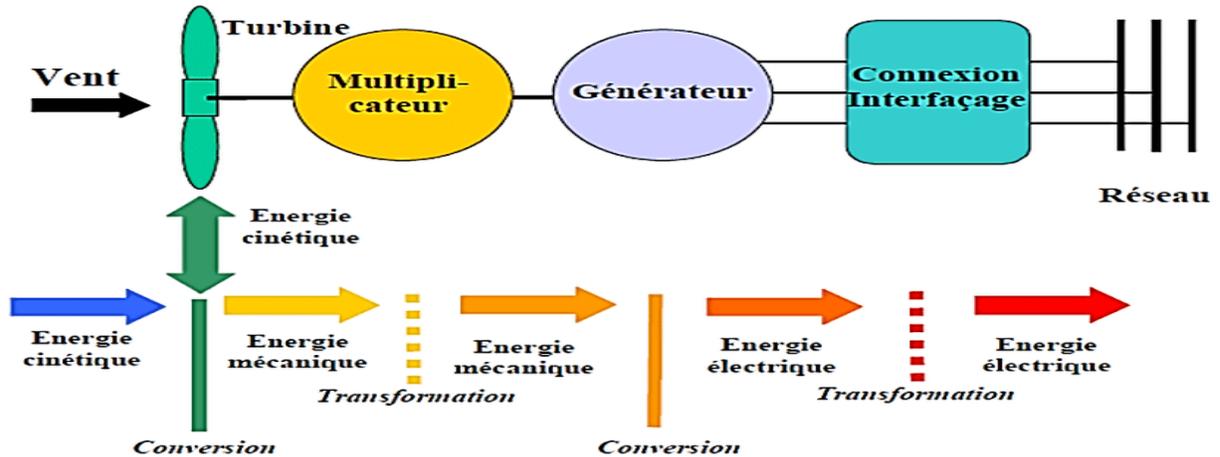


Figure I-1 : conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.4. Direction et vitesse du vent :

Le vent souffle à partir des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et grandes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Dans l'hémisphère Nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère Sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents. La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories. [8]

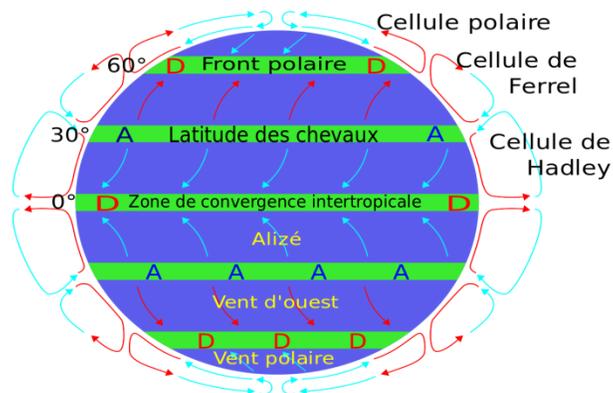


Figure I-2 : Circulation du vent dans le monde.

I.5. Aérogénérateur :

Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. [9]

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

La (Figure I-3) illustre la correspondance taille-puissance des éoliennes.

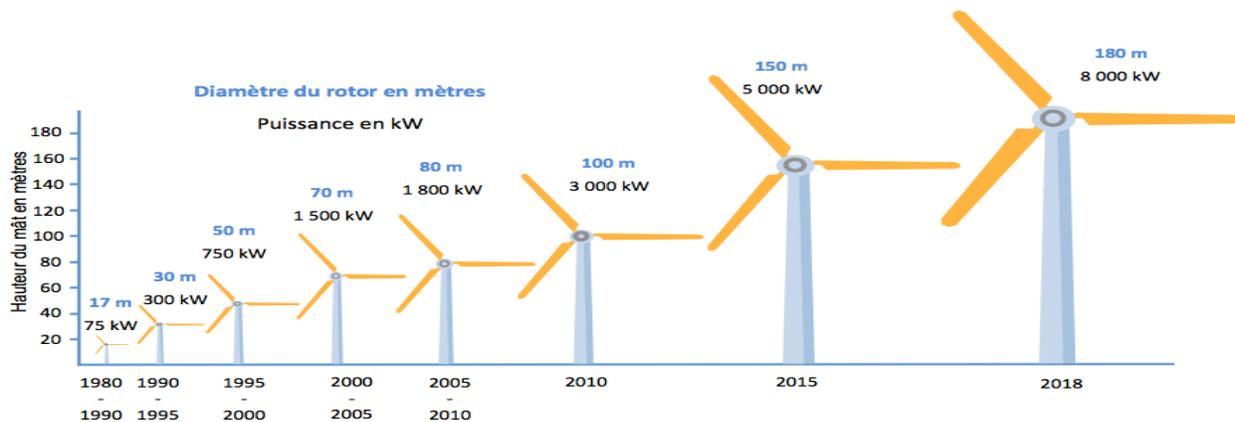


Figure I-3 : Correspondance taille-puissance des éoliennes.

I.5.1. Principaux composants d'une éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne « classique » est généralement constituée de trois éléments principaux.

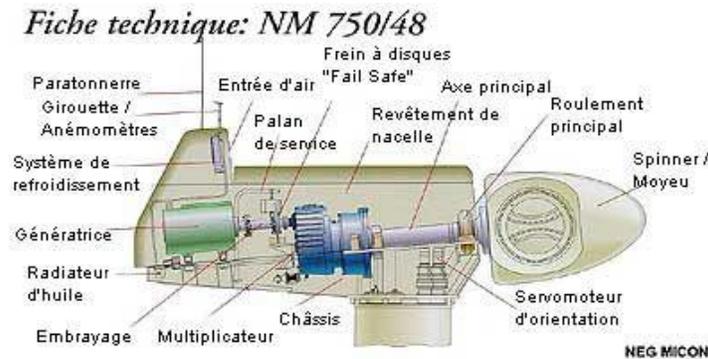


Figure I-4 : Constitution d'une éolienne.

Le mât :

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur). [8]

La nacelle :

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de commande, système de refroidissement, frein à disque différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne. [7]

Le rotor :

Partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute.

I.5.2 Types d'aérogénérateurs :

Après ses premières utilisations à l'époque de la Perse Antique, la technologie qui permet de profiter de l'énergie du vent a évolué sous diverses formes et types de machines. La structure de base des turbines éoliennes consiste aujourd'hui en un rotor pour capter l'énergie du vent en la transformant en énergie en rotation, un système d'engrenage pour démultiplier la vitesse de rotation du rotor, une machine électrique pour convertir l'énergie mécanique en électricité. Un schéma de principe est donné à la (Figure I-5). Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes mais

celles-ci appartiennent principalement à deux groupes selon l'orientation de leur axe de rotation : celles à axe horizontal et celles à axe vertical. [10]

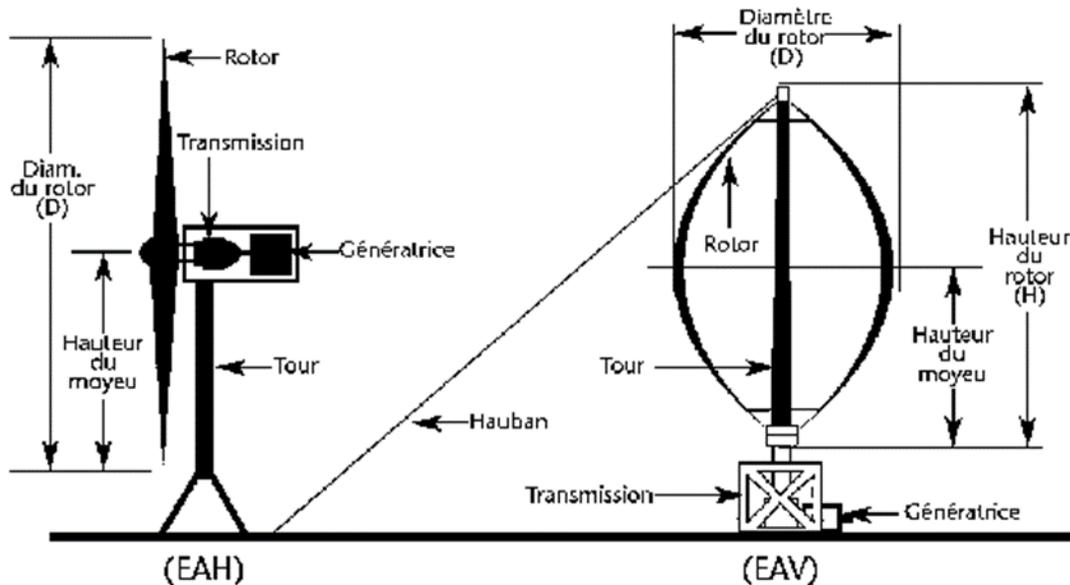


Figure I-5 : Les Différents types d'éoliennes.

I.5.2.1 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 accessible 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 [11].

I.5.2.1.1 Eolienne à axe vertical de type Darrieus :

Encore méconnues, les éoliennes à axe vertical de type Darrieus sont plus adaptées à des secteurs nécessitant l'intégration aux bâtiments, les zones extrêmes (observatoires ...) ...etc. Ayant souvent un rendement moins important que les éoliennes "classiques", ce type d'aérogénérateurs permet en revanche de s'affranchir des limites introduites par la taille des pales et leur vitesse de rotation. L'encombrement total est plus faible, et dans la plupart des cas, le générateur est situé à la base de l'éolienne, ce qui est intéressant pour l'installation et la maintenance. Le principe est celui d'un rotor d'axe vertical qui tourne au centre d'un stator à ailettes. Cette solution réduit

considérablement le bruit tout en autorisant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220 km/h et ce, quelle que soit leur direction. Le principal défaut de ce type d'éoliennes est leur démarrage difficile dû aux frottements générés par le poids du rotor qui pèse sur son socle. [12]

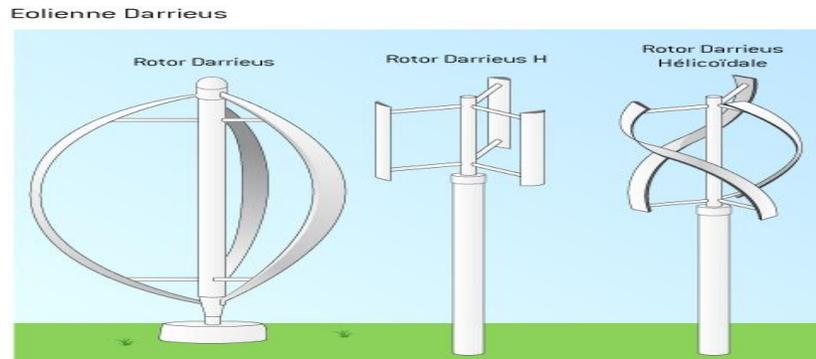


Figure I-6 : rotor de Darrieus.

1.5.2.1.2 Eolienne à axe vertical de type Savonius :

L'éolienne de modèle Savonius utilise la traînée différentielle entre les aubes constituées de parties cylindriques en opposition. Un couple se crée mettant alors le générateur en mouvement. La vitesse de démarrage de ces machines est plutôt basse, autour de 2 m/s. Les éoliennes à axe vertical s'adaptent particulièrement bien aux effets de la turbulence et leur conception induit de bruit. Elles conviennent donc tout à fait bien au milieu urbain. En revanche, ce concept est fortement pénalisé par son coefficient de puissance ($C_p \text{ max} \sim 0.2$). [12]

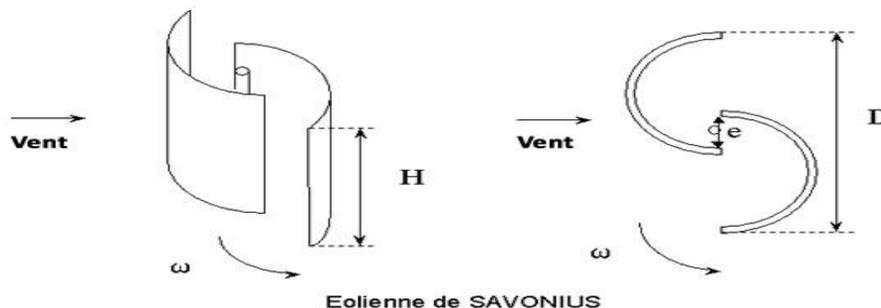


Figure I-7 : rotor de Savonius

1.5.2.2 Eoliennes à axe horizontale :

Ces éoliennes ont leur axe de rotation à l'horizontale du terrain mais aussi presque parallèle à la direction du vent. La majorité des éoliennes présentes dans le marché appartiennent à cette catégorie. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aéro-dynamiquement. Le plus souvent

le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pâles constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales.

Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Par contre, elle rend sa conception plus complexe mais aussi plus coûteuse [13].



Figure I-8 : Les éoliennes à axe horizontal.

I.6. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne :

I.6.1. Générateurs asynchrones :

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

La robustesse et le faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur les bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

Il existe plusieurs types de configurations utilisant la machine asynchrone dans toutes ses formes (Machine asynchrone à rotor bobiné, Machine asynchrone à cage, Machine asynchrone à double stator, MADA...etc) [2]

I.6.1.1 Machines asynchrones à double alimentation (MADA) :

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence. Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de puissance peut être réduit.

Une des solutions très intéressantes et permettant d'obtenir une variation de la vitesse de rotation d'environ 30% autour de la vitesse de synchronisme consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au rotor à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur réseau (Figure I.9). En général, le dimensionnement de la chaîne rotorique se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit à assurer une variation de 30% de la plage de vitesse. Ceci constitue le principal avantage de cette structure. Par contre son inconvénient majeur est lié aux interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau [15].

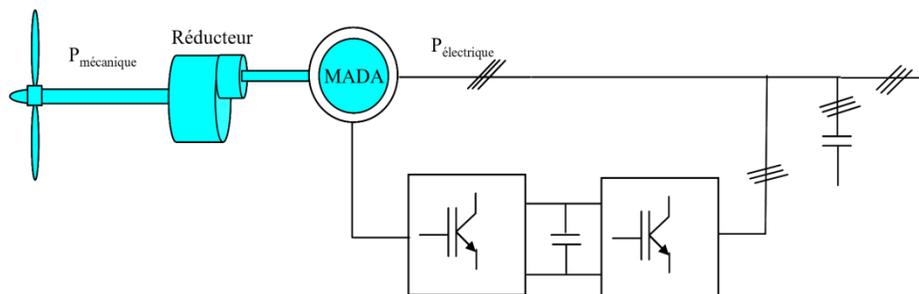


Figure I.9 : Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation- régulation de la vitesse de rotation par chaîne rotor alimentation. [15]

I.6.1.2 Machine asynchrone à double stator :

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure (I.10)).

Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles est conçu pour les petites vitesses de vent. Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner à des vitesses de vent élevées.

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième bobinage statorique rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble [14].

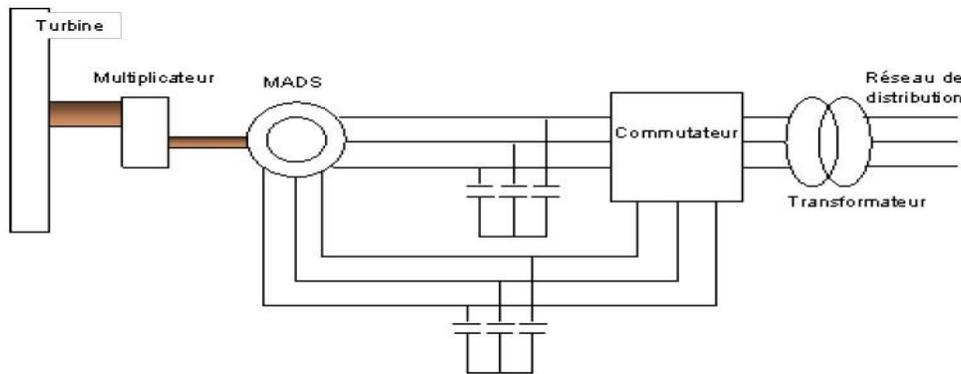


Figure I-10 : Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator

I.6.1.3 Machine Asynchrones à cage (MAS) :

Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs pour compenser la puissance réactive et à un démarreur automatique progressif à gradateur pour éviter des régimes transitoires perturbateurs lors de la mise sous tension. Ces machines tournant généralement à 1000 ou 1500 tr/min nécessitent d'être associées à leur turbine éolienne qui est beaucoup plus lente à travers un multiplicateur de vitesse, organe qui subit au cours de sa vie des sollicitations normales ou pas et qui exige un grand emplacement. Il a un poids considérable et nécessite un débit d'huile important. [16]

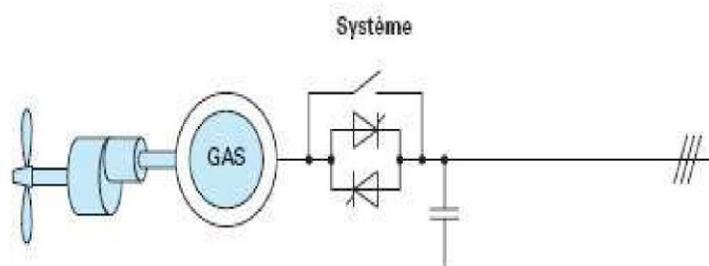


Figure I-11 : Génératrice asynchrone à cage intégrée dans une chaîne éolienne.

I.6.2 Génératrices synchrones :

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur, le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statorique. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau, ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.

I.6.2.1 Machine synchrone à rotor bobiné : [16]

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.

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.

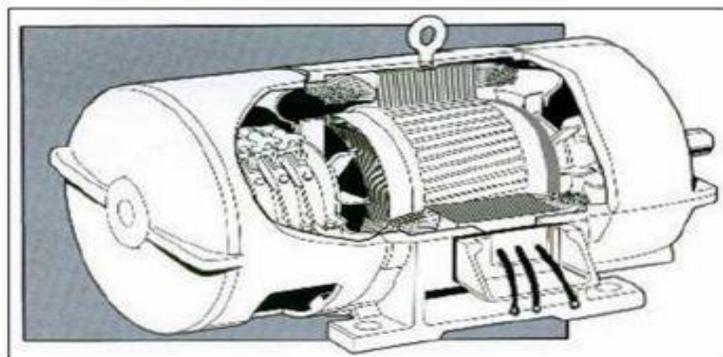


Figure I-12 : Machine synchrone à rotor bobiné.

I.6.2.2 Machines synchrones à aimants permanents :

Les systèmes de conversion basés sur des machines synchrones à aimants permanents à grand nombre de pôles, sont caractérisés par l'absence du multiplicateur de vitesse. Ce mode de transformation de puissance (transmission direct) offre un couple massique suffisant pour garantir l'entraînement de la machine. La machine synchrone à aimants permanents est la plus performante de toutes les machines existantes. De par son aimantation permanente à plusieurs pôles lui permet d'éliminer plusieurs sièges de pertes de puissance et de bruit, notamment le système bagues balais et le multiplicateur de vitesse. Cependant, le contrôle de l'excitation rotorique devient impossible.

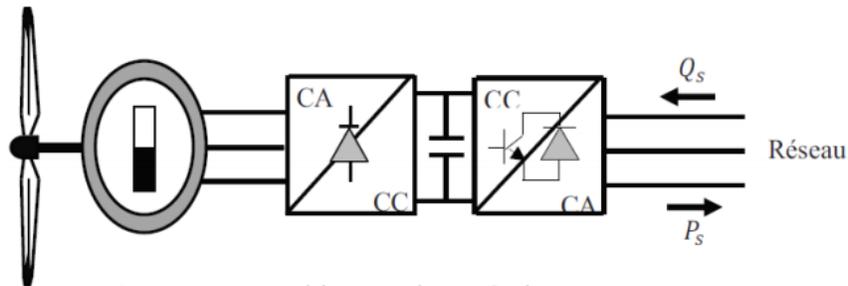


Figure I-13 : Machines synchrones à aimants permanents.

I.7. Eoliennes à base de génératrice synchrone à aimant permanent en fonctionnement isolé et autonome :

I.7.1 Structure avec redresseur à diodes :

Cette configuration est la plus simple. Elle trouve ses applications dans le cas de très petites puissances. Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la figure (I.14). Dans ce cas, il n'y a aucun composant commandé, pas ou peu de capteurs et le coût de l'équipement est alors minimal. Le fonctionnement est « naturel » mais nécessite un choix très précis de tous les paramètres système [17].

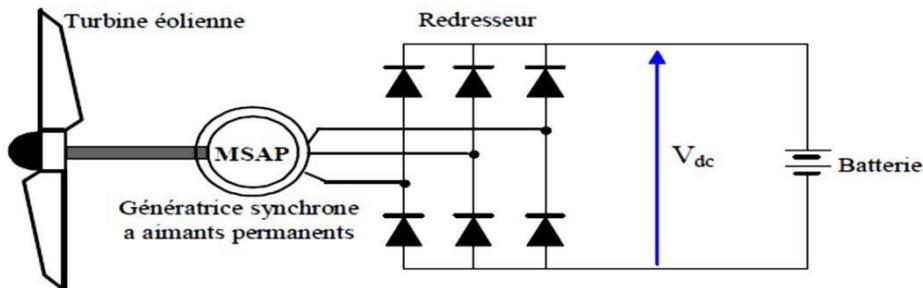


Figure I-14 : Machine synchrone avec redresseur à diodes.

I.7.2 Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur :

Le cadre de changement d'énergie dédié par l'éolienne doit permettre son fonctionnement sous une force électrique extrême. De cette façon, l'illustration simplifiera ces capacités d'énergie quelle que soit la vitesse du vent. C'est la norme à suivre pour la plus grande perspective de contrôle (M. P. P. T). La coopération d'un redresseur à diode avec un générateur synchrone pour des aimants durables nécessite toutefois des obstacles qui ne permettent pas d'atteindre cet objectif de manière fiable. En place avec guérir ceci, un chopper-down-down, nourrissant autour d'une batterie de capacité, sera orchestré accompagnant ces span de diode. [18]

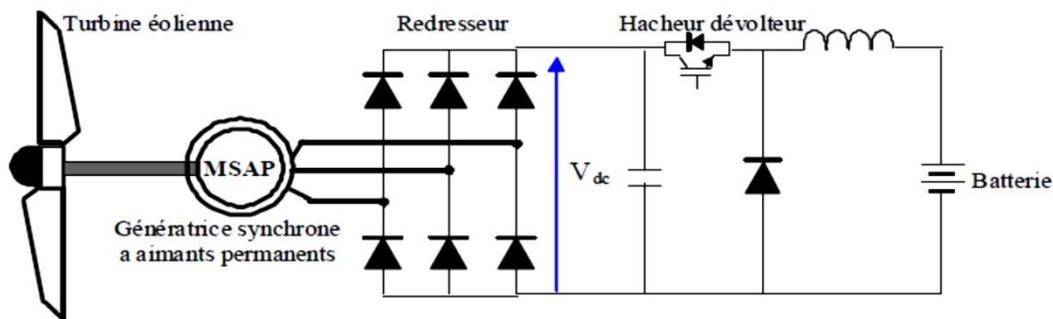


Figure I-15 : Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur.

I.7.3 Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont :

Toujours dans la même optique d'optimisation du rendement énergétique, une structure en pont à commande différentielle permet de fonctionner avec un rapport cyclique proche de 0,5 en commandant les deux interrupteurs T1 et T2. Cette configuration est avantageuse en termes de sûreté de fonctionnement mais nécessite deux fois plus de composants, d'où un coût conséquent et des pertes plus élevées. [17]

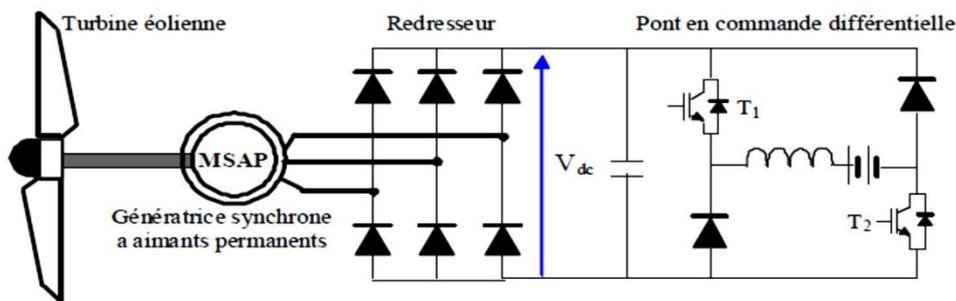


Figure I-16: Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont

I.7.4 Structure avec redresseur à MLI : [18]

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le cas du montage de la figure I.17, il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation. Par contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six interrupteurs, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de position.

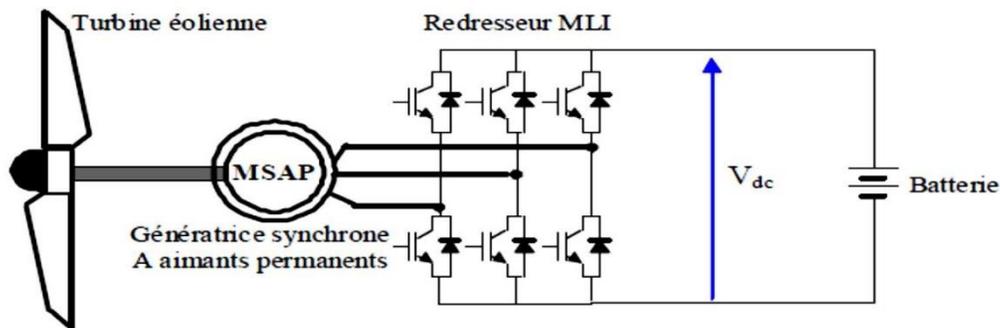


Figure I-17: Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI.

I.8 Eoliennes à vitesse fixe et variable :

I.8.1 Eolienne à vitesse variable :

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et limite la plage de vitesses de vent exploitable. Ces deux principaux inconvénients peuvent, en grande partie, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire. Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue [20].

I.8.2 Eolienne à vitesse fixe :

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statorique. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif).

Le système d'orientation des pales (pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au travers un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1%. [20]

I.9. Connexion au réseau :

Le réseau de distribution impose la stabilité de la tension et de la fréquence. Il faut donc gérer les phases transitoires de fonctionnement de l'éolienne, tels que le démarrage, l'arrêt ou l'absorption de rafales. Un démarrage progressif de l'éolienne à l'aide des thyristors est alors envisagé. Ces thyristors jouent le rôle d'interrupteurs assurant une connexion ou une déconnexion graduelle au réseau. Ces interrupteurs peuvent aussi être des disjoncteurs de dérivation. Ces processus ne sont pas pris en compte pour cette étude. Les éoliennes doivent être rependues à certains règles pour satisfaire aux exigences techniques de raccordement au réseau, Actuellement, le code de réseau Algérien ne tient pas compte des énergies renouvelables et notamment de l'énergie éolienne. Dans la région d'Adrar, le réseau n'est pas interconnecté avec le nord. C'est un réseau local (ou micro réseau). Différents composants sont installés lors de la connexion de l'éolienne :

- Le transformateur élévateur de tension : Les générateurs de turbine d'éolienne ont en général une tension de sortie de l'ordre de 690 (V). Le transformateur permet d'élever la tension pour le raccord au réseau de distribution « par exemple 20 (kV) ». Actuellement, il n'y a pas d'éolienne directement connectée sur le réseau de transport.
- Les batteries de condensateurs : Pour les systèmes de conversion éolienne se basant sur la machine asynchrone, améliorer le facteur de puissance de l'installation peut améliorer en connectant au réseau trois batteries monophasées de condensateurs couplées en triangle. En mode autonome, les batteries de condensateurs deviennent indispensables pour la magnétisation de la machine asynchrone. Ces batteries ne sont pas obligatoires pour la MADA. [21]

I.10. Stockage d'énergie électrique : [22]

Le stockage d'énergie joue un rôle réactif et multifonctionnel dans le réseau d'alimentation, ce qui permet une meilleure gestion des ressources disponibles. En coopération avec les systèmes de production d'électricité en modifiant les énergies renouvelables, les systèmes de stockage d'énergie (SSE) peuvent exagérer la quantité d'électricité générée par les centrales électriques à éolienne ou solaires en économisant de l'énergie à partir de sources renouvelables.

De la méthode de stockage d'énergie peut être classé en deux catégories :

- **Stockage à court terme** : pour cette classe, la durée de stockage est inférieure à 10 minutes. Ce

type est utilisé pour atténuer les fluctuations de l'énergie générée par le parc et pour contrôler la tension et la fréquence du réseau (traitement initial).

- **Stockage à long terme** : la durée de stockage est supérieure à 10 minutes. Ce type est utilisé pour répondre au pic d'énergie pendant les heures de pointe du réseau et en l'absence d'air.

I.11. Avantages et inconvénients des énergies éoliennes :

- **Avantages** : [23]

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- ✓ L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).
- ✓ Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- ✓ L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.
- ✓ La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie : le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- ✓ 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.

Inconvénients :

- ✓ Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la

nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux.

- ✓ La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- ✓ Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils, extrémités de pale, mécanismes de transmission etc.
- ✓ Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques.

I.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné une brève description et un rappel des concepts nécessaires à la compréhension du système de conversion éolienne. Des formes non similaires d'éoliennes ont été décrites, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Les composantes des différents types des chaînes de conversion ont été présentées. Dans le chapitre suivant, on va présenter la modélisation mathématique des différentes composantes de la chaîne de de conversion.

II.1 Introduction :

Après avoir présenté les différents types d'éolienne, et les systèmes de conversion d'énergie éolienne, nous allons dans cette partie à modéliser les éléments de la chaîne de conversion constituée d'une turbine éolienne, génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), un redresseur et un onduleur triphasé. Pour le préparer à la simulation de la chaîne de conversion dans le troisième chapitre.

II.2 Modélisation de l'énergie du vent :

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante. La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période l'hiver et au niveau des mers (offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse. La vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques. [24]

$$v_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (\text{II-1})$$

Avec :

A : La valeur moyenne de la vitesse du vent.

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre k .

ω_k : Pulsation de l'harmonique de l'ordre k .

i : Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

II.3 Le théorème de BETZ :

La théorie globale du moteur éolien s'applique essentiellement à axe horizontal. Betz suppose que le générateur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse et à l'infini en aval d'une vitesse, représenté sur la figure (II.1) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur est nécessairement inférieure de la vitesse V_2 en aval. Soit donc V_1 la vitesse de l'air en amont, V_2 celle en aval V et celle au travers de S , la section balayée par les pales de l'éolienne.

Soient $\left(\frac{V_1+V_2}{2}\right)$ la vitesse moyenne et m_{cste} la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde : [24]

$$m_{cste} = \frac{\rho S(V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II-2})$$

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

$$p_m = \frac{m_{cste} \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II-3})$$

Soit en remplaçant m_{cste} par son expression dans (II.3) :

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

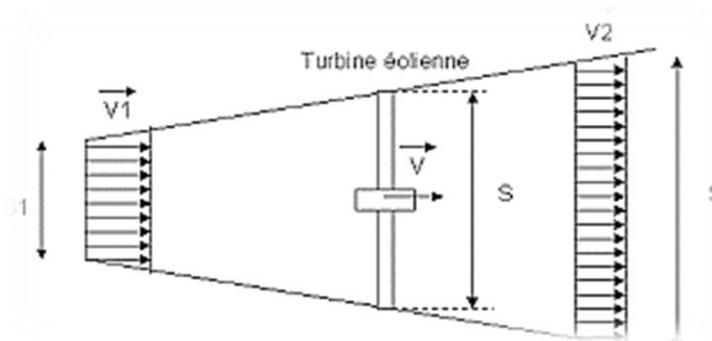


Figure II.1 : Tube de courant autour d'une éolienne.

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

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

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

$$\frac{p_m}{p_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} = C_p \quad (\text{II-6})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus selon (figure II.2) on s'aperçoit que le rapport p_m/p_{mt} appelé aussi coefficient C_p présente un maximum de $16/27$ soit 0.59 . C'est cette limite théorique, appelée limite de Betz, qui fixe la puissance maximale extraite pour une vitesse du vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [15].

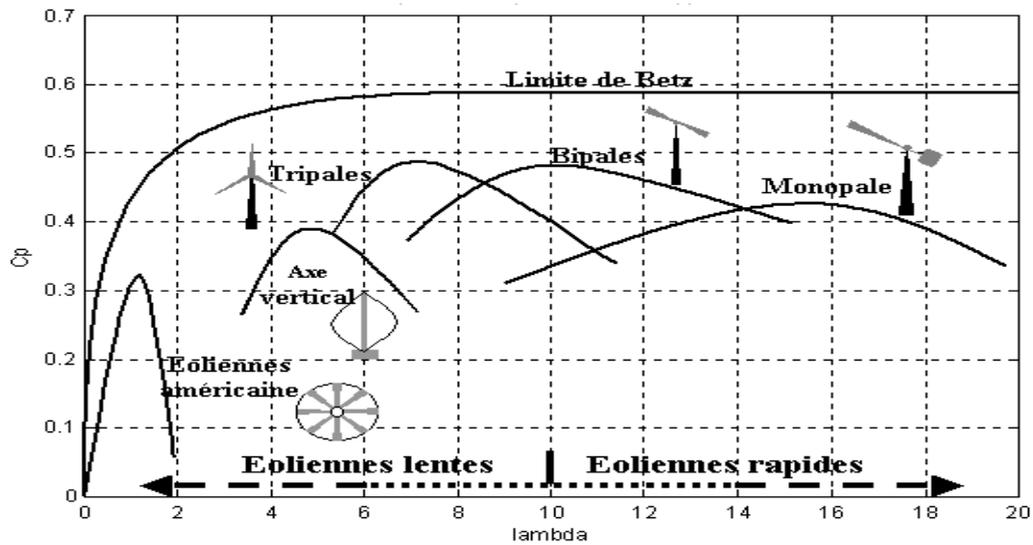


Figure II.2 : Coefficient de puissance pour les différents Types d'éoliennes.

II.4 Modélisation de la turbine :

Le dispositif qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse (Fig II.3).

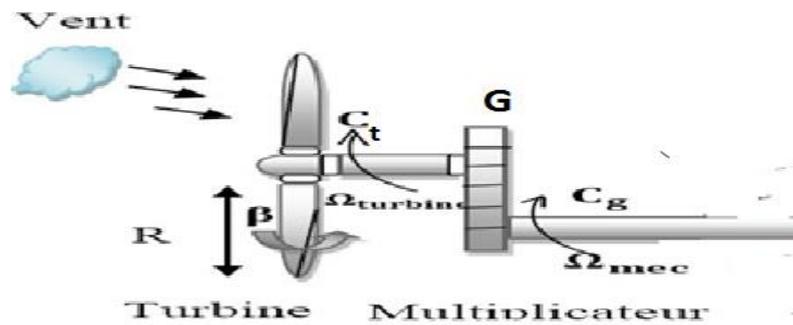


Figure II.3 : Schéma de la turbine éolienne.

II.4.1. Modèle des pales :

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R, est donnée par la relation suivante : [25]

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho s V^3 = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \tag{II-7}$$

La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne P_t peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_t = C_p P_{vent} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V^3 \tag{II-8}$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise la vitesse réduite (spécifique) λ qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \quad (\text{II-9})$$

Le coefficient de puissance est une fonction non linéaire dépend à la fois de l'angle de calage β et de la vitesse réduite λ . L'équation analytique de C_p en fonction de λ et β , comme indiqué dans le bloc de l'éolienne présenté dans le logiciel Matlab/Simulink, est donnée par :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (\text{II-10})$$

Avec :

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,0035}{\beta^3 + 1}, \quad (\text{II-11})$$

La figure II.4 indique l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse réduite λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β . On constate que pour chaque valeur de β , le coefficient de puissance a une valeur maximale, correspondant à une vitesse réduite optimale λ_{opt} .

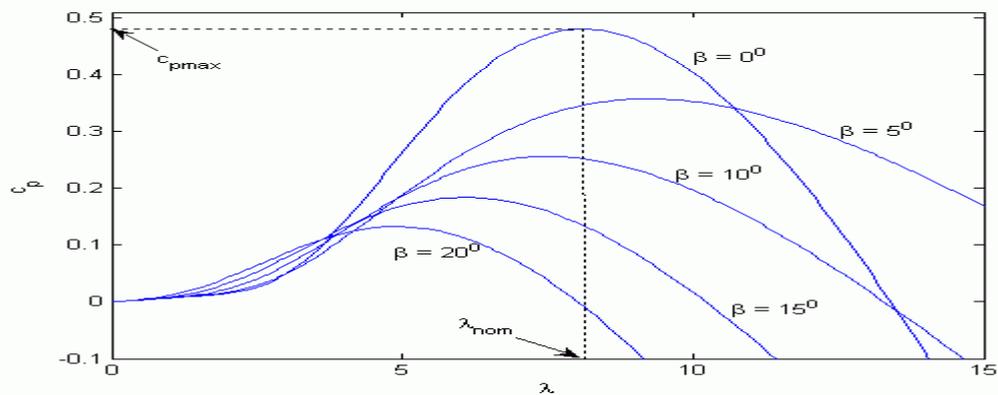


Figure II.4 : coefficient C_p en fonction de λ

Pour la suite de ce travail, on considère que l'angle de calage β est fixé à zéro.

II.4.2 Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes : [26]

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II-12})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II-13})$$

Où :

C_g : est l'effet du couple de la turbine sur l'arbre de la génératrice.

G : est le gain du multiplicateur.

II.4.3 Équation mécanique de l'arbre :

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J_t constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g = cte \tag{II-14}$$

L'absence de multiplicateur de vitesse se justifie par la génératrice synchrone à aimants permanents retenue qui possède un grand nombre de paires de pôles [27].

$$\begin{cases} C_t - C_{em} - f_v \Omega_g = J_t \frac{d\Omega_g}{dt} \\ \frac{\Omega_t}{G} = \Omega_g \\ J_t = J_{pales} + J_g + J_{arbre} = cte \end{cases} \tag{II-15}$$

Avec :

- $C_m = f_v \Omega_g$: Couple de frottement.
- f_v : Coefficient de frottements visqueux dans la génératrice.

Remarque : le coefficient de frottement visqueux de la turbine est négligeable. [2]

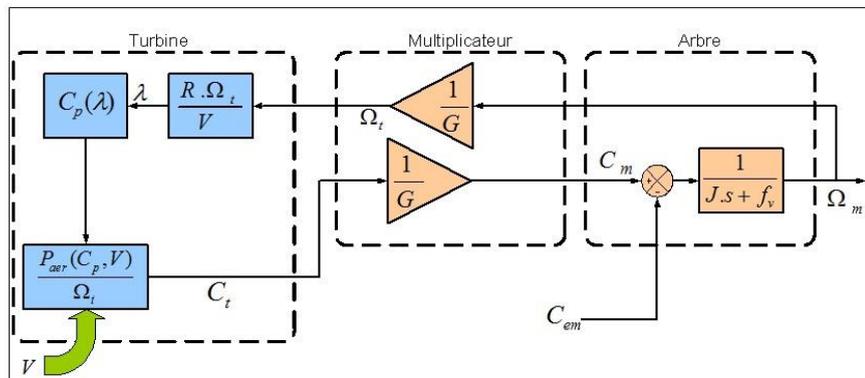


Figure II.5. Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne

II.5. Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents :

Dans la machine à aimants permanents MSAP, l'inducteur est remplacé par des aimants. Le champ d'excitation créé par les aimants permanents, présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotorique. La machine synchrone à aimants permanents est utilisée largement dans plusieurs applications comme les machines à outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux, la traction électrique...).

II.5.1. Les Hypothèses simplificatrices :

Afin de simplifier la modélisation de la machine synchrone, il est nécessaire de poser les hypothèses simplificatrices suivantes [28] :

- ❖ La bobine de stator connectée en étoile, neutre dans l'air pour éliminer l'élément homopolaire des courants.
- ❖ La saturation du circuit magnétique est négligée, elle aboutit à l'expression des flux magnétiques en tant que fonctions linéaires des courants des phases.
- ❖ La distribution de la FMM dans l'entrefer est sinusoïdale, les harmoniques d'espace sont alors négligés.
- ❖ Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont négligées.
- ❖ L'effet de peau et de la température est négligé.

II.5.2. Mise en équations de la machine synchrone à aimants permanents :

Le schéma représentatif de la machine à modéliser est donné par la figure (II.5)

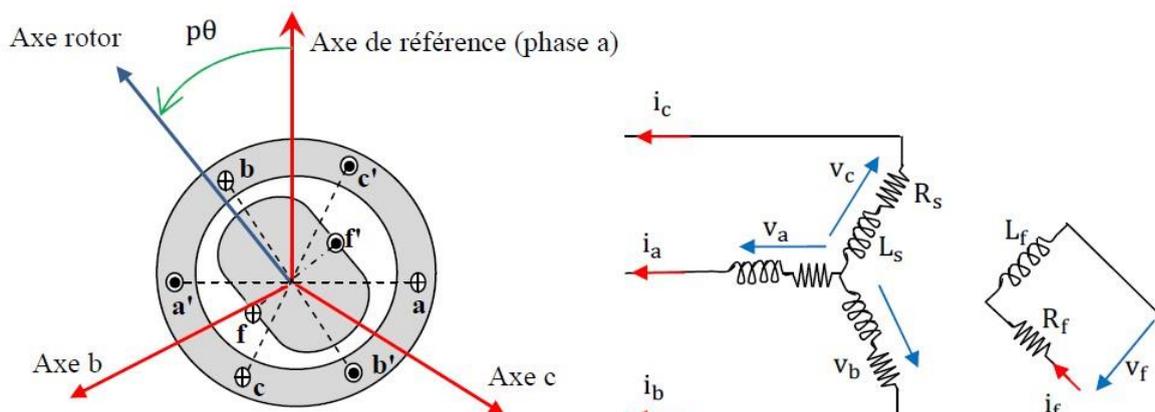


Figure II.6 : Représentation symbolique de la machine synchrone

II.5.3. Equations électriques :

II.5.3.1. Equations électriques dans le repère fixe (a,b,c):

$$[\mathbf{v}_s] = [\mathbf{R}_s] \cdot [\mathbf{i}_s] + \frac{d}{dt} [\boldsymbol{\varphi}_s] \quad (\text{II-16})$$

Avec :

$$[\mathbf{v}_s] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}; [\mathbf{R}_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [\mathbf{i}_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [\boldsymbol{\varphi}_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-17})$$

Ou :

$[\mathbf{v}_s]$: Vecteur des tensions statoriques.

$[\mathbf{R}_s]$: Matrice des résistances statorique.

$[\mathbf{i}_s]$: Vecteur des courants statoriques.

$[\boldsymbol{\varphi}_s]$: Vecteur des flux statoriques.

En vertu de l'hypothèse d'une répartition spatiale sinusoïdale de l'induction, les flux induits par les aimants dans les trois phases statorique (a, b, c) sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \frac{2\pi}{3} & \cos \frac{4\pi}{3} \\ \cos \frac{4\pi}{3} & \cos 0 & \cos \frac{2\pi}{3} \\ \cos \frac{2\pi}{3} & \cos \frac{4\pi}{3} & \cos 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \varphi_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II-18})$$

Avec :

- φ_{abc} : Les flux des axes (a, b, c).
- φ_f : Flux de l'aimant permanent.
- L_s : L'inductance propre des phases statorique.

Les enroulements statorique de la génératrice synchrone est connectés en étoile à neutre isolé ce qui explique l'inexistence de la composante homopolaire et même s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la génératrice est donc représenté par deux variables indépendantes [29].

II.5.3.2. Equations électriques dans le repère de Park (d, q) :

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statorique fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor (Figure II.5).

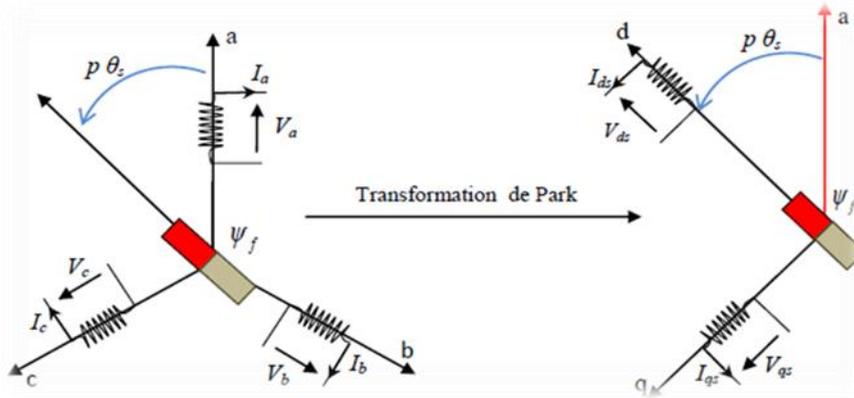


Figure II.7 : Représentation d'une GSAP dans le repère (d, q).

En réalité, la transformation de Park pour fait un repère diphasé, équivalent du repère triphasé à partir d'un passage définie par la matrice $[p(\theta_s)]$ reliant les grandeurs des deux domaines (abc) et (d, q) par l'équation (II.16) [24].

$$X_{dqo} = [p(\theta_s)] \cdot X_{abc} \Rightarrow X_{abc} = [p(\theta_s)]^{-1} \cdot X_{odq} \quad (\text{II-19})$$

La Matrice de Park est :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-20})$$

L'inverse de $[P(\theta)]$:

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-21})$$

Le changement de variable effectué aux équations des tensions, courants et flux, on obtient :

$$[i_{dq}] = P(\theta)[i_{abc}] \quad (\text{II-22})$$

$$[v_{dq}] = P(\theta)[v_{abc}] \quad (\text{II-23})$$

$$[\varphi_{dq}] = P(\theta)[\varphi_{abc}] \quad (\text{II-24})$$

Les équations électriques de la MSAP convention moteur sont données par :

$$v_d = R_s \cdot i_d + L_s \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_d - \omega \cdot L_s \cdot i_q \quad (\text{II-25})$$

$$v_q = R_s \cdot i_q + L_s \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_q - \omega \cdot L_s \cdot i_d \quad (\text{II-26})$$

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

$$v_d = -R_s \cdot i_d - L_s \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_d + \omega \cdot L_s \cdot i_q \quad (\text{II-27})$$

$$v_q = -R_s \cdot i_q - L_s \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_q - \omega \cdot L_s \cdot i_d + \omega \cdot \varphi_f \quad (\text{II-28})$$

II.5.4. Equations magnétiques :

$$\varphi_d = L_d \cdot i_d + \varphi_f \quad (\text{II-29})$$

$$\varphi_q = L_q \cdot i_q \quad (\text{II-30})$$

❖ L_q et L_d : les inductances directe et en quadrature.

❖ φ_f : représente le flux des aimants.

II.5.5. Equations du couple électromagnétique et d'équation mécanique :

Pour compléter le modelé électromécanique de la GSAP, on doit ajouter l'expression du couple électromagnétique ainsi que l'équation mécanique. L'expression du couple électromagnétique : [29]

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_q - L_d) i_q i_d + i_q \varphi_f] \quad (\text{II-31})$$

Avec P est le nombre de paire de pole.

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

$$C_m - C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (\text{II-32})$$

C_m : couple moteur appliqué sur la génératrice

J : moment d'inertie total de la machine,

f : coefficient de frottement visqueux.

Ω : Vitesse mécanique

II.6. Modélisation des convertisseurs :

II.6.1. Modélisation de redresseur triphasé double alternance à diodes :

Le redresseur est un convertisseur alternatif/ continu. Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternative il est représenté par figure suivante :

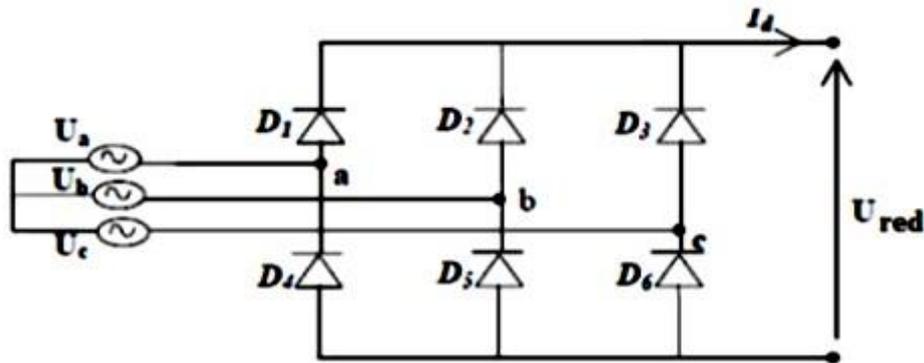


Figure II.8 : Redresseur triphasé double alternance à diode.

Ce type de redresseur comporte trois diodes à cathode comme assurant l'aller du courant ($i_d(t)$), D1, D2 et D3, et trois diodes à anode comme assurant le retour du courant ($i_d(t)$), D4, D5 et D6. Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension :

Si l'effet de l'empiètement est négligé, la valeur instantanée de la tension redressée peut être exprimée par : [30]

$$\begin{aligned} V_a(t) &= V_{max} \sin(\omega t) \\ V_b(t) &= V_{max} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c(t) &= V_{max} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (\text{II-33})$$

La tension redressée à la sortie de redresseur, est donnée par

$$U_{red}(t) = \max[v_a(t), v_b(t), v_c(t)] - \min[v_a(t), v_b(t), v_c(t)] \quad (\text{II-34})$$

Sa valeur moyenne est donnée par :

$$\overline{U_{red}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{max} \quad (\text{II-35})$$

2.6.2 Modélisation du bus continu

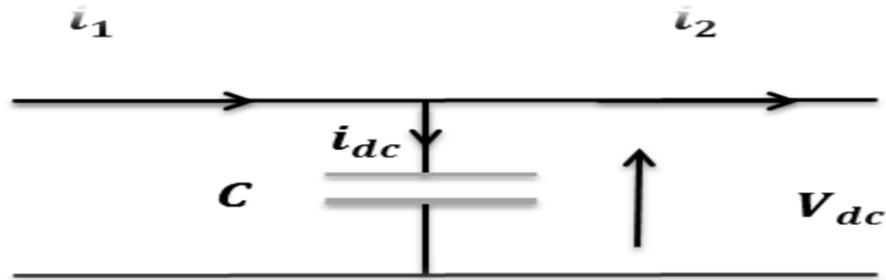


Figure II.9 : Schéma électrique du bus continu

Le schéma électrique de la (figure II.9) permet par la loi des nœuds d'établir la relation suivante [31] :

$$\frac{dV_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{c} i_{dc}(t) \quad (\text{II.36})$$

$$i_{dc} = i_1 - i_2 \quad (\text{II.37})$$

Avec

- i_1 : Le courant redressé.
- i_2 : Le courant à onduleur.
- i_{dc} : Le courant de charge du condensateur.

De la relation (II.34), après intégration, on obtient :

$$V_{dc} = \frac{1}{c} \int_{t_1}^{t_2} i_{dc} dt + V_{dc0} \quad (\text{II.38})$$

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

$$V_{dc} = \frac{1}{c.s} \cdot i_{dc} \quad (\text{II.39})$$

II.6.2. Modélisation de l'onduleur de tension :

Un onduleur est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou des thyristors *GTO* pour les grandes puissances.

Il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Pour assurer la continuité en courants chaque interrupteur est monté en antiparallèle avec une diode de récupération. Les interrupteurs $(F1, F4)$, $(F2, F5)$, $(F3, F6)$ sont contrôlés de manière complémentaire pour éviter le court-circuit de la source. L'onduleur permet de transformer un signal d'entrée continu en un signal de sortie alternatif. (Figure II.10) [31].

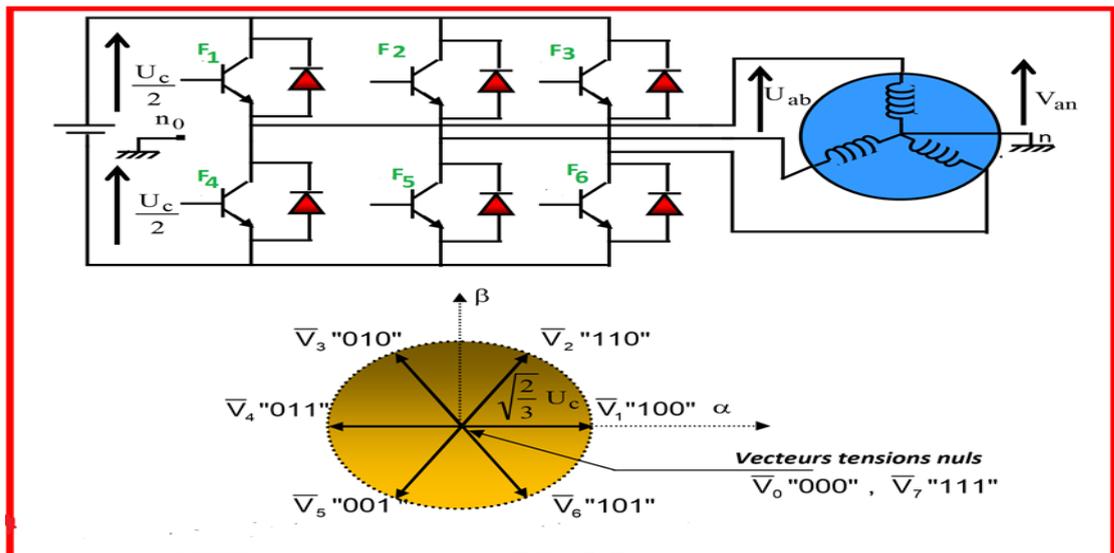


Figure II.10 : Le schéma global d'un onduleur à MLI.

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peuvent être défini par trois grandeurs booléennes de commande S_i ($i=abc$).

➤ **Branche1**

$$F_i = 0 \text{ si } F_1 \text{ est en position fermé et } F_4 \text{ est à ouvert}$$

$$F_i = 1 \text{ si } F_1 \text{ est en position ouvert et } F_4 \text{ est à fermé}$$

➤ **Branche2**

$$F_i = 0 \text{ si } F_2 \text{ est en position fermé et } F_5 \text{ est à ouvert}$$

$$F_i = 1 \text{ si } F_2 \text{ est en position ouvert et } F_5 \text{ est à fermé}$$

➤ **Branche3**

$$F_i = 0 \text{ si } F_3 \text{ est en position fermé et } F_6 \text{ est à ouvert}$$

$$F_i = 1 \text{ si } F_3 \text{ est en position ouvert et } F_6 \text{ est à fermé}$$

Dans ces conditions on peut écrire les tensions de phase $V_{in,abc}$ en fonction des signaux de commande :

Les fonctions de commande F_i sont générées par un bloc de commande en fonction des objectives de la commande du système.

$$V_{in,abc} = F_i \cdot U_c - \frac{U_{dc}}{2} \tag{II-40}$$

Les tensions composées des trois phases sont obtenues à partir des relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \\ V_{bc} = V_{b0} - V_{c0} \\ V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \end{cases} \tag{II-41}$$

Soit "n" le point neutre du coté alternatif, alors on a :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} - V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} - V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} - V_{n0} \end{cases} \quad (\text{II-42})$$

La charge est considérée équilibrer, il l'en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II-43})$$

La substitution de (II-40) dans (II-41) nous donnons :

$$V_{n0} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (\text{II-44})$$

En remplant (II-42) dans (II-40) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{a0} + \frac{2}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} + \frac{2}{3}V_{c0} \end{cases} \quad (\text{II-45})$$

Les différentes combinaisons des trois grandeurs (F_1 F_2 F_3) permettent de générer huit vecteurs tensions dont deux correspondent au vecteur nul comme le montre la figure (II-8) L'utilisation de l'expression (II-38) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II-46})$$

II.7 Modélisation du filtre :

L'onduleur est connecté au réseau a travers une filtre (R, L) raccordé entre le convertisseur de puissance et le réseau représenté sur la (figure II.11).

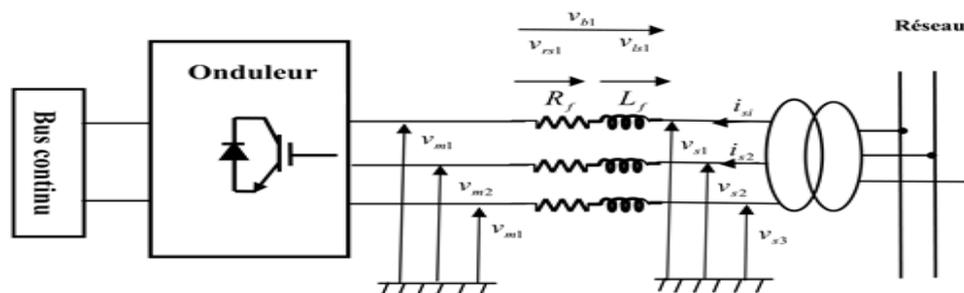


Figure II.11 : Schéma électrique du filtre passif.

Les équations différentielles définissant le filtre sont exprimés par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_t \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_t \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (\text{II-47})$$

Avec :

- $V_{a,b,c}$: Tensions à la sortie de l'onduleur
- $e_{a,b,c}$: Tensions du réseau électrique.
- $R_t L_t$: Filtre triphasé.
- $i_{1,2,3}$: Courants injectés au réseau électrique.

Le modèle de la connexion au réseau dans le repère (d, q) est obtenu en appliquant la transformée de PARK à l'équation (II-47) :

$$v_{mq} = R_t i_{tq} + L_t \frac{di_{tq}}{dt} - L_t I_{tq} \omega_s + e_q \quad (\text{II-48})$$

$$v_{md} = R_t i_{td} + L_t \frac{di_{td}}{dt} - L_t I_{td} \omega_s + e_d \quad (\text{II-49})$$

Avec :

- v_{mq}, v_{md} : Composantes de la tension à la sortie de l'onduleur dans le repère (dq) .
- e_d, e_q : Composantes de la tension du réseau dans le repère (dq) .
- i_{tq}, i_{td} : Composantes des courants injectés au réseau dans le repère (dq) .

II.8 Modélisation du réseau électrique :

Le modèle du réseau électrique est présenté sur la Figure II.11 Est exprimé par les trois tensions e_a, e_b, e_c qui sont des formes sinusoïdales.

$$\begin{cases} V_a - e_1 = R_t \cdot i_a + L_t \cdot \frac{di_a}{dt} \\ V_b - e_2 = R_t \cdot i_b + L_t \cdot \frac{di_b}{dt} \\ V_c - e_3 = R_t \cdot i_c + L_t \cdot \frac{di_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-50})$$

Les tensions de réseau électrique :

$$\begin{cases} e_a(t) = -\frac{L di_a}{dt} - R_t i_a(t) + V_{dc}/3(2F_a - F_b - F_c) \\ e_b(t) = -\frac{L di_b}{dt} - R_t i_b(t) + V_{dc}/3(-F_a + 2F_b - F_c) \\ e_c(t) = -\frac{L di_c}{dt} - R_t i_c(t) + V_{dc}/3(-F_a - F_b + 2F_c) \end{cases} \quad (\text{II-51})$$

La force électromotrice du réseau triphasé est définie par (II.51), où $U_{eff.res}$ est la tension composée efficace du réseau [32].

$$\begin{cases} e_a = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{eff.res} \cdot \sin(w \cdot t) \\ e_b = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{eff.res} \cdot \sin\left(w \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{eff.res} \cdot \sin\left(w \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (II-52)$$

Conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons présenté les modèles mathématiques des sous-systèmes de la chaîne de conversion éolienne étudiée. On a élaboré la modélisation de la chaîne globale de la conversion de l'énergie éolienne débutant par la modélisation du vent et de la turbine et on a parlé sur la loi de BETZ qui détermine le rendement idéal de l'éolienne, en suite on a fait le model d'état de la GSAP sans oublié le modèle mathématique du couplage mécanique reliant la turbine par la génératrice. Dans le chapitre suivant on va appliquer la commande en MPPT de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

III.1. Introduction :

L'objectif principal de la commande des éoliennes à vitesse variable est d'assurer une bonne qualité de la puissance mécanique et électrique générée par la turbine et la génératrice à partir d'une source primaire variable qui est le vent[33].

Après avoir modélisé la chaîne de conversion dans le chapitre précédent, dans ce chapitre on va présenter la simulation et la commande : la puissance active optimale sera générée par un bloc de recherche de point de puissance maximale. Cette puissance optimale sert à la commande prédictive des puissances du réseau électrique.

III.2. Description du schéma de commande :

La chaîne de conversion électrique est composée de turbine, machine synchrone à aimant permanent, deux convertisseurs (redresseur et onduleur triphasé) couplés sur un bus continu.

L'onduleur de tension est connecté au réseau électrique. La cascade et sa commande est indiquée dans la (figure III-1). Le bloc MPPT génère la puissance optimale de référence en fonction de la vitesse de rotation de la machine, suivant une relation prédéfinie. Le bloc de la commande prédictive génère les impulsions de commande de l'onduleur de manière à minimiser l'écart entre les puissances de référence et les puissances réelles.

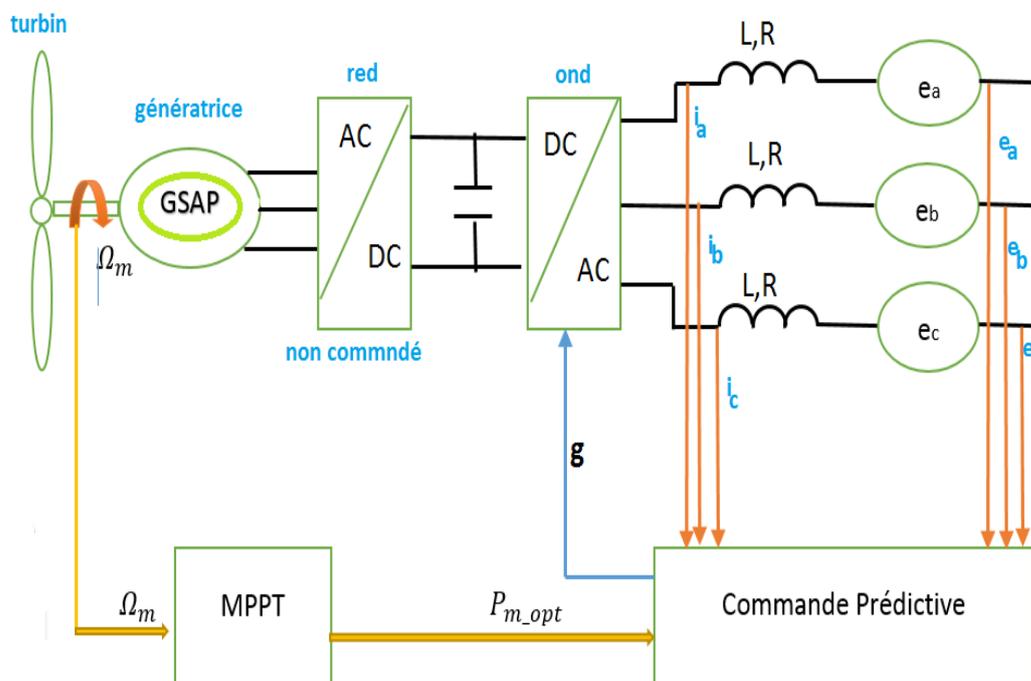


Figure III-1 : Schéma global de la chaîne de conversion et de sa commande.

III.3. Commandes-enMPPT (Maximum Power Point Tracking) : [33]

L'algorithme de contrôle selon la méthode MPPT permet de rechercher le maximum de puissance électrique générée pour chaque vitesse de vent. La vitesse d'opération de la génératrice synchrone à aimant permanent est ainsi ajustée afin de produire un maximum de puissance en tout temps. Pour atteindre ce but, il faut estimer la position et la direction du point d'opération sur la courbe de puissance en fonction de la vitesse. La figure III.2 présente l'évolution de la puissance en fonction de la vitesse de rotation de la machine pour différentes valeurs de la vitesse du vent, et pour un angle de calage $\beta = 0$. Sur la même figure, on a présenté l'évolution de la puissance maximale générée en fonction de la vitesse de rotation. Il est observé que la puissance maximale que la turbine peut produire pour chaque vitesse de vent, correspond à une vitesse optimale. Cette vitesse optimale est atteinte lorsque le coefficient de puissance C_p est maximal. Pour chaque valeur de la vitesse de rotation, On peut déduire la puissance maximale qu'on peut obtenir [4] :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega_m^3}{\lambda^3} C_p \quad (\text{III-1})$$

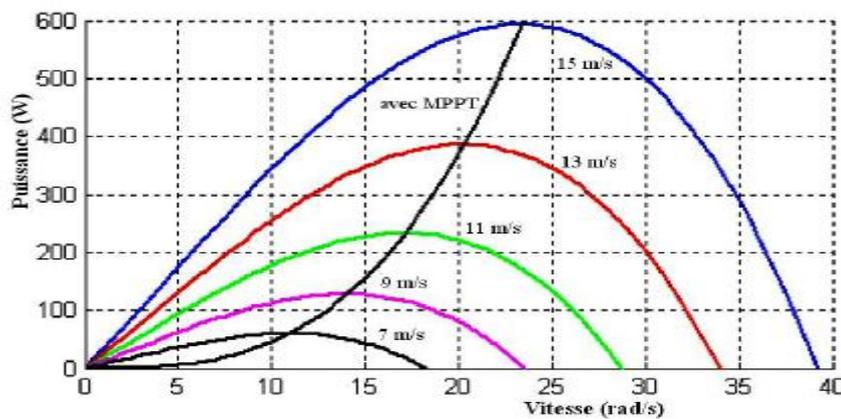


Figure.III.2 : Caractéristiques d'une éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation.

III.3.1 Différentes méthodes de MPPT :

III.3.1.1 MPPT par la méthode de lambda optimal (TSR) :

Le TSR optimal pour une éolienne donnée est constant indépendamment de la vitesse du vent. Si TSR reste constamment à la valeur optimale, il est garanti que l'énergie extraite sera maximisée. Par conséquent, cette méthode cherche à forcer le système de conversion d'énergie à rester à ce stade en le comparant à la valeur réelle et en transmettant cette

différence au contrôleur. Cela, à son tour, modifie la vitesse du générateur pour réduire cette erreur. Le point optimal du TSR. Peut être déterminé expérimentalement ou théoriquement et stocké comme une référence. Bien que cette méthode semble simple car la vitesse du vent est mesurée directement et en continu, une mesure précise pour la vitesse du vent est impossible en réalité et augmente le coût du système. Le schéma de principe est illustré à la (Fig.III.3).[35]

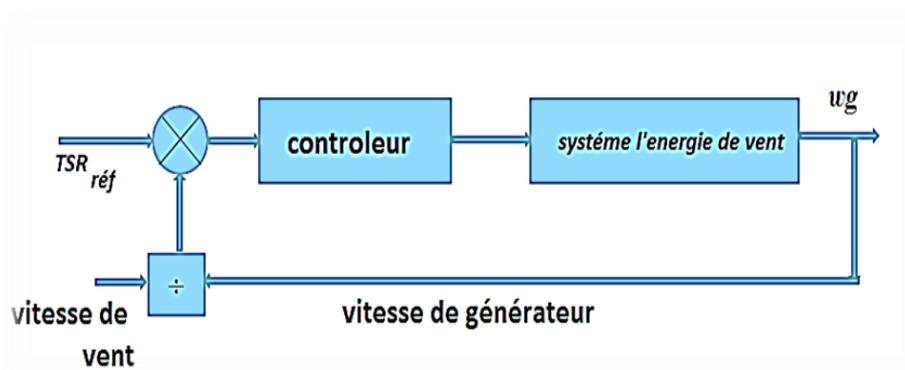


Figure III.3: Schéma block de la méthode de MPPT lambda optimal (TSR)

III.3.1.2 MPPT par la méthode de recherche de la montée colline (Hill climb):

L'algorithme de contrôle HCS recherche en permanence de la puissance crête de l'éolienne. Il peut surmonter certains des problèmes communs normalement associés avec les deux autres méthodes. En fonction de l'emplacement du point de fonctionnement et relation entre les variations de puissance et de vitesse, l'algorithme de suivi calcule le signal de commande optimum pour entraîner le système à un point de puissance maximale. La figure I.4 montre le principe de l'HCS.

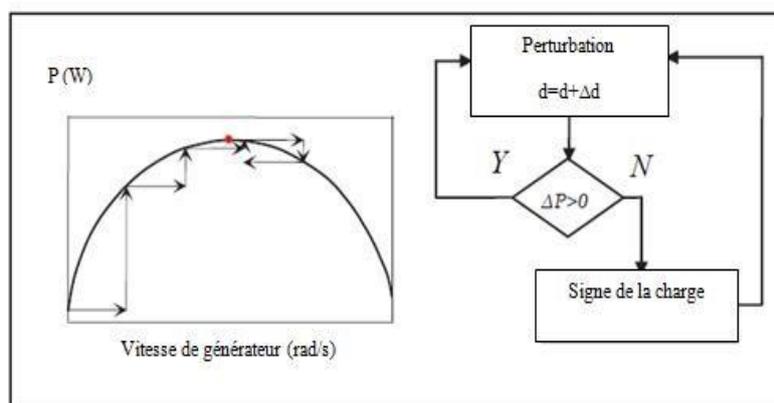


Figure III.4 : Principe Contrôle HCS.

III.3.1.3 MPPT par la méthode de contrôle optimale de couple (OTC) :

Dans cette méthode, le couple du générateur est commandé à son optimum afin d'obtenir la valeur maximum du coefficient de puissance et, par conséquent, un rendement énergétique maximal. La commande de couple permet de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples, c'est-à-dire sans utilisation de capteur de la vitesse du vent. En revanche cette commande exige la connaissance de la courbe de puissance maximale de l'éolienne.

La turbine éolienne peut développer un couple mécanique maximal T_{m_opt} exprimée en :

$$T_{m_opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \omega_m^2 \quad (\text{III-2})$$

Les méthodes d'optimisations énergétiques présentées jusqu'à maintenant pour régler le transfert d'énergie dans les systèmes éoliens présentent une dépendance directe ou indirecte aux caractéristiques de l'aérogénérateur. Cette dépendance entraîne, d'une part, des difficultés de mise en œuvre de ces méthodes et, d'autre part, un surcoût du système. Il existe des méthodes pour connaître les points de fonctionnement sans connaître ses caractéristiques[35].

III.3.1.4 MPPT par la méthode de perturbation et observation (P&O) :

L'algorithme P&O est l'un des plus simples. Il consiste à l'introduction d'une petite perturbation du rapport cyclique. Son effet est par la suite remarqué au niveau de la puissance de sortie de la GSAP. Si une augmentation de la puissance électrique est enregistrée par l'augmentation du rapport cyclique, alors ce dernier va être augmenté encore une fois avec le même pas que le précédent. Si par contre une diminution de la puissance est enregistrée suite à l'augmentation du rapport cyclique, la consigne suivante du rapport cyclique est alors inversée. Il est clair que cette méthode ne nécessite aucune connaissance préalable des paramètres mécaniques ou électriques du système éolien. [34]

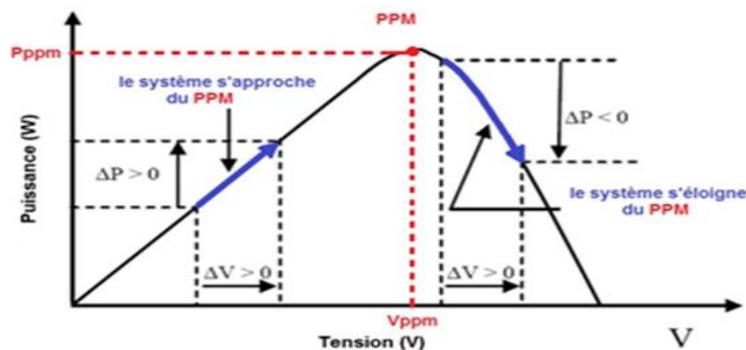


Figure III.5 : Caractéristique de Puissance d'une éolienne en fonction de Tension

III.3.1.5 Méthode de maximisation par la méthode d'asservissement du signal de la puissance (PSF) :

En mode PSF, il est nécessaire de connaître la courbe de puissance maximale de l'éolienne et de suivre cette courbe à travers ses mécanismes de contrôle. Les courbes de puissance maximale doivent être obtenues via des simulations ou des expériences hors ligne sur des éoliennes individuelles. Dans cette méthode, la puissance de référence est générée soit en utilisant une courbe de puissance maximale enregistrée, soit en utilisant l'équation de puissance mécanique de l'éolienne où la vitesse du vent ou la vitesse du rotor est utilisée comme entrée. La Fig.6 montre le schéma synoptique d'un système WECS avec contrôleur PSF pour une extraction de puissance maximale.

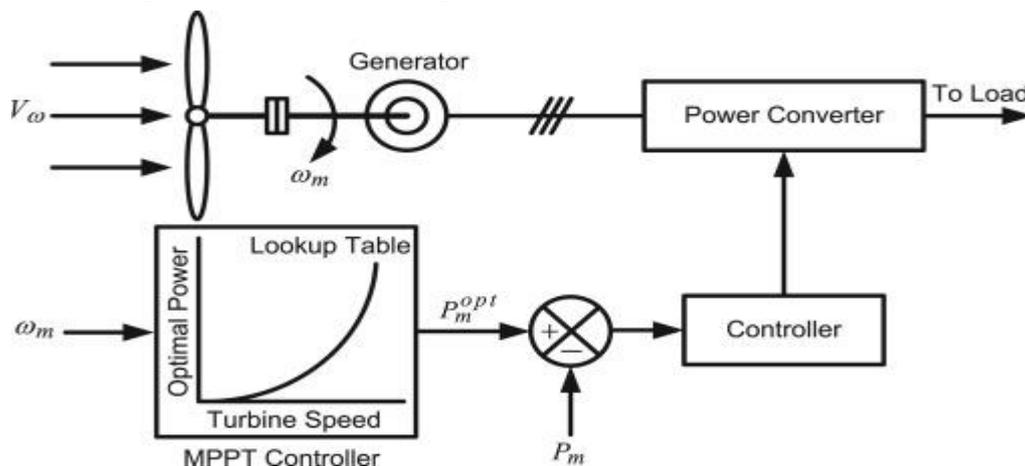


Figure III.6 : Le Block Diagramme de la méthode de retour de signal de puissance

Dans la suite de ce travail on va continuer par la méthode de PSF.

La méthode (PSF) d'asservissement du signal nécessite d'avoir de mesures des puissances maximales de référence, qui peuvent être générées en fonction des vitesses de rotation ou en fonction des vitesses du vent.

La valeur de la vitesse du vent reliée à la vitesse de la turbine est donnée par :

$$V_w = \frac{\omega_m R}{\lambda} \quad (\text{III-3})$$

En remplaçant la vitesse du vent par son expression indiquée à (III-3) on obtient l'expression de la puissance en fonction de la vitesse de la machine :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega_m^3}{\lambda^3} C_p \quad (\text{III-4})$$

Cette puissance est maximale lorsque le coefficient de puissance est maximal, et la vitesse spécifique est à sa valeur optimale :

$$\lambda = \lambda_{opt}, C_p = C_{pmax}$$

La puissance maximale correspondante est alors :

$$P_{m_opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega_{max}^3}{\lambda_{opt}^3} C_{pmax} \quad (\text{III-5})$$

Le couple optimal de la turbine est obtenu en divisant la puissance maximale par la vitesse de rotation :

$$T_{m_opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \omega_m^2 \quad (\text{III-6})$$

Les expressions de la puissance et du couple optimale peuvent être réécrites sous la forme suivante :

$$P_{m_opt} = \omega_m \cdot T_{m_opt} = K_{opt} \cdot \omega_m^3 \quad (\text{III-7})$$

$$\text{Avec : } K_{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3}$$

III.4. Commande prédictive des puissances du réseau :

La commande prédictive consiste à imposer à la puissance du réseau à suivre la puissance optimale générée par le bloc MPPT. Pour cela, on effectue une prédiction de la puissance générée pour chaque état de l'onduleur, et on impose l'état qui provoque l'écart minimal entre la puissance optimale et la puissance prédite.

Les erreurs entre les valeurs de référence des puissances active et réactive instantanées et leur mesure sont introduits dans un fonction de cout j qui choisit le minimum valeur de l'erreur, Cette valeur exprimer l'état le plus proche de la référence, puis on va appliquer la valeur et la position de cette état sur l'onduleur.

Cette commande se résume dans l'algorithme suivant :

- 1- Mesure les tensions et les courants du réseau.
- 2- Calcul les puissances actives et réactives du réseau.
- 3- Déterminer les prédictions des courants pour chaque état de l'onduleur.
- 4- Dédire les prédictions des puissances par chacune des huit états de l'onduleur.
- 5- Calcul les écarts entre les valeurs optimales des puissances et les prédiction des puissances.
- 6- Proposer une fonction du cout proportionnelle aux écarts des puissances.
- 7- Détermination de l'état qui produit le minimum de la fonction de cout j .
- 8- Appliquer cet état sur l'onduleur dans le prochain échantillon de temps.

III.4.1. Expression des puissances :

Les puissances active et réactive instantanées sont proportionnelles aux composantes biphasées du courant du réseau.

Applique la transformation triphasée biphasée sur les tensions de phase du réseau :

$$\begin{pmatrix} e_d \\ e_q \end{pmatrix} = \frac{3}{2} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (\text{III-8})$$

La même transformation est appliquée sur les courants triphasés du réseau:

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \frac{3}{2} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (\text{III-9})$$

Les puissances active et réactive sont exprimé par :

$$\begin{aligned} P_{dq} &= e_d i_d + e_q i_q \\ Q_{dq} &= e_q i_d - e_d i_q \end{aligned} \quad (\text{III-10})$$

III.4.2. Prédiction des puissances :

On effectue une prédiction des puissances active et réactive par chacune de huit états de l'onduleur.

Etats de l'onduleur :

$$\begin{cases} V_0 = (0,0,0) \\ V_1 = (1,0,0) \\ V_2 = (0,1,0) \\ V_3 = (1,1,0) \\ V_4 = (0,0,1) \\ V_5 = (1,0,1) \\ V_6 = (0,1,1) \\ V_7 = (1,1,1) \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

Tension de sortie de l'onduleur :

Les tensions de sortie de l'onduleur dépendent des huit états de commutation (F_1, F_2, F_3) selon la variation de ces derniers.

A partir des équations (II-39) on obtient :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2F_1 & -F_2 & -F_3 \\ -F_1 & 2F_2 & -F_3 \\ -F_1 & -F_2 & 2F_3 \end{pmatrix} \quad (\text{III-12})$$

D'après la transformation:

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} = P(\theta) \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (\text{III-13})$$

Donc :

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (\text{III-14})$$

Prédiction de courant :

D'après la loi des mailles dans le réseau électrique :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (\text{III-15})$$

V : La tension de sortie de l'onduleur.

R : Résistance de ligne de réseau.

L : Inductance de ligne de réseau.

e : La tension de réseau.

Après d'appliquer une transformation triphasé-biphasé l'équation est écrite :

$$\begin{cases} V_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} + e_d \\ V_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + e_q \end{cases} \quad (\text{III-16})$$

Les dérivées de courant (i_d, i_q) est écrite comme :

$$\begin{pmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{pmatrix} = \frac{1}{L} \begin{pmatrix} V_d - e_d - Ri_d \\ V_q - e_q - Ri_q \end{pmatrix} \quad (\text{III-17})$$

On approxime la dérivée par une différence $\frac{di}{dt} = \frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{i(k) - i(k-1)}{T}$

Avec T la période d'échantonnage, qui doit suffisamment supérieur au pas de simulation du système.

Alors :

$$\begin{cases} i_d(K) = i_d(K-1) + T \frac{di_d}{dt} \\ i_q(K) = i_q(K-1) + T \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (\text{III-18})$$

On remplace la dérivée de courant dans l'équation (III-17) dans l'équation (III-18) :

$$\begin{pmatrix} i_d(K) \\ i_q(K) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_d(K-1) \\ i_q(K-1) \end{pmatrix} + T \begin{pmatrix} V_d - e_d - Ri_d(k-1) \\ V_q - e_q - Ri_q(k-1) \end{pmatrix} \quad (\text{III-19})$$

Donc on obtient les prédictions des courants i_d et i_q , après on calcul cette prédiction pour chaque état de l'onduleur à partir de variation de V_d et V_q .

Expression des puissances prédictives :

On calcul les prédictions des puissances active et réactive pour chaque instant d'échantillonnage kT :

$$p(k) = e_d \cdot i_d(k) + e_q \cdot i_q(k) \quad (\text{III-20})$$

$$Q(k) = e_d \cdot i_q(k) - e_q \cdot i_d(k)$$

III.4.3. Erreur de puissance :

On calcule les différences entre la valeur optimale de la puissance active et réactive et les puissances actives et réactive du réseau (P, Q réels) :

$$\begin{pmatrix} \Delta P(K) \\ \Delta Q(K) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{opt} - P(k) \\ Q_{opt} - Q(k) \end{pmatrix} \quad (\text{III-21})$$

III.4.4. Algorithme du choix de l'état de l'onduleur :

On propose la fonction du cout suivante :

$$j = \text{abs}(P_{opt} - P) + \text{abs}(Q_{opt} - Q) \quad (\text{III-22})$$

A chaque pas d'échantillonnage, cette fonction du cout peut prendre une parmi huit valeurs, qui correspond aux huit états de l'onduleur. Ces valeurs peuvent être groupées sous forme d'un vecteur comme suit :

$$\text{Avec : } \quad j = (j_0 \ j_1 \ j_2 \ j_3 \ j_4 \ j_5 \ j_6 \ j_7)$$

On cherche le minimum de la fonction du cout, i.e. le minimum du vecteur g, à travers la fonction 'min' dans Matlab :

$$[C, I] = \min(j) \quad (\text{III-23})$$

Avec :

C : indique la valeur du minimum.

I : indiquer l'indice de minimum.

L'indice I permet de déduire l'état à appliquer sur l'onduleur à l'échantillon du temps e la puissance optimale et la puissance réelle.

A noter que la puissance réactive optimale Q_{opt} est imposée de façon à Contrôler le facteur de puissance du réseau, généralement unitaire.

III.5. Simulation numérique :

On simule la commande prédictive en MPPT, de la chaîne de conversion éolienne. La simulation est effectuée à l'aide de Matlab/Simulink. Le schéma du modèle de la simulation est indiqué à la (figure III.7).

III.5.1 Paramètres du système :**➤ Profil du vent :**

On impose l'évolution de la vitesse de vent de façon déterministe par l'expression suivante :

$$V_v(t) = 7 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t) \quad (\text{III-24})$$

➤ La turbine :

On utilise une éolienne tripale à axe horizontal, de faible puissance, ayant les paramètres suivants :

Masse volumique de l'air en Kg.m-3	ρ	1.225
Rayon de la turbine (m)	r	2.2
Gain de multiplicateur	G	3
Coefficient de C_p	C1	0.5
	C2	116
	C3	0.4
	C4	5
	C5	21
	C6	0.0068

➤ Machine synchrone à aimants permanents :

Les paramétré de la MSAP :

Résistance statorique (Ohm)	R_s	0.425
Inductance (H)	$L_d = L_q$	
Flux statorique (Wb)	ϕ_f	0.433
Moment d'inertie (kg.m ²)	j	0.01197
Paire de pole	p	5

Coefficient de frottement	f	0.001189
---------------------------	-----	----------

➤ **Bus continu :**

Le convertisseur de courant coté source (redresseur à diode) délivre une tension continue à l'entrée d'un onduleur de tension triphasé, raccordé à un réseau alternatif.

A l'intermédiaire du redresseur à diode et de l'onduleur de tension se trouve le bus à tension continu, composé par un condensateur qui sert de-tampon à l'entrée de l'onduleur pour prendre en charge les variations rapides du courant d'entrée de l'onduleur. Ce condensateur a aussi la tâche de lisser la tension continue redressée. Ce condensateur a une capacité C de valeur 0.02 F.

➤ **Filtre et réseau triphasé**

Un filtre série (R, L) est raccordé entre le convertisseur de puissance et le réseau pour réduire la propagation des harmoniques dans le réseau électrique.

Les paramètres du filtre :

R(Ohm)	0.1
L(H)	0.04

Le réseau triphasé équilibré est caractérisé par la valeur efficace E et la fréquence f indiquées ci-dessous :

E(V)	$200\sqrt{2}(3\sim)$
F(Hz)	50

III.5.2 Résultat de la simulation :

Une simulation de la cascade a été effectuée en utilisant le modèle de vent montré sur la (Figure III.8). La figure. III.9 indique le couple de la turbine, le couple augmente rapidement et suit le couple appliqué à la GSAP. Les figures III.10 à III.14 montrent les variables de la GSAP. La figure III.10 indique la vitesse de rotation de la GSAP. On remarque une augmentation rapide de la vitesse de rotation, puis cette vitesse varie avec la vitesse du vent. La figure III.11 indique le couple de la GSAP. Il présente des ondulations provoquées par le convertisseur à diodes. Sa valeur moyenne en valeur absolue a un rapport G avec la valeur moyenne du couple de la turbine. La figure III.12 indique le courant de phase i_a de la GSAP. Il a une forme alternative avec des harmoniques provoqués par le convertisseur. La figure

III.13 indique un zoom de courant i_a . La figure III.14 indique la tension v_a de sortie de la GSAP. Elle a une forme alternative rectangulaire. Les figures III.15 à III.18 montrent les variables du réseau, la figure III.15 montre le courant i_a et la tension e_a du réseau, L'amplitude de ce courant est variable avec la vitesse du vent. La tension de réseau e_a est sinusoïdale et en phase avec le courant i_a car la puissance réactive du réseau est nulle. La figure III.16 montre la tension composée de sortie de l'onduleur qui est une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires à deux niveaux. La figure III.17 montre la puissance active, optimale et réelle, la puissance active optimale est générée par un bloc de mppt à partir de vitesse de la turbine, cette puissance suit la vitesse du vent, la puissance réelle consommée par le réseau suit cette puissance optimale. Les figures III.19a III.21 montre un test de variation de la puissance réactive. On applique un test de variation de la puissance réactive de référence Q_{opt} à l'instant $t=3s$, dans lequel cette puissance passe de 0 à 500 VAR. La figure III.19 indique la tension e_a et le courant i_a du réseau, on remarque un déphasage entre le courant et la tension à l'instant 3s. Figure III.20 montre les puissances réactives Optimale et réelle. On remarque que la puissance réactive réelle suit la puissance optimale après le changement de celle-ci à l'instant 3s.

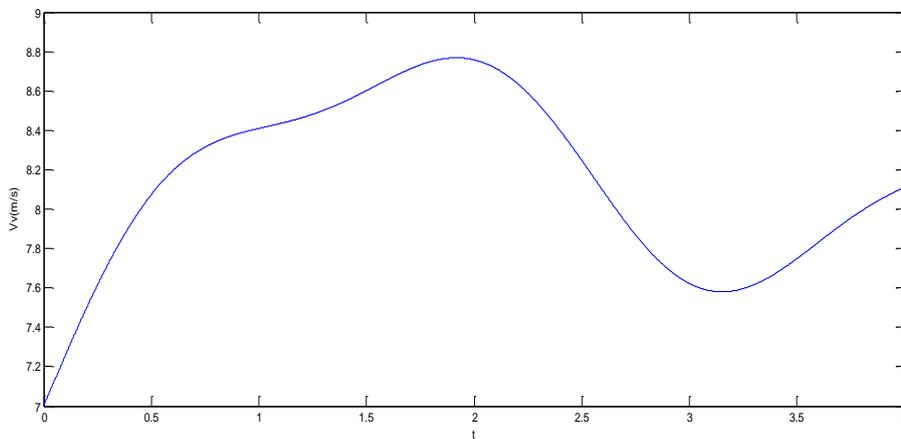


Figure III.8 : Profil de la vitesse du vent.

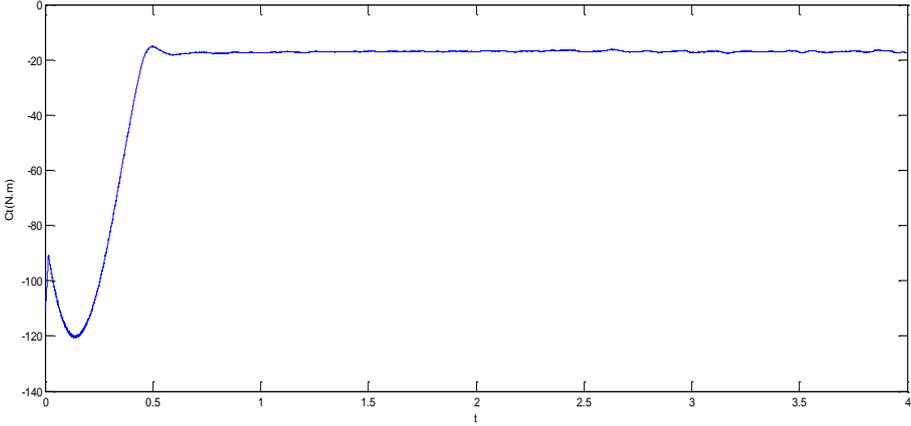


Figure III.9 : Couple de la turbine.

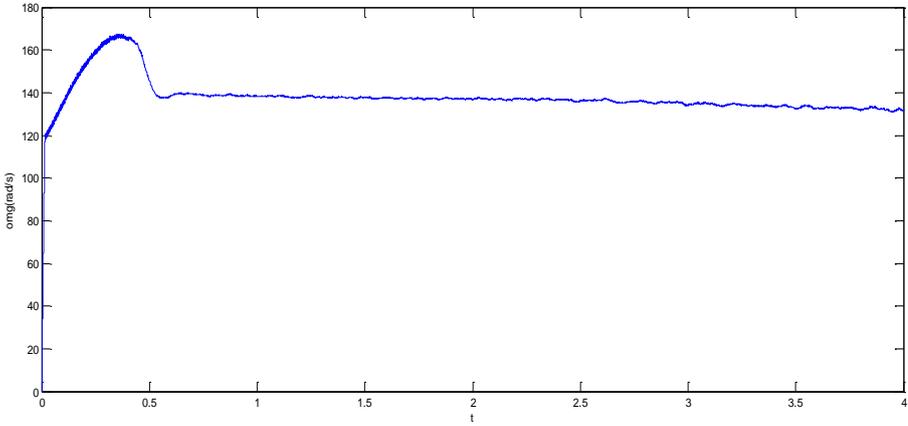


Figure III.10 : Vitesse de rotation de la GSAP.

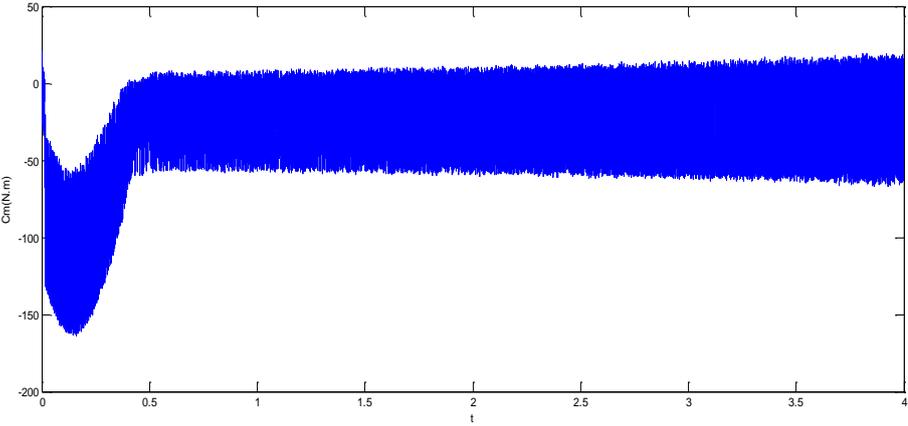


Figure III.11 : Couple de la GSAP.

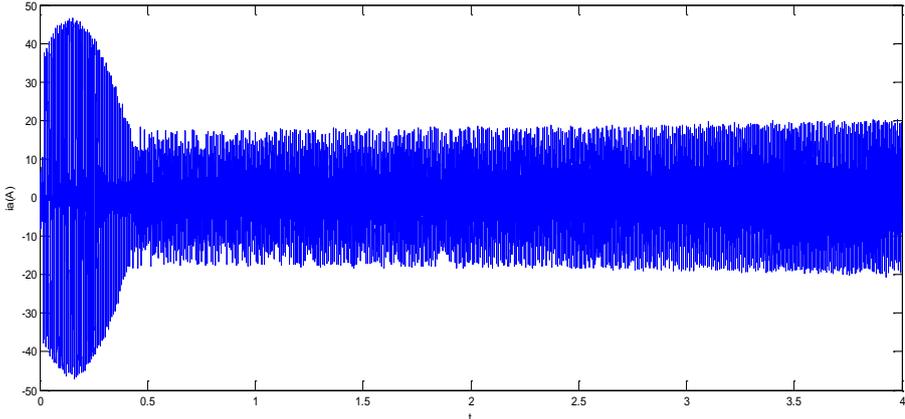


Figure III.12 : Courant de sortie i_a de la GSAP.

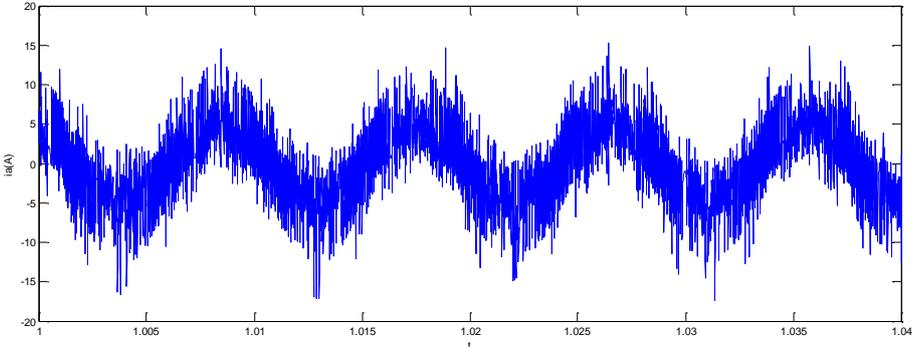


Figure III.13 : Zoom du courant de sortie de la GSAP.

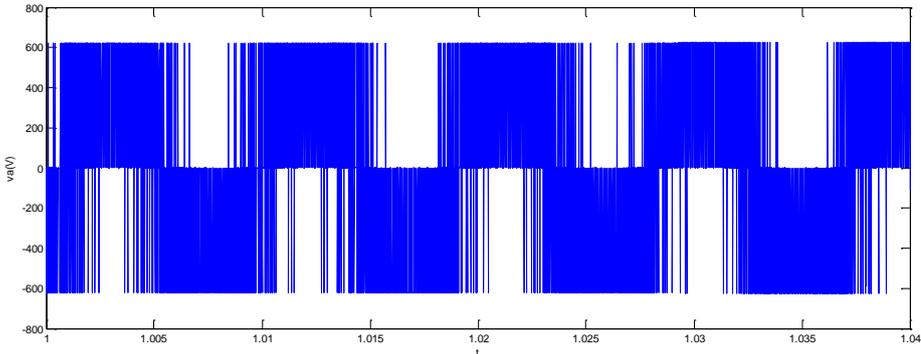


Figure III.14 : Tension de sortie v_a de la GSAP.

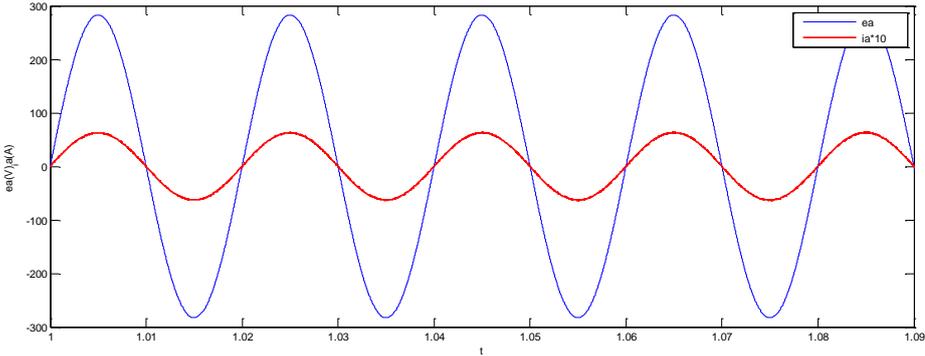


Figure III.15 : Courant i_a et tension e_a du réseau.

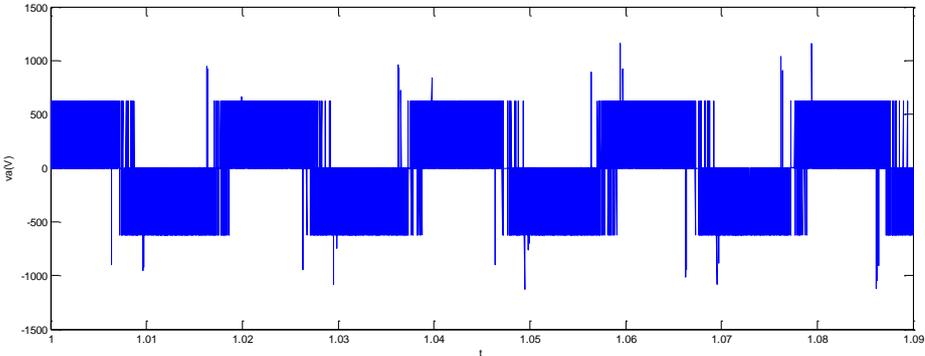


Figure III.16 : Tension composée de la sortie de l'onduleur.

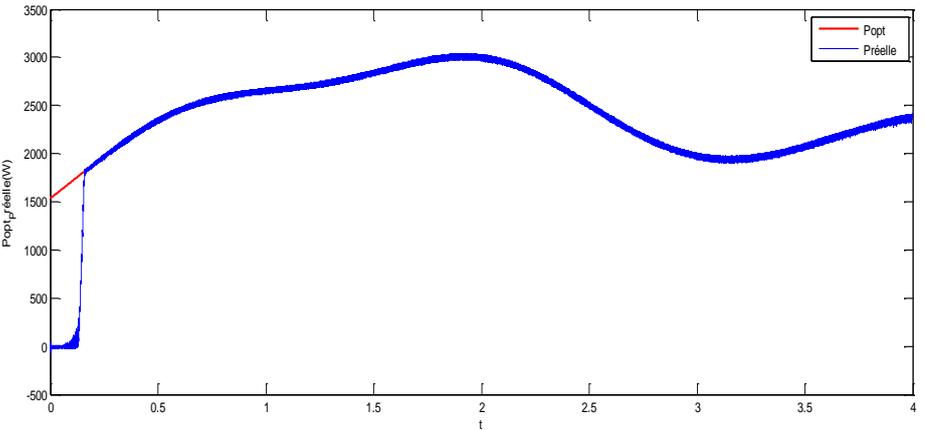


Figure III.17 : puissance active optimal et réelle.

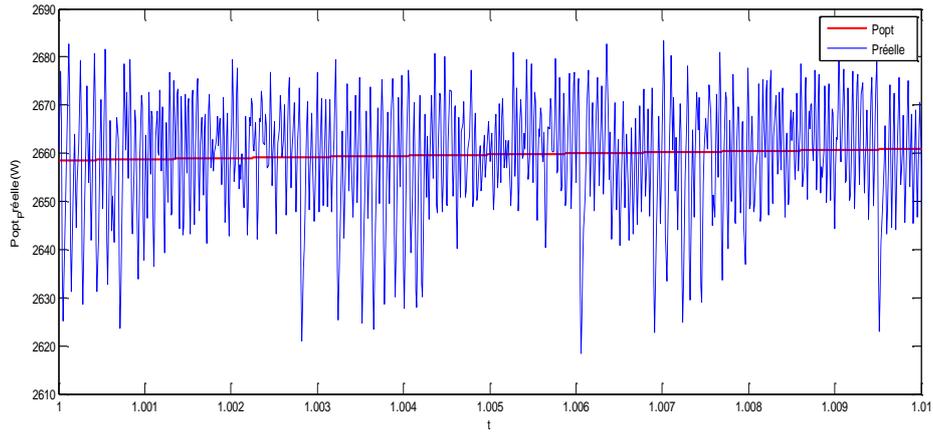


Figure III.18 : Zoom de la puissance active.

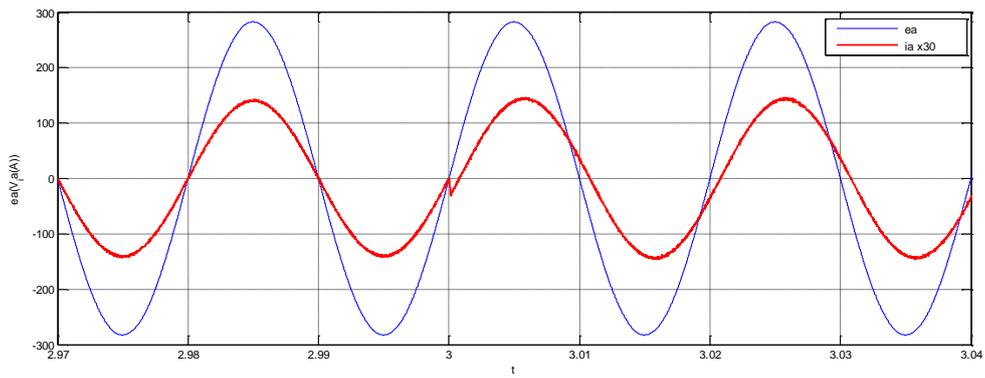


Figure III.19: Déphasage Courant i_a et tension e_a du réseau.

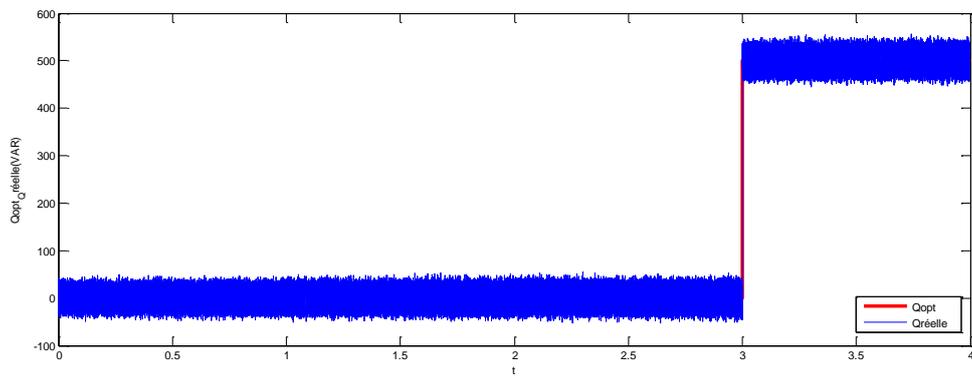


Figure III.20 : Puissance réactive.

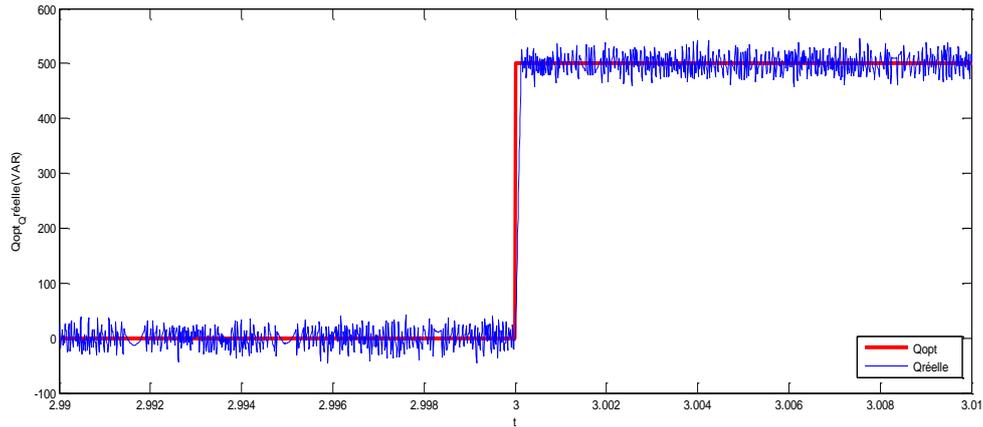


Figure III.21 : Zoom de puissance réactive.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons simulé le fonctionnement de la chaîne de conversion éolienne, en appliquant la commande du point de puissance maximale et la commande prédictive des puissances du réseau qui permet de séparer la commande de la puissance active et réactive. La chaîne fonctionne toujours dans le point correspondant à la puissance maximale de la turbine. Cette commande permet de créer une poursuite entre la puissance calculée et la puissance optimale quel que soit la vitesse du vent, afin d'assurer une meilleure qualité de l'énergie extraire et délivrer au réseau électrique. Un test de variation de la référence de la puissance réactive montre la création d'un déphasage entre la tension et le courant du réseau, provoqué par cette variation. Ainsi, la commande appliquée permet aussi de contrôler le facteur de puissance du réseau.

Dans ce mémoire nous avons étudié une chaîne de conversion éolienne basée sur une machine synchrone à aimant permanent. Cette chaîne est composée d'une turbine associée à une génératrice synchrone, avec deux convertisseurs statiques séparés par un bus continu, un convertisseur à diodes non commandé du côté de la génératrice, et un convertisseur MLI connecté au réseau électrique dans lequel la puissance produite est injectée.

Le premier chapitre présente une généralité sur les systèmes éoliens. Nous avons parlé des différents types des éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Nous avons également traité les lois fondamentales permettant la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Nous avons parlé aussi sur les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable.

Dans le deuxième chapitre. Nous avons présenté la modélisation mathématique des différents éléments de la chaîne de conversion à savoir la turbine, la MSAP, les convertisseurs statiques et le réseau électrique. On a présenté le profil du vent qui est la source principale de l'énergie, en suite on modélise la turbine qu'elle possède toujours un point de fonctionnement pour lequel, la puissance produite est maximale. La turbine est connectée à la génératrice à travers un réducteur de vitesse.

Dans le troisième chapitre, on a simulé l'application de la commande prédictive des puissances active et réactive du réseau électrique, en tenant compte de la poursuite du point de puissance maximale. Un bloc MPPT permet de générer la puissance active de référence, tandis que la puissance réactive de référence est imposée délibérément de manière à imposer le facteur de puissance voulu au réseau. Les résultats obtenus montrent que la puissance générée suit la forme du profil du vent, que la puissance produite par la turbine est la puissance optimale, et que le déphasage entre la tension et le courant du réseau peut être contrôlé à travers la référence de la puissance réactive.

Comme perspective à ce travail, on propose de modifier la chaîne de conversion, en introduisant, à la sortie de la génératrice, un convertisseur contrôlable au lieu d'un convertisseur à diodes, afin d'améliorer la commande et les performances du système.

- [1] S. belakehal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », thèse doctorat Electrotechnique l'université de constantine.2010.
- [2] S. HAMECHA, Etude et « Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents », Mémoire de Magister l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.
- [3] Revue des Energies Renouvelables VOL.17 N°4 (2014) 507 - 518 / Art173_15.pdf.
- [4] H.TAMISSA, N.TOUTI, « Comparaison entre les techniques d'extraction de puissance MPPT appliquées à une éolienne hybride », Mémoire De Master, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2017.
- [5] M. Addour, « Etude et maximisation d'un système éolien », mémoire de master électrotechnique l'université de bejaya.2013
- [6] D.DJEMATI , « étude de l'écoulement autour d'une éolienne de type Savonius. Simulation des performances de l'éolienne », mémoire de magistère en physique, université de BATNA, 2011.
- [7] N. HAMDY « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », Université Mentouri de Constantine. République Algérienne. Mémoire magister,2008
- [8] T. 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 », Thèse de Doctorat de Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011.
- [9] F. POITIERS, « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'énergie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003.
- [10] M. Lopez, « contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unite de production isolée », Thèse de Doctorat de l'Université de paris, 2008.
- [11] R.REDJEM, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », mémoire de magistère en Electrotechnique, l'Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [12] M. Kassa IDJDARENE, « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes », Thèse de Doctorat de l'Université de Abderrahmane MIRA – Béjaia, 2010.
- [13] O. Benyahia, « Analyse des performances d'éoliennes sur un Banc d'essai ; Simulation sous ANSYS et SolidWorks » Memoir de master de l'université de M'hamed Bougara de Boumerdès, 2017.

- [14] H. CAMBLONG, « minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable », Thèse de Doctorat de École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, 2003
- [15] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive ». Energie électrique. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2007. Français
- [16] A. Nabil. « Optimisation multi-critères et multi-physique d'aérogénérateurs à aimants permanents à flux axial ». Energie électrique. Université du Havre, 2008. Français.
- [17] A. Mirecki « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2005
- [18] R K, Idjdarene « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales éoliennes Autonomes »,Thèse de doctorat en cotutelle, A.Mira, Béjaïa,Algérie,etl'UniversitésLille1,France, 2010.<https://www.connaissancedesenergies.org>
- [19] S. Ziraoui , « Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau », mémoire master l'Université de BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2007
- [20] T. BOUSMAHA , Z.TAHIR , « Etude et Simulation d'une ferme éolienne en vue d'une application hybride », MÉMOIRE MASTER Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 2016.
- [21] A. TAMAARAT, « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA », Thèse de Doctorat de l'Université de Mohamed Khider – Biskra , 2015.
- [22] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », thèse de doctorat de l'université de Heneri Poincaré, Nancy I, 11-12-2006.
- [23] <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/avantages-inconvenients-eolienne/>.
- [24] N. La verdure « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » ; thèse doctorat de l'NPG ; Spécialisé : Génie électrique ; 09 décembre 2005
- [25] A.TABTI . A. ZAHIR. « Commande et modélisation d'une éolienne à base d'une MSAP couplé au réseau », Mémoire De Master, Université Abderrahmane Mira – Bejaïa, 2013.
- [26] L. Leclercq. « Apport du stockage inertiel associe a des éoliennes dans un reseau électrique en vue d'assurer des services systèmes ». These de doctorat, Laboratoire

- [27] B. MOBARAKEH, « Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification 'en ligne' des paramètres », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine. December 2001.
- [28] B. VASEGHI, « Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre -spires : modélisation- réduction du courant de défaut », Thèse doctorat, Nancy Université - Institut National Polytechnique de Lorraine, Décembre 2009.
- [29] D. Abdeldjalil « Étude des performances et commande d'une machine synchrone à aimants permanents utilisée dans les éoliennes » THÈSE de magister Université de Sétif 2012.
- [30] Z. Souhila, « commande par passivité de la machine synchrone à aimants permanent », Mémoire de Master l'Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2015.
- [31] B. Merghem, « Étude Et Commande D'une Éolienne À Base D'une Msap Pour La Production D'énergie Electrique », Mémoire De Master, Université Farhat Abbas Sétif, 2016
- [32] Mr M. Sekou Camara . « Modélisation et commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent pour la production et l'injection des énergies offshore dans un réseau ». Symposium de Génie Electrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. <hal-01065217>
- [33] M. Billel, « Contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne énergétique éolienne », Thèse de Doctorat de l'Université de BADJI MOKHTARANNABA, 2015.
- [34] A. Zaimi. « Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents ». Energie électrique. 2014. dumas-01222261ff
- [35] H. ABD ELHAKIM, « Comparaison entre les techniques de commande de la puissance de vent dans une éolienne à vitesse variable », Mémoire De Master, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2016.

