

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE
SPECIALITE: AUTOMATIQUE

THEME

Etude et Modélisation d'une Chaîne de Production Eolienne

Proposé et dirigé par :

- Mr. CHOUCHOU Abdelmadjid

Présenté par :

- BENKHALED Bilal

Année Universitaire : 2012 / 2013

N° d'ordre : 064

Dédicace

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage
et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés
rencontrées.*

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs
soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices
qu'ils ont endurés.*

A mes frères

A mes chers amis

A tous les amis d'études surtout ceux de génie électrique promotion 2013



Remerciements

Je remercie Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donné, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaires, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au long de mon chemin, durant toutes mes années d'études.

Je adresse mes sincères remerciements à tous mes enseignants de L'université de M'SILA, notamment à mon Encadreur Mr. CHOUCHOU Abdelmadjid

, d'avoir proposé le sujet sur lequel j'ai travaillé, et qui a assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire.

Je tiens notamment, à adresser l'expression de ma sincère reconnaissance aux membres du jury d'examen, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Cette page ne serait être complète sans remercier mes meilleurs collègues et frères :B.imad Eddine, M.imad,L. Hamza, CH.Nidhal, sans leurs soutiens je n'aurais sûrement pas pu mener à bien ce mémoire.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin à réussir ce travail.

Mes vives salutations



Table des matières

Introduction Générale :	1
--------------------------------	---

CHAPITRE I

Etat de l'art sur l'énergie éolienne

I.1 Introduction :	3
I.2. Définition de l'énergie éolienne :	4
I.3. Situation actuelle de l'énergie éolienne :	5
I.4. Types d'aérogénérateurs :	7
I.4.1. Eoliennes à axe vertical :	7
I.4.2. Eoliennes à axe horizontal :	7
I.5. Principales composantes des éoliennes à axe horizontal :	8
I.5.1. Le mât :	8
I.5.2. Une nacelle :	9
I.5.3. Les pales :	10
I.5.4. Le moyeu :	10
I.6. Descriptif d'une éolienne :	10
I.7. Structure des systèmes de conversion de l'énergie éolienne :	12
I.7.1. Les éoliennes à vitesse fixe :	13
I.7.1.1. Principe général :	13
I.7.1.2. Les Avantages des éoliennes à vitesse fixe :	13
I.7.1.3. Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe :	13
I.7.2. Eolienne à Vitesse variable :	14
I.7.2. 1. Principe général :	14
I.7.2.2. Les avantages :	14
I.8. Types des machines électriques :	15
I.8.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone :	15
I.8.2. Systèmes utilisant la machine synchrone :	16
I.9. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :	18
I.10. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :	19
I.10.1. Avantages :	19
I.10.2. Inconvénients :	19
Conclusion :	20

CHAPITRE II

Modélisation de la conversion éolienne et contrôle au niveau de la turbine

II-1 Introduction :	21
II.2. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique :	21
II.2.1. Loi de Betz :	21
II.2.2. Modèle de la turbine :	23
II.2.3. Modèle du multiplicateur :	26
II.2.4. Schéma bloc du modèle de la turbine :	27
II.3. Stratégies de commande de la turbine éolienne :	28
II.3.1. Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable :	28
II.4. Système de contrôle de l'aéroturbine :	29
II.5. Méthodes de recherche du point maximum de puissance :	29
II.5.1. Commande dans la zone de fonctionnement en dessous de la puissance nominale :	30
II.5.2. Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse :	30
II.5.3. Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse :	32
II.6. Modélisation du système d'orientation des pales (PITCH) :	34

II.7. Résultats de simulation	35
II.7.1. Résultats obtenus avec la structure de commande sans asservissement de vitesse	35
II.7.2. Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse en utilisant un Régulateur PI :	37
II.8. Conclusion	38

CHAPITRE III

Modélisation de la GSAP

III.1. Introduction :	39
III.2. Généralités sur la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	39
III.2.1. Emplacement des aimants :	41
III.2.2. Principe de fonctionnement	41
III.3. Puissances :	43
III.4. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :	44
III.4.1. Hypothèses simplificatrices :	44
III.4.2. Mise en équation de la MSAP :	44
III.4.3. Equations électriques :	45
III.4.4. Passage au repère de Park :	45
III.4.5. Modèle de la MSAP dans le repère de Park :	46
III.5. Simulation de la GSAP :	48
III.5.1. GSAP A vide :	48
III.5.2. La GSAP alimentée une charge (<i>Rch, Lch</i>) :	50
III.5.3. La GSAP débite sur une source de tension parfaite :	54
III.6. Conclusion	57

CHAPITRE IV

Modélisation et simulation de la chaîne globale de conversion d'énergie éolienne

IV.1 : Introduction :	58
IV.2. Topologies des convertisseurs électriques utilisés	59
IV.3. Modélisation du convertisseur :	59
IV.3.1. Modèle de l'onduleur à deux niveaux	60
IV.3.2. Stratégie de commande	61
IV.3.3. Algorithme de commande :	61
IV.4. Modèle du redresseur :	62
IV.4.1. Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI	62
IV.4.2. Modèle mathématique du redresseur commandé	62
IV.4.3. Commande du redresseur en courant par hystérésis	66
IV.5. Contrôle de la chaîne éolienne globale	67
IV.6. Simulation de la commande mli	68
IV.7. Conclusion	73
Conclusion générale	73
Référence bibliographique	73
Annexe :	78

Table des figures

Figure.I.1	Principe de conversion de l'énergie éolienne	4
Figure.I.2	Croissance de la puissance éolienne installée dans le monde de 1996 à 2011	5
Figure.I.3	Eolienne E- 126	7
Figure.I.4	Carte préliminaire des vents de l'Algérie	7
Figure.I.5	Petites éoliennes à axe vertical.....	8
Figure I.6	Petite éolienne à axe horizontal.....	8
Figure.I.7	Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.....	10
Figure.I.8	Principales composants de l'éolienne à axe horizontale.....	11
Figure.I.9	Eléments constituant une éolienne.....	12
Figure.I.10	Eolienne directement connectée au réseau	14
Figure.1.11	Eoliennes à vitesse variable.....	15
Figure.I.12	Machine asynchrone avec liaison direct au réseau	16
Figure.I.13	Machine asynchrone avec liaison indirecte au réseau	16
Figure.I.14	MADA avec 2 convertisseurs MLI en cascade reliés au réseau	17
Figure.I.15	Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents	18
FigureI.16	Système basée sur la machine synchrone et redresseur à diodes	19
Figure.I.17	Système éolien à coût minimum	19
Figure.I.18	Diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent	20
Figure.II.1	Tube de courant autour d'une éolienne.....	22
Figure.II.2	Coefficient de puissance	22
Figure.II.3	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	23
Figure II.4	Coefficient de puissance C_p	25
Figure.II.5	Puissance théorique disponible en fonction de la vitesse de vent.....	26
Figure.II.6	Schéma de la turbine éolienne	27
Figure.II.7	Schéma bloc du modèle de la turbine	28
Figure.II.8	Caractéristiques vitesse de rotation, vitesse de vent.....	30
Figure II.9	Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation	31
Figure II.10	Schéma bloc de commande avec asservissement de la vitesse.....	34
Figure.II.11	Schéma bloc de commande sans asservissement de la vitesse	34
Figure II.12	Schéma de principe de l'implantation du contrôle de l'angle de calage.....	5
Figure.II.13	Profil du vent appliqué	35
Figure.II.14	La vitesse du vent et mécanique et la puissance produis	36
Figure.II.15	Le coefficient de puissance et La vitesse spécifique	36
Figure.II.16	Résultats de simulation de la turbine avec asservissement de vitesse	37

Figure.III.1	Courbes caractéristiques des aimants	40
Figure.III.2	Quelques configurations du placement des aimants	41
Figure.III.3	Principe du générateur synchrone.....	42
Figure.III.4	Bilan de puissance	43
Figure III.5	Schéma représentatif de la MSAP à modéliser	44
Figure III.6	Transformation triphasée- diphasée.....	45
Figure.III.7	Résultats de simulation de la GSAP à vide	50
Figure.III.8	Bloc de simulation de la GSAP en charge	52
Figure III.9	GSAP sur une charge séparée.....	54
Figure III.10	Bloc de simulation de la GSAP connectée au réseau	55
Figure.III.11	GSAP connectée à une source de tension parfaite	56
Figure IV.1	Exemple d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne	58
Figure.IV.2	Interface d'électronique de puissance	59
Figure.IV.3	Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux	60
Figure.IV.4	Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo-sinusoidale à une porteuse.....	62
Figure.IV.5	Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de tension	63
Figure.IV.6	Schéma du bloc du bus contenu et de la charge.....	65
Figure.IV.7	Schéma fonctionnel du redresseur à MLI	65
Figure.IV.8	Principe de contrôle du courant par hystérésis	66
Figure.IV.9	Schéma globale de la chaîne de conversion éolienne	67
Figure.IV.10	Comparaison de signal triangulaire et la référence sinusoïdale.	67
Figure.IV.11	Tensions de la sortie de l'onduleur.....	68
Figure.IV.12	Tensions entre lignes à la sortie de l'onduleur	68
Figure.IV.13	Tension du bus continu	69
Figure.IV.14	Puissance du bus continu.....	69
Figure IV.15	Variations de la vitesse spécifique et le coefficient de puissance en fonction de la vitesse de vent	70
figures.IV.16	Allure des tensions issue de la génératrice.....	70
Figure.IV.17	Allure des courants issus de la génératrice	71
Figure.IV.18	Tension du bus continu	71
Figure.A.1	Schéma bloc du correcteur PI.....	79

INDEX DES NOTATIONS

MS	Machine synchrone
MSAP	Machine synchrone à aimants permanents
GSAP	Génératrice synchrone à aimants permanents
d,q	repère de Park lié au rotor
R_s	Résistance statorique
L_d	Inductance statorique directe
v_{ds}, v_{qs}	Composantes de la tension au stator dans le repère de Park
L_{ds}	Inductance statorique quadratique
Φ_f	Flux d'excitation des aimants permanents
i_{ds}, i_{qs}	Composantes de courant statorique dans le repère de Park
C_{em}	Couple électromagnétique
C_{vis}	Couple de frottements visqueux
C_m	Couple moteur
p	Nombre de paire de pôles
J	Moment d'inertie totale de la chaîne complete
f	Coefficient de frottement visqueux
JT	Inertie de la turbine
f_g	Coefficient des frottements visqueux de la machine
ω_r	Pulsation électrique rotorique
J_g	Moment d'inertie de la machine
m	Masse d'air traversant le rotor éolien
v_1, v_2	Vitesses du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
P	Masse volumique de l'air
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
P_m	Puissance extraite par le rotor éolien
ρ	la masse volumique de l'air
V_v	est la vitesse du vent
S	La surface balayée par le rotor (balayée par les pales)
R_T	Le rayon du rotor de la turbine à vent
P_{mt}	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne
λ	Vitesse spécifique ou ration de vitesse, Tip-Speed-Ratio
P_v	la puissance de la masse d'air
P_{aer}	la puissance extraite par l'éolienne
β	l'angle d'inclinaison des pales

C_{aer}	le couple mécanique à la sortie de la turbine
Ω_T	Vitesse angulaire de la turbine
β_{opt}	l'angle d'inclinaison des pales optimale
λ_{opt}	Vitesse spécifique optimal
C_g	Couple issu du multiplicateur
Ω_{mec}	Vitesse mécanique de la génératrice
G	Gain du multiplicateur
P_{opt}	la puissance optimale
C_p^{opt}	Coefficient de puissance de l'éolienne optimale
MPPT	Maximum Power Point tracking
$C_{em-réf}$	Couple électromagnétique de référence
K_{ass}	Régulateur pour l'asservissement de la vitesse mécanique
$\Omega_{mec-réf}$	Vitesse mécanique de référence de la génératrice
$\Omega_{T-réf}$	Vitesse angulaire de la turbine de référence
$C_{aer-opt}$	Le couple aérodynamique optimale
C_{g-opt}	Couple résistant optimal (issu du multiplicateur)
v_a, v_a, v_a	tension de phases statoriques
i_a, i_a, i_a	courant de phases statoriques
Φ_a, Φ_a, Φ_a	flux totaux traversant les bobines statorique
$[P(\theta)]$	Matrice de parke
R_{ch}	Résistance de charge
L_{ch}	Inductance de charge
MLI	Modulation de largeur d'impulsions
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}	Tensions composées statoriques
S_a, S_b, S_c	Etat des commutateurs de puissance
U_{dc}	Tension de bus continu
f_b	Fréquence de la porteuse.
U_p	Amplitude de la porteuse
V_{ref}	l'amplitude de la tension de référence de l'onduleur
r	Taux de modulation
I_{dc}	curant de bus continu
C	capacité

Introduction Générale :

De nos jours, la demande en énergie électrique ne cesse d'augmenter. Les différentes centrales traditionnelles de production d'électricité (nucléaire, hydraulique, thermique) utilisent des sources fossiles et naturelles telles que : l'uranium, les hydrocarbures et l'eau. Les centrales thermiques sont responsables de rejets des gaz atmosphériques. L'énergie nucléaire présente un avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution, mais le risque d'accident nucléaire demeure. Le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. [MER07]

Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie. Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion des noyaux atomiques qui, éventuellement, pourraient être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière ne sont pas assurés. Il existe plusieurs types et modèles utilisés dans le domaine des énergies renouvelables, parmi ces énergies, trois grandes familles, la première famille est d'origine mécanique (la houle, éolien), une deuxième sous forme d'énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou bien l'énergie sous forme de chaleur (géothermie, solaire thermique).[RED09]

Aujourd'hui, les énergies renouvelables sont sous-exploitées par rapport à leurs potentiels. Ainsi, elles couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité (en intégrant l'hydroélectricité). Ces énergies regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie éolienne [BEL10]

L'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique. L'exemple le plus connu est le moulin à vent. En 1888, Charles F. Brush construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batteries. La première éolienne industrielle génératrice d'électricité est développée par le danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse.

L'éolien ne peut être considéré que comme une source d'énergie de complément et non de remplacement des solutions classiques. [RED09]

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. [ALI11]

Notre travail vise essentiellement à l'étude de système de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique en utilisant une machine synchrone a aimants permanents. Pour ce faire, plusieurs stratégies de commande sont proposées dans ce travail afin de contrôler ces machine

La structure de notre mémoire se décompose comme suit

Dans le premier chapitre, nous présentons l'état de l'art de l'énergie éolienne. Il comprend des données et des perspectives qui montrent l'importance et l'évolution dans le temps de ce processus de production d'énergie au niveau mondial. Des notions de base de la technologie éolienne ont été abordées et développées. Quelques exemples, habituellement utilisés à l'échelle industrielle, d'architectures de chaînes de conversion d'énergie sont cités en association avec les différents types de génératrices.

Le second chapitre, est dédié à l'étude du système de conversion aérodynamique comportant essentiellement les caractéristiques et stratégies de fonctionnement de l'éolienne. Des modèles analytiques de la turbine éolienne et du système de régulation, ont été conçus en utilisant différentes méthodes d'optimisation de puissance

Le troisième chapitre, est consacré à la description et la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents à flux radial, essentiellement, l'aspect technologique des aimants permanents avec leur modèle électrique équivalent. Un modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents a été établi et appliqué pour différents modes de fonctionnement.

Le dernier chapitre, porte sur la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents, et constituée d'un redresseur MLI et un bus continu ; l'ensemble est relié au réseau via un onduleur MLI, la simulation numérique en utilisant une génératrice synchrone à aimants illustre le fonctionnement.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale suivie de quelques perspectives envisagées pour d'autres travaux futurs.

CHAPITRE I

État de l'art sur l'énergie éolienne

I.1 INTRODUCTION :

Des intérêts considérables ont été offerts au domaine des énergies renouvelables ces dernières années à cause principalement des inquiétudes sur la pénurie énergétique au niveau mondial compte tenu de l'industrialisation massive, et la forte pollution environnementale engendrée par la combustion des matières fossiles.

La génération de l'énergie éolienne représente une solution importante qui pourrait mitiger ces problèmes grâce essentiellement à ces impacts insignifiants sur l'environnement, et le fait que cette énergie est renouvelable et pourrait contribuer au développement dans le Monde. [MES08]

Dans ce premier chapitre, nous avons commencé par un peu d'histoire sur l'énergie renouvelable et les éoliennes, ainsi que quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne. Ensuite, nous avons traité les caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal, ainsi que les génératrices adaptées pour différents types d'éolienne et configurations ainsi que leurs avantages et inconvénients

I.2.Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure « I.1 »).

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" (non dégradée), est géographiquement diffusée, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). [REG09]

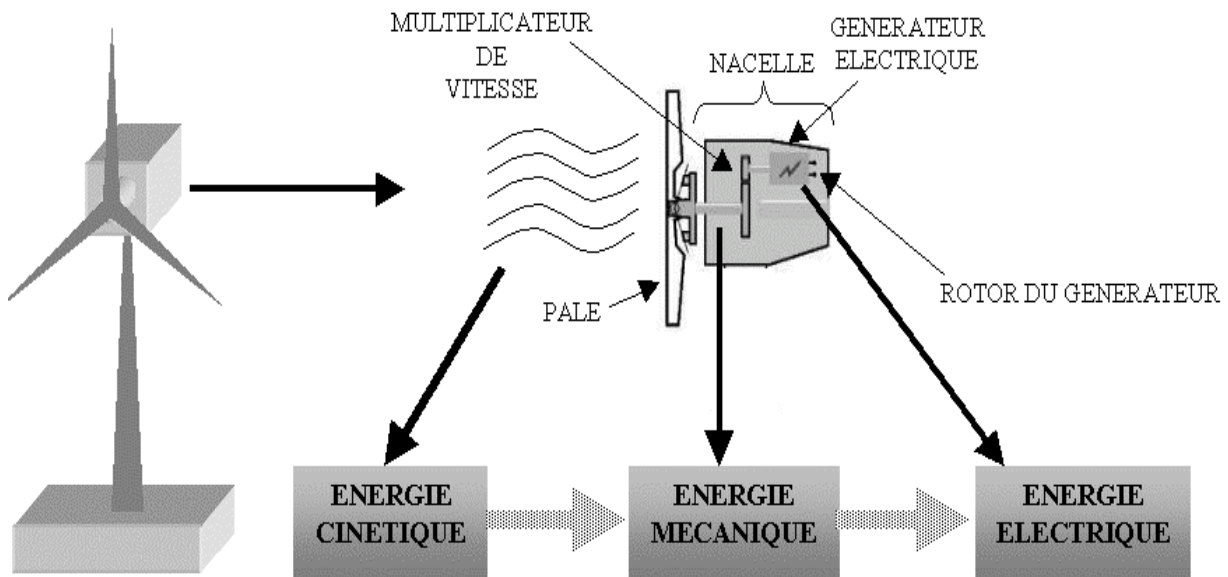


Figure. I.1 : Principe de conversion de l'énergie éolienne. [REG09]

Les éoliennes sont conçues de manière à produire un maximum de puissance pour des vents de force moyenne fréquemment rencontrés. Elles atteignent leur puissance nominale pour une vitesse de vent de 50 km/h (14 m/s). Si le vent devient plus violent, la machine subit des contraintes plus importantes. Elle est alors freinée grâce à un système de régulation électronique qui lui permet de rester à la puissance maximale (atteinte dès 50 km/h) tout en limitant les efforts sur la structure. Au delà d'un certain seuil (90 km/h, soit 25 m/s), la régulation ne suffit plus. La machine est alors stoppée afin de lui éviter de subir des charges trop importantes.

Cette énergie offre deux grands avantages, puisqu'elle est totalement propre être renouvelable. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet (pas d'effet de serre ou de pluies acides) et aucun déchet. Mais le principal inconvénient de cette source d'énergie renouvelable est son manque de flexibilité et son inconstance. Le vent ne souffle pas forcément quand on en a besoin! En moyenne, une éolienne tourne à sa puissance nominale 1/5 du temps sur une année. Il convient alors de diviser par 5 la puissance installée pour obtenir la puissance réelle moyenne. [RED09]

I.3. Situation actuelle de l'énergie éolienne :

Le rapport annuel publié par le GWEC (Global Wind Energy Council) pour l'année 2011 montre l'énorme intérêt voué à l'énergie éolienne à travers le monde, en effet la puissance totale installée à travers le monde jusqu'à la fin de l'année 2011 est estimée à plus de 238.351 MW contre 197.637 MW pour l'année précédente (Figure I.2). [GWE11]

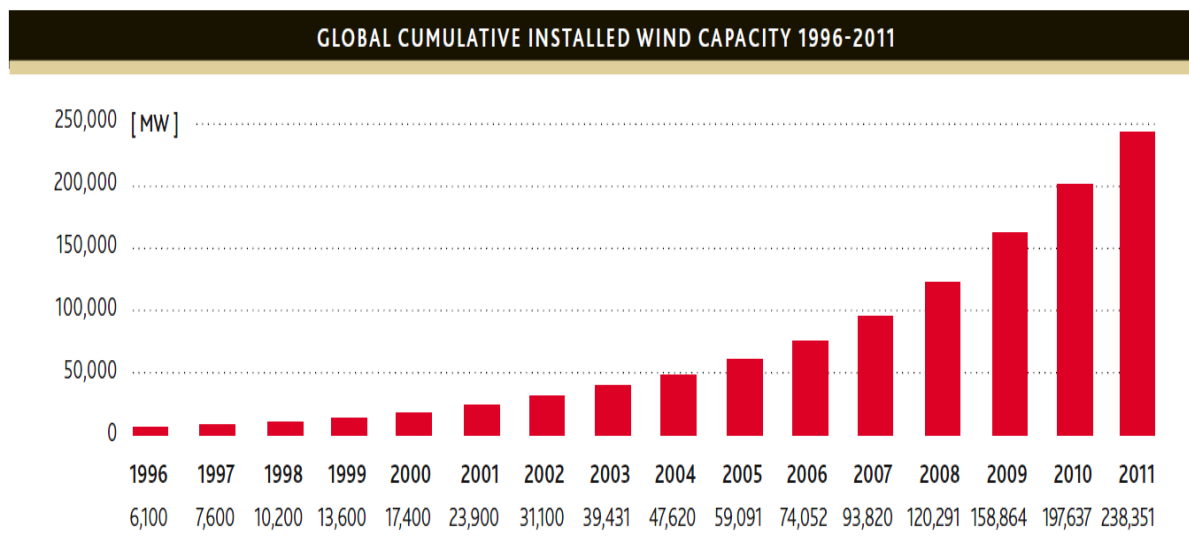


Figure. I.2 : Croissance de la puissance éolienne installée dans le monde de 1996 à 2011.[GWE11]

En 2010, la Chine a investi 63 milliards de dollars dans l'éolien, les États-Unis 18 milliards de dollars. La croissance des investissements dans l'éolien a été de 34 % en 2010, quant à la puissance, elle a augmenté de 22 % en 2010 (soit 35,8 GW). Fin 2010, 197 GW d'éolien sont installés dans le monde .

Les pays qui s'intéressent au développement de l'éolien sont encore en phase de premier investissement (mise en service de champs d'éoliennes qui n'existaient pas auparavant). De fait, les capacités installées croissent en permanence mais à des rythmes différents selon les pays, et classer les États par puissance installée donne un résultat mouvant d'une année à l'autre. Néanmoins, il ressort des chiffres actuels que les plus gros pays investisseurs sont la Chine et les pays occidentaux (Amérique et Europe). D'autres puissances économiques émergentes, comme le Brésil, l'Inde et le Mexique commencent à investir lourdement dans l'énergie éolienne.

En 2007, l'Allemagne disposait de 22,3 GW de puissance éolienne installée, les États-Unis 16,8 GW, l'Espagne 15,1 GW, l'Inde 8 GW, la Chine 6,1 GW et la France 2,4 GW (uniquement à terre).

En 2008, les États-Unis étaient devenus le premier pays pour la capacité d'énergie éolienne avec 25170 MW installés devant l'Allemagne (23 902 MW. Ce secteur employait en 2008 environ 85 000 Américains).

En 2010 la Chine détrône les États-Unis avec 42 GW de puissance installée contre 40 GW pour les Américains. Selon l'Observatoire des Énergies Renouvelables, dans un rapport publié

par EDF (Électricité de France), l'éolien est actuellement la filière énergétique la plus dynamique dans le monde et plus particulièrement dans l'Union européenne où la production d'électricité éolienne a augmenté de 37,8 % par an en moyenne de 1993 jusqu'en 2002. (Tableau I.1). [WIK11]

Les progrès réalisés pour la fin 2011, ne se limite pas à la puissance installée, mais aussi à la puissance d'une seule éolienne, c'est ainsi que le constructeur allemand « ENERCON » vient d'installer la plus grande éolienne jamais mise en service à savoir la E- 126 avec un diamètre de turbine de 126 m, une hauteur totale de 198 m et une puissance de 6MW équipée d'un générateur synchrone à aimants permanents (Figure I.3). [ALI11]

pays	MW fin 1997	MW fin 1998	MW fin 1999	MW fin 2000	MW fin 2001	MW fin 2002	MW fin 2003	MW fin 2004	MW fin 2005	MW fin 2006	MW fin 2007	MW fin 2008	MW fin 2009	MW fin 2010	MW fin 2011
chine	146	200	262	352	400	468	567	764	1266	2599	5899	12210	26010	41800	62733
États-Unis	1673	1820	2534	2564	4258	4685	6370	6725	9149	11603	16819	25170	35159	40200	46919
Allemagne	2081	2875	4443	6095	8754	12001	16629	18428	18500	20622	22247	23903	25777	27191	29060

(Tableau I.1) : Puissance éolienne totale installée- les 3 premiers pays fin 2011 - évolution de 1997 à 2011. [WIK11]



Figure.I.3 : éolienne E- 126

En l'Algérie, l'état a commencé d'intéresser de l'énergie éolienne et se lancer dans un projet de réalisation d'une ferme éolienne à Adrar, d'une puissance de 10 MW. [BEN08]

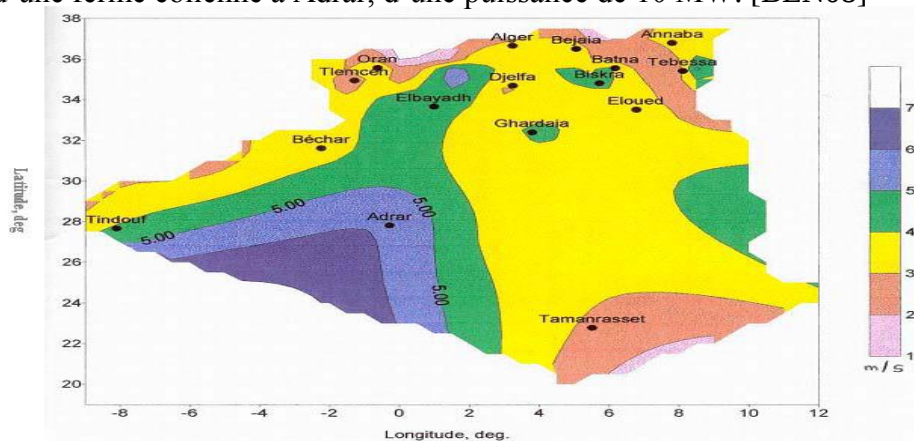


Figure. I.4 : Carte préliminaire des vents de l'Algérie. [RED09]

I.4.Types d'aérogénérateurs :

Un aérogénérateur est un dispositif utilisé pour le transfert de l'énergie cinétique du vent vers l'arbre de transmission en mouvement rotatif. Plusieurs types existent, ils se caractérisent par la position de leur axe de rotation et des performances qui leurs sont propres.

I.4.1.Eoliennes à axe vertical :

Elles ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. De nombreuses variantes ont vu le jour mais rares sont celles qui ont atteint le stade de l'industrialisation.

Ce type d'éolienne a été de plus en plus abandonné à cause des différents inconvénients qu'il a posés. Des problèmes d'aéroélasticité et la grande occupation du sol ont été les raisons de cet abandon au profit des éoliennes à axe horizontale. [BEN08]



Figure. I.5 : Petites éoliennes à axe vertical. [HON10]

I.4.2.Eoliennes à axe horizontal :

Ce type d'éolienne est le plus répandu dans le monde. Ce système se base sur le principe de portance aérodynamique, les pales sont profilées de la même façon qu'une aile d'avion et la circulation du flux d'air dans la turbine entraîne la rotation du rotor de la machine.

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

- Elles sont légères et donc moins chères.
- Elles tournent plus vite car le multiplicateur utilisé présente un rapport de multiplication moins important d'où sa légèreté et des pertes réduites.
- Le couple nécessaire pour la mise en route de ce type d'aérogénérateur est très faible et donc un fonctionnement à faible vitesse de vent. [BEN08]

Ces raisons expliquent notre restriction à ce type d'aérogénérateur dans la suite de nos travaux.



Figure I.6 : Petite éolienne à axe horizontal. [HON10]

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Le tableau I.2 présente une classification des turbines éoliennes.

ECHELLE	DIMÉTRE DE L'HÉLICE	PUISSANCE DELIVRÉE
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

Tableau. I.2: Classification des turbines éoliennes. [RED09]

I.5.Principales composantes des éoliennes à axe horizontal :

L'éolienne à axe horizontale (Figure. I.6), étant le sujet de notre étude, sera décrite en citant ses différents composants.

En générale, l'éolienne à axe horizontale est constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat) la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu. [BEN08]

I.5.1.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). [REG09]

I.5.2. Une nacelle :

Montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

Les différents composants d'une nacelle.

✓ **Le multiplicateur de vitesse** : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.

✓ **L'arbre secondaire** : comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

✓ **La génératrice** : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

✓ **Un contrôleur électronique** : chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle.

Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

✓ **Divers dispositifs de refroidissement** : (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile. Grâce à un système de supervision et contrôle d'une éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu. [RED09]

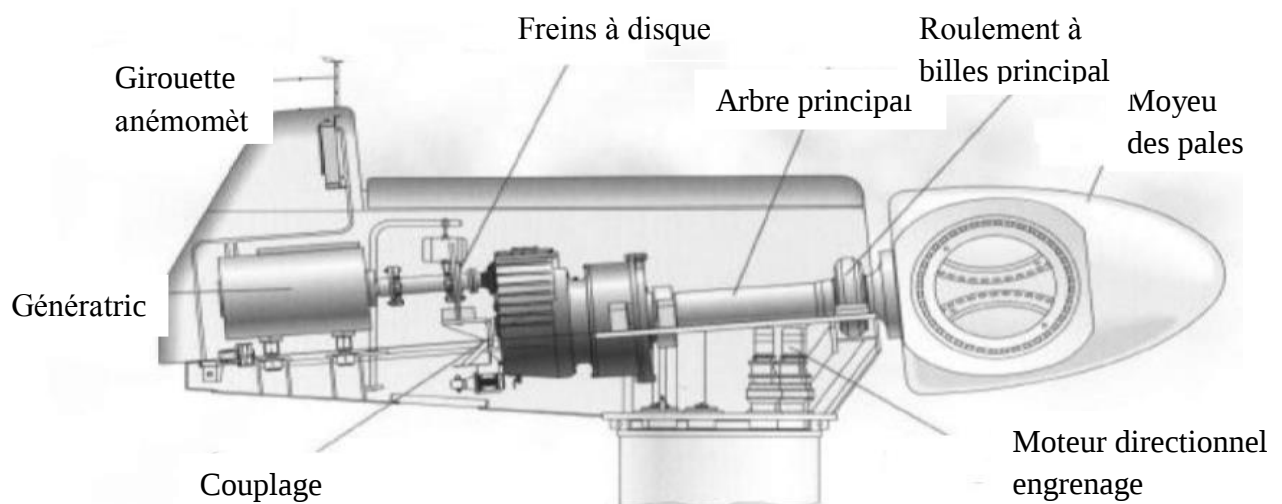


Figure. I.7 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne
[BEN08]

I.5.3. Les pales :

Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.

I.5.4. Le moyeu :

C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent. [BEN08]

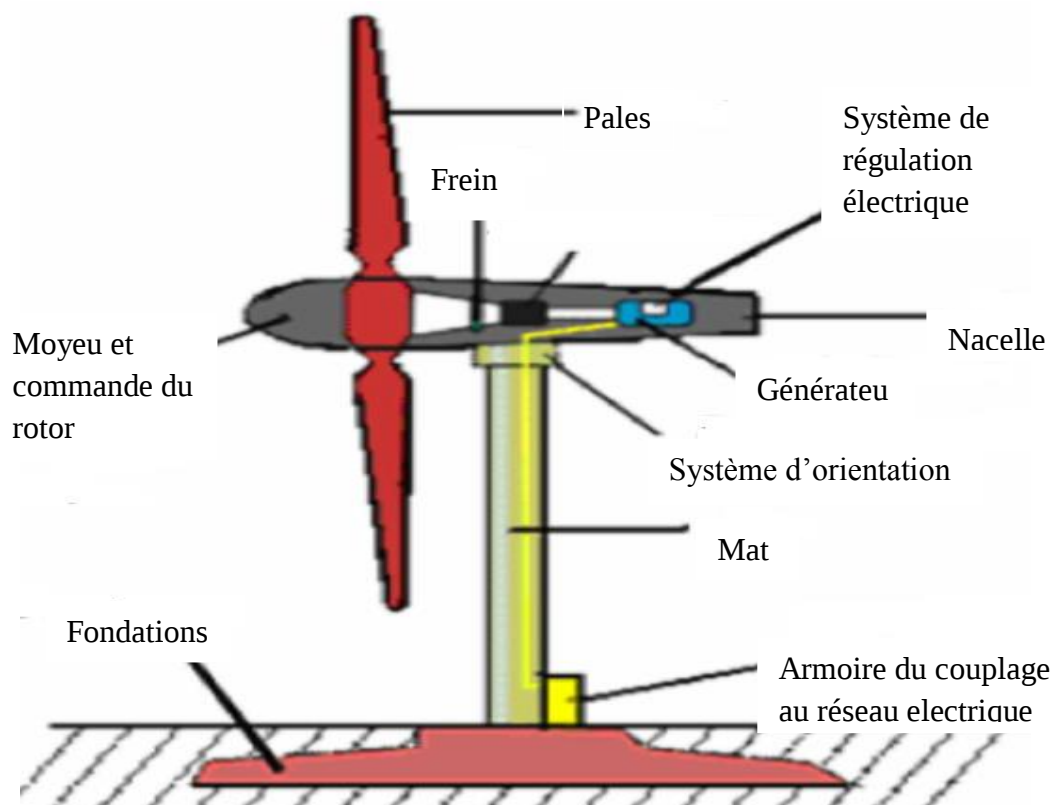


Figure. I.8 : Principales composants de l'éolienne à axe horizontal. [MER07]

I.6. Descriptif d'une éolienne :

Pour qu'une éolienne produise... Quelques notions importantes Diapositives Plusieurs éléments doivent être pris avant installation. L'éolienne doit être adaptée au site et à ses besoins, Il faut vérifier le vent, on considère qu'un site est exploitable lorsque l'on dispose d'une vitesse minimale de vent de 4m/s, à une hauteur du sol de 10m. La donnée 'vent' est essentielle à l'installation d'une éolienne, cependant le coût d'une étude précise, à l'aide d'un anémomètre peut se révéler élevé. Il faut que cela reste cohérent avec le prix global de votre projet. L'observation du site (la présence de moulins, d'éoliennes altitude, vents dominants, végétation...) et l'intuition peuvent se révéler de bons indicateurs du potentiel éolien dans un premier temps.

Ce potentiel conditionnera le choix d'une machine de puissance nominale adaptée. Un autre critère important reste l'évaluation de ses besoins en électricité au regard de ces consommations journalières et annuelles. Cette étape permettra également de réfléchir plus largement à maîtriser ses consommations électriques. [RED09]

Une éolienne est constituée par une tour au sommet de laquelle se trouve la nacelle. Etant donné que la vitesse du vent augmente lorsque l'on s'éloigne du sol, une tour peut mesurer entre 50 et 80 m de haut. Typiquement une éolienne de 1 MW a une hauteur de 80 mètres de haut, ce qui correspond à la hauteur d'un immeuble de 32 étages. La tour a la forme d'un tronc en cône où, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle. La nacelle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande. Tous ces éléments sont représentés sur la figure (I.9). [KEH07]

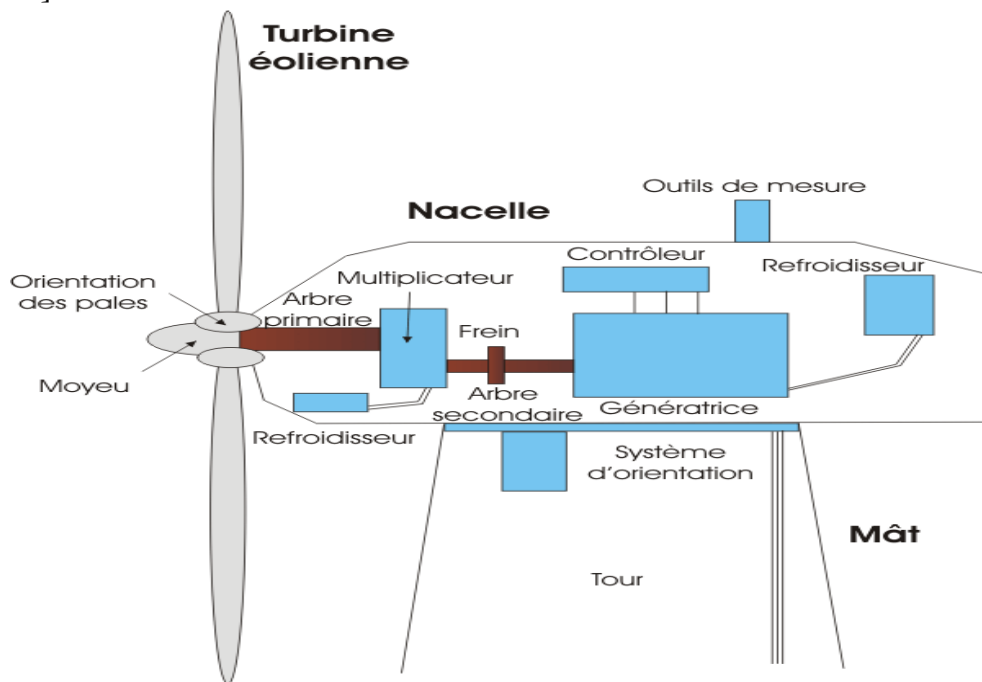


Figure. I.9. Éléments constituant une éolienne. [KEH07]

Un dispositif oriente automatiquement la nacelle face au vent grâce à une mesure de la direction du vent effectuée par une girouette située à l'arrière de la nacelle. La turbine éolienne est munie des pales fixes ou orientables et tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 tr/min. Plus le nombre de pales est grand, plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité. En effet, lorsque la pale supérieure atteint le point le plus extrême, elle capte la puissance maximale du vent. A ce moment, la pale inférieure traverse la zone abritée du vent par la tour. Cette disposition tend à faire fléchir l'ensemble de la turbine vers l'arrière. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales. Lorsque des pales fixes sont

utilisées, un dispositif de freinage aérodynamique est utilisé permettant de dégrader le rendement de la turbine au de là d'une certaine vitesse (décrochage aérodynamique ou stall control). Sinon, un mécanisme d'orientation des pâles permet la régulation de La puissance et un freinage (réglage aérodynamique).

Un arbre dit "lent" relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

Un multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné à environ 1500 tr/min). Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilise pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

La génératrice (ou l'alternateur) est généralement asynchrone, et sa puissance électrique peut varier entre 600kW et 2,5MW.

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

Le système de contrôle -commande comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (par exemple une surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse sont variables. La partie ci-dessous d'écrit d'une manière assez générale le fonctionnement de ces deux procédés. [KEH07]

I.7. Structure des systèmes de conversion de l'énergie éolienne :

La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique se fait en deux étapes :

Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique. En fonction du type de générateur utilisé, il existe actuellement trois principaux types de systèmes éoliens :

- système éolien à vitesse fixe avec machine asynchrone à cage (S.E.I.G.).
- système éolien à vitesse variable avec machine asynchrone à double alimentation (D.F.I.G. ou MADA)

- système éolien à vitesse variable avec machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants. [BEL10]

I.7.1. Les éoliennes à vitesse fixe :

I.7.1.1. Principe général :

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse Ω_{mec} est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice (figure I.10)

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard a deux paires de pôles, la vitesse mécanique (Ω_{mec}) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $\Omega_s = 1500$ t/min, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne. [KEH07]

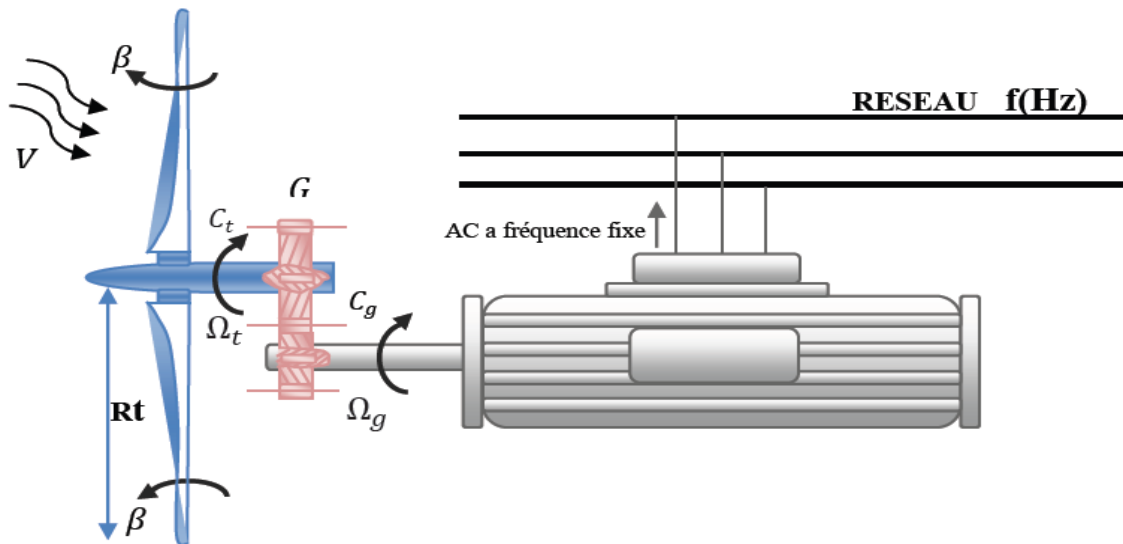


Fig. I.10 : Eolienne directement connectée au réseau. [ROU12]

I.7.1.2. Les Avantages des éoliennes à vitesse fixe :

- Système électrique plus simple ;
- Pas besoin de système électrique de commande ;
- Moins cher. [FER07]

I.7.1.3. Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe

Cette stratégie pose beaucoup de problèmes au niveau de l'exploitation de l'énergie extraite :

- Puissance extraite non optimisée (On rate les maxima théoriques) ;
- Rendement très faible pour les moyens et faibles vents ;

- Nécessité de la maintenance périodique de la boîte de vitesse ;
- Perte de control de la puissance réactive ;
- Magnétisation de la génératrice non contrôlée. [ROU12]

I.7.2. Eolienne à Vitesse variable :

I.7.2.1. Principe général :

Vu les problèmes causés par un fonctionnement à vitesse variable (Systèmes d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre,...), on a cherché l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent. Pour cela, il faut ajuster en permanence la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent. Cette optimisation de la production voulue peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, et sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance).

Le convertisseur statique a pour mission de découpler la fréquence du réseau de distribution électrique à la vitesse de rotation de la génératrice, c'est à lui de jouer le rôle d'une interface électronique de régulation de la fréquence et de l'amplitude. Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé (La société Jeumont Industrie utilise un rotor à pas fixe)

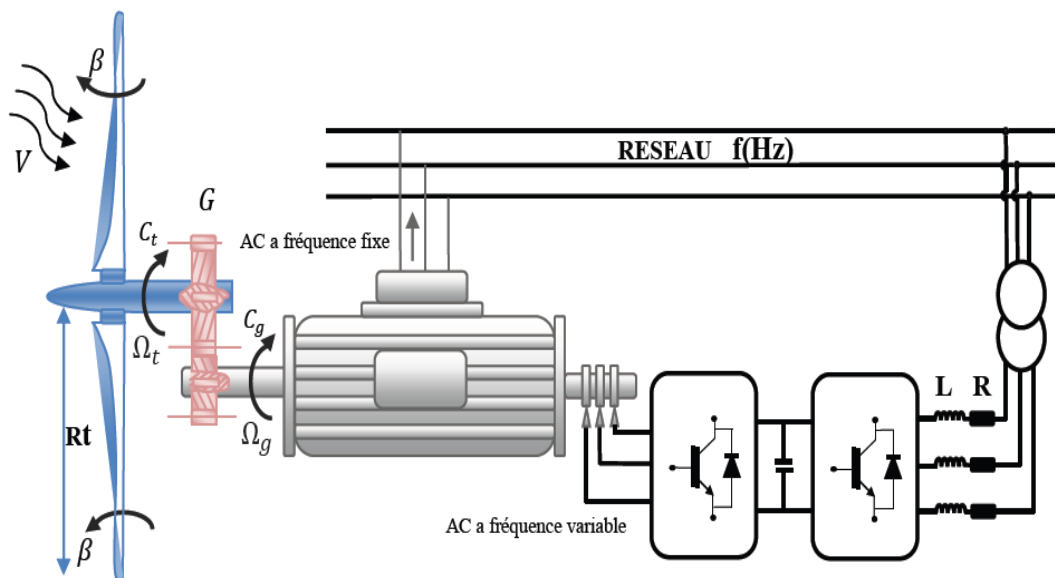


Figure.1.11 : Eoliennes à vitesse variable. [ROU12]

I.7.2.2. Les avantages :

- Augmentation du rendement énergétique ;
- Réduction des oscillations du couple ;
- Réduction des efforts subis par le convertisseur de puissance ;
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

I.8.Types des machines électriques :

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une influence sur son fonctionnement, le fait qu'une éolienne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. [MER07]

I.8.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone :

La machine asynchrone équipe actuellement une grande partie du parc éolien. Elle a l'avantage d'être robuste et de faible coût.

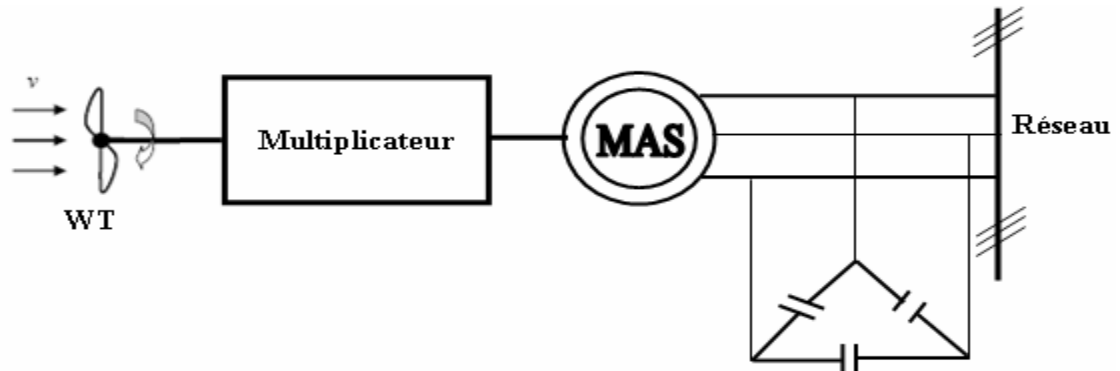


Figure.I.12 : Machine asynchrone avec liaison direct au réseau

Une topologie consiste à relier directement une MAS à cage d'écureuil au réseau (Figure (I.12)). Un multiplicateur est associé à la machine et un banc de condensateurs assure sa magnétisation. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la MAS. L'avantage de cette architecture est sa simplicité et son faible coût. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage/décrochage au réseau. Cette structure est

Largement employée au Danemark depuis les années 70. Le dispositif de la figure (I.13) permet de fonctionner à vitesse variable. Le redresseur à diodes fournit une tension continue variable en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne qui peut être exploitée par un onduleur MLI pour renvoyer sur le réseau une tension alternative à la fréquence adéquate et des courants sinusoïdaux.

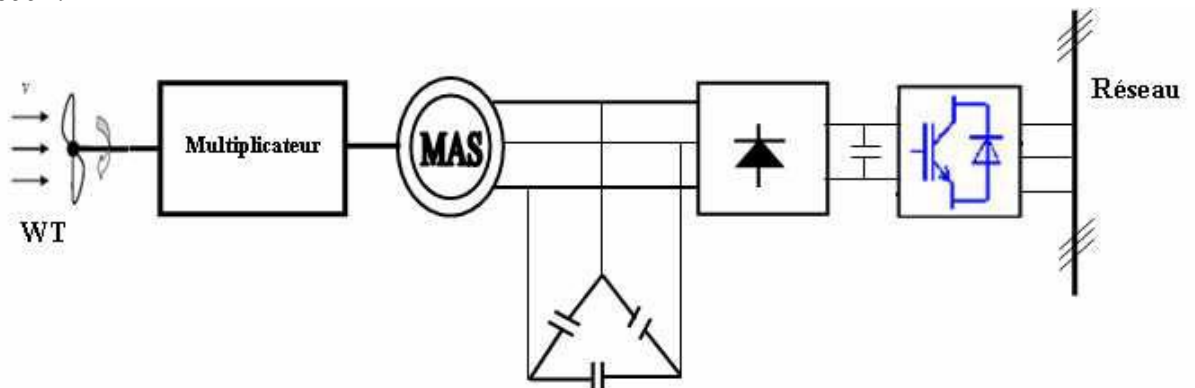


Figure.I.13 : Machine asynchrone avec liaison indirecte au réseau

La magnétisation de la machine s'effectue avec un banc de condensateurs. Cette solution met en œuvre des convertisseurs de puissance qui doivent être dimensionnés pour la puissance totale envoyée par le générateur sur le réseau (coût et pertes importants) et des condensateurs pénalisants en termes de coût. Ces inconvénients ont freiné le développement industriel de cette structure

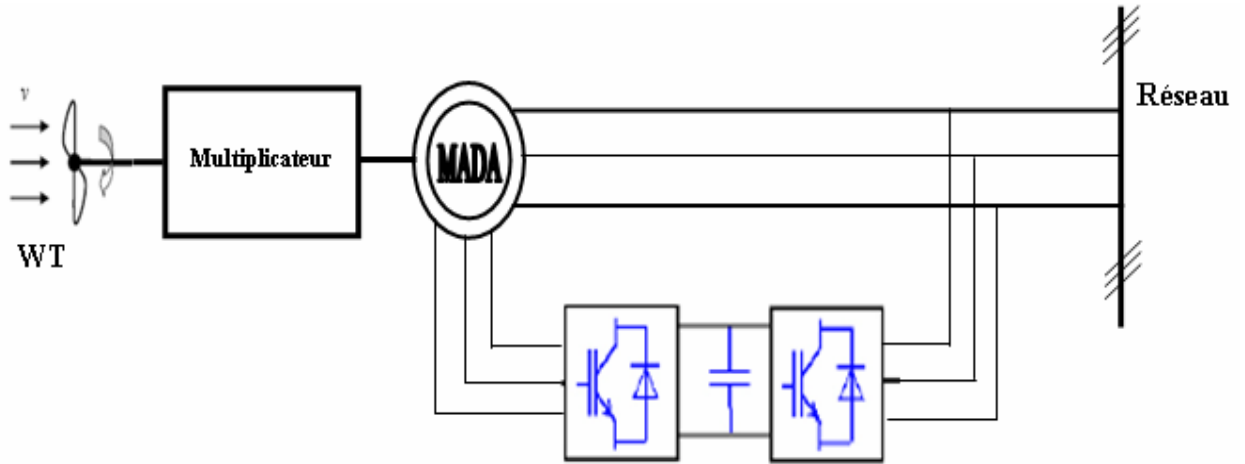


Figure. I.14: MADA avec 2 convertisseurs MLI en cascade reliés au réseau

La figure (I.14) montre une configuration avec la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). La MADA a la particularité de disposer de deux bobinages triphasés au stator et au rotor. L'un est relié directement au réseau et transfère la plus grande partie de la puissance alors que l'autre de moindre puissance permet de faire varier les courants rotoriques d'excitation de la MADA. C'est sur ce bobinage de moindre puissance que le convertisseur de puissance, composé d'un ensemble redresseur/onduleur MLI en cascade, est inséré afin de contrôler la vitesse de rotation de la machine. Un tel dispositif a l'avantage de fonctionner à vitesse variable en faisant intervenir un convertisseur de faible puissance. Celui-ci a une puissance de l'ordre de 30 % de la puissance nominale fournie au réseau. [BEL10]

I.8.2. Systèmes utilisant la machine synchrone :

Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts.

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive. Les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante. Par contre, la possibilité de réglage de l'inducteur de ces machines offre un moyen supplémentaire

d'ajustement du point de fonctionnement énergétique. Le couplage direct sur le réseau est proscrit car étant beaucoup trop rigide.

Une électronique de puissance s'impose pour toutes les applications utilisant ce type de machine qui sont donc à vitesse variable. Mais, contrairement aux génératrices MADA (Machines Asynchrones à Double Alimentation) la chaîne de conversion placée sur le stator doit être dimensionnée pour la totalité de la puissance du système de production. Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais pour les génératrices à aimants (Figure I.15). Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple). La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.

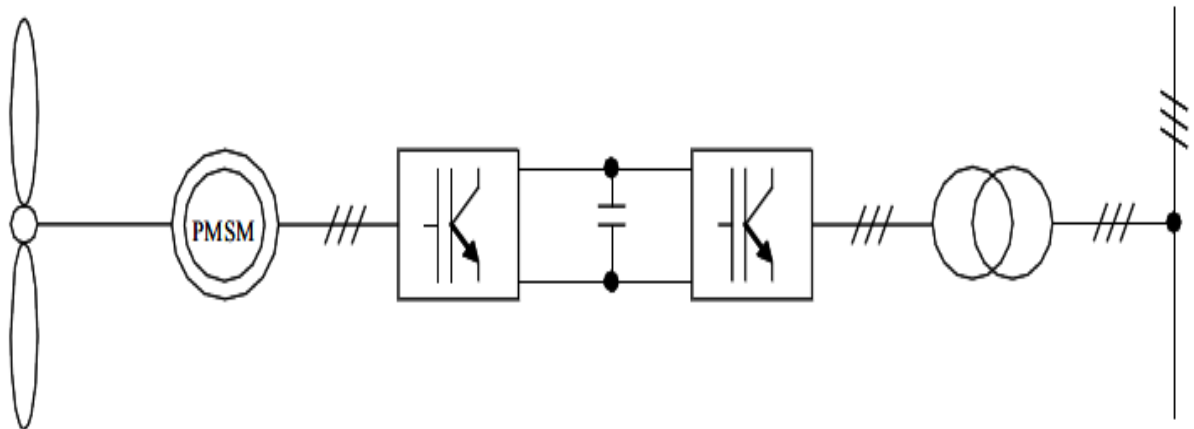


Figure.I.15 : Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents

Une autre solution (Figure I.16) est le redressement à diodes placé directement derrière la génératrice. L'optimisation de la gestion énergétique n'est alors possible que si l'excitation est réglable.

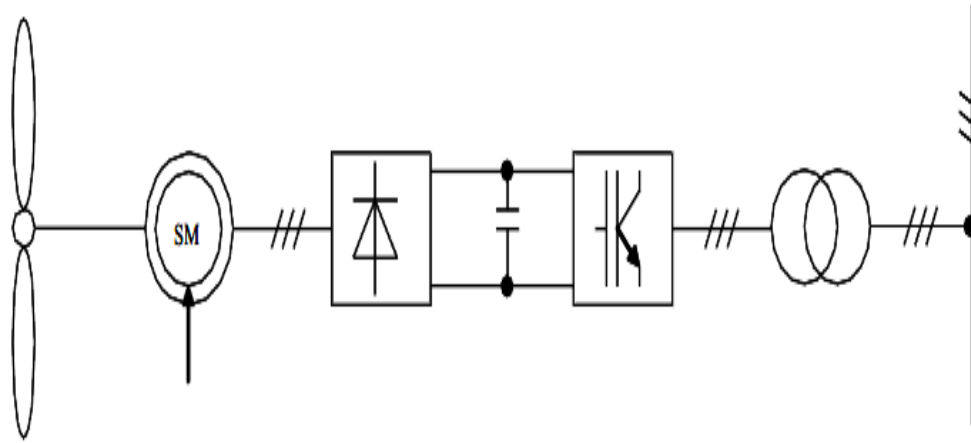


Figure.I.16 : Système basée sur la machine synchrone et redresseur à diodes

Les systèmes de très petite puissance peuvent être simplifiés radicalement. En choisissant judicieusement les paramètres (paramètres machine et tension continue) du système représenté sur la Figure (I.17) un système à vitesse « non constante », à coût minimum et énergétiquement assez performant peut être obtenu. [REC05]

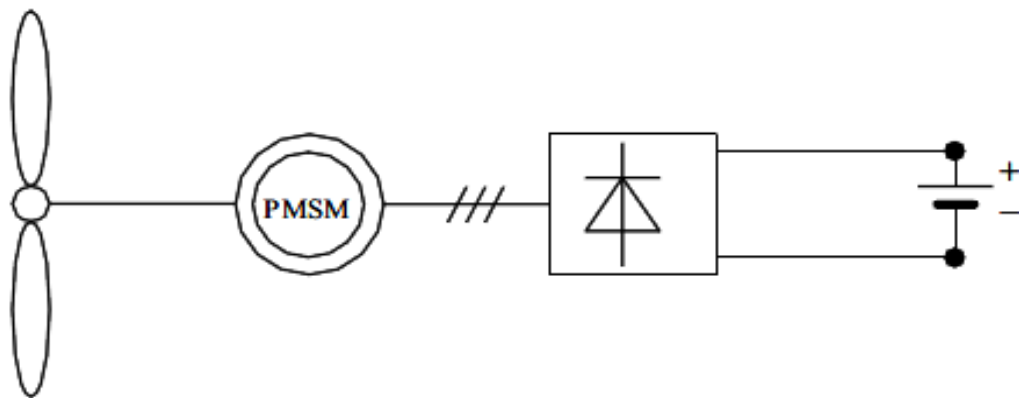


Figure. I.17 : Système éolien à coût minimum. [REC05]

I.9.Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la puissance. Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nominale P_n qui est obtenue à partir d'une vitesse nominale du vent V_n . Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante. A côté de la vitesse nominale V_n , on spécifie aussi

- la vitesse de démarrage, V_d à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie,
- la vitesse maximale du vent, V_M , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Les vitesses V_n, V_d et V_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance

Utile en fonction de la vitesse du vent (Figure (I.18)) :

- la zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas) ;
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V
- la zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n ;
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie. [BEL10]

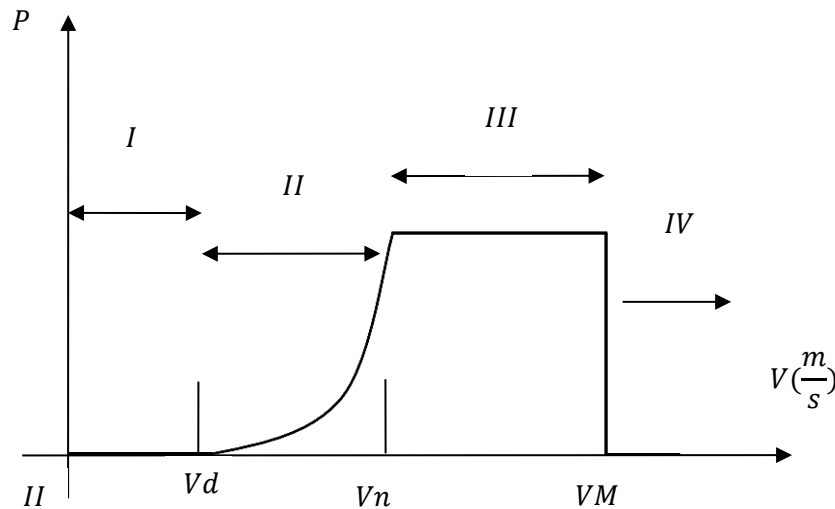


Figure.I.18: Diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent

I.10. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne:

Tous système de production d'énergie a ses avantages et ses inconvénients :

I.10.1. Avantages

- Non polluante
- Inépuisable (énergie du vent)
- Peut être rentable dans les régions éloignées et ventée (sites isolés)
- Peut être complémentaire des filières traditionnelles.

I.10.2. Inconvénients

- Aspect aléatoire (sujette aux variations des vitesses de vent)
- Bruit des pales
- Impact visuel
- Interférences électromagnétiques. [BEL10]

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu théorique sur le système de génération d'énergie à base d'une éolienne. Cette étude nous a permis de connaître le mode de fonctionnement de ce système de conversion d'énergie, qui se décompose de trois parties, à savoir la partie aérodynamique, la partie transfert mécanique et la partie génératrice ainsi que son système de pilotage.

Dans un premier temps, une description de l'énergie éolienne et quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été présentées, ainsi que les méthodes de description du gisement éolien. Ensuite, on a traité les deux types d'éoliennes à axe horizontal et vertical. Vu que le système de génération éolien à axe horizontal est le plus répandu dans le monde, nous avons traité les caractéristiques technologiques de ce type d'éoliennes. Enfin, les avantages et les inconvénients de cette énergie

Dans la suite de ce mémoire, nous allons étudier par modélisation et par simulation numérique chaque partie du système de conversion ce qui fait l'objet des prochains chapitres.

Chapitre II

Modélisation de la conversion éolienne et contrôle au niveau de la turbine

II-1 Introduction :

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

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

Dans cette partie, un modèle analytique de la turbine éolienne est décrit ainsi que l'identification des différents paramètres qui régissent le fonctionnement de cette dernière à savoir le coefficient de puissance $C(p)$, l'angle de calage (β) et la vitesse spécifique du vent (λ). [ALI11]

II.2.Énergie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique :

II.2.1. Loi de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (II.1), sur lequel on a représenté la vitesse du vent v_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse v_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne v_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor v_2 soit $\frac{(v_1+v_2)}{2}$ la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pâles est définie par. [12]

$$m = \frac{\rho S(v_1 + v_2)}{2} \quad (\text{II.1})$$

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) :

$$P_m = m * \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \quad (\text{II.2})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (II.2) :

$$P_m = \frac{S\rho(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (\text{II.3})$$

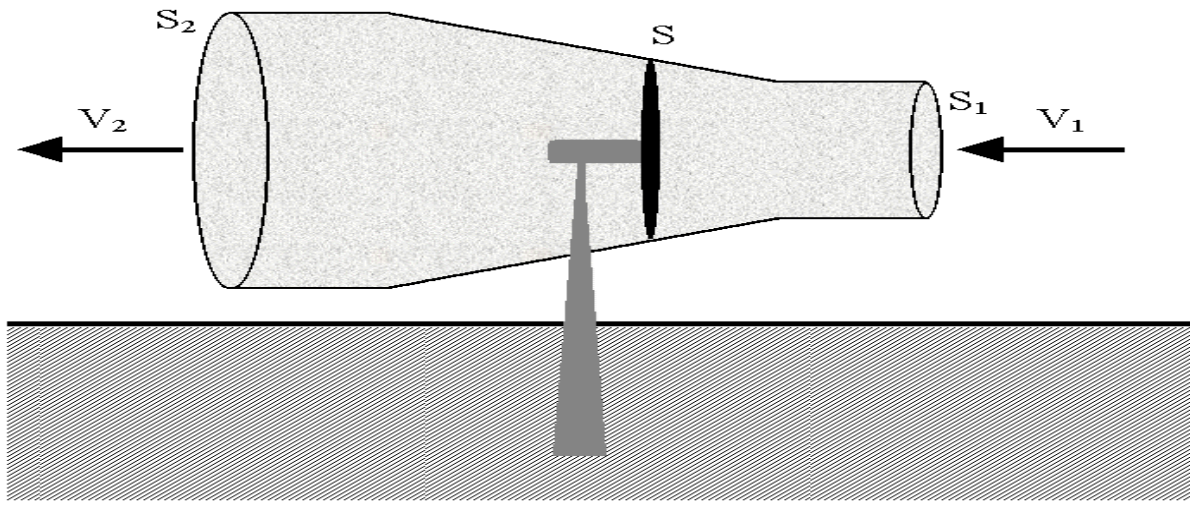


Figure. II.1 : Tube de courant autour d'une éolienne

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 :

$$P_{mt} = \frac{\rho v_1^3 S}{2} \quad (II.4)$$

La puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{v_1}{v_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2\right)}{2} \quad (II.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure II.2), on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance 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 extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. (Figure II.3) [KEH07]

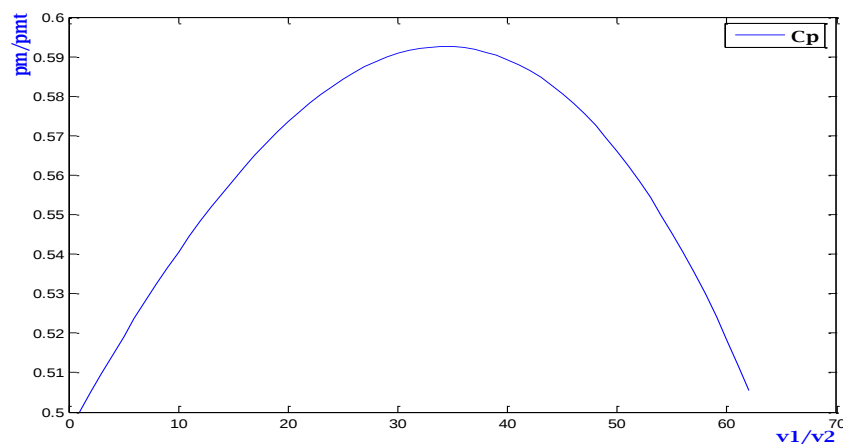


Figure.II.2 : Coefficient de puissance

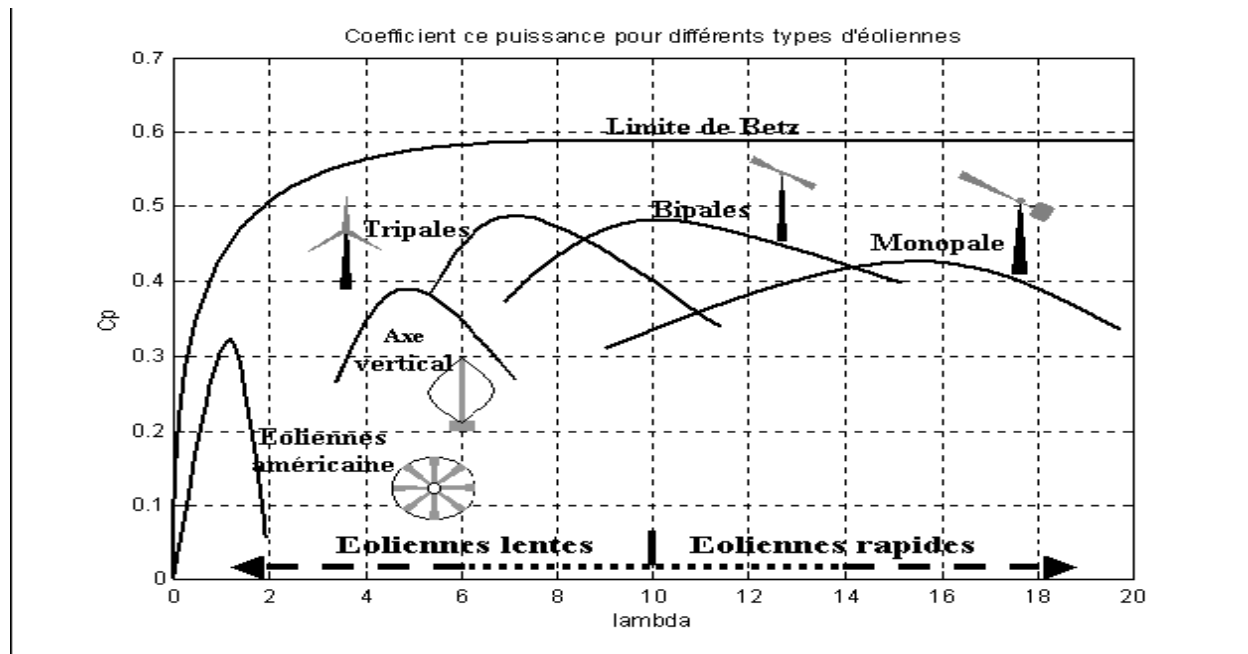


Figure.II.3 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes. [KEH07]

II.2.2. Modèle de la turbine :

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par [BEL10]

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_v^3, \quad S = \pi R_T^2 \quad (\text{II.6})$$

Avec :

ρ : La masse volumique de l'air (kg/m^3).

V_v : La vitesse du vent (m/s).

Ω_T : La vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine [rad/s]

S : La surface balayée par le rotor (balayée par les pales) [m^2]

R : Le rayon du rotor de la turbine à vent [m]

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est fournie par la limite de Betz :

$$P_{max} = \frac{19}{27} P_v = 0.59 P_v \quad (\text{II.7})$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini par :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{max}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{max}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} = 0.59 \quad (II.8)$$

Le coefficient de puissance C_p de l'éolienne, est propre à chaque voile. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent par : [BEL10]

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{aer}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \quad (II.9)$$

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent (P_v).

La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne P_{aer} peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p : [RED09]

$$P_{aer} = C_p(\lambda) * P_v \quad (II.10)$$

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \rho S C_p(\lambda) V_v^3 \quad (II.11)$$

D'après Betz, le coefficient de puissance C_p ne peut être supérieur à 16/27. Le coefficient C_p , diffère pour chaque éolienne, dépend de l'angle d'inclinaison des pales β et du rapport de vitesse λ :

$$\lambda = \frac{R_T \cdot \Omega_T}{V_v} \quad (II.12)$$

Le couple exercé par le vent sur la turbine (ou le couple mécanique à la sortie de la turbine) est défini par: [KEH07]

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_T} \quad (II.13)$$

Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour calculer le coefficient C_p et différentes expressions ont été proposées. Nous présentons ci-dessous quatre formes déjà utilisées dans différents articles scientifiques. [SAG04]

$$i) \quad C_p = \frac{1}{2} \cdot (\gamma - 0,022 \cdot \beta^2 - 5,6) \cdot e^{-0,17 \cdot \gamma}$$

Ou : $\gamma = \left(\frac{9}{4}\right) \cdot \frac{V_v}{\Omega}$; γ est le rapport de vitesse périphérique

$$ii) \quad C_p = (0.44 - 0.0167 \cdot \beta) \cdot \sin \left[\frac{\pi(\lambda-3)}{15-0,3\beta} \right] - 0.00184(\lambda-3) \cdot \beta$$

$$iii) \quad C_p = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda'} - 0,4 \cdot \beta - 5 \right) \cdot e^{-\left(\frac{12,5}{\lambda'}\right)} \text{ et } \frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}$$

$$iv) \quad C_p = 0,73 \left(\frac{151}{\lambda'} - 0,58 \cdot \beta - 0.002 \cdot \beta^{2,14} - 13.2 \right) \cdot e^{-\frac{18,4}{\lambda'}}$$

$$\text{Et } \frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda - 0,02 \cdot \beta} - \frac{0,003}{\beta^3 + 1}$$

Généralement les articles présentent le coefficient C_p par des graphiques

Le coefficient C_p est différent d'une turbine à l'autre, en effet les courbes du coefficient de puissance des turbines à vent commerciales sont fournies dans la documentation produite par le fabricant et peuvent être utilisées pour définir une approximation mathématique de la courbe de puissance à l'aide de méthodes d'optimisation numériques.

Cependant, il est jugé souvent non nécessaires de développer différentes approximations de ce coefficient pour tous les types des turbines à vent, puisque les différences entre les courbes des turbines à vent sont généralement faibles et peuvent être souvent négligées dans de nombreuses applications. [SAG04]

L'étude d'une éolienne particulière a permis de déduire la formule empirique: [KEH07]

$$C_p = (0.5 - 0.00167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{II.14})$$

Avec β exprimé en degrés

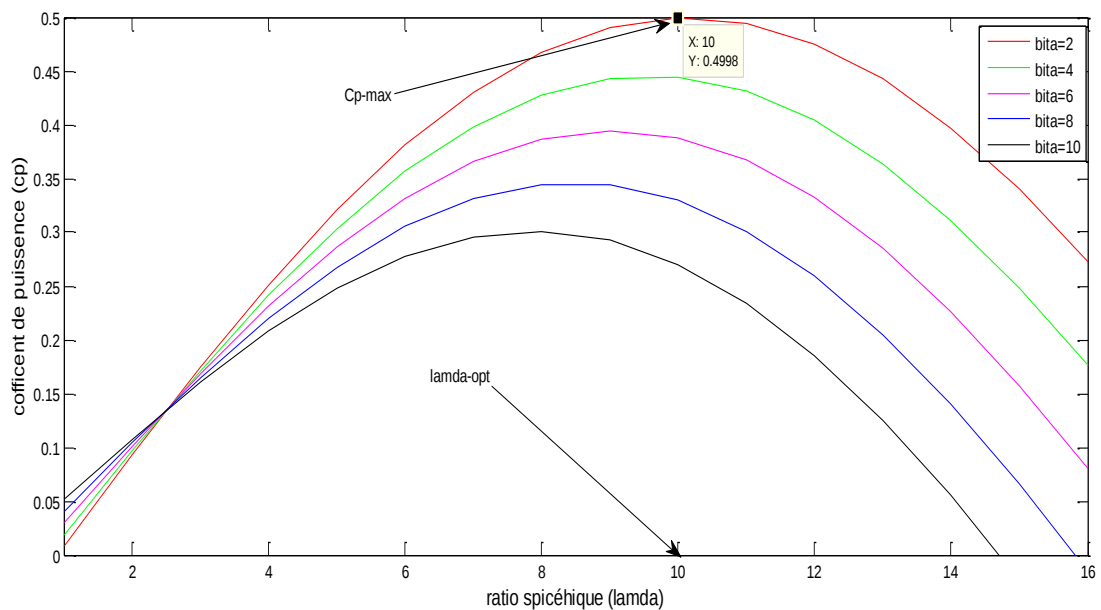


Figure II.4 : Coefficient de puissance C_p

La figure II.4 représente le coefficient de puissance C_p (calculé à partir de l'équation $C_p(\lambda, \beta_i)$) en fonction du rapport de vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales β_i . On remarque que si, pour un angle constant β_i , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal à λ_{optimal} à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale. La figure II.4 montre le λ_{optimal} correspondant à un angle d'inclinaison des pales β_i .

Ainsi comme il est illustré dans la figure (II.4), il est possible de constater que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci ($C_{p-\text{max}} = 0.499$) est atteint pour une valeur du rapport d'avance $\lambda_{\text{optimal}} = 10$, et de l'angle d'orientation des pales $\beta_{\text{opt}} = 2$. Avec cette valeur la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Dans la suite de notre travail une commande adaptée sera élaborée pour atteindre ce point de fonctionnement [ROU12]

Au vu de la caractéristique suivante (Figure II.5), on peut remarquer que pour chaque vitesse de

vent, il existe une vitesse de la génératrice qui permet de capter une puissance maximale.[MER07]

Et il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités.[RED09]

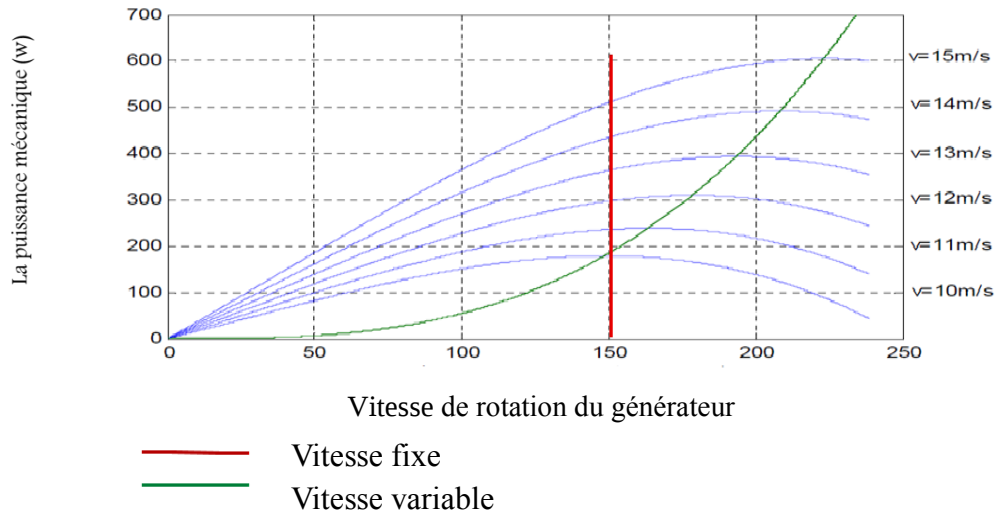


Figure. II.5 : Puissance théorique disponible en fonction de la vitesse de vent. [RED09]

II.2.3. Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par l'équation suivante. [BEL10]

$$C_g = \frac{c_{aer}}{G} \quad (II.15)$$

$$\Omega_T = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.16)$$

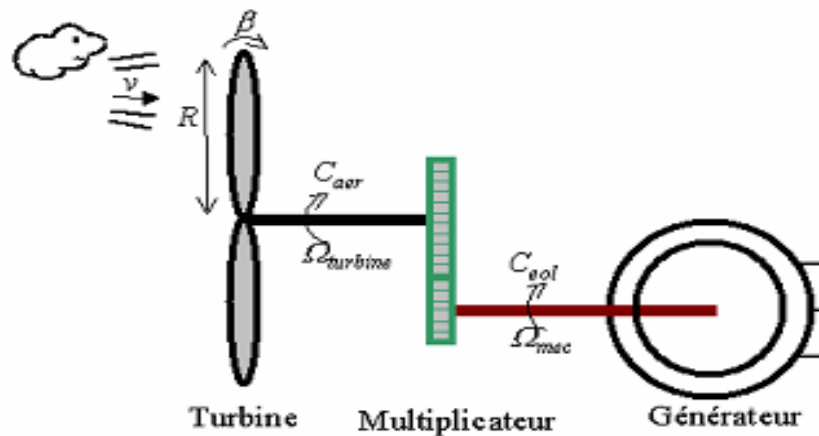


Figure.II.6 : Schéma de la turbine éolienne

II.2.4. Modélisation de l'arbre de la machine

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine.

$$J = \frac{J_T}{G^2} + J_g \quad (II.17)$$

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.18)$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.19)$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f : [RED09]

$$C_{vis} = f \Omega_{mec} \quad (II.20)$$

II.2.5. Schéma bloc du modèle de la turbine :

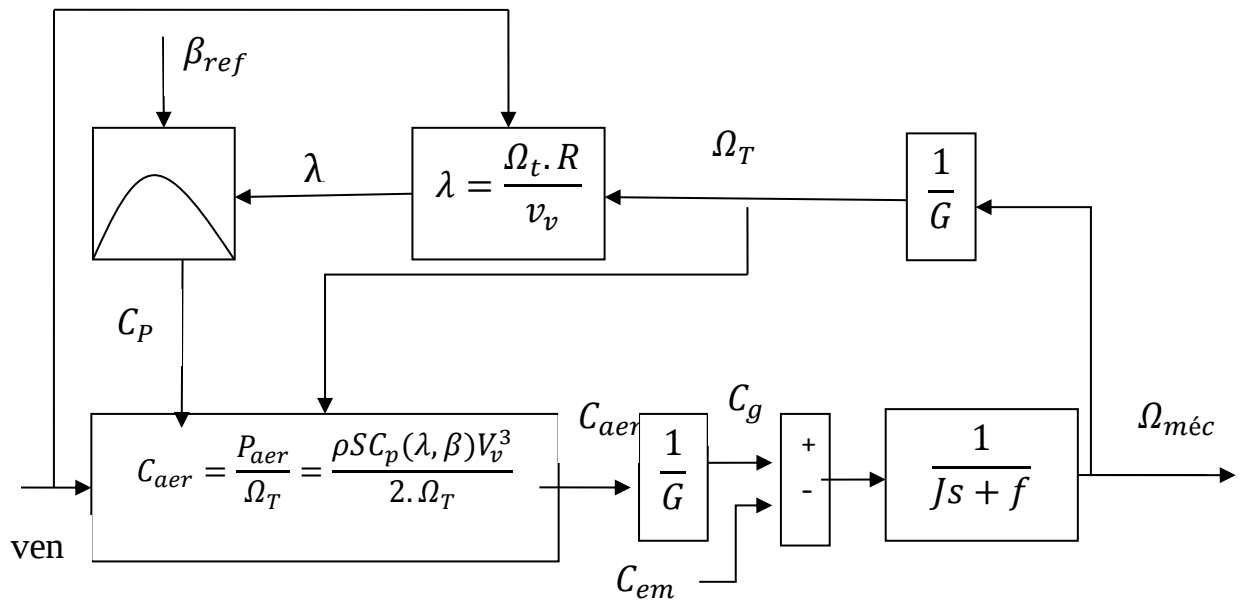


Figure. II.7: Schéma bloc du modèle de la turbine.

La turbine génère le couple aérodynamique (équation (II.13)) qui sera appliqué au multiplicateur. Les entrées de la turbine sont :

- La vitesse du vent ;
- L'angle d'orientation des pales ;
- La vitesse de rotation de la turbine ;

II.3.Stratégies de commande de la turbine éolienne

II.3.1.Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable

Il y a trois zones de fonctionnement pour une éolienne

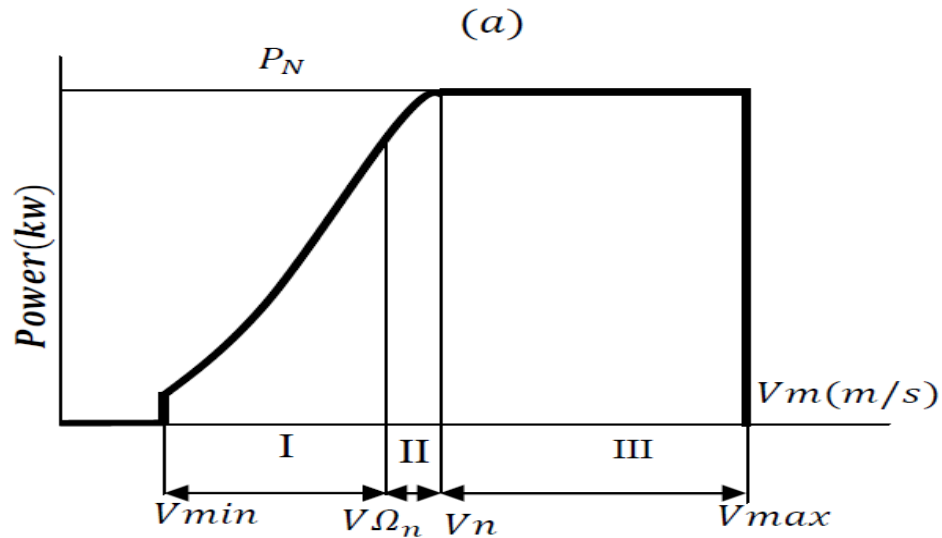


Figure.II.8 : Caractéristiques vitesse de rotation, vitesse de vent [ROU12]

Deux stratégies de commande de la turbine à vitesses variables sont indiquées sur la figure (II.8)

a) Stratégie d'optimisation de puissance : Dans cette stratégie représentée par les Zones I et II l'énergie capturée est optimisée au-dessous de la vitesse nominale du vent.

b) Stratégie de limitation de puissance : Le but de cette stratégie est de limiter la puissance nominale de la turbine pour une vitesse supérieure à vitesse nominale du vent « la zone III ».

Cette caractéristique, idéale, montre trois zones différentes avec des objectifs de commande distinctifs

➤ **Zone I :**

Correspond aux faibles vitesses du vent, la puissance disponible dans cette zone est inférieure à la puissance nominale de la turbine. L'objectif dans cette zone est d'extraire le maximum de puissance du vent en appliquant des techniques appelées techniques d'extraction de maximum de puissance (Maximum Power Point Tracking MPPT).

➤ **Zone II :**

Zone de transition entre la zone de charge partielle (Zone I) et la zone de charge nominale (Zone II). Dans cette zone, la vitesse de rotation est maintenue constante pour des raisons mécaniques (contraintes des pales) et acoustiques (bruits générés).

➤ **Zone III :**

Correspond aux vents forts, l'objectif dans cette zone est de limiter la puissance produite à une valeur égale à la puissance nominale de l'éolienne pour éviter les surcharges. Cela se fait par action sur l'angle de calage des pales. [ROU12]

II.4. Système de contrôle de l'aéroturbine :

Le contrôle de l'aéroturbine est assuré par deux boucles de régulation, fortement liées :

1. Boucle de régulation de vitesse.
2. Boucle de régulation de puissance.

La première boucle est la boucle principale dans la stratégie d'optimisation de la puissance où la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique. Dans la stratégie de limitation de puissance, les deux boucles de régulation interviennent.

Quand la vitesse de vent est inférieure à la vitesse nominale, l'angle de calage est maintenu constant à une valeur optimale β_{opt} , tandis que la vitesse de rotation est ajustée par la boucle de régulation de vitesse pour extraire le maximum de la puissance du vent. Lors d'une rafale de vent, la vitesse de rotation va augmenter et peut dépasser la vitesse nominale à cause de la vitesse lente du système d'orientation des pales qui a une dynamique plus lente que celle de la machine. Dans ce cas, la boucle de vitesse réagit en augmentant la puissance de référence de la génératrice, et anticipe l'action du dispositif d'orientation des pales en réglant le couple électromagnétique de manière à contrôler la vitesse de rotation dans la zone III. [ALI11]

II.5. Méthodes de recherche du point maximum de puissance :

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de « cloche ». Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale.

Le schéma de la figure (II.9), illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse donnée du vent. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale définie par l'équation

$$P_{opt} = \frac{1}{2} \rho S C_p^{opt}(\lambda_{opt}) V_v^3 \quad \text{II.21}$$

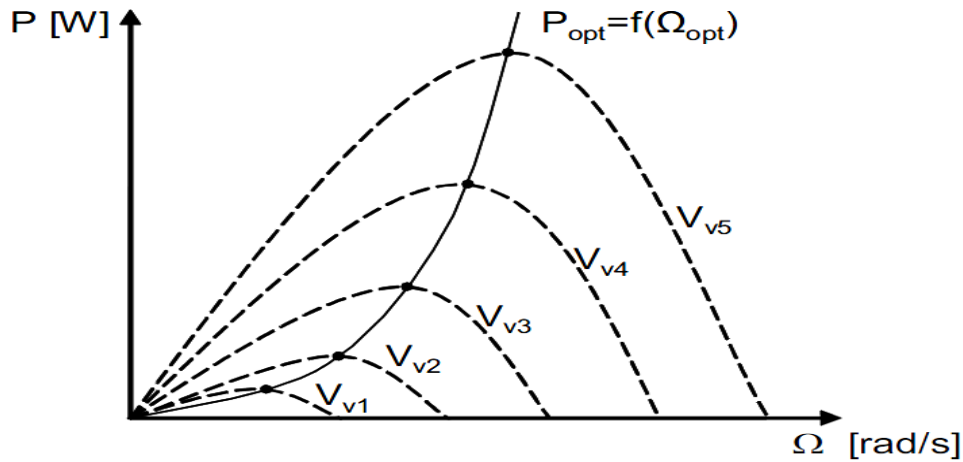


Figure II.9 : Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation.

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette courbe. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie: Maximum Power Point Tracking (MPPT) correspond à la zone II doit être utilisée. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. On distingue deux approches possibles :

1- La première approche ;

C'est l'approche la moins classique, considère que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ n'est pas connue.

2- La deuxième approche ;

Cette approche est la plus répandue, suppose que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ est connue. Il suffit de suivre la courbe optimale de puissance pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales [MES08]. Dans ce travail, nous basons sur la deuxième approche.

II.5.1. Commande dans la zone de fonctionnement en dessous de la puissance nominale

Dans cette zone de fonctionnement, la commande a pour principaux objectifs de maximiser l'énergie capturée du vent et de minimiser les efforts subis par le dispositif d'entraînement. Pour maximiser la capture de l'énergie du vent, ces deux variables doivent être maintenues à leurs valeurs optimales afin d'assurer la valeur maximale de $C_p^{\text{opt}} = (\lambda_{\text{opt}}, \beta_{\text{opt}})$. On fixe donc l'angle de calage à sa valeur optimale β_{opt} . La vitesse spécifique à sa valeur optimale λ_{opt} [ROU12]

II.5.2. Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien, et crée des variations continues de puissance. De cet effet, il est supposé que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence quel que soit la puissance générée.

$$C_{\text{em}} = C_{\text{em-réf}} \quad (\text{II.22})$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une vitesse de référence. Ce ci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence

$$C_{em-réf} = K_{ass}(\Omega_{mec-réf} - \Omega_{mec}) \quad (II.23)$$

K_{ass} : Régulateur de vitesse

$\Omega_{me-réf}$: vitesse de référence

La vitesse de rotation de la turbine est égale à :

$$\Omega_T = \frac{v_v * \lambda}{R} \quad (II.24)$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique λ_{opt} et le coefficient de puissance maximale C_{p-max} peut se déduire de (II.24) :

$$\Omega_{T-réf} = \frac{v_v * \lambda_{opt}}{R} \quad (II.25)$$

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ($\Omega_{T-réf}$) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc : [MES08]

$$\Omega_{mec-réf} = G * \Omega_{T-réf} \quad (II.26)$$

La figure (II.10) représente le schéma bloc de cette maximisation.

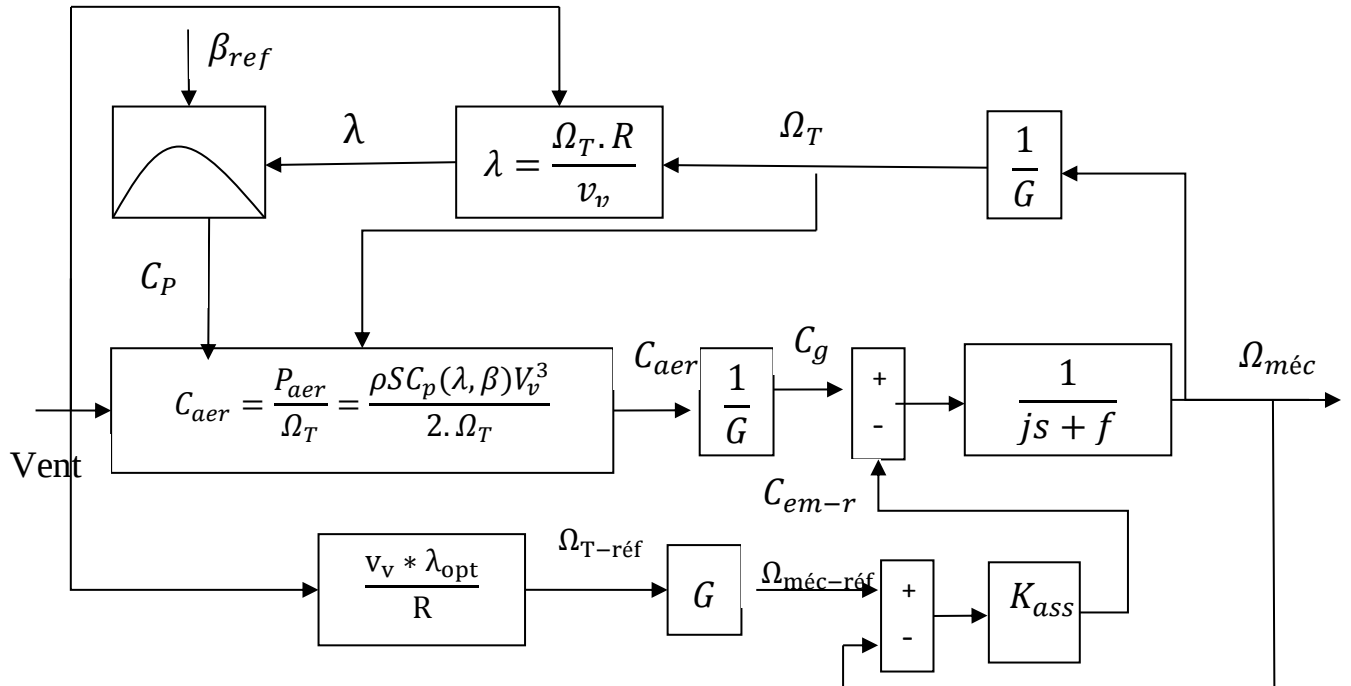


Figure II.10– Schéma bloc de commande avec asservissement de la vitesse.

II.5.3. Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Etant donné que la technique précédente de maximisation de puissance repose sur la connaissance précise de la vitesse du vent, ce qui rend le réglage de la vitesse de rotation de la turbine relativement difficile, et dégrade les puissances captées avec des mesures erronées de cette vitesse de vent. Le recours au contrôle des éoliennes sans asservissement de vitesse est devenu une nécessité pour la plupart des constructeurs

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent, et par conséquent la vitesse de rotation de la turbine varient très peu en régime permanent. [MES08]

Donc le couple aérodynamique optimale est déterminé par l'expression :

$$C_{aer-opt} = \frac{\rho \pi R_T^3 C_p^{opt}(\lambda_{opt})}{2\lambda_{opt}} V_v^2 \quad (II.27)$$

$C_{aer-opt}$: Le couple optimal

λ_{opt} : La vitesse spécifique optimale

Cette équation est écrite sur l'arbre lent de l'éolienne, pour la ramener sur l'arbre rapide (l'arbre du générateur) il suffit de la diviser par le rapport du réducteur de vitesse G .

$$C_{g-opt} = \frac{\rho \pi R_T^3 C_p^{opt}(\lambda_{opt})}{2G\lambda_{opt}} V_v^2 \quad (II.28)$$

Si le couple électromagnétique C_g est commandé de manière à suivre le couple optimal, l'éolienne demeure autour de sa courbe de rendement optimal. Cependant, l'équation (II.27) exige une mesure de la vitesse du vent généralement réalisée par un anémomètre situé sur la nacelle. Cette mesure est peu précise car elle donne la vitesse du vent en un seul point de l'espace d'une part, et très perturbée par les turbulences provoquées par les pales en rotation d'une autre part. L'utilisation d'un filtre spatial peut corriger le problème des turbulences en faisant un filtrage passe-bas de la mesure de l'anémomètre, mais le phénomène du cisaillement (variation de la vitesse du vent avec la hauteur des pales) reste non pris en charge.

Une estimation de la vitesse du vent est souvent utilisée pour contourner ce problème. Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, la vitesse du vent sera déduite de l'équation de la vitesse spécifique comme suit :

$$V_{opt} = \frac{\Omega_T R_T}{\lambda_{opt}} \quad (II.29)$$

$$C_{aer-opt} = \frac{\rho \pi R_T^5 C_p^{opt}(\lambda_{opt})}{2\lambda_{opt}^3} \Omega_T^2 \quad (II.30)$$

On constate que le couple aérodynamique optimal est proportionnel au carré de la vitesse du rotor au point de fonctionnement

$$C_{aer-opt} = K_{opt} \Omega_T^2 \quad (II.31)$$

Tel que :

$$K_{opt} = \frac{\rho \pi R_T^5 C_p^{opt}(\lambda_{opt})}{2 \lambda_{opt}^3} \quad (II.32)$$

En régime permanente, l'équation mécanique s'écrit sous la forme

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} = 0 \quad (II.33)$$

$$\Rightarrow \frac{C_{aer}}{G} - C_{em} - \Omega_g f = 0 \quad (II.34)$$

Avec

$$C_{aer-opt} = K_{opt} \Omega_T^2 \text{ et } \Omega_g = \Omega_T G$$

$$D'où \frac{K_{opt}}{G^3} \Omega_g^2 - \Omega_g f = C_{em-ref} \quad (II.35)$$

Cette expression donne le couple qui doit être imposé à la génératrice pour assurer le fonctionnement optimale de l'éolienne. Le schéma block de cette structure de commande est donné par la figure ci-dessous [ROU12]

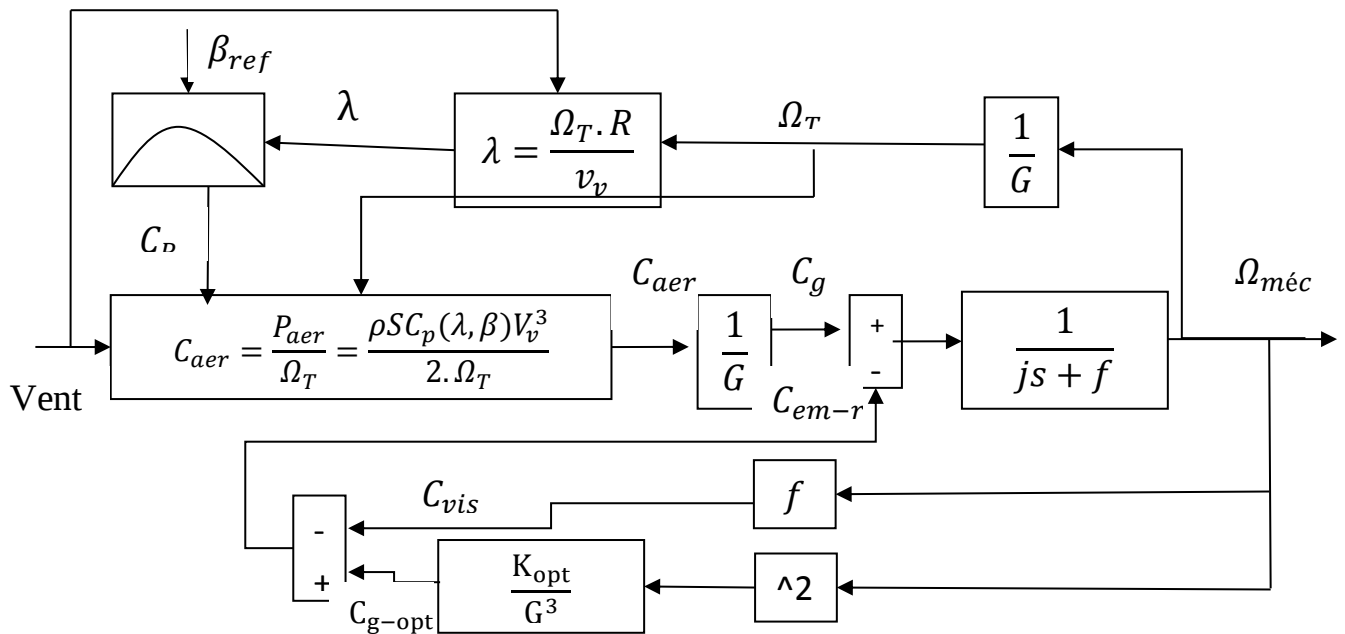


Figure. II.11 : Schéma bloc de commande sans asservissement de la vitesse

II.6. Modélisation du système d'orientation des pales (PITCH)

Les turbines éoliennes de grande puissance, de nos jours utilisent le système PITCH pour le contrôle de la puissance dans la zone III. Elles utilisent pour cela le principe du contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à sa valeur nominale.

Ainsi, l'orientation des pales pour augmenter ou diminuer la portance selon la vitesse du vent constitue l'organe principal du contrôle de la puissance extraite de la turbine. En réglant l'angle d'orientation des pales, et on modifie les performances de la turbine, et plus précisément le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses, puis, pour les fortes vitesses de vent, s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance. Elles atteignent la position « en drapeau ($\beta=90^\circ$) » à la vitesse maximale V_{max} . L'entrée de commande du système d'orientation des pales est la puissance électrique mesurée (Figure. II.12). [ALI11]

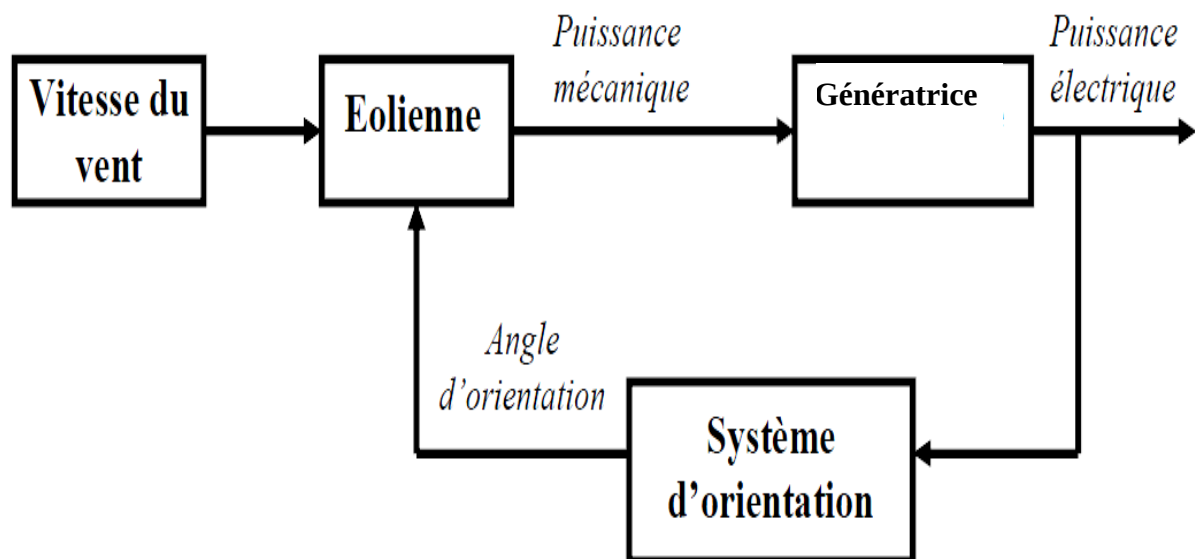


Figure II.12 : Schéma de principe de l'implantation du contrôle de l'angle de calage

II.7.Résultats de simulation

La figure (II-13) montre le profil du vent considéré pour la simulation des différentes stratégies de commande utilisées. La puissance électrique est considérée égale à la puissance électromagnétique en négligeant les pertes électriques, cette puissance est définie par $(\Omega_{mec} * C_{em})$ et s'oppose à la puissance aérodynamique

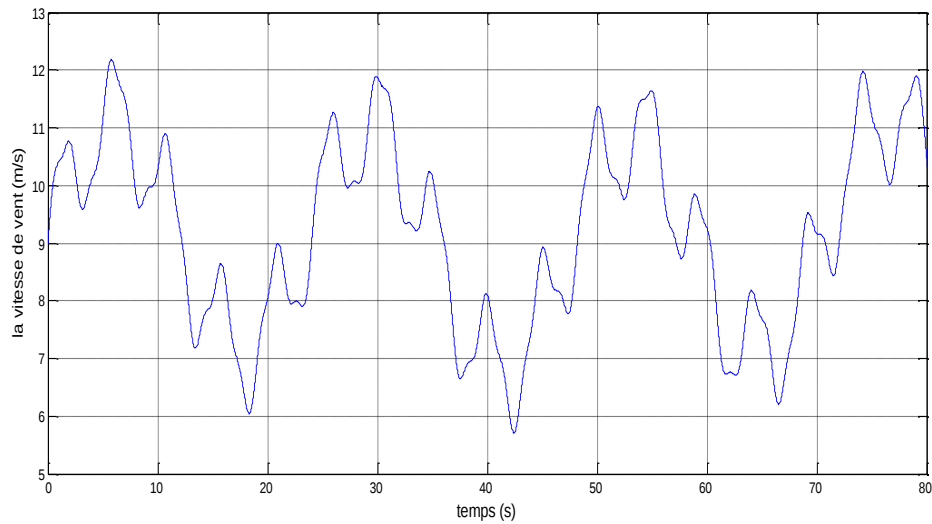
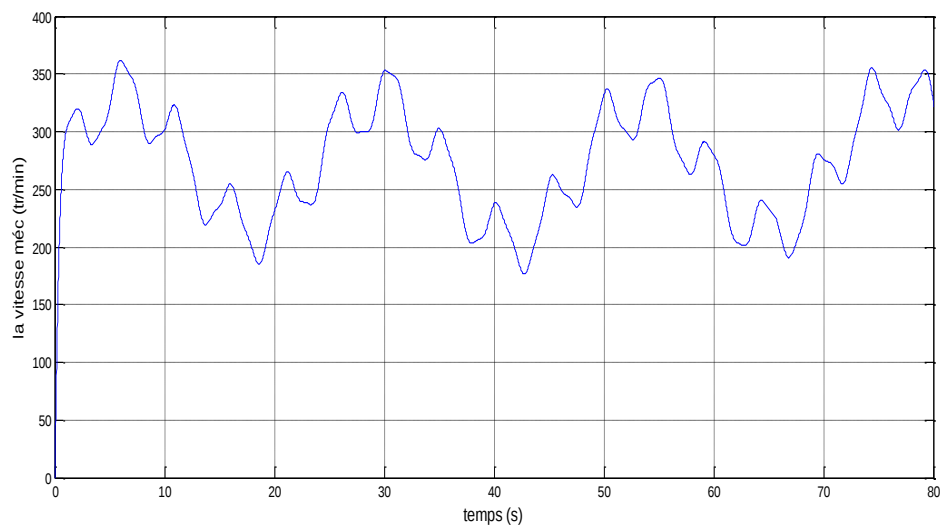
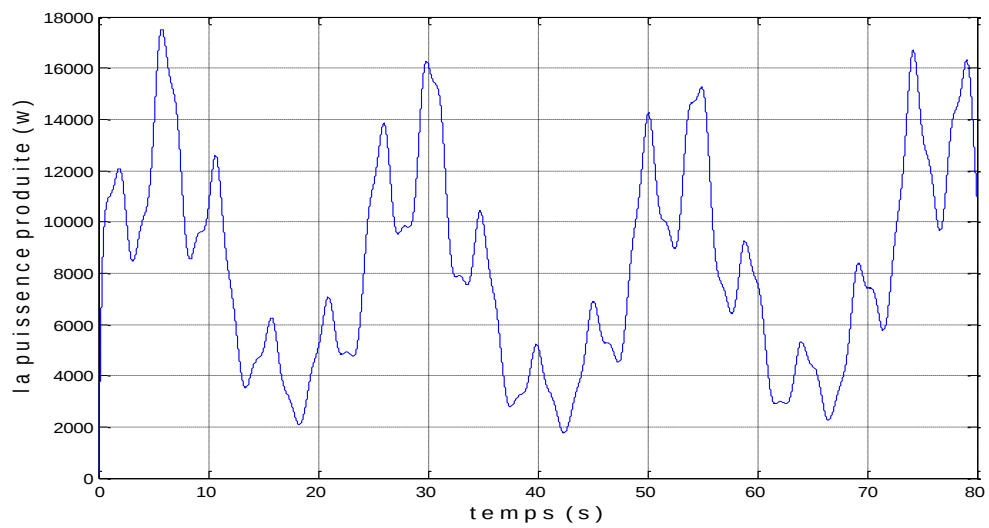


Figure. II.13 : Profil du vent appliqué

II.7.1.Résultats obtenus avec la structure de commande sans asservissement de vitesse

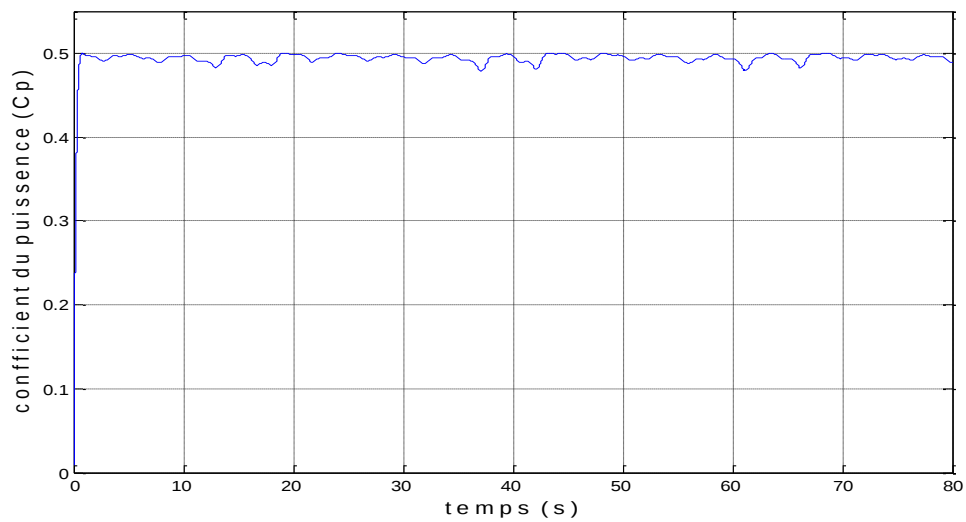


(a)

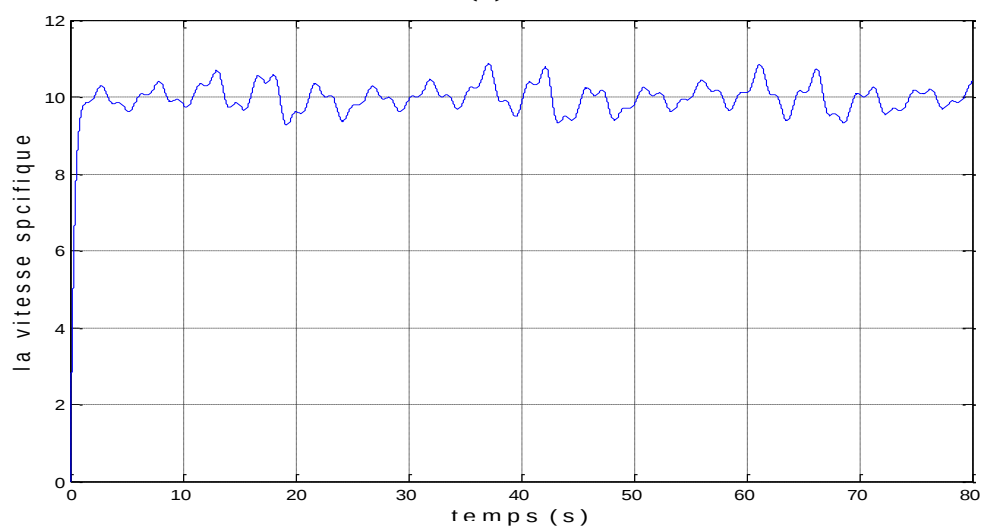


(b)

Figure. II.14 : la vitesse mécanique et la puissance produit



(a)



(b)

Figure. II.15: Le coefficient de puissance et La vitesse spécifique.

a) Interprétations des résultats :

La simulation nous a permis de vérifier la fiabilité de la commande sans asservissement de la vitesse du vent. Nous avons choisi un profil de vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne, ce profil est caractérisé par une valeur relativement faible autour de (9 m/s). Les résultats de simulation montrent que la variation de la puissance électrique est adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice, et cette dernière, est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de des variations au niveau de la vitesse du vent sur la vitesse mécanique et par la suite sur la puissance électrique produite.

II.7.2. Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse en utilisant un Régulateur PI :

Les résultats de simulation inhérents à l'algorithme cité précédemment (Equations II.22 à II.25), en utilisant un régulateur de vitesse de type PI dont les équations relatives et le calcul sont cités au niveau de l'annexe (Annexe A). Les résultats de simulation sont illustrés à la figure II.16. Ces résultats montrent qu'un meilleur contrôle en boucle fermée de la vitesse est obtenu en régime transitoire et en régime permanent. Ce contrôle est très dynamique et la puissance obtenue en régime transitoire est donc plus importante.

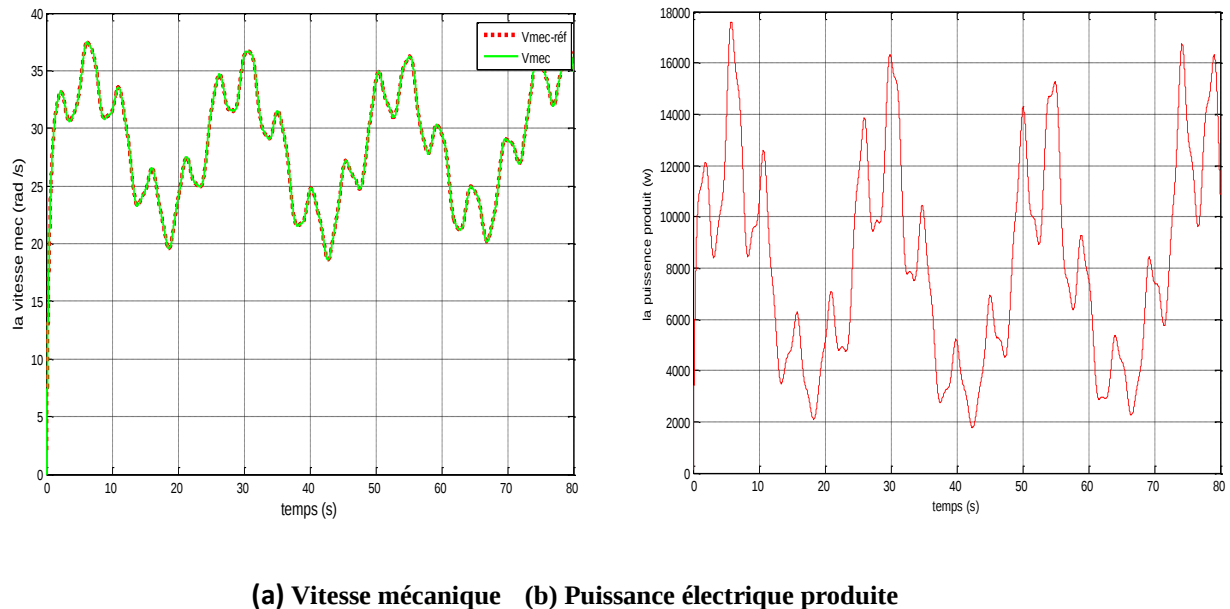


Figure. II.16 : Résultats de simulation de la turbine avec asservissement de vitesse avec un régulateur PI

$P_{ref}=10KW$; $R=3.1915m$; $G=1$; $J=7.68kg.m^2$; $f=0Nm/ra/s$ [MES08]

II.8. Conclusion

Dans cette partie, nous avons étudié les principales caractéristiques de la turbine éolienne, suite à une étude aérodynamique. Nous avons expliqué les différentes zones de fonctionnement et les différentes stratégies de contrôle de la puissance relatives à chaque zone.

Deux modèles d'optimisation de puissance ont été étudiés, dans le premier modèle, nous avons utilisé un correcteur PI dans la boucle de régulation de vitesse. Tandis que, l'autre est basé sur estimation de la vitesse de vent.

Le comportement de la turbine pouvait donc être observé à travers un modèle de simulation. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de la stratégie de limitation de la puissance recueillie par la turbine éolienne. Dans le chapitre suivant, nous allons modéliser la génératrice synchrone à aimants permanents utilisée avec la turbine dans la chaîne globale proposée pour la conversion de l'énergie éolienne.

Chapitre III

Modélisation de la GSAP

III.1.Introduction :

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables.

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. [RED09]

L'évolution des aimants permanents modernes, qu'ils soient à base d'alliages métalliques ou à terres rares (par exemple du type Alnico, Samarium-Cobalt, Néodyme Fer Bore ...) leurs a permis d'être utilisés comme inducteurs dans les machines synchrones offrant ainsi beaucoup d'avantages: induction de saturation élevée, faible désaimantation, densité massique élevée, énergie maximale stockée plus grande par rapport aux autres types de machines

Dans la machine synchrone à aimants permanents MSAP, l'inducteur est remplacé par des aimants. Le champ d'excitation créé par les aimants permanents, présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques. 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,.....). [MES08]

La modélisation des machines est essentielle aussi bien, pour le concepteur que pour l'automaticien. Elle est généralement utilisée pour l'analyse du comportement du système. Les machines à courant alternatif sont en général, modélisées par des équations non linéaires (équation différentielles). Cette non linéarité est due aux inductances et coefficients des équations dynamiques qui dépendent de la position rotorique et du temps. Une transformation triphasée – biphasé nécessaire pour simplifier le modèle (réduire le nombre des équations)

III.2.Généralités sur la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

La très grande majorité des machines électriques utilisées dans l'industrie fait appel à des technologies connues depuis très longtemps : moteur asynchrone à cage d'écureuil et alternateur synchrone. Depuis quelques décennies, les concepteurs de machines électriques étudient de nouvelles structures (machines à aimants permanents ou reluctance variable, avec flux axial, radial ou transverse). Ces innovations sont possibles grâce aux avancées technologiques dans l'électronique de puissance, les matériaux et les calculs numériques. Pour l'excitation rotorique, les aimants permanents ont remplacé le bobinage rotorique depuis une vingtaine d'années. Pourtant connus à l'époque des grecs, les aimants permanents n'ont connu leurs réels

développements que depuis les années 1930. A l'heure actuelle, il existe quatre familles d'aimants permanents. Ce sont les Alnico (ou Ticonal), les ferrites dures, les aimants permanents Samarium- Cobalt et les aimants permanents Néodyme-Fer-Bore. Au cours des années 1930, les Alnico furent les premiers aimants permanents industrialisés. Composés d'aluminium, de nickel et de cobalt, ils sont très peu utilisés de nos jours du fait de la présence de cobalt (très coûteux) et de leurs modestes propriétés magnétiques. Néanmoins, des applications de niches telles que les appareils de mesure et le domaine de la haute température utilisent ces aimants dotés d'une très bonne stabilité thermique.

Apparus dans les années 50, les ferrites dures (hexaferrites de baryum ou de strontium) sont parmi les aimants les plus utilisés à l'heure actuelle. Malgré des performances magnétiques limitées, ils restent compétitifs grâce à leur très faible coût de production. Les aimants permanents samarium cobalt (SmCo), apparus dans les années 60, sont dotés de performances magnétiques très élevées supplantant dans ce domaine les deux familles précédentes. Résistants à la corrosion et stables en température, ils sont en revanche chers (présence de cobalt). Leurs applications sont limitées à des domaines où le coût n'est pas un critère majeur (en particulier les hautes températures). Enfin les plus récents, les aimants permanents néodyme fer bore (NdFeB), découverts dans les années 80, sont les aimants les plus utilisés dans l'industrie. En effet, ils combinent d'excellentes propriétés magnétiques et un faible coût d'exploitation (le néodyme est une terre rare plus répandue que le samarium). Très sensibles à la corrosion, ils ne peuvent être utilisés seulement qu'après avoir été recouverts d'une couche protectrice. Leur température de Curie, comprise entre 310 et 330 °C contre 700 à 850 °C pour les SmCo, handicap majeur de ces aimants, limite leurs domaines d'application. Pour la suite, le choix s'est porté naturellement vers les aimants permanents néodyme fer bore qui offrent des performances magnétiques élevées pour un coût d'exploitation abordable.[ALI11]

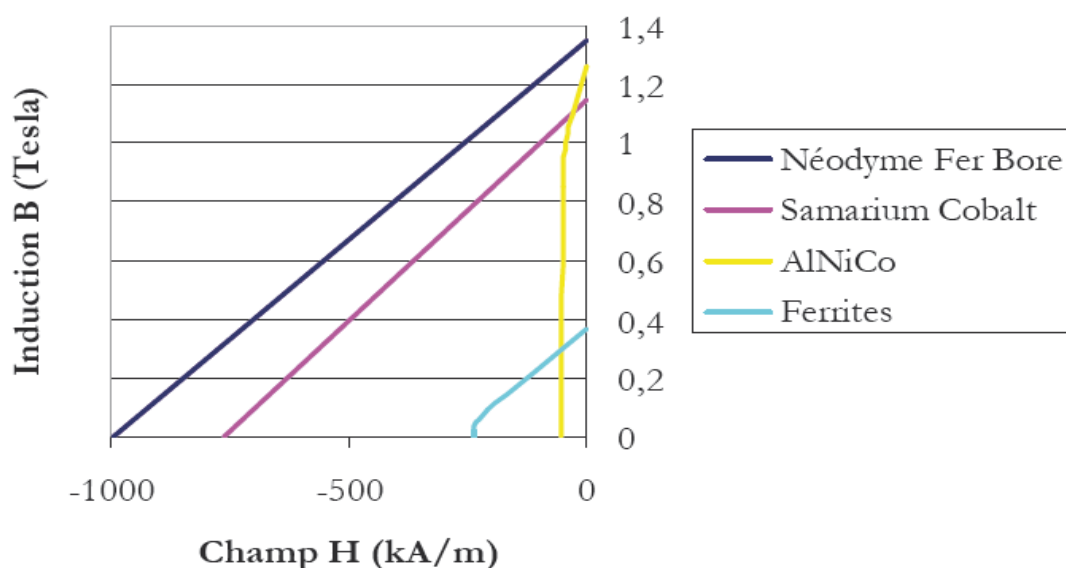


Figure.III.1 : Courbes caractéristiques des aimants.[ALI11]

III.2.1.Emplacement des aimants :

Différentes configurations d'emplacement des aimants sont possibles (Figure.III.2). Chacune a ses avantages et ses inconvénients. En règle générale, les aimants en surface ont l'avantage d'être simples à mettre en place (un simple collage sur la surface du rotor suffit). A haute vitesse, cette configuration n'est pas adaptée car avec la force centrifuge, les aimants vont se décoller. Pour remédier à ce problème, il est préconisé de recourir soit à un rotor extérieur avec aimants en surface (les aimants étant plaqués à la surface grâce à la force centrifuge) soit à frotter les aimants. En plus de supprimer les problèmes de décollement à haute vitesse, les aimants enterrés peuvent être utilisés en concentration de flux. Ainsi, leur utilisation est optimisée. A noter qu'en plaçant les aimants de cette manière, les courants de Foucault dans les aimants sont diminués.

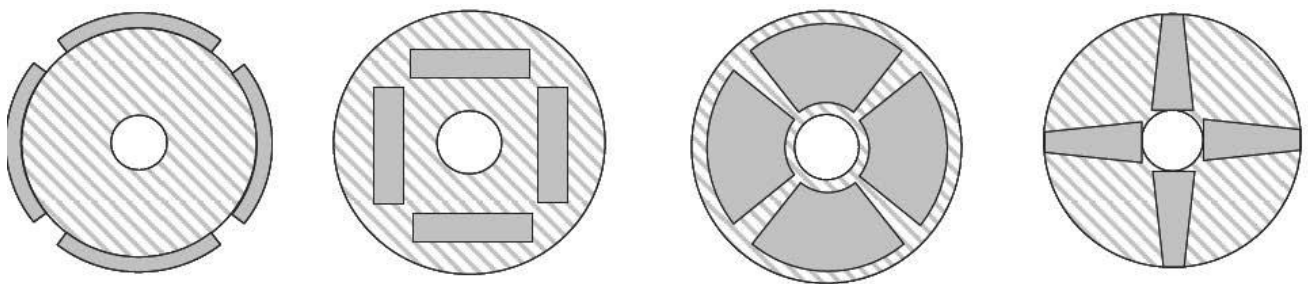


Figure.III.2 : Quelques configurations du placement des aimants

- a-** Aimants en surface pour machine à flux radial.
- b-** Aimants enterrés pour machine à flux radial.
- c-** Aimants enterrés pour machine à flux axial.
- d-** Aimants en surface pour machine à flux axial.

III.2.2. Principe de fonctionnement

L'ensemble des génératrices (ou moteurs) triphasées utilisent un champ magnétique tournant. Si l'on dit que le moteur est synchrone, c'est parce que l'aimant au centre tourne à une vitesse constante qui est synchrone avec la rotation du champ magnétique

Le principe de fonctionnement est basé sur la création d'une variation de flux magnétique par la rotation d'un aimant (nommé rotor) passant devant les faces de trois bobines fixes (appelées stator) alimentées par le réseau (figure III.3). Cette variation provoque l'apparition d'une force électromotrice d'induction dans chacune des bobines, créant ainsi un courant triphasé. Dans ce type de générateur, la rotation de l'aimant, entraînée par le rotor de l'éolienne, doit être synchrone avec l'excitation des bobines, d'où son appellation. [RED09]

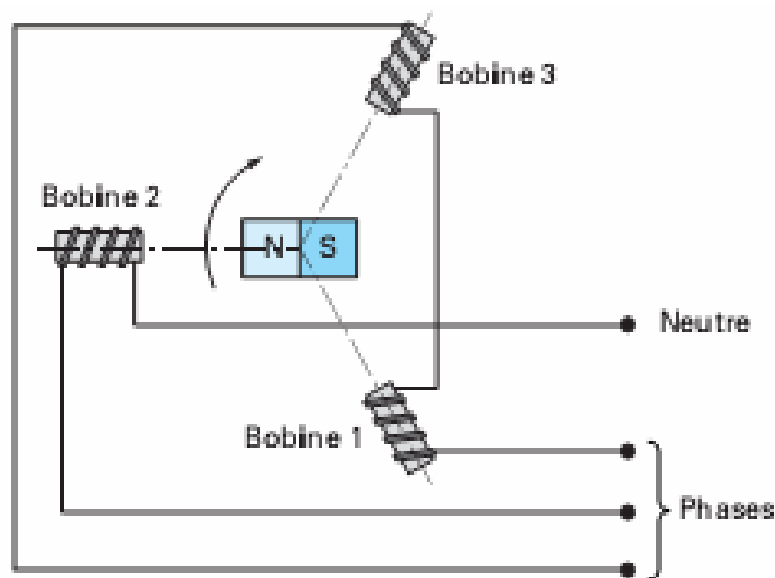


Figure.III.3 : Principe du générateur synchrone

En faisant varier le nombre de pôles magnétiques du rotor d'un générateur synchrone on fait également varier sa vitesse de synchronisation selon la formule suivante pour un réseau fonctionnant sous 50 Hz :

$$\text{Vitesse (tr/min)} = 6\,000 / \text{Nombre de pôles.}$$

Le nombre de pôles du générateur influe directement sur sa taille, et il faut mentionner que le couple moteur supportable par un générateur dépend de son volume. Habituellement, les générateurs à quatre ou six pôles ont la préférence des constructeurs car leur encombrement permet des économies au niveau de la taille de la nacelle qui doit les accueillir.

Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 KW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. 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. [RED09]

Dans cette configuration la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance.

Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur- élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance.

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté En courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on remplace souvent ce bobinage par des aimants permanents. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie. [RED09]

III.3. Puissances :

Cette section expose la détermination des différentes puissances à partir de la tension induite de mouvement de phase en tenant compte des pertes issues de la machine (pertes Joule et pertes fer). Avant de présenter les différentes composantes de la chaîne énergétique, il est intéressant d'établir le bilan de puissance sous forme graphique (III.4) avec l'utilisation des paramètres suivants : P_{elec} la puissance électrique, P_{mec} puissance mécanique, P_f les pertes fer, P_j les pertes joule et P_{frot} les pertes frottements [BEL10].

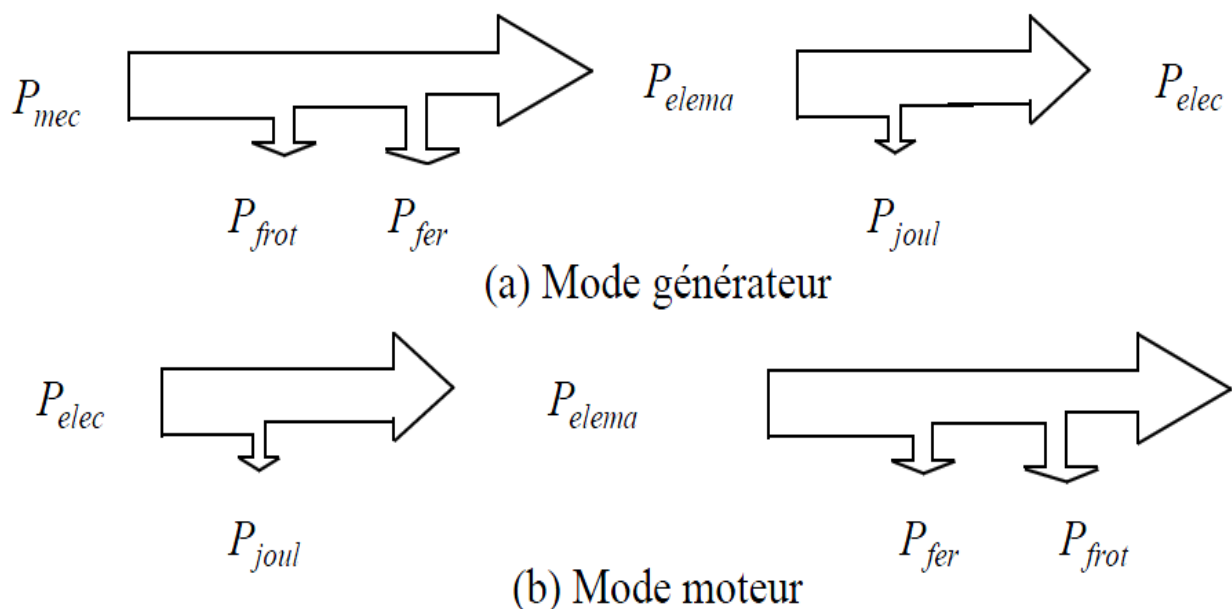


Figure.III.4: Bilan de puissance

III.4.Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :

III.4.1 Hypothèses simplificatrices :

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

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

La structure de la machine à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation est créée par les aimants permanents au niveau du rotor, ces derniers sont supposés de perméabilité voisine de celle de l'air.[ALI11]

III.4.2.Mise en équation de la MSAP :

Les modèles des machines électriques les plus utilisés sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à un système cartésien d'axes, d et q

Dans le repère classique, il y'a trois axes (a_s, b_s, c_s) orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine.

D'habitude, l'axe de la phase a (a_s) est considéré comme référence pour les transformations ultérieures. Quant au rotor, un seul axe portant un enroulement qui schématise l'aimant permanent (d'indice F correspondant à la direction de l'aimantation). L'angle θ_r donne la position du rotor par rapport au stator.

Le modèle de la MSAP qui sera développé dans notre travail est basé sur le schéma de la figure suivante :

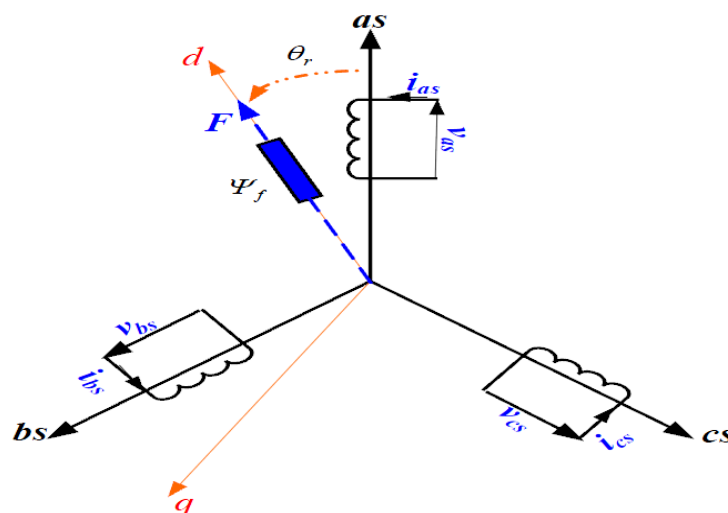


Figure.III.5 Schéma représentatif de la MSAP à modéliser

III.4.3. Equations électriques :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \quad \text{III.1}$$

$[v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^t$: Vecteur tension de phases statoriques

$[i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^t$: Vecteur courant de phases statoriques

$[\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}]^t$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques

R_s : La résistance des phases statoriques

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérée sont connectés en étoile à neutre isolé, d'où la somme instantanée des courants statoriques est nulle, et il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple [ALI11]. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

III.4.4. Passage au repère de Park :

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Ce changement s'effectue grâce à une transformation mathématique, qui transforme les trois bobines statoriques déphasées de $\frac{2\pi}{3}$ en deux bobines fictives équivalentes diphasées de $\frac{\pi}{2}$ et situées sur le rotor Figure (III.6).

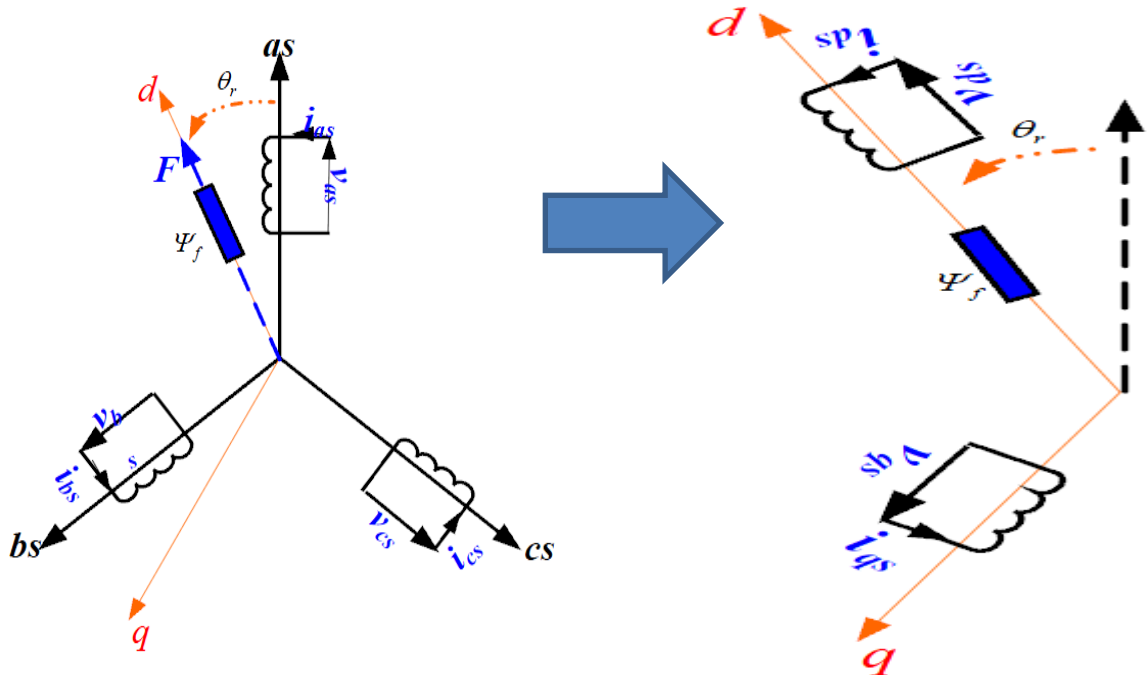


Figure.III.6: Transformation triphasée- diphasée

La transformation de Park ($P(\theta_r)$) est définie par la matrice suivante :

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

$P(\theta_r)$ Définie le passage du repère (d, q, o) vers (a, b, c)

$$[P(\theta_r)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{III.3}$$

$P(\theta_r)^{-1}$ définie le passage du repère (a, b, c) vers (d, q, o) .

On définit aussi une autre transformation qui est celle de Concordia qui définit d'autres axes fictifs α et β tel que l'axe α est confondu avec l'axe as ce qui revient à poser $\theta_r = 0$ dans la transformation de Park (équation III-2):

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}$$

III.4.5. Modèle de la MSAP dans le repère de Park :

Le schéma simplifié du GSAP dans le repère de Park est représenté sur la Figure III.6, le modèle de la MSAP est défini par les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques suivantes :

a) Equations électriques :

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

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r L_q i_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \Phi_f \end{cases} \quad \text{III.4}$$

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

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} - L_d \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r L_q i_{qs} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} - L_q \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \Phi_f \end{cases} \quad \text{III.5}$$

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

b) Equations magnétiques :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_d i_{ds} + \Phi_f \\ \Phi_{qs} = L_q i_{qs} \end{cases} \quad \text{III.6}$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale les flux d'axe direct (Φ_{ds}) et d'axe en quadrature (Φ_{qs}) sont fonction linéaire des courants (i_{ds} et i_{qs}) d'axes direct et de en quadrature.

c) Expression du couple électromagnétique :

L'expression de la puissance transmise est donnée par :

$$p(t) = (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \quad \text{III.7}$$

En remplaçant v_{ds} et v_{qs} par leurs expressions on aura :

$$p(t) = [-R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) - \left(i_{ds} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \right) + \frac{d\theta_r}{dt} (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds})] \quad \text{III.8}$$

$R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2)$: Représente la puissance dissipée par effet Joule

$\left(i_{ds} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \right)$: La variation de l'énergie emmagasinée dans les enroulements du stator.

$\frac{d\theta_r}{dt} (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds})$: La puissance électromagnétique. Sachant que $P = C_{em} \cdot \Omega$ et $\omega = p\Omega$

(Ω : vitesse mécanique) Alors :

$$C_{em} = p \cdot (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad \text{III.9}$$

Après l'affectation des valeurs de flux on aura :

$$C_{em} = p \cdot ((L_d - L_q) i_{ds} i_{qs} + \Phi_f i_{qs}) \quad \text{III.10}$$

e) Equations mécaniques :

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

$$C_m - C_{em} - f \cdot \Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{III.11}$$

Tel que :

C_m : Couple moteur.

$f \cdot \Omega$: Couple de frottements visqueux

f : Coefficient des frottements visqueux

J : Moment d'inertie de la machine.

III.5.Simulation de la GSAP :

Dans cette partie la GSAP sera simulée sur trois cas distincts :

1). A vide : la GSAP sera entraînée par un couple moteur d'une valeur de 6,6 N.m durant 15 ms et dans ce cas la machine tourne librement.

2). La GSAP alimente une charge (R_{ch}, L_{ch}). montée en étoile, le couple moteur initial est de 6,6 N.m puis à 0,5ms, ce couple sera diminué à 4,9 N.m

3). La GSAP débite sur une source de tension parfaite d'une valeur efficace $E=100V$, le couple moteur au démarrage est de 6,28 N.m, il est ensuite diminué à 3,2 N.m

III.5.1.GSAP A vide :

On fait lancer la génératrice par un couple moteur égale à 6.6 Nm pour une durée de 15ms puis, on la laisse tourner librement. Etant donné que le frottement considéré dans ce cas est nul, on constate sur la figure (III.7) que la vitesse est stabilisée à une valeur de 78.5 (rad/s), alors que les tensions des phases sont parfaitement sinusoïdales en régime stable, avec une valeur crête de 54 V et une fréquence de 50 Hz.

- A vide les courants sont nuls donc

$$\begin{cases} i_{ds} = 0 \\ i_{qs} = 0 \end{cases} \text{ ainsi : } C_{em} = 0$$

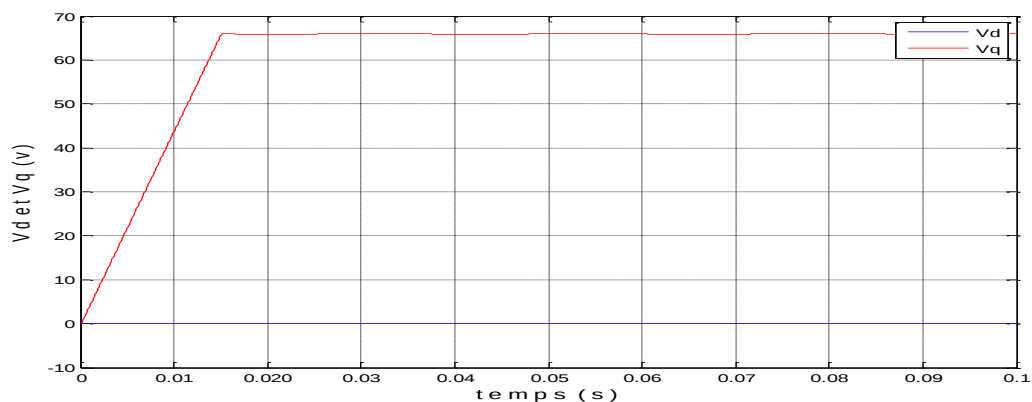
Les expressions des tensions :

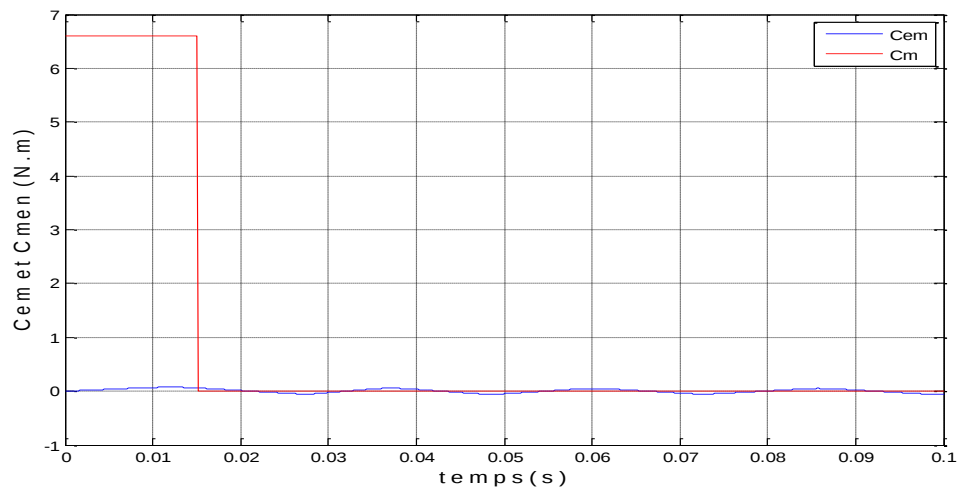
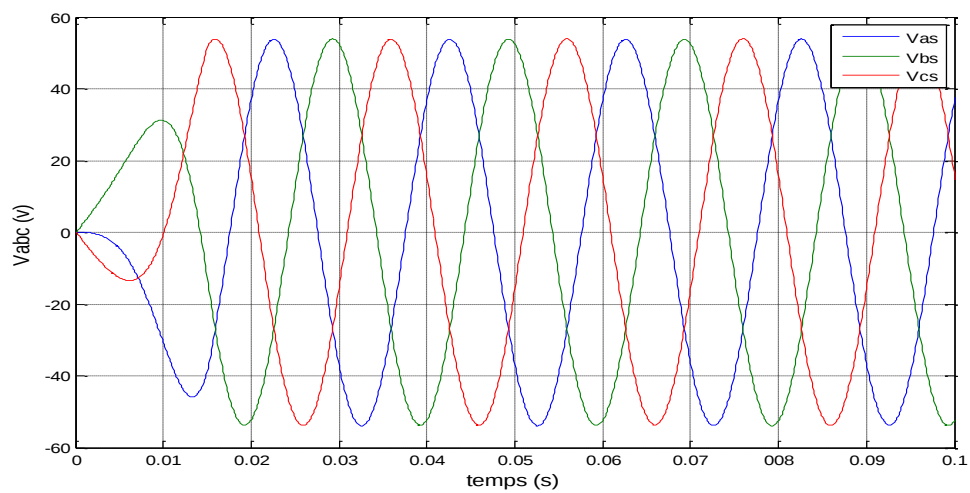
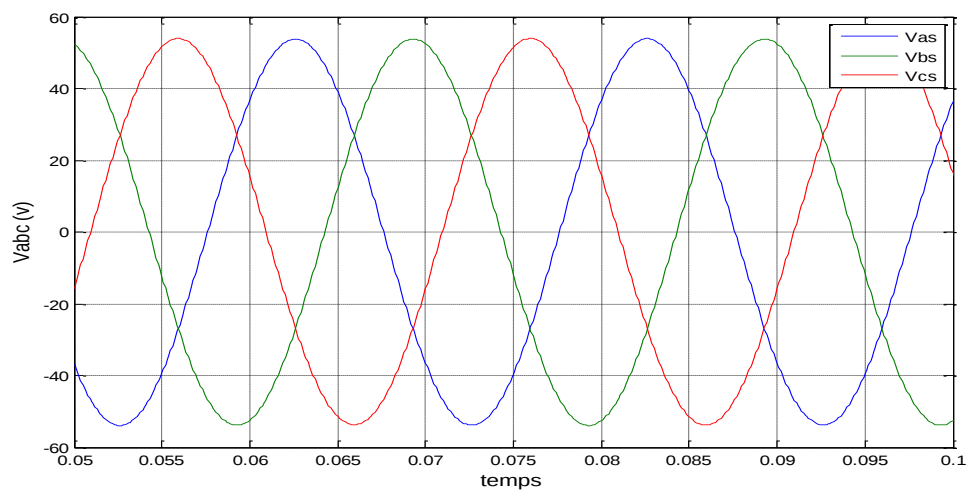
$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = \omega \Phi_f \end{cases}$$

a) Résultats de simulation a vide

a.1) Evolution les tensions (v_{ds} et v_{qs})

a.2)



Evolution le couple moteur et couple électromagnétique**a.3) Evolution des tensions statoriques****a.4) Les tensions de phase zoomées**

a.5) Evolution la vitesse de rotation

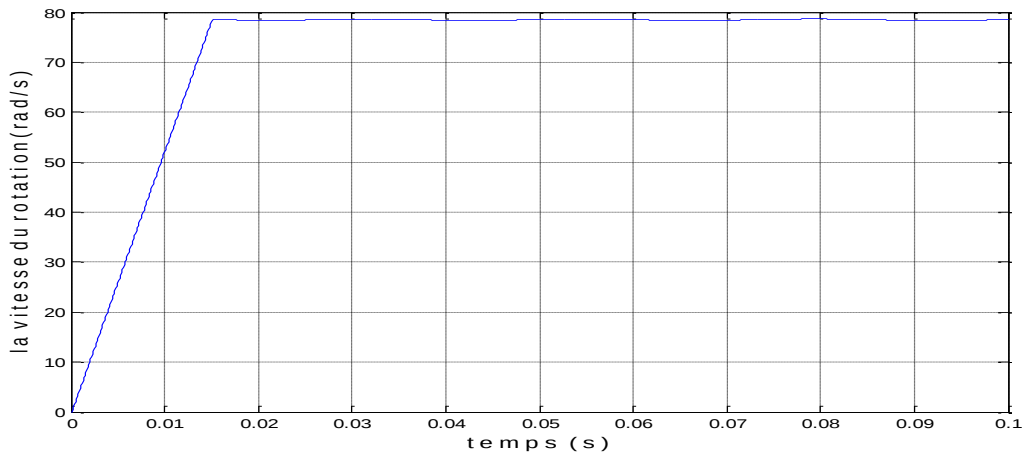


Figure.III.7 : Résultats de simulation de la GSAP à vide.

III.5.2.La GSAP alimentée une charge (R_{ch}, L_{ch}) :

La génératrice alimente dans ce cas une charge électrique (R_{ch}, L_{ch}). Pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique d'une part, les équations données par (III.5) :

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} - L_d \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r L_q i_{qs} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} - L_q \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \Phi_f \end{cases}$$

D'autre part, l'application des tensions v_{ds} et v_{qs} sur la charge donne:

$$\begin{cases} v_{ds} = R_{ch} i_{ds} + L_{ch} \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r L_{ch} i_{qs} \\ v_{qs} = R_{ch} i_{qs} + L_{ch} \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r L_{ch} i_{ds} \end{cases} \quad \text{III.12}$$

En remplaçant les expressions de v_{ds} et v_{qs} dans (III.12), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch}) i_{ds} - (L_d + L_{ch}) \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r (L_q + L_{ch}) i_{qs} \\ 0 = -(R_s + R_{ch}) i_{qs} - (L_q + L_{ch}) \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r (L_d + L_{ch}) i_{ds} + \omega_r \Phi_f \end{cases} \quad \text{III.13}$$

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

$$\begin{cases} Si_{ds} = \frac{1}{(L_d + L_{ch})} [-(R_s + R_{ch}) i_{ds} + \omega_r (L_q + L_{ch}) i_{qs}] \\ Si_{qs} = \frac{1}{(L_q + L_{ch})} [-(R_s + R_{ch}) i_{qs} + \omega_r (L_d + L_{ch}) i_{ds} + \omega_r \Phi_f] \end{cases} \quad \text{III.14}$$

Considérons le flux d'excitation Φ_f comme grandeur de commande, et les courants i_{ds} , i_{qs} comme variables d'état.

a) Equations d'état :

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

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

$$[x] = [i_{ds} \quad i_{qs}]^t, [v] = [0 \quad \Phi_f]^t \quad \text{III.16}$$

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

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

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

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

$$[B][v] = \omega_r \frac{1}{L_q + L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi_f \end{bmatrix} \quad \text{III.19}$$

b) Schéma Bloc de simulation :

A partir des équations (III.12 à III.18, et III.20), on construit le bloc de simulation de la génératrice (figure III.8).

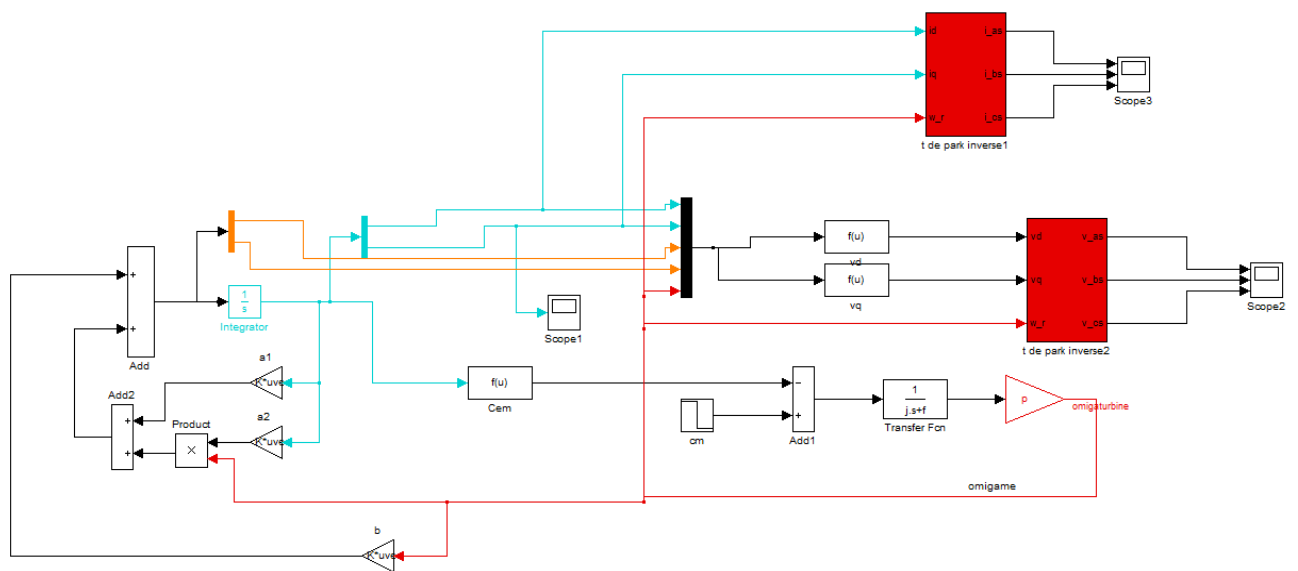
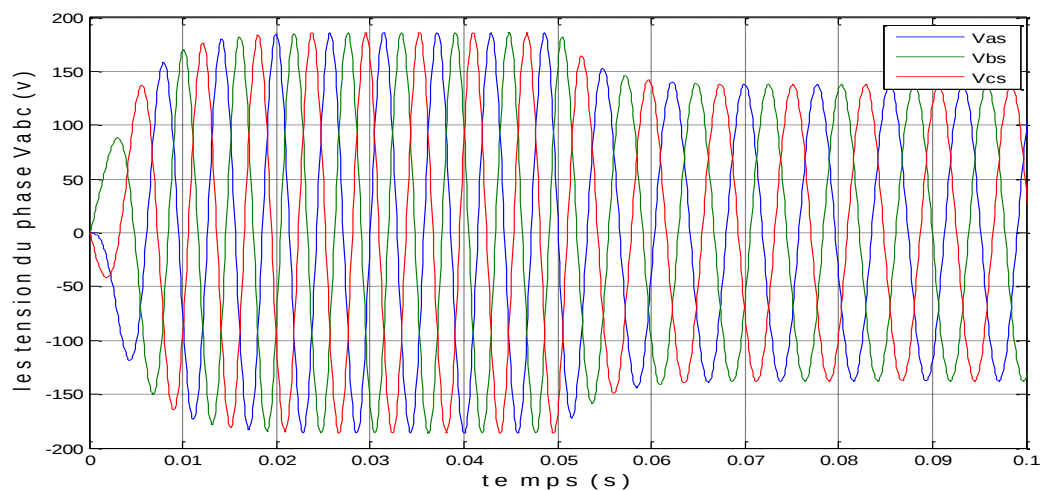


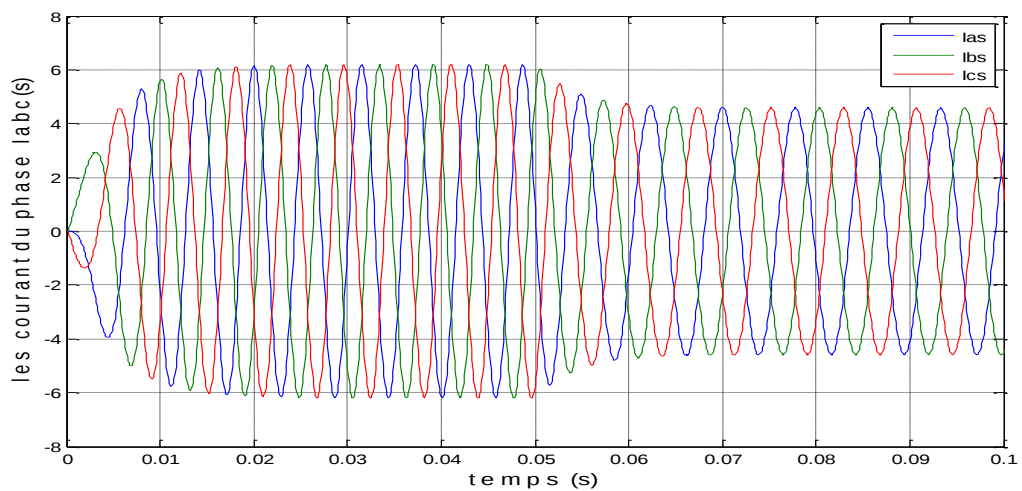
Figure III.8: Bloc de simulation de la GSAP en charge

c) Résultats de simulation :

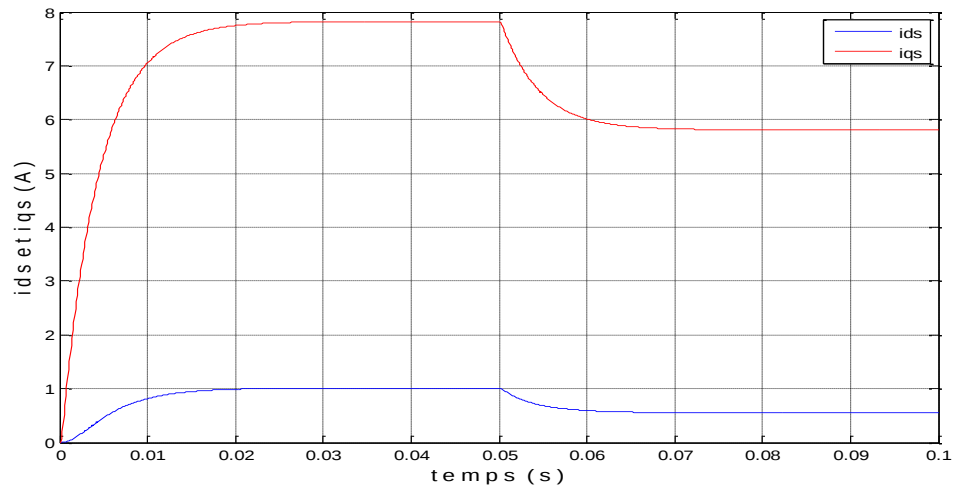
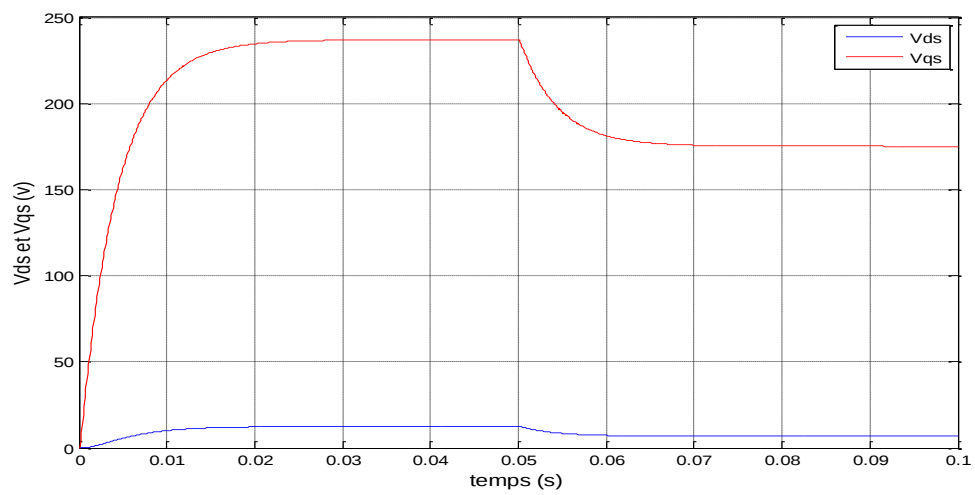
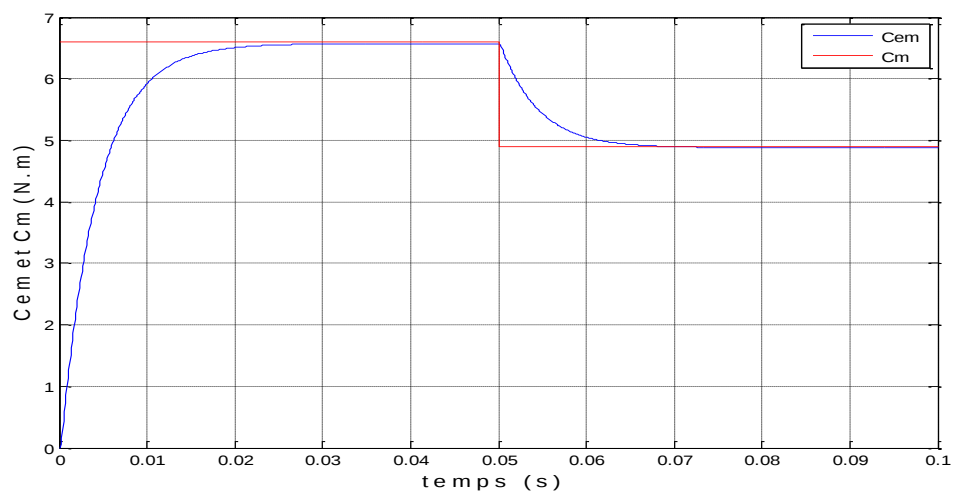
Pour montrer l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents sont appliqués, à savoir 6.6 Nm et 4.9 Nm. On constate sur la Figure III.9 que la vitesse de la génératrice est forte et loin de celle de synchronisme, ce qui se traduit par la fréquence élevée au niveau de la tension et courant. Ceci est expliqué par le fait que le couple moteur appliqué est grand. En diminuant le couple moteur de 6.6 Nm, à 4.9 Nm, la vitesse mécanique varie de 274 rad/s jusqu'à 220 rad/s. La tension et le courant diminuent respectivement de 186 V vers 137.5 V, et de 6.2 A, à 4.6 A. Il est clair donc, que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.



a) Tensions statoriques *vabc*



b) Courants statoriques *iabc*

C) Composantes des courants i_{ds} i_{qs} d) Composantes v_{ds} v_{qs} 

e) Couples électromagnétique et moteur

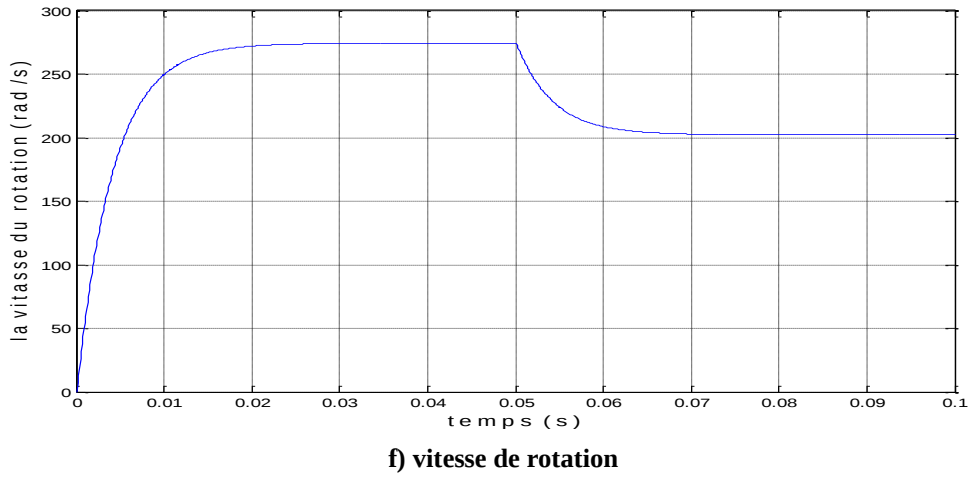


Figure III.9: GSAP sur une charge séparée

$$R_s=0.13\Omega ; L_d=0.00141H ; L_q=0.00141H ; J=0.0025\text{Kg.m}^2 ; f=0.001\text{Nm/rd/s} ; P=4 ; \Phi_f=0.21\text{Wb} R_{ch}=30\Omega ; L_{ch}=0.002H$$

III.5.3.La GSAP débite sur une source de tension parfaite :

Considérons les tensions v_{qs} , v_{ds} et le flux d'excitation Φ_f comme grandeurs de commande, les courants i_{qs} , i_{qs} comme variables d'état.

a) Equations d'état

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

$$[\dot{x}] = [A][x] + [B][v] \quad \text{III.20}$$

$$[y] = [AC][x] + [D][v] \quad \text{III.21}$$

Avec:

$$[x] = [I_{ds} \quad I_{qs}]^t ; [v] = [v_{ds} \quad v_{qs} \quad \Phi_f]^t \quad \text{III.22}$$

La forme matricielle (III.24).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_r \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_q} & \frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ \Phi_f \end{bmatrix} \quad \text{III.23}$$

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

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q}{L_d} \\ -\frac{L_d}{L_q} & 0 \end{bmatrix} \quad \text{III.24}$$

$$[\mathbf{B}] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \quad \text{III.25}$$

b) Schéma Bloc de simulation :

A partir des équations (III.12 et III.24), on construit le bloc de simulation de la génératrice.

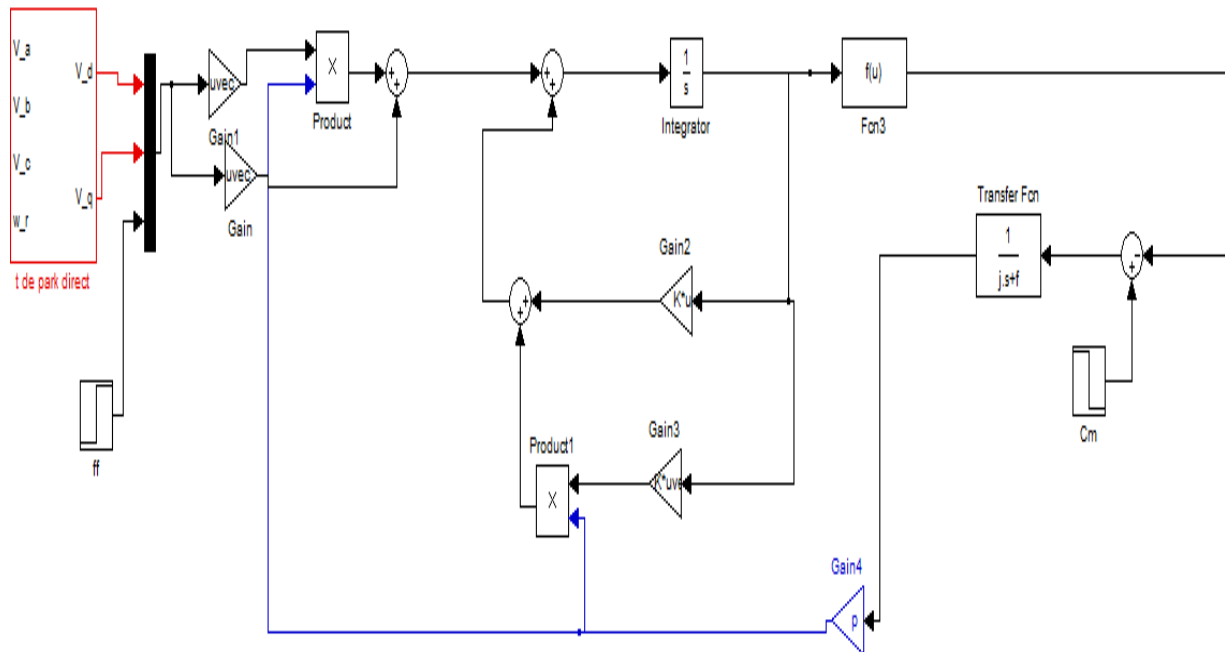
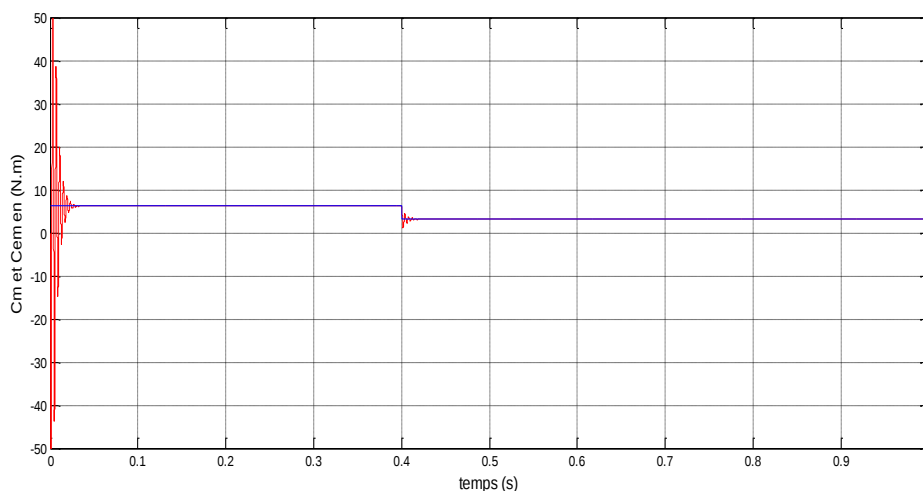


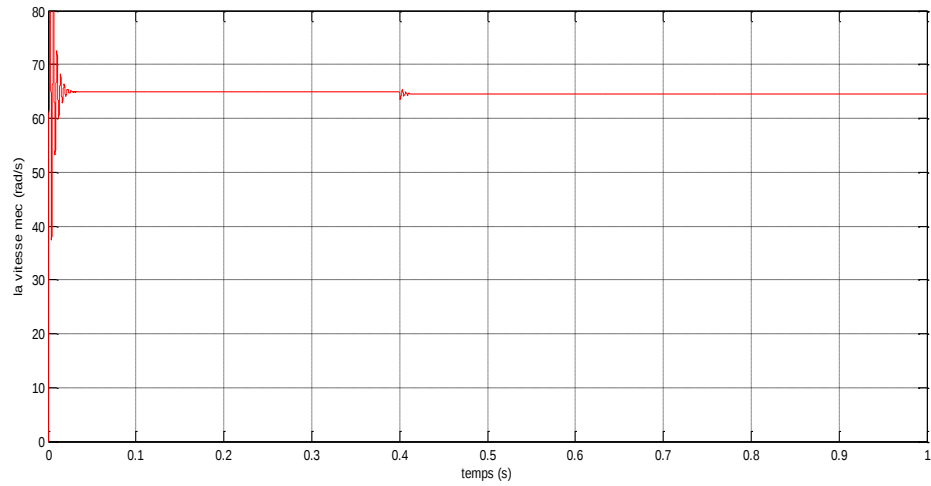
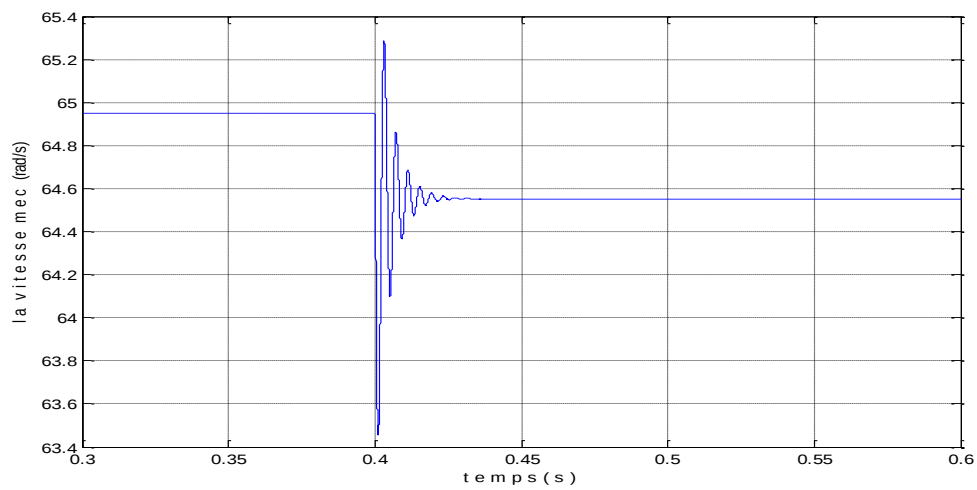
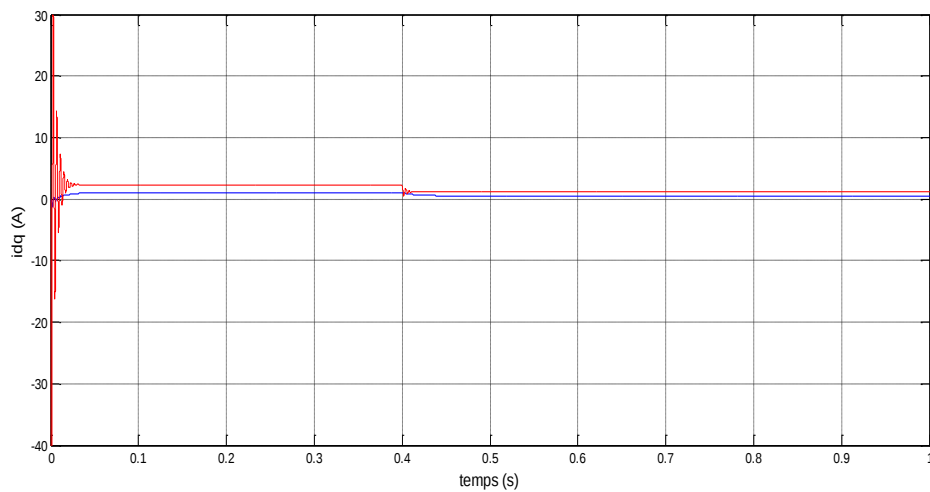
Figure III.10: Bloc de simulation de la GSAP connectée au réseau

c) Résultats de simulation :

Connectée à une source parfaite de tension de valeur efficace de 100 V, on applique à la génératrice un couple moteur de 6.28 Nm, à l'instant $t=0$ s. Après un temps de 0.4s, on diminue ce couple jusqu'à 3.2 Nm. L'allure du couple électromagnétique présente aux premiers instants de démarrage des battements importants, pendant un intervalle de temps très court.



a: Couples électromagnétique et moteur

**b: Vitesse de rotation****c: Vitesse de rotation zoomé****d: Composante Id et Iq****Figure.II.11: GSAP connectée à une source de tension parfaite**

$R_s=0.895\Omega$; $L_d=0.012H$; $L_q=0.0211H$; $J=0.00141Kg.m^2$; $f=0.001Nm/rd/s$; $P=3$; $\Phi_f=0.9Wb$; [MES08]

III.6. Conclusion

Dans un premier temps, nous avons donné une brève description de la machine synchrone à aimants permanents y compris les différentes configurations possibles des aimants. Ainsi que le principe de fonctionnement de la machine.

Par la suite, nous avons abordé la modélisation de la machine synchrone dans sa structure générale, en commençant par le modèle triphasé et après le passage vers le modèle diphasé par le biais de la transformation de Park qui permet à la fois de diminuer nombre de grandeurs et de réduire la non-linéarité du modèle. Ce modèle définitif de la génératrice synchrone à aimants permanents sera utilisé dans le reste de ce travail. Le passage vers la simulation numérique du modèle de la génératrice synchrone à aimants permet de valider le modèle à vide pour deux couples d'entrainements différents et puis avec une charge séparée, ou encore connectée à une source de tension.

Dans le chapitre suivant, nous allons d'un côté établir les modèles analytiques des autres parties de la chaîne de conversion de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents, à savoir, les convertisseurs de puissance, le bus continu et la liaison au réseau, après nous terminons par la simulation de la chaîne de conversion globale.

Chapitre IV

Modélisation et simulation de la chaîne globale de conversion d'énergie éolienne

IV.1 : Introduction :

Après avoir présenté le principe de la conversion d'énergie éolienne, et modéliser les parties essentielles dans la chaîne de cette conversion, à savoir la turbine et la génératrice synchrone à aimants permanents.

Nous nous attachons dans ce chapitre, à présenter la structure globale de cette chaîne avec une modélisation détaillée des différents éléments et une simulation comportementale du système complet sur le plan électrique et énergétique.

Le système éolien étudié est un système complexe composé de plusieurs sous-systèmes appartenant à plusieurs domaines physiques différents, à savoir, la mécanique des fluides, la mécanique traditionnelle, l'électrotechnique, et l'électrochimie. L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. La turbine est accouplée à la génératrice et permet la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique. Les composants électriques tels que les convertisseurs statiques et l'élément de filtrage disposés en aval de la génératrice, ont un rôle d'adaptation active des caractéristiques de l'énergie électrique entre la génératrice et la charge finale. Ce niveau est aussi chargé du pilotage de l'ensemble et d'obtenir le point de fonctionnement à la puissance optimale. La charge, sous la forme d'un pack de batteries, donc d'éléments électrochimiques, est un élément de stockage. Dans notre cas, l'énergie stockée est convertie au réseau à travers un convertisseur de puissance et un élément de filtrage [MES08].

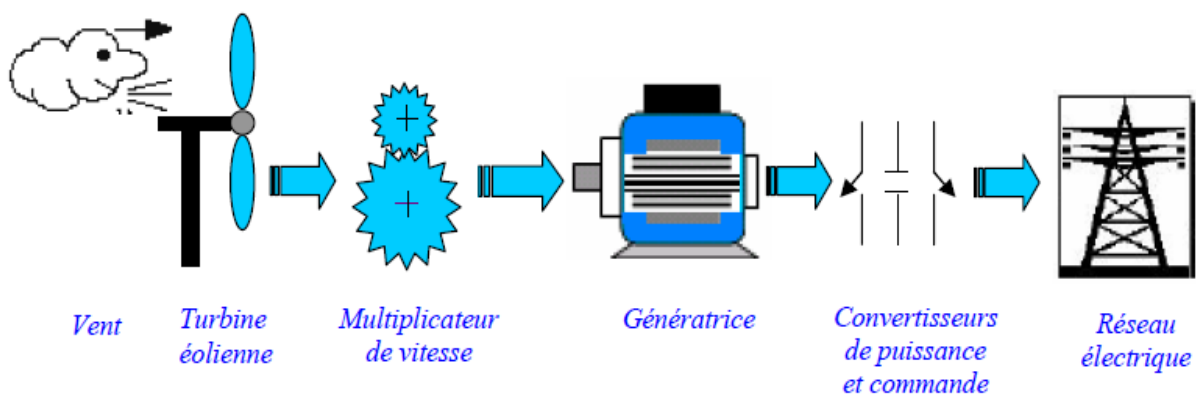


Figure.IV.1 : Exemple d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne

IV.2. Topologies des convertisseurs électriques utilisés : [MES08]

Grâce au développement très rapide de l'électronique de puissance, offrant à la fois, une grande capacité, et une bonne qualité de puissance, avec le moindre de coûts; le domaine de l'énergie éolienne a connu une large utilisation des convertisseurs de puissance.

Des nouveaux types de génératrices associées à ces convertisseurs sont en cours de développement. L'utilisation des convertisseurs de puissance dans le système de conversion d'énergie éolienne permet, non seulement, d'obtenir la forme souhaitée de l'énergie électrique, mais aussi d'optimiser la puissance prélevée.

Plusieurs structures de conversion de l'énergie électrique fournie par la génératrice éolienne à vitesses variables peuvent être utilisées dans le but d'avoir une tension de fréquence et amplitude constants du côté réseau.

Ces structures sont basées sur des dispositifs électroniques (Figure IV-2), et se sont caractérisées par leurs performances et inconvénients sur les plans techniques et économique.

L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine, par la création d'un bus continu intermédiaire. Avec une telle structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée.

Selon la topologie des convertisseurs utilisés, on peut décrire les structures couramment utilisées dans les chaînes de conversion d'énergie dédiées aux aérogénérateurs synchrones à aimants permanents:

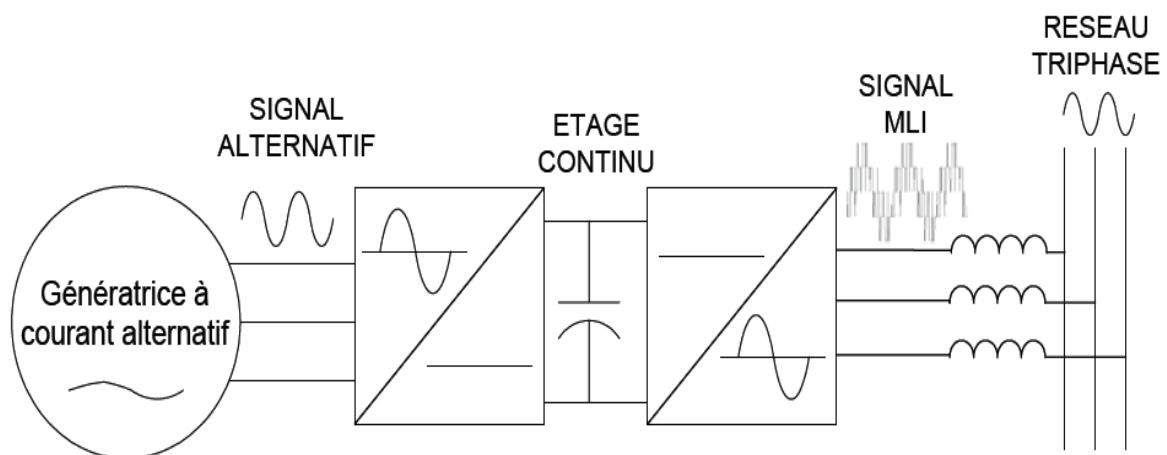


Figure. IV.2 : Interface d'électronique de puissance. [POI03]

IV.3. Modélisation du convertisseur :

Une fonctionnalité comme une des différents types de sources de production décentralisées est à connexion électronique est l'utilisation d'un convertisseur triphasé à modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour assurer le transfert d'énergie au réseau électrique.

L'étude de ce convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie connectée au réseau. [ALI11]

IV.3.1. Modèle de l'onduleur à deux niveaux :

Les onduleurs de tension triphasés, appelé en Anglais : three-phase Voltage Source Converters (VSC), utilisant les techniques de modulation de largeur d'impulsion, sont les convertisseurs statiques d'électronique de puissance les plus utilisés dans les applications industrielles, telles que, par exemple, les entraînements électriques, la robotique, le conditionnement de l'air et les systèmes de ventilation, les alimentations sans interruption et les véhicules électriques [BOU10] L'onduleur à deux niveaux est composé des trois bras, chacun comporte deux interrupteurs. Ces interrupteurs (S_{a1} , S_{a2}), (S_{b1} , S_{b2}), (S_{c1} , S_{c2}) sont contrôlés de manière complémentaire pour éviter le court-circuit de la source.

Le schéma structurel d'un tel convertisseur statique est illustré par la figure (figure IV.3). [RED09]

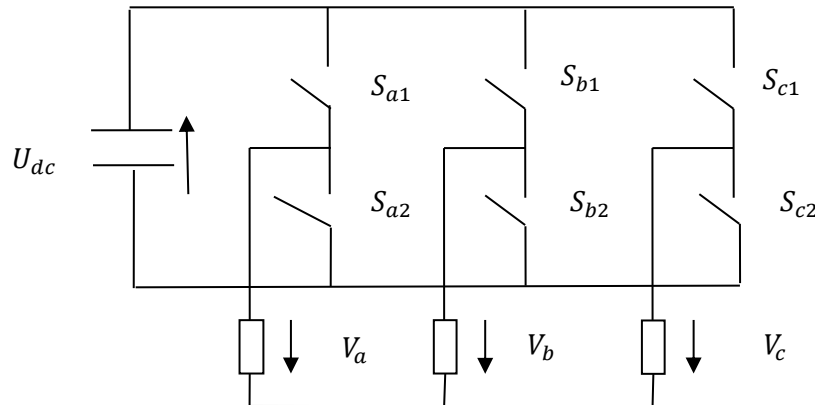


Figure.IV.3 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

Pour simplifier la modélisation de l'onduleur on supposera que les interrupteurs sont idéaux (temps de commutation nul, pertes négligeables), la charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé.

L'objectif de la commande est de trouver la bonne combinaison de contrôle des interrupteurs, de façon à reconstituer la forme de 3 signaux sinusoïdaux. Soit S_k , les signaux de commande des bras k de l'onduleur ; avec $k \in \{a, b, c\}$.

$S_k=1$, Si l'interrupteur en haut d'un bras est fermé et celui en bas est ouvert ;

$S_k=0$, Si l'interrupteur en haut est ouvert et celui en bas est fermé.

Si la charge connectée à l'onduleur est équilibrée, ($v_a + v_b + v_c = 0$) ; alors :

$$\begin{cases} v_a = f_a U_{dc} \\ v_b = f_b U_{dc} \\ v_c = f_c U_{dc} \end{cases} \quad \text{IV.1}$$

Avec :

$$\begin{cases} f_a = \frac{2S_a - (S_b + S_c)}{3} \\ f_b = \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3} \\ f_c = \frac{2S_c - (S_a + S_b)}{3} \end{cases} \quad \text{IV.2}$$

Ces deux équations peuvent se traduire sous formes matricielle

Où v_{abc} est le vecteur des tensions simples à la sortie de l'onduleur, donné par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{IV.3}$$

IV.3.2. Stratégie de commande : [BEN08]

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsions triangulo-sinusoidale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance (Figure IV.3).

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad \text{IV.4}$$

- Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p)

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad \text{IV.5}$$

IV.3.3. Algorithme de commande :

L'algorithme de commande de la stratégie triangulo-sinusoidale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes :

$$\text{Etape 1 : } \begin{cases} V_{ref} \geq U_p \Rightarrow V_k = U_{dc} \\ V_{ref} \leq -U_p \Rightarrow V_k = -U_{dc} \end{cases} \quad \text{IV.6}$$

Tel que U_{dc} est la tension du bus continue

$$\text{Etape 2 : } \begin{cases} V_{ref} = U_{dc} \Rightarrow S_k = 1 \\ V_{ref} = -U_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases} \quad \text{IV.7}$$

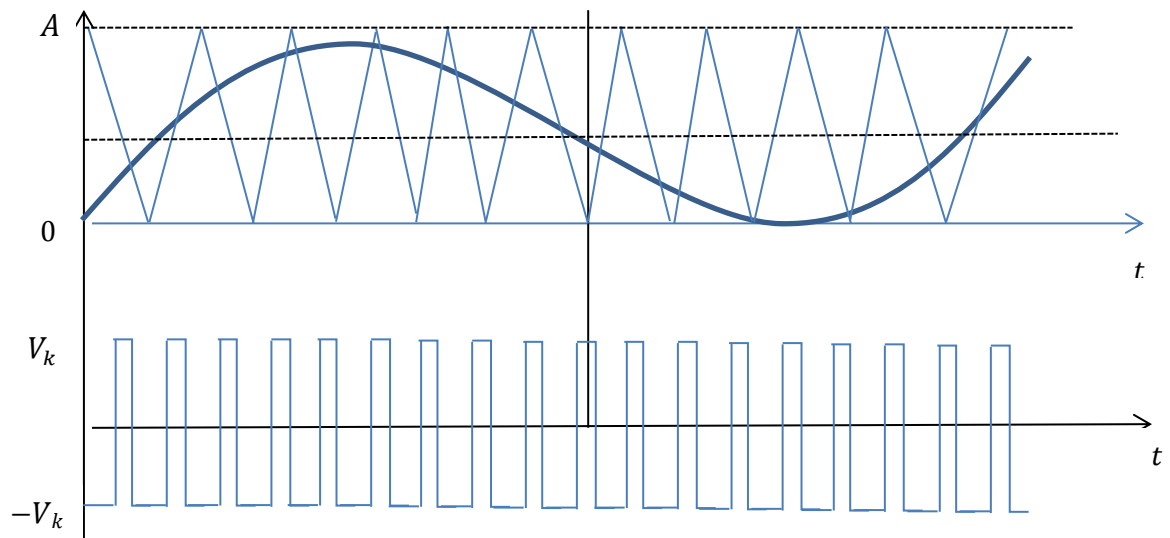


Figure.IV.4. Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo-sinusoidale à une porteuse.

IV.4.Modèle du redresseur :

IV.4.1.Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI :

Le redresseur à MLI à la même principe de fonctionnement qu'un hacheur élévateur. La tension de sortie d'un redresseur à MLI est toujours supérieure à sa tension d'entrée, pour cela il faut régler cette tension de sortie suite à la nécessité de la charge utilisée. Pour accomplir cette tâche, la tension de sortie du redresseur est mesurée et comparée à une référence.

Ce type de convertisseur peut opérer en redresseur ou en onduleur. Quand le courant I_{ch} est positif (Opération redresseur), le condensateur C est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande plus d'énergie à partir du réseau, le bloc de commande prend l'énergie d'alimentation en produisant des signaux appropriés à l'amorçage des transistors. De cette façon, l'écoulement de courant du coté alternatif vers le coté continu, et la tension de condensateur est récupérée (Figure.IV.5.).

Inversement, quand I_{ch} devient négatif (Opération Onduleur), le condensateur C est sur chargé, et le signal d'erreur demande à la commande la décharge du condensateur et renvoyé l'énergie vers le réseau. [HAM08]

IV.4.2.Modèle mathématique du redresseur commandé :

Le redresseur à MLI de tension est basé sur une structure d'onduleur de tension représenté à la figure IV.5. Chaque interrupteur est constitué d'un IGBT (composant commandé à l'amorçage et au blocage) et d'une diode en antiparallèle. Cet interrupteur est unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant.

Ainsi, ce convertisseur, de part sa structure, est réversible en courant. Il peut donc contrôler de façon instantanée la forme d'onde des courants prélevés sur le réseau. Il alimente alors une charge (active ou passive) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant absorbé étant sinusoïdal et, éventuellement, en phase avec la tension réseau correspondante.

Ce redresseur à MLI permet d'atteindre un facteur de puissance très proche de l'unité et régler, via la commande, la direction du flux de l'énergie réactive : absorbée ou fournie. [BOU10]

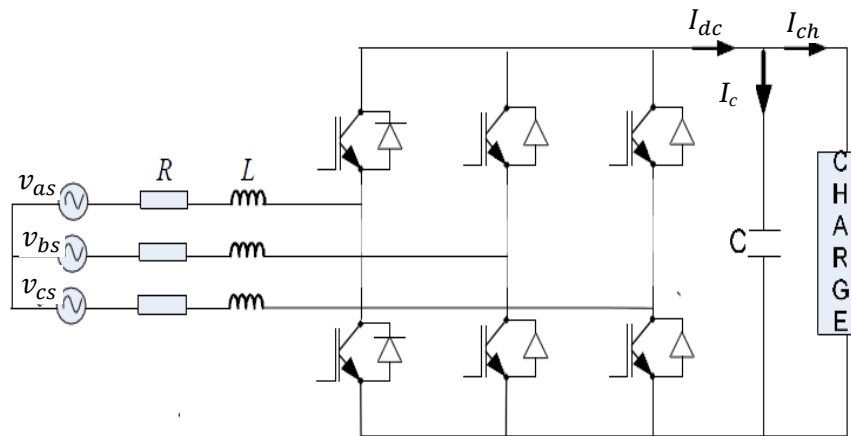


Figure.IV.5.Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de tension

Autre l'absorption de courant sinusoïdal et le fonctionnement avec un facteur de puissance proche de l'unité, le redresseur de tension à MLI peut aussi fonctionner dans deux types de mode : redressement et régénération (fourniture de la puissance active au réseau).

Cet avantage provient de sa capacité à contrôler l'écoulement de puissance active et réactive dans les deux directions sur un large spectre harmonique.

Pour cette raison, le redresseur de tension à MLI est préféré pour les applications fonctionnant fréquemment en mode de régénération, telles que les entraînements électriques surtout à courant alternatif où le redresseur fait partie du variateur de vitesse (convertisseur de fréquence) Il est aussi mis en œuvre pour alimenter en tension continue d'autres types de charges

Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties: le côté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le côté continu.

Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir un lien entre le côté alternatif et le côté continu.

Ensuite la liaison entre le côté alternatif et le côté continu au travers des interrupteurs ; [BEL10] sont des interrupteurs pouvant être commandés en ouverture '1' et en fermeture '0'. La tension redressée U_{dc} est en fonction des états de ces interrupteurs. [RED09]

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

Tableau. IV.1: Les huit états possibles des interrupteurs. [RED09]

De cette table on peut écrire la tension d'entrée redresseur d'une manière générale comme suit :

$$\begin{cases} u_{ab} = (S_a - S_b)U_{dc} \\ u_{bc} = (S_b - S_c)U_{dc} \\ u_{ca} = (S_c - S_a)U_{dc} \end{cases} \quad \text{IV.8}$$

D'où l'on peut déduire les tensions simples

$$\begin{cases} u_{sa} = f_a U_{dc} \\ u_{sb} = f_b U_{dc} \\ u_{sc} = f_c U_{dc} \end{cases} \quad \text{IV.9}$$

Avec :

$$\begin{cases} f_a = \frac{2S_a - (S_b + S_c)}{3} \\ f_b = \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3} \\ f_c = \frac{2S_c - (S_a + S_b)}{3} \end{cases} \quad \text{IV.10}$$

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

$$\begin{cases} v_{sa} = R i_a + L \frac{di_a}{dt} + u_{sa} \\ v_{sb} = R i_b + L \frac{di_b}{dt} + u_{sb} \\ v_{sc} = R i_c + L \frac{di_c}{dt} + u_{sc} \end{cases} \quad \text{IV.11}$$

Le courant redressé est donné par :

$$I_{dc} = (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) \quad \text{IV.12}$$

La Charge :

Ce bloc est constitué d'une capacité C (pour diminuer les ondulations de la tension redressée) placée en parallèle avec une résistance R_{ch} , modélisant la charge continue figure (IV.6).

La tension U_{dc} aux bornes de la charge et le courant redressé, est donnée par les deux expressions (IV.13) et (IV.14) :

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{I_{dc} - I_{ch}}{C} \quad \text{IV.13}$$

$$U_{dc} = R_{ch} I_{ch} \quad \text{IV.14}$$

I_{ch} : Courant de la charge.

I_{dc} : Courant redressé

L'équation de I_{dc} dépend de la nature de la charge :

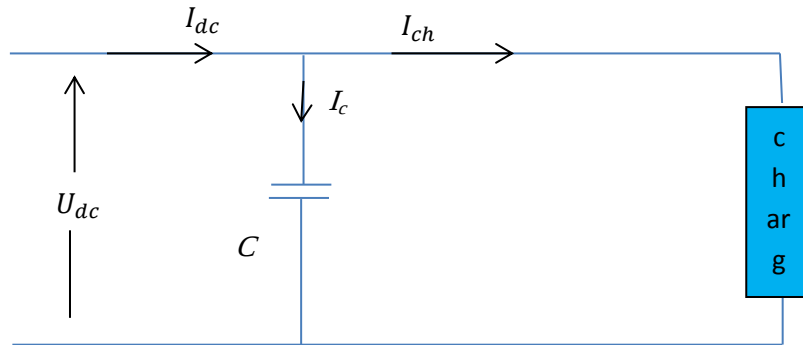
A vide : $I_{ch} = 0$

Pour une charge résistive R_{ch} :

$$I_{ch} = \frac{U_{dc}}{R_{ch}} \quad \text{IV.15}$$

La puissance du bus continu peut se déterminer comme suit :

$$P_{dc} = U_{dc} * I_{dc} \quad \text{IV.16}$$



Figuer.IV.6 : Schéma du bloc du bus contenu et de la charge.

Ce qui permet d'obtenir la fonction de transfert entre tension et courant redressés :

$$\frac{U_{dc}}{I_{dc}} = \frac{R_{ch}}{R_{ch} \cdot C \cdot s + 1} \quad \text{IV.17}$$

A partir des relations (IV. 10), (IV. 11), (IV. 12) (IV. 17), on peut établir le schéma fonctionnel global du redresseur à MLI Figure III-7 ayant comme entrées la commande des gâchettes des interrupteurs du haut (S_a, S_b, S_c) et comme sortie la tension redressée U_{dc}

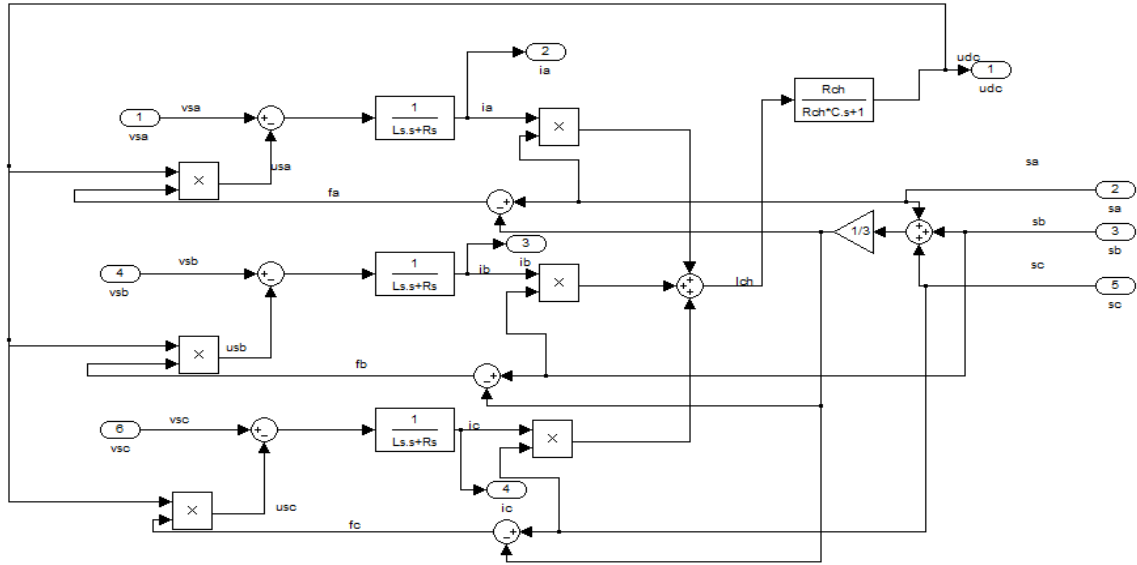


Figure.IV.7: Schéma fonctionnel du redresseur à MLI

IV.4.3. Commande du redresseur en courant par hystérésis :

Ce type de commande permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique avec deux degrés de liberté, l'amplitude et la fréquence.

Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants.

Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de références. [HAM08]

L'algorithme de la commande par hystérésis en courant est le suivant :

- ✓ $I_{réf-k} - I_{mes-k} = \varepsilon_k \Rightarrow S_k = 0$
- ✓ $I_{réf-k} - I_{mes-k} = -\varepsilon_k \Rightarrow S_k = 1$

Avec $k = a, b, c$

Et ΔI est la largeur de la bande d'hystérésis figure : IV.8

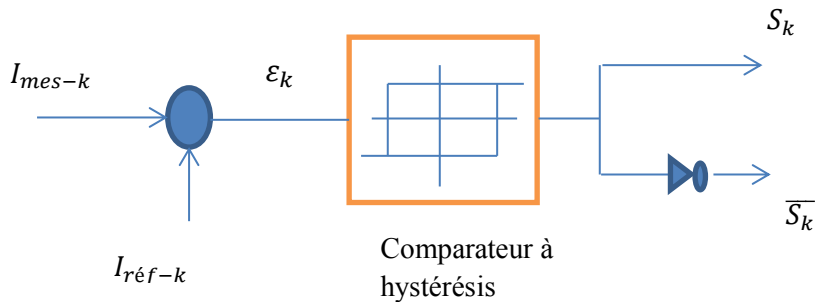


Figure.IV.8 : Principe de contrôle du courant par hystérésis.

IV.5. Contrôle de la chaîne éolienne globale

Le modèle complet de la chaîne de conversion éolienne englobe en outre la turbine et son arbre, la GSAP, un redresseur MLI, un bus continu, un onduleur MLI (Figure.IV.9)

Ce système est assez compliqué pour la génération des lois de commande qui le gère, néanmoins il suffit de partager en parties le système et ainsi suivre le flux de transfert de puissance de la turbine jusqu'au réseau

A l'aide du logiciel de simulation Matlab-Simulink, on transforme les équations qui constituent le modèle du processus à étudier en schémas bloc. En utilisant les paramètres électriques de la machine (voir annexe B).

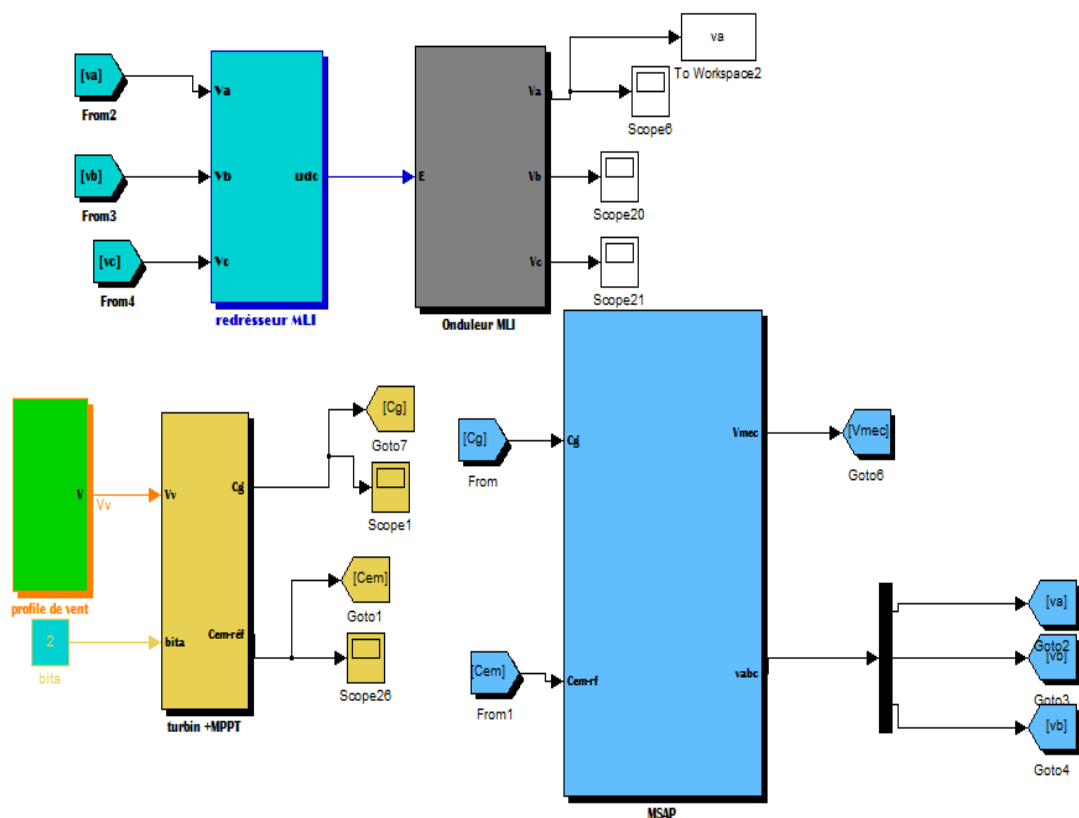


Figure.IV.9 Schéma de simulation de la chaîne globale de conversion éolienne

IV.6. SIMULATION DE LA COMMANDE MLI

La MLI permet de former chaque alternance de la tension de sortie à partir de plusieurs créneaux.

La commande MLI régit de la comparaison d'un signal triangulaire de fréquence 1500 Hz ($m=30$) et une amplitude égale à 1 avec un signal de référence sinusoïdale à amplitude égale à 0.8 et une fréquence de 50 Hz.

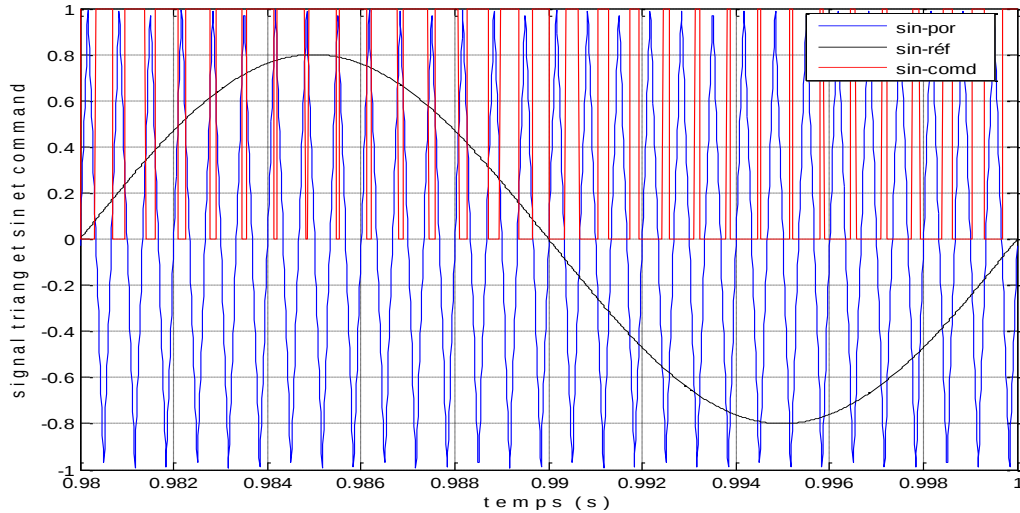


Figure.IV.10: Comparaison de signal triangulaire et la référence sinusoïdale.

La (figure.IV.10) représente la comparaison entre la porteuse triangulaire et une référence sinusoïdale, et le signal de commande résultant.

La (figure.IV.11) représente les tensions de sortie de l'onduleur et la (figure.IV.13) montre les tensions composées à amplitude de 440 V et une fréquence de 50Hz.

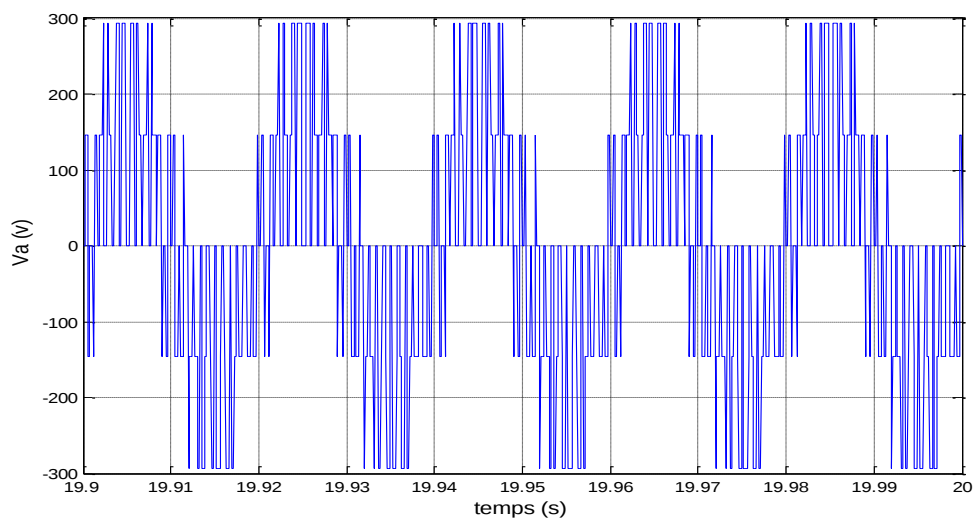


Figure.IV.11: Tensions simples de la sortie de l'onduleur

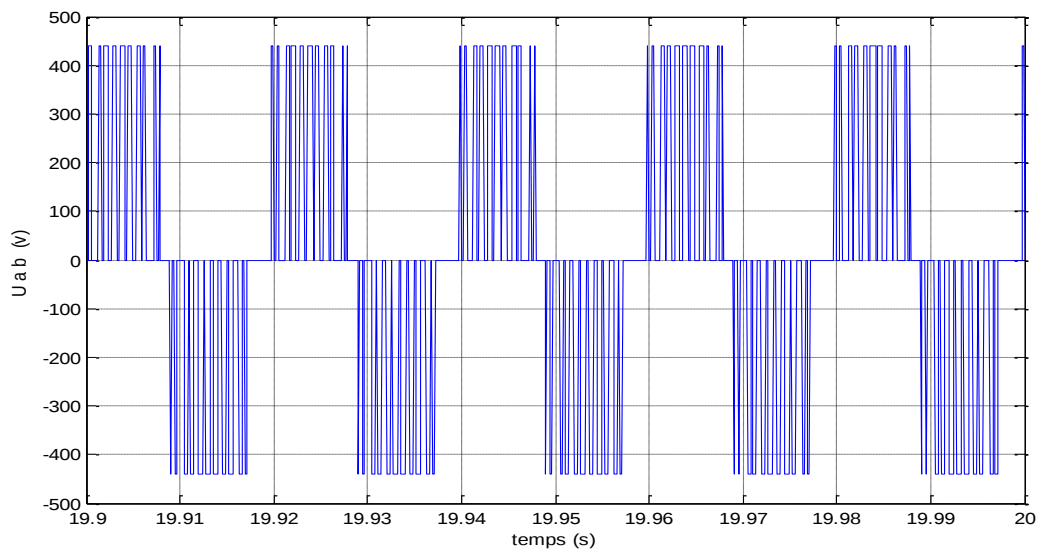


Figure.IV.12 : Tensions entre lignes à la sortie de l'onduleur

La référence de la tension à la sortie du redresseur est prise égale à 440V, nous avons simulé le fonctionnement de la chaîne de conversion pour deux cas différents :

a- La vitesse du vent est constante est vaut 15 m/s, les figures (IV.13 et IV.14) montrent respectivement la tension et la puissance du bus continu. On observe que la tension du bus continu en régime permanent reste en moyenne égale à 440V.

b- En utilisant un profil de vent variant entre trois seuils 7m/s, 9m/s et 11m/s (figure IV.15-a)

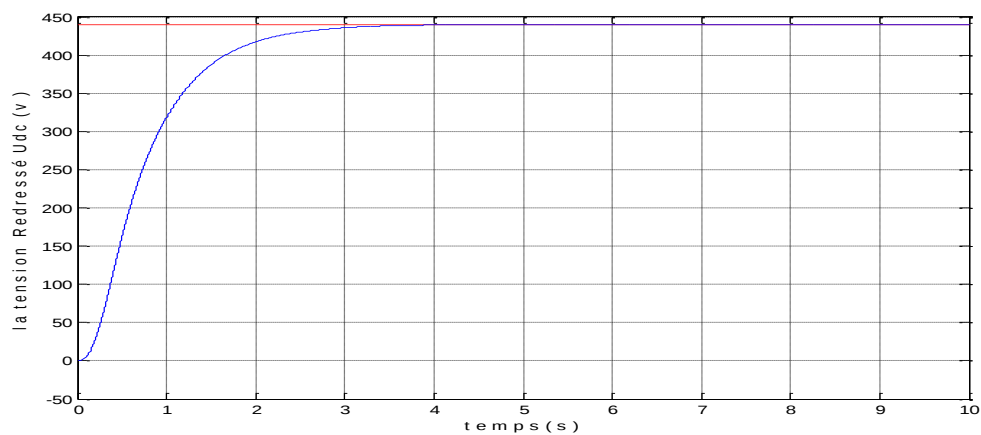


Figure.IV.13: Tension du bus continu

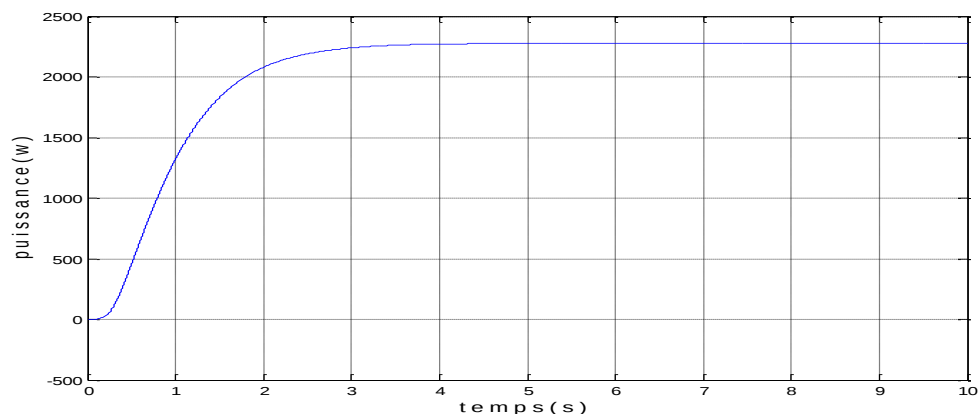


Figure.IV.14: Puissance du bus continu

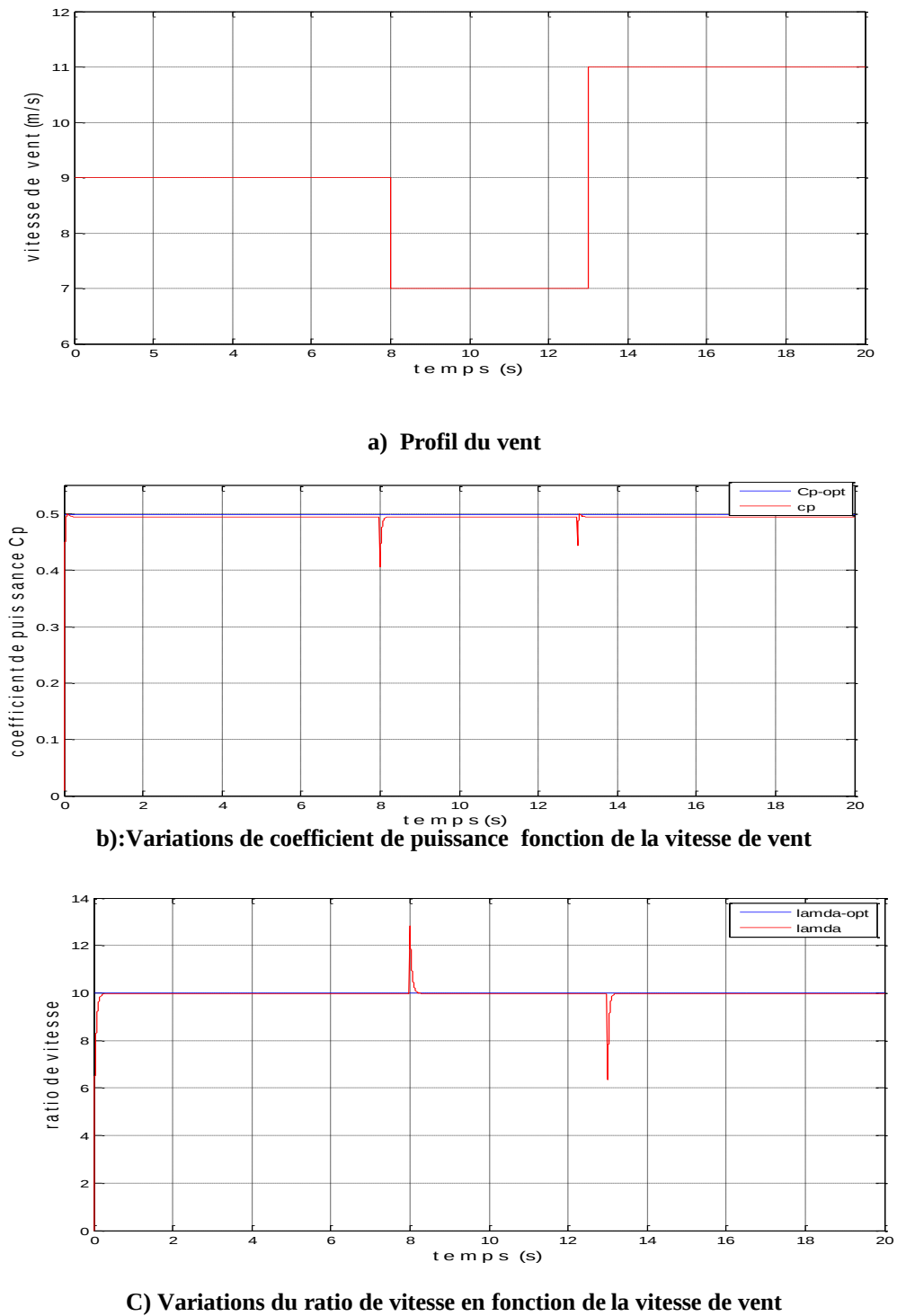
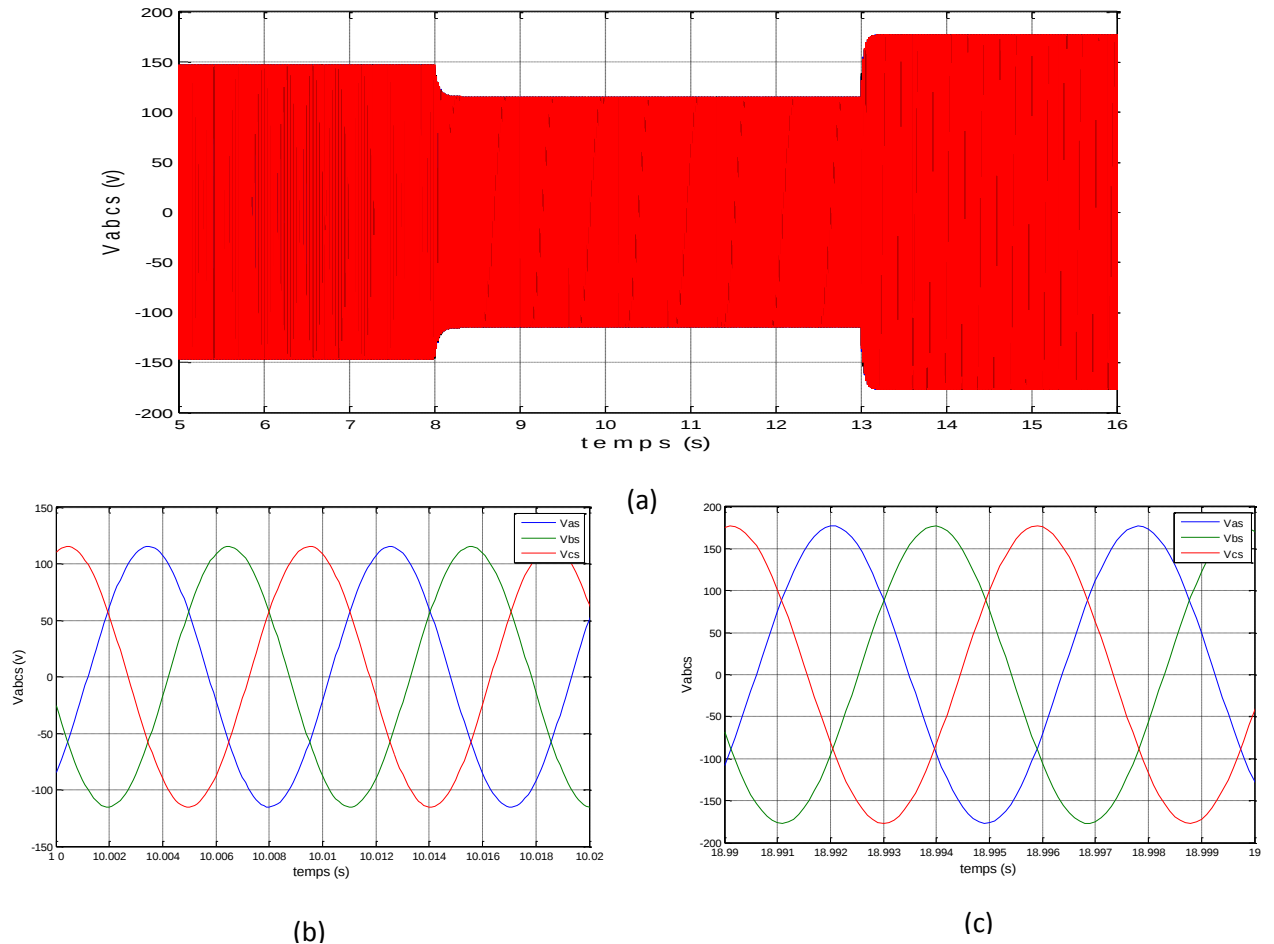


Figure IV.15 : Variations de la vitesse spécifique et le coefficient de puissance en fonction de la vitesse du vent

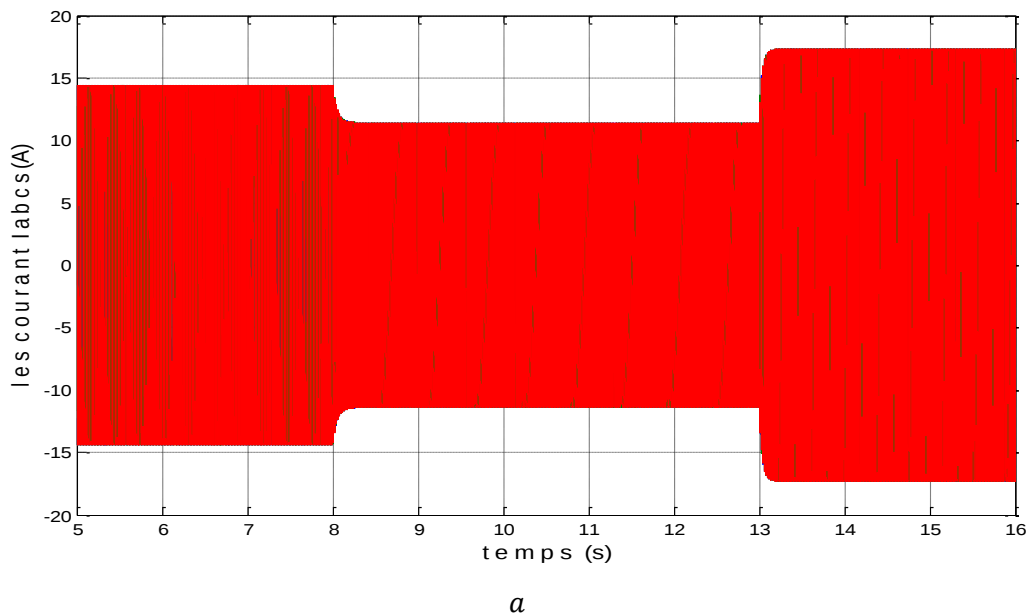
La figure (IV.15-c) illustre les variations de la vitesse spécifique pour une vitesse de vent qui varie de 9m/s à 7m/s à l'instant $t=8s$, et de 7m/s à 11m/s à l'instant 13s selon un échelon. Il est clair que la vitesse spécifique se stabilise à une valeur de 10 et le coefficient de puissance à une valeur 0.499 (figure IV.15-b), ce qui montre que ces grandeurs gardent leurs valeurs optimales grâce à l'algorithme de maximisation de puissance.



Figures.IV.16 : Allures des tensions issues de la génératrice

La figure IV.16-a représente les courbes des trois tensions issues de la génératrice. Alors que les figures IV.16-b et IV.16-c donnent des zooms sur les tensions pour les vitesses du vent respectivement égales à 7m/s et 11m/s. Il est clair que l'amplitude de la tension varie suivant la vitesse du vent, en augmentation ou en diminution.

Dans la Figure IV.17, on a représenté les courants issus de la génératrice ; il est à noter que les variations du courant sont l'image des variations de la tension.



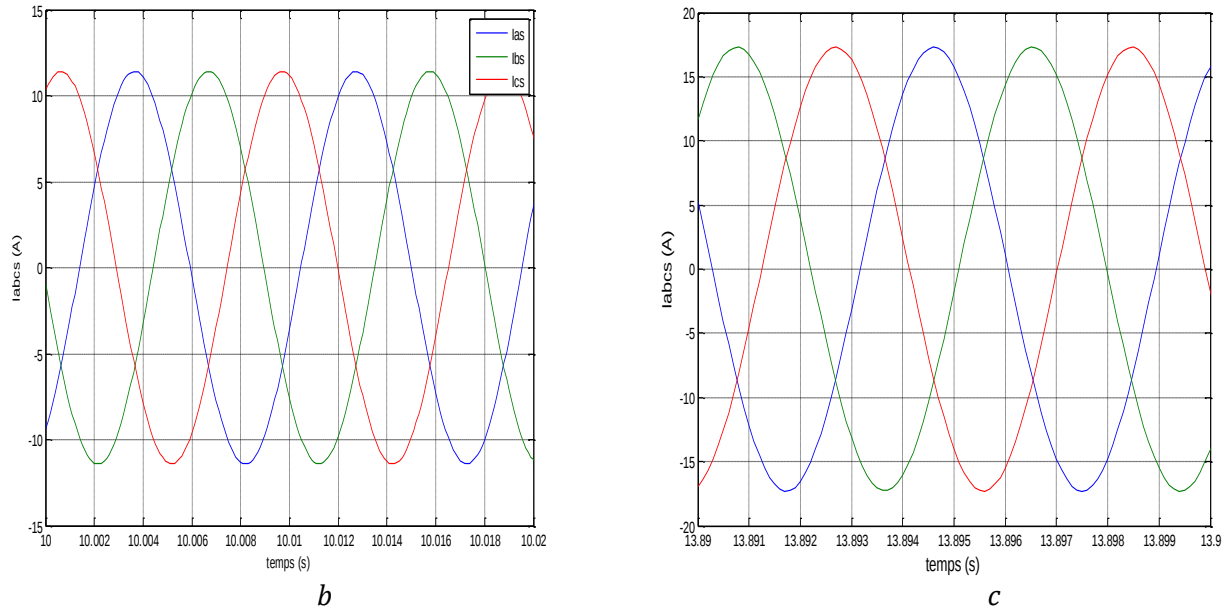


Figure 17.IV Allure des courants issus de la génératrice

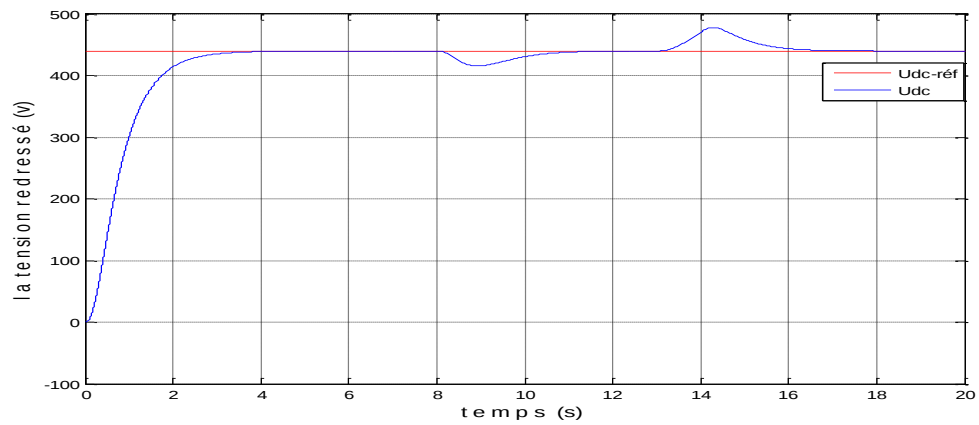


Figure IV.18 : Tension du bus continu

On observe que la tension du bus continu (figure (IV.18)) reste en moyenne égale à 440V et respecte la tension demandée : les surtensions ne dépassent pas 478 V soit une limite de dépassement de 8.64 % de la tension fondamentale et les chutes de tension restent toujours supérieures à 415V soit une chute de tension 5.68%.

Le profil de vitesse du vent est à l'origine des fluctuations de la tension du bus. En effet, lorsque la vitesse du vent varie la commande du redresseur doit suivre le changement du point de fonctionnement afin de stabiliser la tension du bus.

IV.7.Conclusion :

Après avoir décrit les différentes topologies de convertisseurs utilisés fréquemment dans les structures d'éoliennes basées sur la génératrice synchrone à aimants permanents, nous avons établi un modèle de la chaîne de conversion éolienne constitué d'une génératrice synchrone à aimants permanents, un redresseur triphasé MLI, l'ensemble est relié à l'onduleur via un bus continu. Nous avons ensuite, construit un dispositif de commande de la chaîne de conversion proposée. Le système global est simulé pour deux vitesses différentes de vent.

Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de la commande avec maximum de la puissance issue de l'énergie du vent, par la régulation de la tension du bus continu, et la tension issue à la génératrice.

Conclusion générale :

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

Dans un premier temps, une description de l'énergie éolienne et quelques notions principales au sujet de la technologie de cette conversion d'énergie ont été présentées, ainsi que les méthodes de description du gisement éolien. Ensuite, les deux types d'éoliennes à axe horizontal et vertical ont été traités. Vu que le système de génération éolien à axe horizontal est le plus répandu dans le monde, nous avons traité les caractéristiques technologiques de ce type d'éoliennes.

Après avoir déduit les caractéristiques aérodynamiques principales de la turbine, les différentes zones de fonctionnement et les stratégies de contrôle utilisées ont été présentées. La zone particulière, où la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée a été détaillée. Les algorithmes de maximisation de puissance ont été validés par des résultats de simulation.

La conception et la simulation d'un modèle pédagogique d'une éolienne à la base d'une génératrice synchrone à aimants permanents, présente un grand intérêt dans notre étude. Le modèle de la GSAP a été validé par des résultats de simulation à vide, et puis avec charge séparée ou encore connectée à une source de tension.

Enfin, une modélisation des différents éléments de la chaîne éolienne a été élaborée selon une structure de conversion d'énergie choisie constituée d'une génératrice synchrone à aimants permanents, pilotée au stator par un convertisseur contrôlé par MLI, un bus continu placé en aval de ce convertisseur, garde par un control adéquat une tension constante. La liaison au réseau est ensuite réalisée par un autre convertisseur (onduleur) contrôlé en MLI.

Un modèle continu équivalent du système complet, a été développé dans le but d'analyser son comportement dynamique. Compte tenu de la complexité du système étudié, deux dispositifs de commande, complètement séparés ont été développés. Le premier dispositif est basé sur la commande à maximum de puissance (MPPT) pour pouvoir extraire la puissance maximale du vent, alors que le deuxième est consacré au contrôle de la liaison au réseau, avec la régulation du bus continu.

Les résultats de simulation pour deux vitesses différentes du vent ont permis d'envisager les objectifs fixés par ces stratégies de commande. A cet effet, il a été possible d'examiner la validité de l'algorithme d'optimisation de puissance sur les courbes de la puissance et de la vitesse spécifique qui est maintenue à la valeur optimale en régime stable, et d'observer l'influence de la vitesse du vent sur le courant, la tension, qui devient plus importante avec l'augmentation de la vitesse du vent.

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

En perspective, ce travail peut être poursuivi et complété afin d'améliorer la production décentralisée et ceci, par l'étude des points suivants :

- ✓ Etude des systèmes de production hybride tels que les systèmes (éolienne photovoltaïque), (éolienne-diesel), (éolienne - photovoltaïque –diesel)...etc.
- ✓ Application d'autres types de commandes pour l'énergie éolienne, par exemple, les modèles de simulation des aérogénérateurs à vitesse variable avec régulation Pitch.
- ✓ Application des techniques de commande intelligentes tels que la logique floue et les réseaux de neurones.

Références bibliographiques

- [ALI11]Bouhedda Ali, «Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne», Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, 2011
- [BEL10]Soltane Belakehal, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010
- [BEN08]Yacine Abderrahmane Bencherif, «Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne», Mémoire d'Ingénieur, ENP d'Alger, 2008
- [BBM10]S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla ; « Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne» ; Revue des Energies Renouvelables ; Vol. 13 N°1 (2010).
- [BOU10]Bouafia Abdelouahab, « Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: Application aux redresseurs a MLI», Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas-Setif, 2010
- [GWE11]Site Internet, <http://www.gwec.net>
- [HAM08]Hamzaou Ilhssen, «Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur», Mémoire d'Ingénieur, ENP d'Alger, 2008
- [HON10]Duc-Hoantran, «Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive » Analyse de robustesse, validation expérimentale », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2010
- [KEH07]Kehtache Laid, «Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée », Mémoire de Magister, LEP, 2007
- [MER07] Farid MERRAHI, «Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation -Application à l'énergie éolienne-», Mémoire de Magister, ENP d'Alger 2007.
- [MBB07]Rachid Maouedj, Souad Bousalem et Boumedien Benyoucef «Etude des performances d'un système éolien. Application pour des sites algériens» ; 13^{èmes} Journées Internationales de Thermique ; Albi, France du 28 au 30 Aout 2007.
- [MES08]Mayouf Messaud, « Contribution a la modélisation de l'aérogénérateur synchrone a aimants permanents», Mémoire de Magister ,LEP, 2008
- [POI03]Frédéric Poitiers « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne», Thèse de Doctorat , Université de Nantes ,2003

- [REC05]Adammi Recki, «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite», Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, 2005
- [RED09]Redjem Radia, «Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne», Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [REG09]ReguiegYasin, «Etude simulation d'une génératrice asynchrone a doublé alimentation pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Mémoire d'Ingénieur , Université de M'sila, 2009
- [ROU12]Rouabhi Riyadh, «Étude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Application : Energie éolienne», Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Setif , 2012
- [SAG04]Sanae Rechka, Gilles Roy, «Modélisation de systèmes électromécaniques multi-masses à base de machines asynchrones, à l'aide des outils Matlab et EMTP, avec application aux éoliennes», Rapport Technique EPM–RT–2004, Ecole Polytechnique Montréal, 2004
- [WIK11]SiteInternet, <http://fr.wikipedia.org/wiki>
- [ZIO07]Nadjet Zioui, «Conception, modélisation et commande d'une éolienne à axe vertical», Mémoire de Magister, ENP d'Alger, 2007

ANNEXE A : Correcteurs de vitesse

A-1 : Introduction

L'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :[MES08]

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice

A-2: Correcteur proportionnel intégral (PI)

$$C_{em-réf} = \left(a_1 + \frac{a_0}{p} \right) \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (A.1)$$

a_1, a_0 sont respectivement le gain proportionnel et le gain intégral du correcteur.

La fonction de transfert est déterminée de la même manière que la précédente

$$F(p) = \frac{a_1 \cdot p + a_0}{J \cdot p^2 + (f + a_1) \cdot p + a_0} \quad (A.2)$$

$$P(p) = \frac{p}{J \cdot p^2 + (f + a_1) \cdot p + a_0} \quad (A.3)$$

Pour atténuer l'action du couple éolien C_g , il faut que le paramètre a_0 soit élevé .Comme précédemment, Les paramètres (a_1 et a_0), sont déterminés de manière à avoir une fonction de transfert du 2^{ème} ordre, ayant une pulsation naturelle ω_n et un coefficient d'amortissement ξ définis comme suit :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{J}} \quad \text{et} \quad \xi = \frac{f + a_1}{2 \omega_n} \cdot \frac{\omega_n}{\omega_n} \quad (A.4)$$

Donc les paramètres a_0 et a_1 sont déterminés comme suit :

$$a_0 = \omega_n^2 \cdot J \quad \text{et} \quad a_1 = \frac{2 a_0 \xi}{\omega_n} - f - J \quad (A.5)$$

Pour un coefficient d'amortissement ζ et un temps de réponse τ_r imposés en boucle fermée, on considère la fonction anticipatrice suivante (figure A-1):

$$\hat{F}(p) = \frac{J \cdot p^2 + (f + a_1)p + a_0}{(a_1 p + a_0) \left(\frac{\tau_r}{3} p + 1 \right)} \quad (A.6)$$

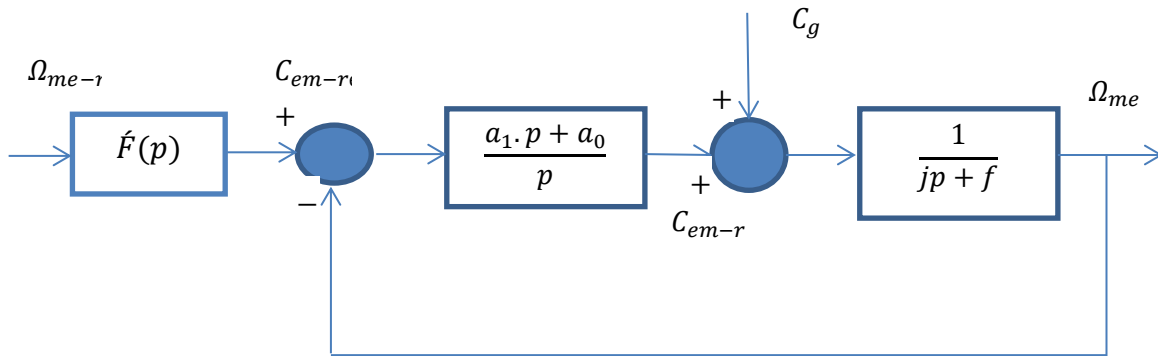


Figure A.1: Schéma bloc du correcteur PI

ANNEXE B : Paramètres de simulation

Paramètres de machine GSAP et la turbine : [HON10]

Inertie de la machine d'émulateur éolien	$J = 0.025 \text{ kg m}^2$
Frottement de la machine d'émulateur éolien	$f_m = 0.01 \text{ Nms/rad}$
Nombre de paire de pôles	$p = 4$
Vitesse de rotation nominale	$\Omega_n = 2600 \text{ tr/min}$
Tension nominale	$U_n = 240/400 \text{ V}$
Puissance nominale	$P_n = 4 \text{ kW}$
Flux magnétique	$\Phi_f = 0.21 \text{ Wb}$
Inductance synchrone	$L_s = 1.41 \text{ mH}$
Rayon du rotor	$R_v = 1.25 \text{ [m]}$
Inertie de la turbine	$J_v = 1.5 \text{ [kg.m}^2\text{]}$

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE**

SPECIALITE: AUTOMATIQUE

Proposé et dirigé par : -Mr. CHOUCHOU Abdelmadjid

Présenté par : - BENKHALED Bilal

Thème :

**Etude et modélisation d'une chaîne de production
éolienne**

Résumé :

Les sources d'énergie renouvelable, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique.

Ce mémoire traite de la simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents destinée à un site isolé. Dans un premier temps, d'un modèle de chaque étage constituant la chaîne de conversion est proposé. Les différents constituants de la chaîne de conversion sont ensuite connectés entre eux afin de former le modèle complet qui est implémenté dans l'environnement Matlab. Les résultats de simulation obtenus ont permis d'analyser le comportement du système de génération éolienne et ont fournis des informations pouvant être utiles à la mise en œuvre d'un système de commande et de contrôle adéquat.

Mots Clés :

Chaîne de production d'énergie, Energie éolienne ; Energie renouvelable ; Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), Turbine.

N° d'ordre : 064