

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Automatique

Spécialité: Automatique et Informatique Industrielle

THÈME

**Amélioration de la qualité d'énergie à l'aide d'un filtre actif
appliqué dans une chaîne de production éolienne connecté
au réseau électrique**

Préparé par: M^{me}: SEKOUANE ASMAA KHOULOUDE

Devant le Jury :

Nom et Prénoms	Grade	Lieu d'exercice	Qualité
Mr. OUARED.R	MAA	UIK Tiaret	Président
Mr. SAFA.A	MAB	UIK Tiaret	Examineur
Mr. BERKANLA	MAA	UIK Tiaret	Examineur
Mr. SEBBA.M	MCA	UIK Tiaret	Encadreur

PROMOTION 2017/2018

Remerciements

Avant tout je remercie Allah, maître de l'univers sans lui, je n'aurais jamais pu congestionner ce travail, et grand salut sur notre prophète Mohamed que le salut soit sur lui. Par ces quelques lignes, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de cette mémoire, en espérant n'avoir oublié personne...

Je tiens à remercier spécialement mon encadreur MONSIEUR SEBAA MORSLI pour le temps et la patience qu'il m'a accordés tout au long de ces mois et d'avoir bien assuré la direction et l'encadrement de mes travaux de thèse.

Mes sincères remerciements et ma gratitude vont au MONSIEUR OUARED pour avoir accepté d'examiner ce travail et d'en présider le jury de soutenance. Qu'il soit assuré de mon entière reconnaissance.

Je remercie également MONSIEUR SAFA qui a accepté d'examiner ce travail et de participer aux jurys de soutenance.

Je remercie MONSIEUR BERKANI d'avoir accepté d'examiner cette thèse. Leurs remarques et précieux conseils vont m'aider à améliorer la qualité de ce travail. Soyez assurés, mes professeurs, de mon estime et de ma profonde gratitude.

Dédicace

Afin d'être reconnaissante envers ceux qui m'ont appuyé et encouragé à effectuer ce travail de recherche, je dédie cette mémoire À mes parents pour tous les sentiments

d'affection et d'amour qui représentent pour moi le pilier de tous mes efforts.

À Mon époux, pour son soutien sa disponibilité et sa compréhension, qu'il soit assuré de ma profonde gratitude.

À mes beaux-parents pour leur aide

À ma très chère tante pour l'amour qu'elle m'apporte

À mes chers frères et sœurs

À mon fils Amir.

À tous les membres de ma famille et ma belle-famille sans aucune exception.

Et à tous ceux que ma réussite leur tient à cœur.

NOTATION

MSAP	: Machine Synchrone à Aimant Permanent.
GSAP	: Génératrice Synchrone à Aimants Permanents
MPPT	: Maximum Power point Tracking.
MLI	: Modulation Largeur d'Impulsion.
THD	: Total Harmonic distortion.
PI	: Régulateur Proportionnel Intégral.
IGBT	: Insulated Gate Bipolaire Transistor

LISTE DES SYMBOLES

C_p	: Coefficient de puissance
V_v	: Vitesse de vent
Ω	: Vitesse angulaire
E_c	: Energie cinétique
T_T	: Couple de la turbine
A	: valeur moyenne de la vitesse de vent
a_k	: Amplitude de l'harmonique d'ordre k
i	: Rang du dernier harmonique retenue du calcul de vent.
C_{em}	: Couple électromagnétique développée par la génératrice.
C_g	: Coupe issue du multiplicateur.
c_f	: Couple résistant au frottement.
k_p	: Coefficient proportionnel au regulateur.
k_i	: Le gain de l'intégrateur.
L_d	: Inductance statorique sur l'axe d.
L_q	: Inductance statorique sur l'axe q.
i_d	: Courant statorique selon l'axe d.
i_q	: Courant statorique selon l'axe q.
e_d	: F.E.M de la machine sur axe d
e_q	: F.E.M de la machine sur l'axe q
T_e	: Constante de temps électrique .
$i_{a,b,c}$: Courant des phases statorique .
R_s	: Résistance d'une phase d'enroulement statorique .
σ	: Coefficient de dispersion .
P_a	: Puissance active
Q	: Puissance réactive.
Θ	: L'abscisse angulaire entre la phase statorique (A) et la phase rotorique (a).
γ	: Le facteur d'affaiblissement sur le rotor de la turbine.
s	: L'opérateur de LAPLACE.
p	: Le nombre de paires de pôles.
g	: La vitesse de glissement.
f	: Le coefficient des frottements visqueux totaux des éoliennes.
v	: La vitesse du vent moyenne.
$P(\Theta)$: La matrice de la transformation de PARK.
$P(\Theta)^{-1}$: La matrice de la transformation inverse de PARK.
J	: L'inertie totale de l'éolienne.
$G(s)$: La fonction de transfert du filtre spatial.
G	: Le rapport du multiplicateur de vitesse.
ρ	: La densité de l'air.
λ	: La vitesse spécifique de la turbine.
β	: L'angle de calage des pales.
ω_s	: La pulsation statorique.

- ω_r : La pulsation rotorique.
- ω : La pulsation mécanique.
- $\Phi_s \Phi_r$: Le flux statorique et rotorique respectivement.
- λ_{opt} : La vitesse spécifique optimale de la turbine.
- Θ_s : L'abscisse angulaire du référentiel de Park par rapport à l'axe de la phase statorique (A).
- Ψ_f : Flux inducteur.
- C_m : Couple moteur appliqué sur la génératrice
- Φ_h : Phase de la composante h lorsque $t=0$.
- Y_h : La valeur efficace de la composante de rang h .
- Y_0 : Amplitude de la composante continue généralement nulle en régime permanent.
- Θ : Est l'angle de park.

LISTE DES FIGURES

- Figure.I.1 : Développement de l'énergie éolienne dans le monde
Figure.I.1 : Les 10 meilleurs pays dans la production de l'énergie éolienne du monde
Figure.I.2 : Schéma synoptique de la conversion de l'énergie.
Figure.I.4 : Turbine éoliennes a axe verticales .
Figure.I.5 : Turbine éolienne à axes horizontale.
Figure.I.6 : Composition de la nacelle.
Figure.I.7 : Schéma général d'une éolienne (aérogénérateur) .
Figure.I.8 : Conversion de l'énergie.
Figure.I.9 : Machines synchrones relié au réseau par un ensemble de redresseurs
Figure.I.10 : Machines synchrone à rotor bobiné à pole saillants [15]
Figure.I.11: Principe du fonctionnement du moteur a aimant permanent
Figure.I.12: Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable [07]
Figure.II.1 : Entrées et sorties du modèle de la voilure [27]
Figure.II.2 : Profile de vent avant et après le filtrage
Figure.II.3 : Colonne d'air animé d'une vitesse V
Figure.II.4 : Schéma de principe de la théorie de Betz
Figure.II.5 : Vitesse de vent V et vitesse tangentielle de l'aubage (Ωr)
Figure.II.6 : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différentes β .
Figure.II.7 : Configuration d'une éolienne
Figure.II.8 : Modèle de la turbine.
Figure.II.9 : Modèle simplifié de la turbine.
Figure.II.10: Organigramme de simulation de la turbine éolienne [11] [35].
Figure.II.11: Schéma bloc du modèle de la turbine.
Figure.II.12: Schéma bloc du modèle du multiplicateur de vitesse [6].
Figure.II.13: Schéma bloc de la turbine le multiplicateur et l'arbre
Figure.II.14: Caractéristiques puissance, vitesse du vent et vitesse de rotation [37] [11]
Figure.II.15: Caractéristiques vitesse de rotation, vitesse de vent [11].
Figure.II.16: Caractéristique de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation
Figure.II.17: Schéma bloc de la turbine avec maximisation de la puissance extraite à l'aide d'un asservissement de la vitesse [34].
Figure.II.18: Schéma bloc de l'asservissement en utilisant un régulateur PI [34]
Figure.II.19: Schéma bloc d'un régulateur IP [34].
Figure.II.20: Modèle du profile de vent
Figure.II.21: Variation du coefficient de Puissance C_p
Figure.II.22: Allure de la vitesse mécanique .
Figure.II.23: Zoom sur l'allure de la vitesse mécanique.
Figure.II.24: Allure de la vitesse mécanique
Figure.II.25: Zoom sur l'allure de la vitesse mécaique
Figure.III 1 : Un ensemble de commande-onduleur-MSAP
Figure.III.2 : Machines synchrones a aiments permanants
Figure.III.3 : Représentation d'une machine synchrone a aiment permanents
Figure.III.4 : Circuit équivalent de MSAP –convention moteur-
Figure.III.5: Modèle de PARK pour la GSAP [11]
Figure.III 6: Schéma bloc de la Gsap
Figure.III.7: Boucle de régulation du courant i_d .
Figure.III.8: Boucle de régulation du courant i_q [34]
Figure.III.9: Modèle du convertisseur
Figure.III.10: Etats de commutation des interrupteurs d'un convertisseur à 02 niveaux [25].
Figure.III.11: Principe de la MLI triangulo-sinusoïdale
Figure.III.12: Schéma bloc de la MLI

Figure.III.13: Schéma bloc de L'onduleur-MLI
 Figure.III.14: Schéma électrique du bus continu
 Figure.III.15: Schéma bloc sous Matlab-simulink de la chaîne de conversion éolienne étudiée
 Figure.III.16: Couple électromagnétique et moteur
 Figure.III.17: Vitesse de rotation
 Figure.III.18: Allure de courant i_d
 Figure.III.19: Allure de courant i_q .
 Figure.III.20: Allure des courants statoriques i_{abc}
 Figure.III.21: Zoom sur les courants statoriques i_{abc}
 Figure.III.22: La tension d'une phase statoriques
 Figure.III.23: Zoom sur la tension d'une phase statorique
 Figure.III.24: Contrôle de la vitesse mécanique de la génératrice.
 Figure.II.25: Tension de sortie de la GSAP .
 Figure.III.26 : Zoom sur les tensions de sortie de la GSAP.
 Figure.III.27: Contrôle de la Tension du Bus continu.
 Figure.III.28: Les courants statoriques dans le plan d,q
 Figure.IV.1: Puissance déformante
 Figure.IV.2: Filtre passif
 Figure.IV.3: Configuration du filtre hybride de puissance à l'aide du convertisseur de puissance proposé .
 Figure.IV.4: Détection d'harmoniques dans un domaine temporel
 Figure.IV.5: Principe de contrôle du courant par hystérésis
 Figure.IV.6: Commande des interrupteurs par hystérésis.
 Figure.IV.7: Schéma global du système à simuler
 Figure.IV.8: De haut en bas
 Figure.IV.9: Variation de la fréquence de commutation
 Figure V.10: Spectre du courant filtré (rang d'harmoniques de 1 à 1000)
 Figure.IV.11: Spectre du courant filtré (rang d'harmoniques de 1 à 50)
 Figure.IV.12: De haut en bas
 Figure.IV.13: De haut en bas (i_d : courant redressé, i_{af} : courant du filtre, i_{as} courant de source, V_c : tension aux bornes du condensateur)
 Figure.IV.14: Spectre du courant filtré (rang d'harmoniques de 1 à 1000)
 Figure.IV.15: Spectre du courant filtré (rang d'harmoniques de 1 à 50)

TABLE DES MATIERES

<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	<i>1</i>
------------------------------------	----------

CHAPITRE I

Etat de l'art de l'énergie éolienne. 1

I. Introduction:.....	3
I.1. L'énergie éolienne :	3
I.1.1.Définition de l'énergie éolienne :	3
I.1.2.Son principe :	5
I.2. Différents types d'aérogénérateurs :.....	5
I.2.1 Éoliennes à axe vertical :	7
I.2.2Éoliennes à axe horizontal :	7
I.2.3. Les raisons pour choisir une éolienne de grande taille :	8
I.2.4 Les raisons pour choisir une éolienne de petite taille :	8
I.3 Principaux composants d'une éolienne :	8
I.4.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :	10
I.4.2. Les inconvénients	11
I.5.Structure des systèmes de conversion de l'énergie éolienne :	12
I.5.1. Systèmes utilisant la machine synchrones à aiment permanant :	12
I.5.2 Machines synchrones à aimants permanents :	13
I.5.3Principe de fonctionnement de la MSAP [17]:.....	14
I.5.4 Eolienne à base de la Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) :	15
I.5.5Avantages des éoliennes à base des machines synchrone à aimants permanents par rapport aux autres types de machines [17] :	16
I.6. La commande vectorielle :	16
I.6.1Avantages et inconvénients de la commande vectorielle :.....	17
I.6.2 Son principe :	18
I.6.3 Hypothèse d'application :	19
I.6.4 Equation de base :	19
I.7.Conclusion :	20

Chapitre II

Modélisation des différents éléments de la turbine éolienne. 21

II.1. Introduction :	21
II.2.La turbine éolienne :	21
II.2.1 Modélisation de la turbine :	22
II.3. Modélisation de la vitesse de vent :	22
II.3.1 Modèle de la vitesse De vent :	23
II.3.2.Expression du vent en un point fixe :	23

II.3.3. Le filtre spatiale :	24
II.4. Conversion de l'énergie éolienne :	25
II.4.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :	25
II.4.2 Loi de Betz :	26
II.4.2.1 La puissance de l'éolienne PT :	27
II.4.3. La vitesse spécifique de vitesse (Tip-Speed-Ratio) λ :	27
II.4.4. Le couple éolien :	28
II.4.5. Le coefficient du couple :	28
II.4.6. Le coefficient de puissance $cp(\lambda, \beta)$:	29
II.4.6.1 La puissance aérodynamique :PT :	30
II.5. Equation dynamique de la turbine :	30
II.5.1. Hypothèses simplificatrices :	31
II.6. Modèle du multiplicateur de vitesse :	34
II.7. Equation dynamique de l'arbre de transmission :	34
II.7.1. Stratégies de commande de la turbine éolienne :	35
II.8. Système de contrôle de l'aéroturbine :	37
II.9. Méthodes de recherche du point maximum de puissance MPPT :	37
II.9.1. Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse :	38
II.10. Système de régulation de la turbine éolienne :	39
II.10.1. Calcul des paramètres du régulateur PI :	39
II.9.2. Calcul des paramètres du régulateur IP :	40
II.9.2.1. Résultat de simulation PI :	41
II.11. Conclusion :	44

Chapitre- III

La génératrice synchrone à aimants permanent (GSAP)

III.1. Introduction :	45
III.1.2. C'est quoi une machine synchrones a aimants permanents ?:	46
III.2. Modélisation de la génératrice synchrones a aimant permanents :	48
III.2.1. Modèle mathématique de la MSAP :	48
III.2.2. Equations électriques :	48
III.2.3. Equations électriques dans le repère de Park (d, q) :	49
III.2.4. Equation magnétique :	50
III.2.5. Expression du couple électromagnétique :	51
III.2.6. Equation mécanique :	51
III.3. Commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation :	52
III.4. Calcul du régulateur PI :	54
III.5. Les convertisseurs :	54
III.6. Principe de la MLI :	57
III.7. Modélisation de la liaison au réseau :	60
III.7.1. Modélisation de bus continue :	60
III.8. Résultats de simulations :	61

III.6.Conclusion :	68
--------------------	----

Chapitre IV

Les perturbations électriques et solutions de dépollution des systèmes électriques à l'aide d'un filtre actif

IV.1. Introduction :	69
IV.2. Effets des harmoniques :	70
IV.2.1.Effetsinstantanés:	70
IV.2.2 Effets à terme dus aux échauffements	70
IV.3Taux de distorsion:	70
IV.4.Le facteur de puissance :	71
IV.5.Les moyens de Réduction des perturbations harmoniques :	72
VI.5.1 Filtrage passif :	72
IV.6 Les filtres actifs.	72
VI.7.Puissances instantanées dans le plan dqo [43] :	74
VI.8 Commande du filtre actif	76
IV.8.1. Commande du filtre actif par hystérésis :	76
VI.8.1.1. Génération des signaux de contrôle par hystérésis :	76
IV.8. Résultats de Simulation :	78
VI.8.2 Commande du filtre actif par la MLI intersective	80
IV.9. Résultats de simulation et discussion	81
IV.10. Conclusion :	83

<i>Conclusion Générale :</i>	85
------------------------------	-----------

Bibliographie

Annexe

INTRODUCTION GENERALE

L'électricité, forme propre de l'énergie par excellence, est aujourd'hui produite, à près de 80 %, à partir de combustibles fossiles (pétrole, gaz,...) ou fissiles (nucléaire), ressources épuisables et polluantes à la fois [1]. Pour un développement durable, les ressources énergétiques renouvelables sont « propres » et inépuisables, donc capables à long terme de satisfaire la majeure partie de nos besoins. Après de nombreux soubresauts, les contraintes environnementales, le rapprochement de l'échéance d'épuisement des ressources fossiles et fissiles ainsi que les soucis d'indépendance énergétique conduisent depuis les années 1990 à un décollage significatif des filières de production d'électricité d'origine renouvelable.

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

Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables 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 cette thèse est l'énergie éolienne.

Les systèmes utilisant l'énergie du vent représentent la technologie à plus forte croissance. Parmi ces technologies éoliennes, de nombreux systèmes de différents types ont été conçus et développés tout en prolongeant une expérience dans ce domaine remontant sur plusieurs siècles. De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de la technologie éolienne est l'aérogénérateur, une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un courant électrique.

La chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique intègre différents organes électrotechniques. Afin de maximiser l'efficacité de cette conversion d'énergie, de nombreuses solutions ont été examinées aussi bien au niveau de la génératrice à utiliser que de l'électronique de puissance. La plupart des dispositifs utilisent des machines synchrones ou asynchrones mais des études sont aussi réalisées dans l'objectif de développer des machines spéciales. L'interface électronique de puissance entre l'éolienne et la charge a généralement pour but de commander le générateur afin d'extraire un maximum de puissance du vent.

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution à l'étude de systèmes de commande d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) à vitesse variable ainsi que l'amélioration de la qualité

d'énergie à l'aide d'un filtre actif. Ce choix est justifié par l'intérêt que portent les chercheurs et les industriels à ce type de structures d'éoliennes. En effet, le développement actuel dans le domaine des matériaux magnétiques permet une meilleure utilisation des génératrices synchrones à aimant permanent et à moindre coût pour la construction de grandes et puissantes éoliennes. Dans le but d'approfondir notre recherche, la thèse est organisée en quatre chapitres .

Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'état de l'art sur les chaînes de conversion de l'énergie éolienne. Ainsi que l'intérêt de l'utilisation de la machine synchrone à aimant permanent dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne est abordé minutieusement ainsi qu'une brève description sur la commande vectorielle.

Le second chapitre est dédié à l'étude des caractéristiques et stratégies de fonctionnement du système de conversion aérodynamique de la chaîne éolienne. Un modèle mathématique du profil du vent, source principale d'énergie, est identifié et choisi pour l'entraînement de la turbine de la chaîne. Le modèle mathématique la turbine éolienne doit permettre son contrôle de sorte à ce que son coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent. Ce contrôle se fait à l'aide de deux types de régulateurs : un régulateur proportionnelle intégrale PI puis un régulateur intégrale proportionnelle IP, la première méthode sera étudiée dans notre thèse.

Le troisième chapitre sera dédié à l'étude de la génératrice synchrone à aimants permanents et son modèle mathématique Afin de valider le modèle choisi, le principe de la commande vectorielle appliquée à la génératrice est étudié et présenté finement.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude du filtrage actif et son rôle pour l'amélioration de la qualité d'énergie.

Pour valider l'efficacité des stratégies de contrôle adoptées a été validée par les résultats obtenus des simulations effectuées sous MATLAB simulink.

Enfin, une synthèse des travaux réalisés et des perspectives de recherche concluront cette thèse.

CHAPITRE I :

Etat de l'art de l'énergie éolienne.

I. Introduction:

I.1. L'énergie éolienne :

Après avoir pendant longtemps oubliée, l'énergie éolienne, portant exploitée depuis l'antiquité, connaît ces dernières décennies un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers et au réchauffement climatique dû à la pollution causée par les produit fossiles utilisés pour la production d'énergie.

En essayant de donner un aperçu sur cette énergie et ses différentes structures, nous allons, dans ce premier chapitre, présenter les différents types d'aéroturbines en décrivant leur principe de fonctionnement.

I.1.1.Définition de l'énergie éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), le parc éolien pourrait atteindre une puissance installée de 230 GW en 2020, soit plus de 5 fois la puissance installée en 2005 qui était de 40 GW.

En Europe principalement, mené par l'Allemagne et suivis par l'Espagne et l'Italie on comptait en 2000 environ 15000 MW de puissance installé. Ce chiffre a doublé en 2003, soit environ 27000MW pour 40 000MW de puissance éoliennes installé dans le monde.



Figure I. 1 Développement de l'énergie éolienne dans le monde

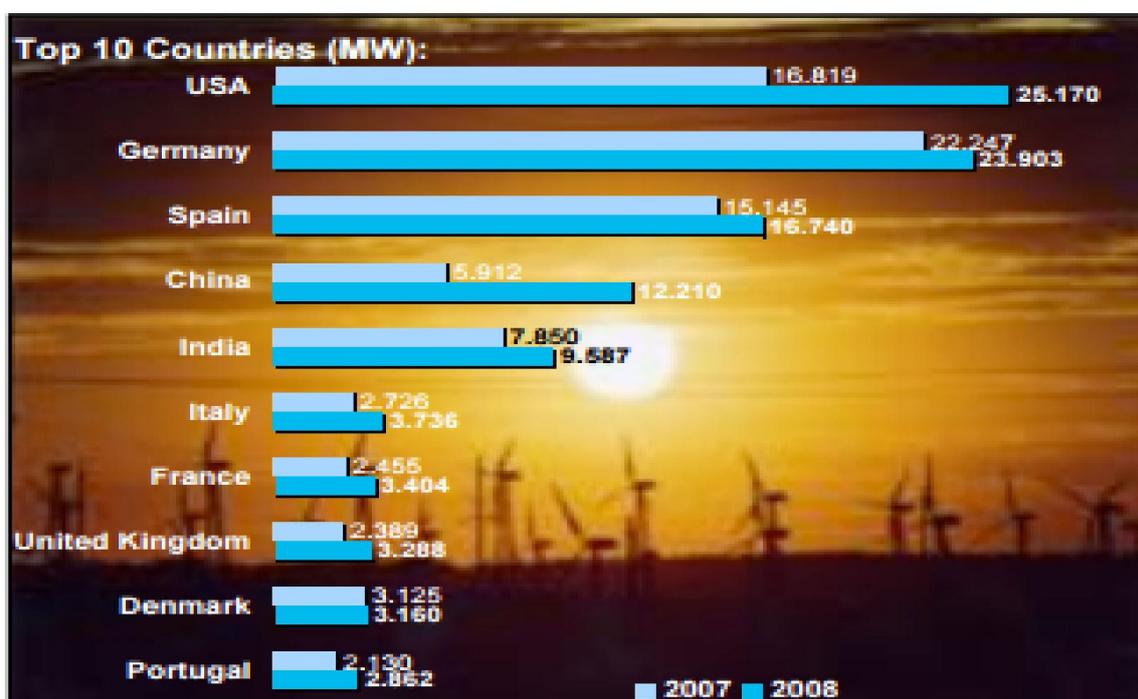


Figure I. 3 Les 10 meilleurs pays dans la production de l'énergie éolienne du monde

Le principal inconvénient de cette source d'énergie est :

L'indisponibilité et l'imprévisibilité du vent. Donc une éolienne, est un dispositif qui permet de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion 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.

Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

I.1.2.Son principe :

Un système éolien a pour rôle d'extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [3,4] :

Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique. Cette dernière est transmise à la génératrice au moyen d'un arbre de transmission et un éventuel réducteur de vitesse.

Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique.

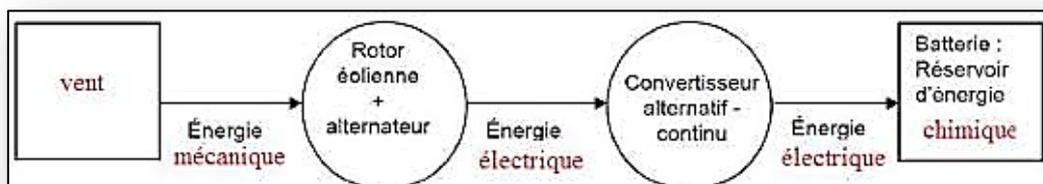


Figure I. 4 schéma synoptique de la conversion de l'énergie.

I.2. Différents types d'aérogénérateurs :

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice [14] :

- les turbines éoliennes à axe horizontal
- les turbines éoliennes à axe vertical



FigureI.4: Turbine éoliennes a axe verticales .



Figure.I.5 : Turbine éolienne à axes horizontale.

I.2.1 Éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années 1920, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation :

- Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur.

- Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 1930). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angle.

Ces genres d'éoliennes ne sont quasiment plus utilisées, à cause les contraintes mécaniques au niveau du sol et occupent plus d'espace.

I.2.2 Éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées de façon aérodynamique à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol, mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance ou de couple en fonction de la vitesse normalisée λ .

I.2.3. Les raisons pour choisir une éolienne de grande taille :

- Une grande éolienne produit beaucoup plus d'énergie électrique, en plus le coût d'installation est le même à celui d'une éolienne à petite taille.
- Les éoliennes de grande taille sont plus efficaces si on les installe en mer.
- Au lieu d'installer plusieurs éoliennes de petite taille on peut installer une grande éolienne ça nous permet de gagner plus d'espace.

I.2.4 Les raisons pour choisir une éolienne de petite taille :

- La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler.
- Le coût de transporter des éoliennes de petite taille est moins chère par rapport à celui du grande taille surtout dans les milieux difficile.
- Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne.

1.3 Principaux composants d'une éolienne :

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

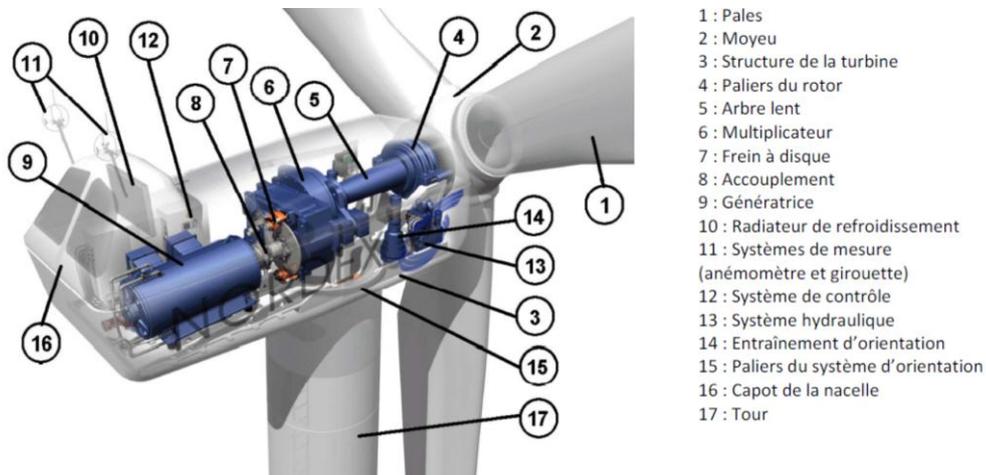


Figure I.6 : Composition de la nacelle.

•Le mât : généralement un tube d'acier doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations au niveau 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) .

•Pales : Ils captent l'énergie cinétique (contenue dans le vent) et la transfèrent au rotor. Ils peuvent mesurer jusqu'à 3mètres.

•Arbres de transmission : Il reçoit le mouvement de rotation du rotor afin d'entraîner la génératrice électrique.

•Transmission : Elle adapte la vitesse de rotation en fonction de la génératrice.

• La nacelle : C'est le coffret qui se trouve en haut du mât comprend: arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Tous ces éléments mécaniques permettent de coupler le rotor éolien au générateur électrique.

• Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

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

• Un système de refroidissement par air ou par eau est souvent utilisé, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

• Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire et le bruit.

• Système de contrôle : Il surveille le fonctionnement de l'éolienne, signale et commande l'arrêt de l'éolienne.

•Anémomètre: Il mesure la vitesse du vent qu'il va transmettre au système de contrôle pour démarrer ou arrêter l'éolienne. Une éolienne est enclenchée à partir de 3 à 4 m/s (15 km/h) et est arrêtée approximativement à 25m/s (90 km/h).

• Gouvernail : C'est le système d'orientation pour les petites éoliennes; Il sert à maintenir le rotor de l'éolienne dans l'axe horizontal face au vent afin de tirer le maximum d'énergie.

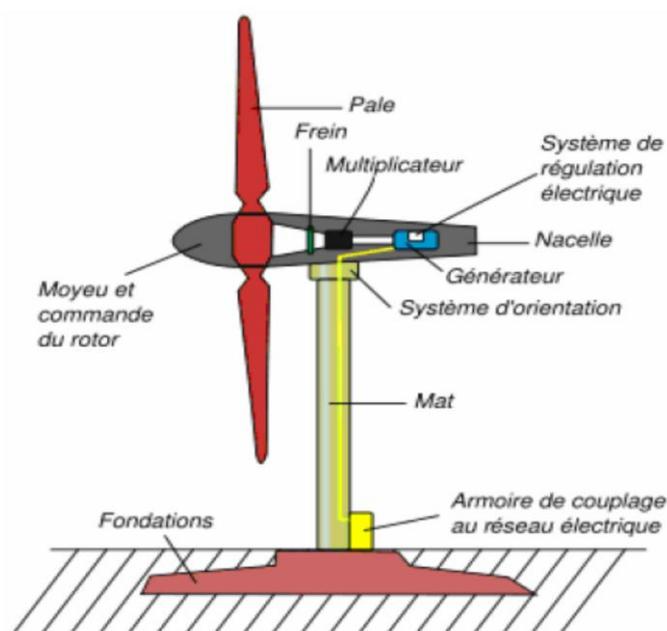


Figure I.7 : Schéma général d'une éolienne (aérogénérateur) .

I.4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

I.4.1. Avantages :

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [14] :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne et ne produit aucun déchet atmosphérique ni déchet radioactif donc elle ne dégrade pas la qualité de l'air, et sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- Les éoliennes sont souvent installées dans des terrains privés donc les propriétaires reçoivent un paiement pour leur collaboration ce qui augmente leur revenu.

- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie : le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.

- L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à moindre coût à la réalisation des objectifs que s'est fixée l'Union Européenne pour 2020 : 20% d'énergies renouvelables (éolienne et autres) dans la consommation globale d'énergie[14].

- Face à la variabilité des prix du baril de pétrole, l'énergie éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement.

- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.

- D'après des études récentes les éoliennes permettent grâce à la taxe professionnelle de participer au développement local des communes avec une contribution annuelle de l'ordre de 10 000 € par MW d'énergie éolienne produite (ce chiffre peut varier en fonction des communautés de communes concernées par les installations d'éoliennes).

- Les autres activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien.

- Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original.

I.4.2. Les inconvénients

- L'énergie éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques [7].

- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit (que l'on remarque essentiellement avec des éoliennes importées d'Asie, problème d'interférences électromagnétiques pour des éoliennes bas de gamme.

- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

I.5. 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 (MADA)
- système éolien à vitesse variable avec machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants permanents dite (MSAP). Qui sera utilisé dans notre projet.

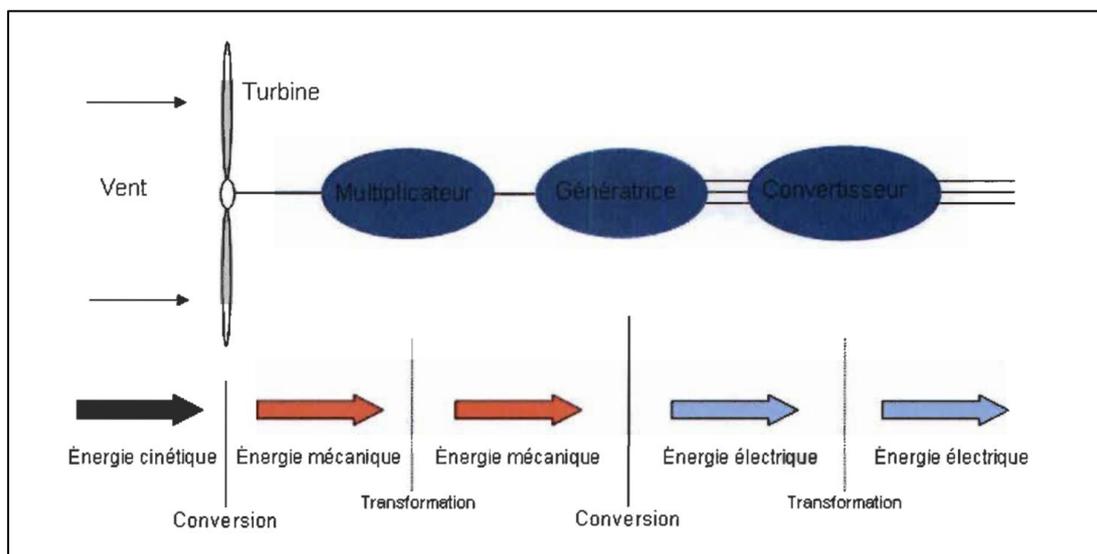


Figure I.8: Conversion de l'énergie.

I.5.1. Systèmes utilisant la machine synchrones à aiment permanent :

La Machine Synchrone (MS) a l'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique notamment pour la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP). Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que la MAS. Plusieurs structures sont possibles pour la machine synchrone. On notera que pour chaque topologie, il est possible de s'affranchir du multiplicateur de vitesse en utilisant une machine synchrone à aimants permanents à grand nombre de paires de pôles.

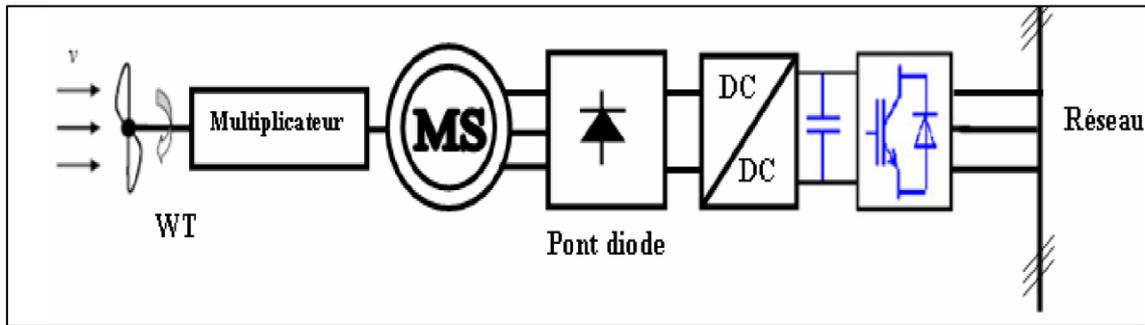


Figure.I.9: Machines synchrones relié au réseau par un ensemble de redresseurs

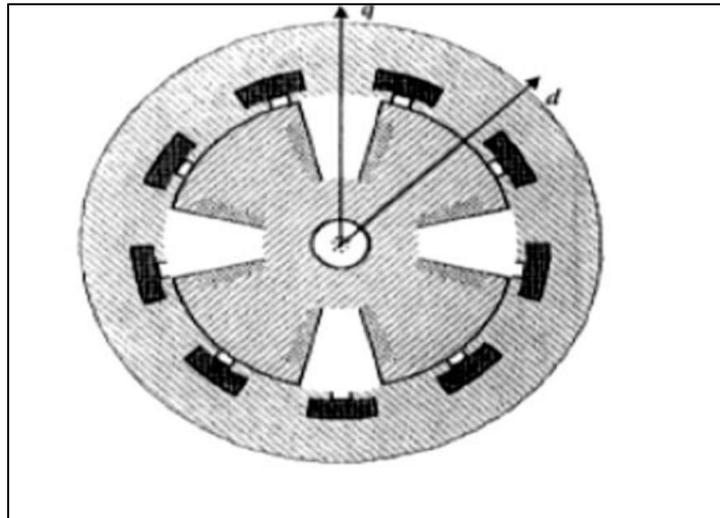


Figure I.10 : Machines synchrone à rotor bobiné à pole saillants [15]

I.5.2 Machines synchrones à aimants permanents :

Aujourd'hui, les machines synchrones représentent une partie importante du marché des convertisseurs électromécaniques d'énergie et couvrent une gamme de puissance très large qui s'étend de quelques MW jusqu'à 1GW environ. Traditionnellement, les fortes puissances restent le domaine réservé pour la production d'électricité. En fonctionnement moteur, en revanche, les puissances installées dépassent rarement quelques dizaines de MW. Le moteur synchrone fonctionnant en vitesse variable, le plus puissant connu à ce jour, à une puissance d'environ 100 MW, il est conçu pour une soufflerie de la NASA [16].

Une machine synchrone est une machine électrique dont les vitesses de rotation du rotor et du champ magnétique tournant du stator sont égales. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est génère soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position de ce champ est alors fixe par rapport au rotor, ce qui entraîne le synchronisme entre le champ magnétique tournant statorique et le rotor [17]. La vitesse de

rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques .

$$\omega_r = \frac{\omega}{p}$$

Le stator, partie fixe de la machine, où sont logés est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identique décalés entre eux de $\frac{2\pi}{3}$. Ces enroulements sont reliés à une source d'alimentation électrique triphasée. Le rotor, partie mobile de la machine, est composé d'aimants permanents. Les aimants permanents apportent beaucoup de simplicité comme l'élimination des balais (donc les pertes rotoriques). Cependant, le flux rotorique n'est plus commandable. Le rotor possède différentes configurations. La figure (I.11) montre trois cas typiques pour un rotor à tétrapolaire : concentration du flux (Fig. 1.11.a). Les aimants permanents sont magnétisés dans le sens radial.

- Les aimants permanents sont disposés radialement (aimants noyés dans le rotor).

Les aimants sont magnétisés tangentiellement (Fig.I.11.b).

- Les aimants permanents sont distribués uniformément sur la surface cylindrique du rotor. L'aimantation des aimants est radiale Fig.1.11.c)

I.5.3 Principe de fonctionnement de la MSAP [17]:

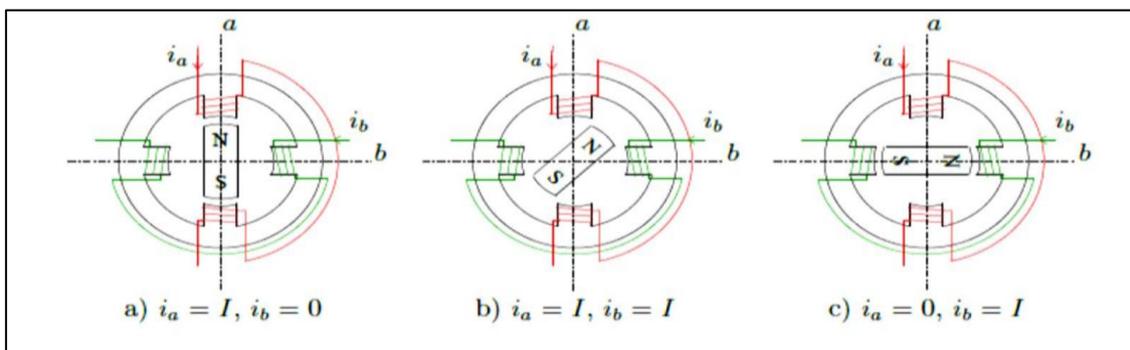


Figure I.11: Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents .

Le principe des moteurs à aimants permanents est assez simple. Seules les bobines sont alimentées. Le champ créé par les enroulements du stator interagit avec les aimants du rotor et oriente ce dernier. La Figure I.9 représente un moteur ayant un rotor bipolaire et un stator trapézoïdal. Les phases a et b sont portées par des enroulements opposés. La présence de courants dans les phases oriente le rotor. On définit un "pas" élémentaire θ_p comme étant le déplacement angulaire du rotor lorsque l'alimentation est commutée d'une phase à la

suivante. Nous obtenons pour cette structure $\theta_p = 90$. Ceci correspond au passage de la figure I.9.a à la figure I.9.c. Les demi-pas sont obtenus en alimentant deux phases à la fois (figure I.9. b). De nombreux moteurs sur le marché utilisent ce genre de structure.

I.5.4 Eolienne à base de la Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) :

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts compétitifs [19]. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables [20], [14]. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur [11] [14], [20], [21].

La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur réseau (figure. I.12). Dans ce cas, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que celui connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci. De plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le comportement du réseau [22]. Toutefois, les deux convertisseurs doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, ce qui constitue le principal inconvénient de cette configuration [07].

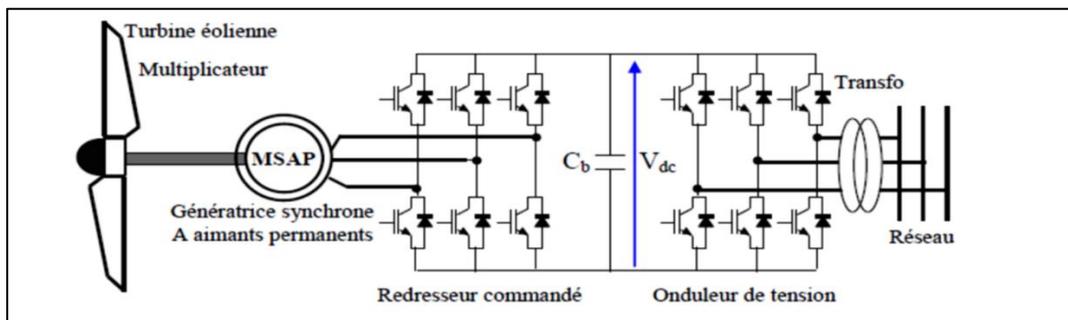


Figure I.12 : Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable [07]

I.5.5 Avantages des éoliennes à base des machines synchrones à aimants permanents par rapport aux autres types de machines [17] :

Un avantage évident de l'utilisation des aimants au niveau de la production du flux est la suppression des pertes par effet joule du système inducteur. Il est aisé de démontrer que dans le cas des machines classiques l'importance relative des pertes par effet joule par rapport à la puissance utile est d'autant plus élevée que la machine est de taille réduite. Un autre avantage de l'excitation par aimants, concerne l'amélioration de la sécurité de fonctionnement. Les moteurs synchrones à aimants sont intéressants du point de vue puissance, rendement, facteur de puissance et moment d'inertie pour les gammes accessibles à leurs utilisations (coût et fiabilité) [17].

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus fiable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple), ainsi la présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace [11][25].

I.6. La commande vectorielle :

La commande vectorielle, aussi appelée commande à flux orienté (field-oriented control en anglais), est une méthode de commande des variateurs de vitesse électrique dans laquelle les courants statoriques triphasés d'un moteur électrique à courants alternatifs sont transformés en deux composantes orthogonales qui peuvent être considérées comme étant des vecteurs. Le premier vecteur permet le réglage du flux magnétique du moteur, tandis que le second règle le couple. Ils sont alors découplés et le fonctionnement devient alors similaire à celui d'un moteur à courant continu.

Le calculateur calcule alors à partir de la consigne de vitesse du moteur, le flux et le couple nécessaires, desquels on déduit les courants requis. Typiquement, un régulateur PI sert à maintenir le courant à la valeur demandée. La modulation de largeur d'impulsion (MLI) gère ensuite la commutation des transistors du variateur de vitesse électrique en fonction de la

consigne de tension qui lui parvient. Un régulateur PI est placé après les consignes de courant afin de stabiliser l'ensemble.

La commande vectorielle est utilisée pour les machines synchrones et asynchrones, ainsi que pour les onduleurs en général, par exemple dans le cas des installations haute tension à courant continu. Elle a été conçue au départ pour des applications demandant de bonnes performances de la part du moteur : fonctionnement régulier sur toute la plage de vitesse, couple maximal à vitesse nulle, bonnes performances dynamiques combinés à des accélérations et décélérations rapide. La technique s'est toutefois démocratisée car elle permet également de réduire la taille du moteur, et donc son coût, ainsi que sa consommation électrique.

K. Hasse, de l'université de Darmstadt, et F. Blaschke, de l'université technique de Brunswick, sont les pères de la commande vectorielle des moteurs à courant alternatif. Le premier propose la commande vectorielle indirecte en 1968, le second en proposant la commande vectorielle directe en 1971 [1,2,3]. Werner Leonhard, de l'université technique de Brunswick pose les bases de la commande à flux orienté et contribue à rendre les moteurs à courant alternatifs compétitifs face aux moteurs à courant continu [4,5].

Ce n'est cependant qu'avec la commercialisation des microprocesseurs dans le début des années 1980, que la commande des moteurs à courant alternatif se démocratise^{6,7}. Au départ, la commande à flux orienté est plus coûteuse, plus complexe et moins facile à maintenir que la commande des moteurs à courant continu. En effet, les premières demandaient encore de nombreux capteurs, amplificateurs et autres composants électroniques pour leur fonctionnement⁸.

La transformée de Park est utilisée largement pour analyser et modéliser les machines synchrones et asynchrones. Elle est la clé de voute de la commande à flux orienté.

La publication de Robert H. Park de 1929 a d'ailleurs été classée en 2000 comme étant la deuxième en termes d'influence au xx^e siècle dans le domaine de l'électronique de puissance,

Son apport principal a été de permettre le remplacement des équations différentielles non linéaires par des équations différentielles linéaires avec des coefficients constants dans le temps.

I.6.1 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle :

La commande vectorielle a les avantages suivants [29]:

- Elle est basée sur le modèle transitoire.

- Elle est précise et rapide.
- Il y a un contrôle du couple à l'arrêt.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase

Elle a également certains inconvénients:

- Coûteuse (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse, DSP). Le processeur doit être capable de calculer l'algorithme environ toutes les millisecondes.
- Faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante de temps rotorique.
- Nécessité d'un modulateur pour la commande rapprochée de l'onduleur qui provoque des retards, surtout à basse fréquence de modulation (grande puissance). Ces retards sont responsables d'une augmentation du temps de réponse en couple, ce qui pénalise les variateurs utilisés en traction.
- Présence de transformations de coordonnées dépendant d'un angle θ_s estimé.
- La vitesse de rotation intervient explicitement dans l'algorithme de commande. Quand on ne mesure pas cette vitesse (variateur sans capteur de vitesse), les erreurs sur l'estimée de cette vitesse dégradent les performances du variateur.
- De mauvais paramètres entraînent une erreur sur le couple. Par rapport à la commande directe du couple, l'algorithme de la commande vectorielle doit être calculé moins fréquemment. Le capteur de courant ne doit pas être aussi bon dans le cas de la commande vectorielle que pour une commande directe du couple. La première est donc globalement moins coûteuse que la seconde.

I.6.2 Son principe :

Par construction, la machine à courant continu produit un champ magnétique statorique toujours perpendiculaire au rotor, La commande vectorielle cherche à reproduire cette configuration dans le cas des machines alternatives, qui sont globalement plus compactes et plus simples à construire [11],[12].

Les machines à courant continu à excitation séparée, la vitesse de rotation du moteur Ω et le couple C sont découplés [12]. La première ne dépend que de la force contre-électromotrice E , elle-même égale à une constante multipliée par le courant d'excitation, tandis que le second ne dépend que du courant I_i :

$$E = K \cdot \Omega = k \cdot I_i \cdot \Omega \quad (\text{I.1})$$

$$C = K \cdot I_i \quad (\text{I.2})$$

I.6.3 Hypothèse d'application :

Pour que la transformée de Park simplifie les équations et permettent l'utilisation de la commande à flux orienté, il faut que les hypothèses suivantes soient satisfaites :

- le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé, autrement dit le flux varie de manière linéaire avec le courant ;
- les pertes par courants de Foucault sont négligées ;
- Les courants, tensions et flux sont sinusoïdales 15;
- Les réactances de fuites sont indépendantes de la position du rotor. Elles sont homogènes ;
- la machine doit être alimentée, comme on le fait dans la pratique, par un système de tensions triphasées sans neutre. Dans ce cas, la somme des 3 courants est forcément nulle et la composante homopolaire est nulle.

I.6.4 Equation de base :

La commande à flux orienté est intimement liée à la transformée de Park : c'en est une application concrète pour une machine triphasée, au stator on peut écrire :

$$[V_{abc}] = [R][i_{abc}] + \frac{d[\Phi_{abc}]}{dt} \quad (I.3)$$

Où V est la tension, R la résistance, i le courant et Φ le flux

En effectuant une transformation de Park, on obtient un système de trois équations :

$$V_0 = R \cdot i_0 + \frac{d\Phi_0}{dt} = 0 \quad (I.4)$$

$$V_d = R \cdot i_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \cdot \Phi_d \quad (I.5)$$

$$V_q = R \cdot i_q + \frac{d\Phi_q}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \cdot \Phi_q \quad (I.6)$$

θ est l'angle de park.

En multipliant par les courants, on obtient les puissances, dont la puissance active P_e

$$P_e = \frac{d\theta}{dt} \Phi_d \cdot i_q - \frac{d\theta}{dt} \Phi_q \cdot i_d \quad (I.7)$$

Or mécaniquement, on sait que :

$$P_e = C_e \cdot \Omega = C_e \cdot \frac{1}{p} \frac{d\theta}{dt} \quad (I.8)$$

Où C_e est le couple, Ω c'est la vitesse de rotation du moteur, p le nombre de paires de poles du moteur, en simplifiant on trouve :

$$C_e = p(\Phi_d \cdot i_q - \Phi_q \cdot i_d) \quad (I.9)$$

Finalement on constate que l'utilisation de la transformation de Park peut lier le repère au rotor.

I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, une brève description de chaînes de conversion de l'énergie éolienne est donnée. Quelques notions sur la conversion mécanique de l'énergie éolienne ont été introduites. Un aperçu succinct des deux grandes familles d'éoliennes, leurs avantages et inconvénients, a été donné. Dans la seconde partie, les différents constituants d'une éolienne sont présentés. Les systèmes éoliens basés sur la machine synchrone à aimant permanent et les différentes topologies qui existent ont été abordés. Après l'étude des avantages des éoliennes à base de machines synchrones à aimants permanents par rapport aux autres types de machines. Ainsi qu'une brève explication sur la commande vectorielle, l'idée de consacrer la suite des recherches sur un système utilisant une machine synchrone à aimant permanent MSAP a été retenue. Au chapitre suivant, nous allons nous intéresser à la présentation et la modélisation mathématique des différentes parties constituant une chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une GSAP fonctionnant à vitesse variable.

Chapitre II :

Modélisation des différents éléments

de la turbine éolienne.

II.1. Introduction :

Le besoin de contrôle des turbines éoliennes remonte à leurs origines d'utilisation. Le but principal était la limitation de la puissance et de la vitesse de rotation pour protéger les turbines des vents forts. A nos jours, les turbines éoliennes sont devenues de taille et de puissances plus grandes, les spécifications de contrôle plus exigeantes et les mécanismes de régulation plus sophistiqués. De plus, on s'est attendu à ce que les systèmes de commande ne gardent pas simplement la turbine dans sa zone de fonctionnement sûre, mais également améliorent l'efficacité et la qualité de conversion d'énergie ce qui demande une modélisation plus précise et plus exigeante et des techniques de commande différentes pour chaque gamme de vitesse de vent, faible, moyenne ou forte . Dans ce chapitre, nous commençons par la modélisation de la source primaire, le vent ,en essayant d'être le plus proche de la réalité, puis les différentes parties mécaniques de l'éolienne seront aussi modélisées sous certaines hypothèses simplificatrices. Ensuite, deux stratégies de commande différentes seront abordées pour chaque zone de fonctionnement de l'éolienne. Une comparaison des performances de ces deux stratégies nous permettra de choisir la quelle sera utilisée dans le reste de ce document.

II.2.La turbine éolienne :

La voilure éolienne est un élément tridimensionnel, ayant des formes complexes, en mouvement et plongée dans un flux d'air. Un modèle prenant en compte toutes ces propriétés n'est à l'heure actuelle pas envisageable. Toutefois, et c'est un point important, le modèle en question doit décrire la dynamique mécanique réelle de la voilure, et non pas uniquement le comportement quasi-statique.

Une voilure éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une Puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique [26] [27].

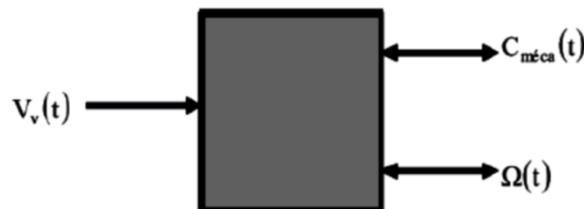


Figure II .1 : Entrées et sorties du modèle de la voilure [27]

II.2.1 Modélisation de la turbine :

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse du vent et des conditions de fonctionnement, cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne. Cette modélisation s'appuie sur des recoupements bibliographiques ou des informations extraites de brochures des différents constructeurs.

II.3. Modélisation de la vitesse de vent :

Source primaire : le vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs, son énergie cinétique constitue la source primaire d'énergie. Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacement de masses d'air caractérisé par sa vitesse et sa direction qui sont affectées par plusieurs facteurs, en particulier le phénomène de cisaillement et l'effet d'obstacle de la tour. Ces phénomènes modélisables correspondent à la partie déterministe de la variation spatiale du champ de vitesses. Les turbulences provoquées par les obstacles en amont (bâtiments, arbres, autre éoliennes, ...) correspondent à la partie stochastique de la variation spatiale du champ de vitesses. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés.

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

- Définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne ;
- Définir les solutions qui s'appliquent sur les pales ;
- Développer et affiner la modélisation du rotor ;
- Evaluer le potentiel d'énergie utilisable ;
- Fournir une aide pour l'implantation des machines

La définition du modèle du profil du vent nécessite la connaissance des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concerné par l'étude. Le modèle du profil du vent est donné par une série de Fourier qui représente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques.

II.3.1 Modèle de la vitesse De vent :

La vitesse du vent V est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps :

$$V = f(t) \quad (\text{II.1})$$

$$V = V_0 + \sum_{i=1}^n A_t \sin(\omega_i + \varphi_i) \quad (\text{II.2})$$

Tel que :

V_0 : est la composante moyenne

A_t, ω_i, φ_i , sont respectivement l'amplitude, la pulsation et la phase initiale de chaque composante spectrale fluctuante.

$$V = 12 + \sin\left(2.5t - \frac{\pi}{5}\right) + 2 \sin\left(4t - \frac{\pi}{3}\right) + 1.5 \sin\left(5.4t + \frac{\pi}{12}\right) + 0.5 \sin\left(2.5t - \frac{\pi}{12}\right) \quad (\text{II.3})$$

II.3.2. Expression du vent en un point fixe :

La vitesse du vent en un point $v_0(t)$ peut être décomposée en une somme d'une composante moyenne V (lentement variable) et d'une composante variable représentant les fluctuations $v_t(t)$: du vent.

$$v_0(t) = V + v_t \quad (\text{II.4})$$

V : Vitesse moyenne du vent.

$v_t(t)$: Composante représentant la turbulence du vent.

1ère étape : reconstitution du spectre de la turbulence à partir d'un bruit blanc filtré :

La composante représentant la turbulence $v_t(t)$ est caractérisée par l'échelle de longueur L_v et l'écart type σ_v de cette turbulence. La définition de la composante turbulente se fait en 2 Deux filtres largement utilisés sont le filtre de Von Karman et celui de Kaimal .le filtre de Von Karman peut être approché sous la forme suivante :

$$\phi_v(s) = \frac{K_v \cdot (m_1 \cdot T_v \cdot s + 1)}{(1 + T_v \cdot s)(1 + m_2 \cdot T_v \cdot s)} \quad (\text{II.5})$$

Avec : $m_1 = 0.4$ et $m_2 = 0.25$

$$K_v = \sqrt{2 \cdot T_v \cdot (1 - m_2^2) \cdot \left(\frac{m_1^2}{m_2} - m_2 + 1 - m_1^2\right)^{-1}} \quad (\text{II.6})$$

$$T_v = \frac{L_v}{V} \quad (\text{II.7})$$

K_v : Gain statique du filtre.

T_v : Constante de temps du filtre.

L_v : L'échelle de longueur de la turbulence obtenue expérimentalement et il dépend de la nature du terrain.

2ème étape : définition de l'écart type de la turbulence

L'écart type dépend de la vitesse moyenne v et d'un coefficient K_g , qui dépend de la nature du terrain, et qui représente l'intensité de la turbulence.

$$\sigma_v = K_g \cdot V \quad (\text{II.8})$$

K_g : Le coefficient l'intensité de la turbulence .

Nichita [20] donne des ordres de grandeurs de l'intensité K_g et de l'échelle de longueur L_v de la turbulence pour divers sites. Ainsi à partir d'un bruit blanc gaussien en entrée, il est possible de déterminer la composante de la turbulence et donc de générer une série temporelle de la vitesse du vent en un point $v_0(t)$

II.3.3. Le filtre spatiale :

La vitesse du vent en un point de l'aire balayée par l'aéroturbine doit permettre de retrouver le couple éolien proche de celui que produirait le champ de vitesse du vent réel incident sur toute l'aire balayée par le rotor. Il a été démontré expérimentalement que seules les composantes basses fréquences du vent incident se retrouvaient dans le couple total produit par les pales. Par contre, l'aéroturbine filtre les fluctuations hautes fréquences. On reconstitue cet effet en appliquant sur la vitesse instantanée du vent un filtre dont la fonction de transfert simplifiée est donnée par :

$$G(s) = \frac{1}{1+b.s} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$b = \gamma \frac{RT}{V} \quad (\text{II.10})$$

RT : Rayon des pales de l'éolienne

γ : facteur d'affaiblissement sur le rotor ($\gamma = 1.3$)

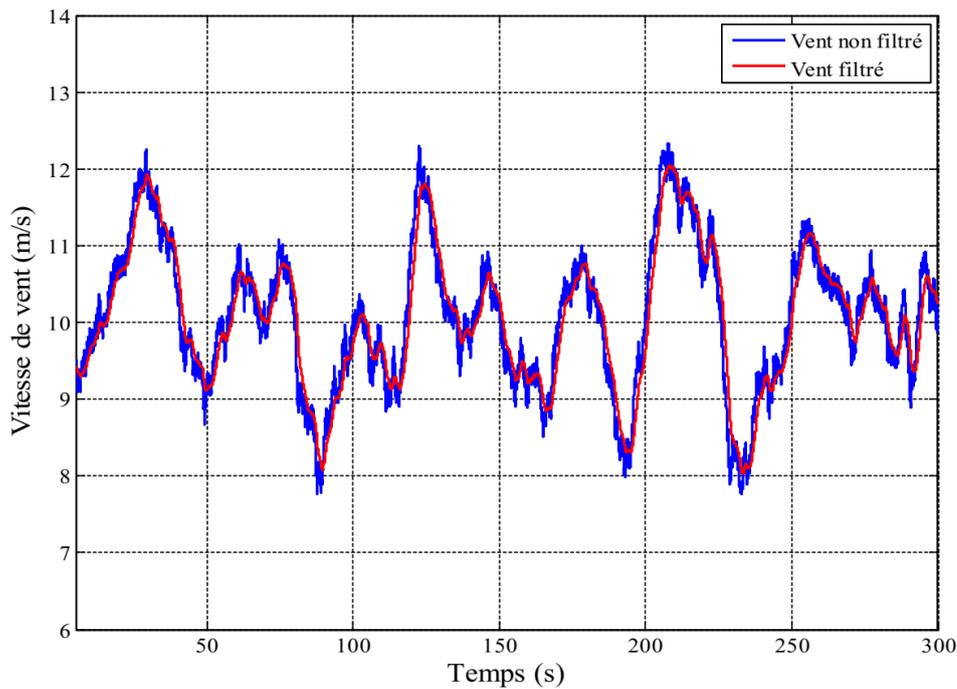


Figure II.2 : Profile de vent avant et après le filtrage

Dans le but de reproduire les caractéristiques de la vitesse du vent, il existe deux méthodes qui sont les mesures expérimentales à partir d'un site bien déterminé et la modélisation analytique à partir d'un modèle mathématique. Dans notre cas on utilisera la deuxième méthode pour sa flexibilité à envisager plusieurs scénarios. Parmi les méthodes les plus utilisées pour modéliser le vent, celle qui utilise la caractéristique spectrale de Van Der Hoven est la plus répandue.

II.4. Conversion de l'énergie éolienne :

II.4.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx , de section S , de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v , figure II.3 s'écrit [11] .

$$DE_c = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot dx \cdot V^2 \quad (\text{II.11})$$

La puissance P_m extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps [11].

En supposant $dx = vdt$ on déduit l'expression de P_m :

$$P_m = \frac{DE_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot V^3 \quad (\text{II.12})$$

Où :

ρ : est la masse volumique de l'air

V : est la vitesse du vent (m/s) .

S : est la surface traversée par le vent.

E_C : en joule.

Avec :

$$S = \pi \cdot R_T^2 \quad (\text{II.13})$$

Et :

RT: Rayon de la turbine (longueur de pale)

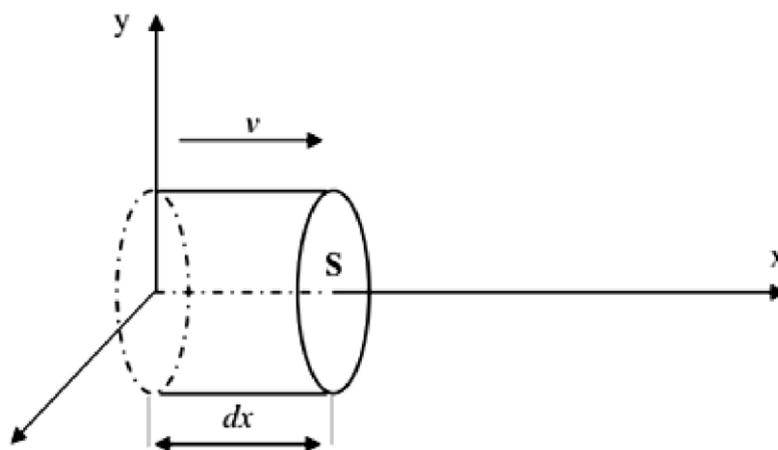


Figure II.3: colonne d'air animé d'une vitesse V

II.4.2 Loi de Betz :

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de $16/27$ (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de Betz pour la première fois [11], [28]. Considérons le système de la figure II.4 qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal. V_1 représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

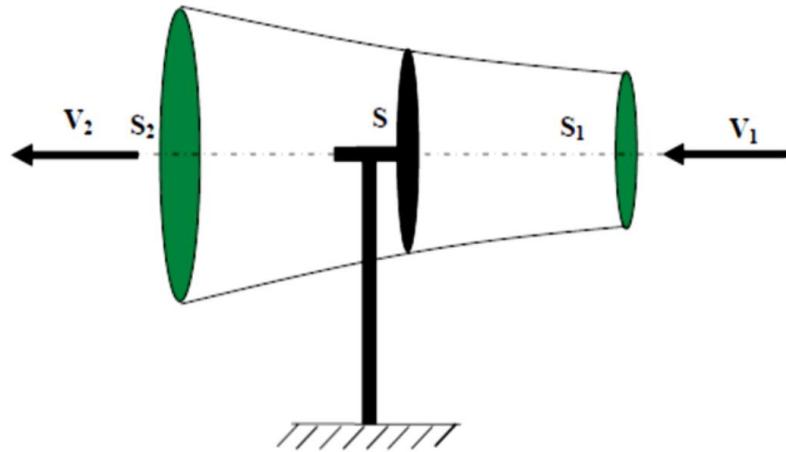


Figure II.4: schéma de principe de la théorie de Betz

La théorie de Betz permet d'expliquer simplement le processus d'extraction de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Cette théorie est rappelée dans l'annexe, elle aboutit à l'expression de la puissance de l'éolienne P_T :

II.4.2. La puissance de l'éolienne P_T :

$$P_T = C_p \cdot P_{amont} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^2 \cdot V^3 \cdot C_p \quad (\text{II.14})$$

C_p : Le rendement aérodynamique de la turbine, appelé souvent coefficient de puissance.

R_T : Le rayon des pales de la turbine.

Ce coefficient, dont la limite théorique égale à $16/27 = 0.593$ (limite de Betz), dépend de deux paramètres :

- La vitesse spécifique λ

Et

- L'angle de calage β

II.4.3. La vitesse spécifique de vitesse (Tip-Speed-Ratio) λ :

On définit la vitesse spécifique ou normalisée λ comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine sur la vitesse instantanée de vent V (figure II-3) et donné par l'expression suivante [11], [28].

Avec :

$$\lambda = \frac{R_T \cdot \Omega_T}{V} \quad (\text{II.15})$$

Ω_T : vitesse de la turbine avant le multiplicateur [rad /sec]

R_T : rayon de pale.

V : vitesse de vent en m.

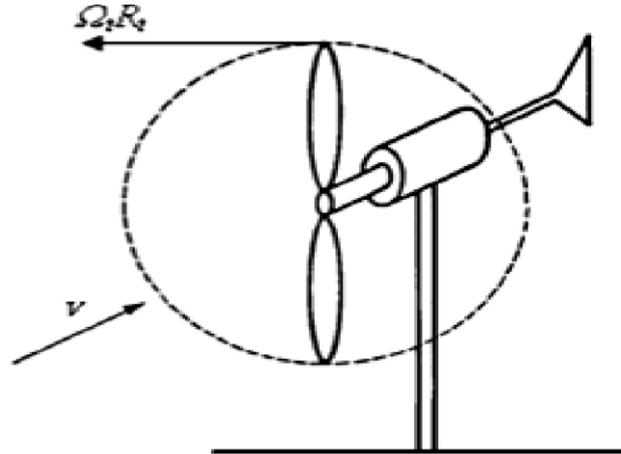


Figure.II.5 : Vitesse de vent V et vitesse tangentielle de l'aubage ($\Omega_T R_t$)

II.4.4. Le couple éolien :

On en déduit aisément l'expression du couple éolien à partir de l'équation précédente :

$$T_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2}{\lambda} \cdot c_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II.16})$$

II.4.5. Le coefficient du couple :

Le coefficient de couple C_q est assez proche du C_p . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle [11][30], d'où on définit le coefficient du couple par l'expression suivante :

$$c_q = \frac{c_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (\text{II.17})$$

II.4.6. Le coefficient de puissance $c_p(\lambda, \beta)$

Le coefficient de puissance $c_p(\lambda, \beta)$ représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. La modélisation du couple éolien va donc dépendre essentiellement de la prise en compte de la spécificité du coefficient $c_p(\lambda, \beta)$, puisqu'il dépend grandement du type et de la caractéristique de la turbine. Il est souvent représenté en fonction de la vitesse λ . la valeur maximale théorique possible du c_p , appelé limite de BETZ est de 0.593 [13], L'expression de coefficient de puissance que nous allons utiliser dans notre étude est donnée par :

$$c_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda^i} - C_3\beta - C_4 \right) e^{\frac{C-5}{\lambda^i}} + C_6\lambda \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda^i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \quad (\text{II.19})$$

Les coefficients C_1 à C_6 dépendent de la turbine considérée. L'exemple donné ci-dessous correspond à une turbine de puissance nominale de 300kW.

les valeurs sont données dans le Tableau suivant :

Tableau [1] : Coefficient définissant l'évolution de C_p

Coefficients	Valeurs
C1	0.5109
C2	116
C3	0.4
C4	5
C5	21
C6	0.0068

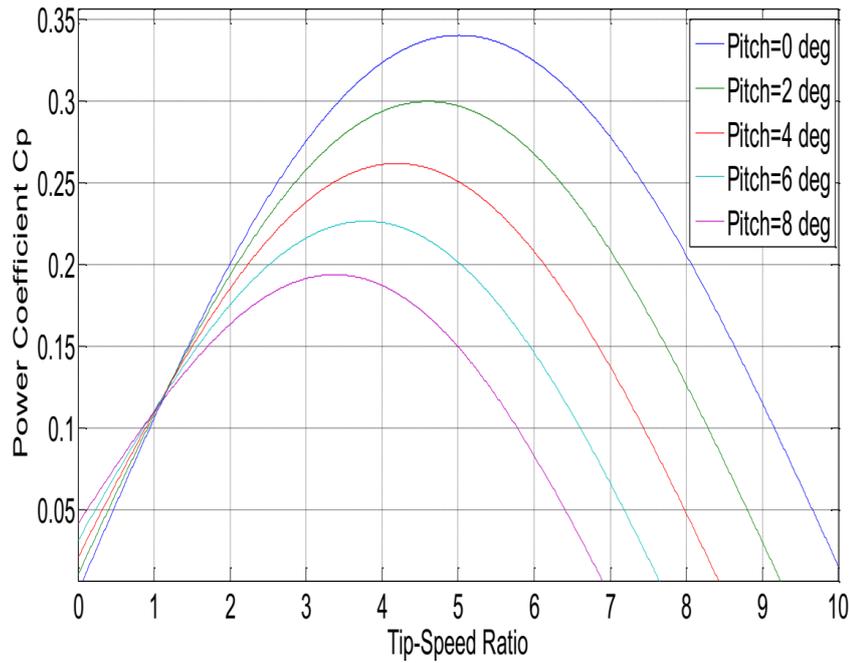


Figure II.6 Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β .

II.4.6. La puissance aérodynamique : P_T

La puissance aérodynamique d'une éolienne P_T peut être aussi exprimée comme suit:

$$P_T = \Omega_T T_T . \quad (\text{II.20})$$

$C_q(\lambda, \beta)$: est le coefficient du couple, son expression est donnée par :

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\Omega_T} \quad (\text{II.21})$$

Le couple éolien est donc donné par :

$$T_T = \frac{P_T}{\Omega_T} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_T} \quad (\text{II.22})$$

II.5. Equation dynamique de la turbine :

Le système mécanique complet comprend donc les éléments suivants :

- Un moyeu sur lequel sont reliées les pales.
- L'axe lent.
- Le multiplicateur de vitesse.
- L'axe rapide (rotor de la génératrice) .

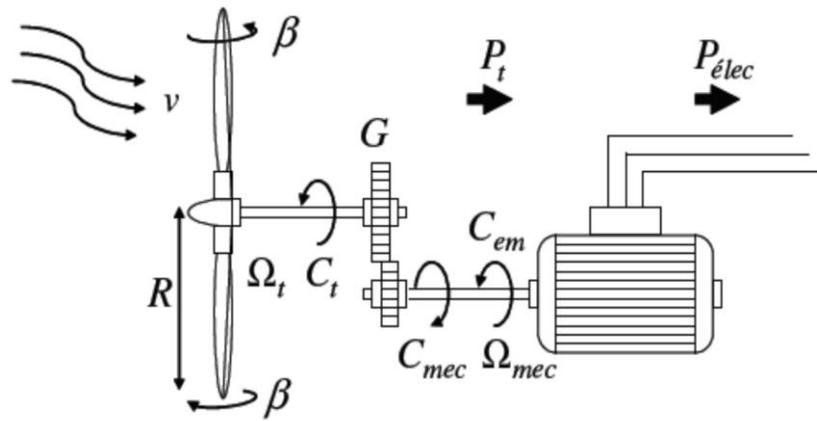


Figure II.7 : Configuration d'une éolienne

Un tel système peut être représenté comme sur la figure ci-dessous

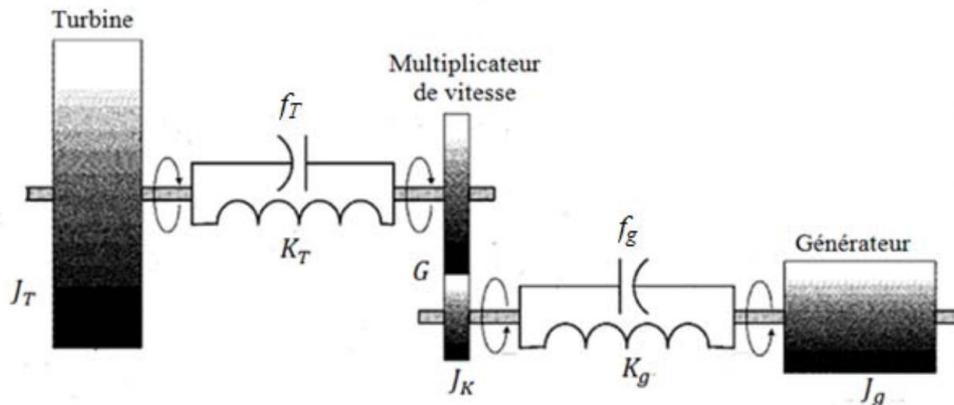


Figure II.8 : Modèle de la turbine.

Ce modèle est très complexe et sa modélisation exige la connaissance de plusieurs paramètres difficile à obtenir. Néanmoins nous pouvons poser des hypothèses que nous les trouvons réalistes et qui sont acceptées dans divers ouvrages [2,10,18]. En effet, Le moment d'inertie de l'ensemble moyeu-pales représente à lui seul, en prenant comme exemple les éoliennes à base de machines synchrones, 90% du moment d'inertie global, alors que celui de la génératrice est de l'ordre de 6 à 8%. Le reste (2 à 4%) correspond au moment d'inertie du multiplicateur de vitesse, ce qui nous permet de poser les hypothèses simplificatrices suivantes [3].

II.5.1.Hypothèses simplificatrices :

- La turbine comprend trois pales de longueur R_T chaque une, supposées identiques, attachées au moyeu. L'ensemble peut être considéré comme une seule masse d'une inertie J_T .

- L'inertie du multiplicateur de vitesse est négligeable devant celle de la turbine et celle du générateur, ce qui nous permet de le considérer comme un gain de vitesse égale à G ou un gain de couple égale à $\frac{1}{G}$.

- Les arbres de transmission sont parfaitement rigides.

Ces hypothèses nous permettent de considérer le modèle simplifié à deux masses suivant.

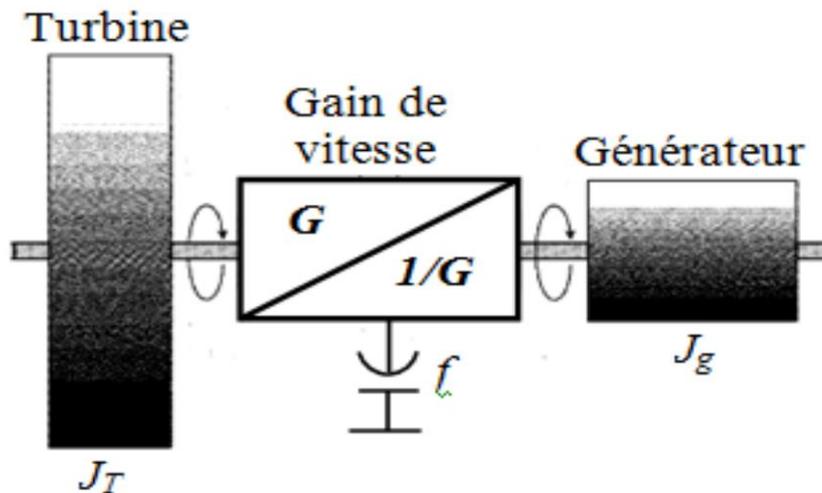


Figure II.9: modèle simplifié de la turbine.

Ainsi, l'équation mécanique de ce modèle, ramenée sur l'arbre du générateur, se simplifie sous la forme suivante :

$$T_T - T_g = \left(\frac{J_T}{G^2} + J_g\right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_T}{G^2} + f_g\right) \cdot \Omega_g \quad (\text{II.23})$$

T_T, T_g : Le couple éolien et le couple électromagnétique.

J_T, J_g : L'inertie de la turbine et celle du générateur.

f_T, f_g : Le coefficient des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur.

G : Le rapport du multiplicateur de vitesse.

Ω_g : La vitesse de rotation du générateur (axe rapide) .

On pose :

$$\frac{J_T}{G^2} + J_g = J \quad (\text{II.24})$$

$$\frac{f_T}{G^2} + f_g = f \quad (\text{II.25})$$

D'où, l'équation mécanique devienne :

$$\frac{T_T}{G} - T_g = J \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + f \cdot \Omega_g \tag{II.26}$$

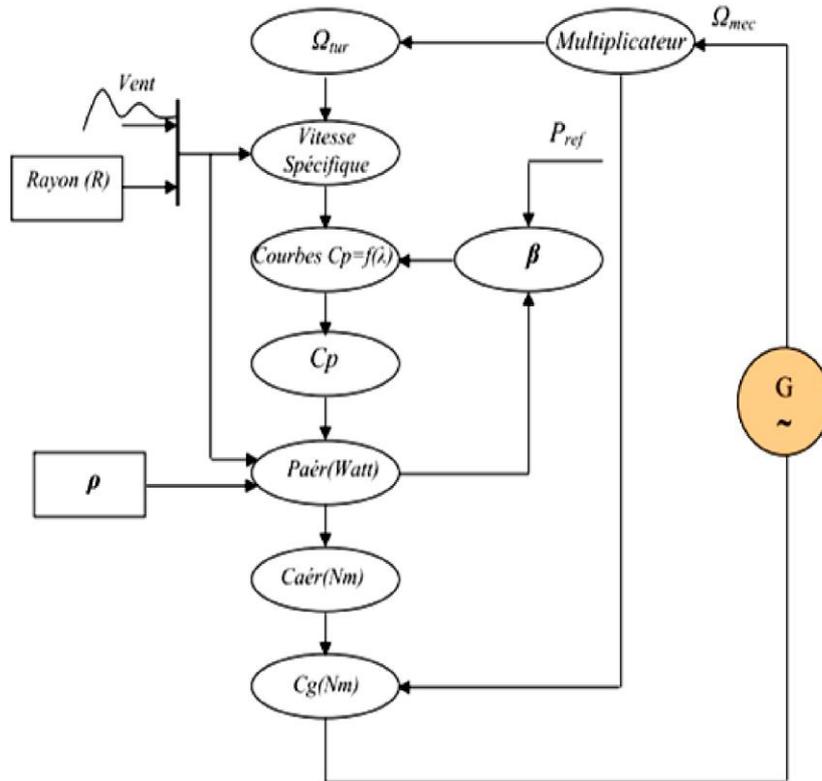


Figure II.10: Organigramme de simulation de la turbine éolienne [11] [35].

Ainsi, nous pouvons établir le modèle de la turbine dont le schéma bloque est donné sur la figure ci-dessous :

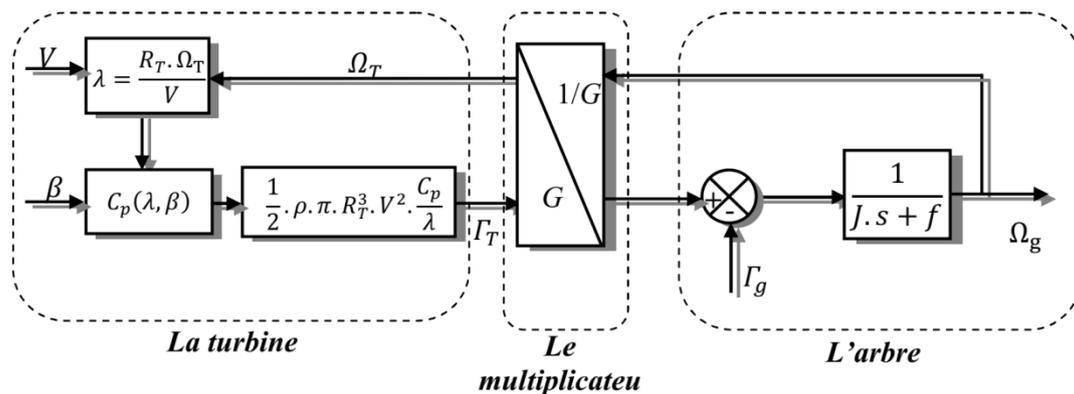


Figure II.11 : schéma bloc du modèle de la turbine.

II.6.Modèle du multiplicateur de vitesse :

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour but d'adapter la vitesse de la turbine Ω_t , assez lente, à celle que nécessite la génératrice Ω . Il est modélisé par les deux équations suivantes :

$$G = \frac{C_{aer}}{C_g} \tag{II.27}$$

$$G = \frac{\Omega_{aer}}{\Omega_{tur}} \tag{II.28}$$

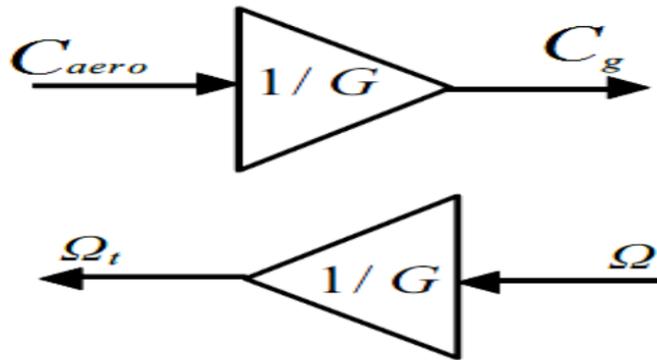


Figure II.12 : Schéma bloc du modèle du multiplicateur de vitesse [6].

II.7.Equation dynamique de l'arbre de transmission :

L'équation fondamentale du moment du couple dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor [11]:

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{II.29}$$

Où :

- J : est l'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.

Le couple mécanique est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \tag{II.30}$$

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

- C_g : Le couple issu du multiplicateur

- C_f : Le couple résistant dû aux frottements.

$$C_f = f \cdot \Omega_{mec} \tag{II.31}$$

Où :

C_f : le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} [11] .

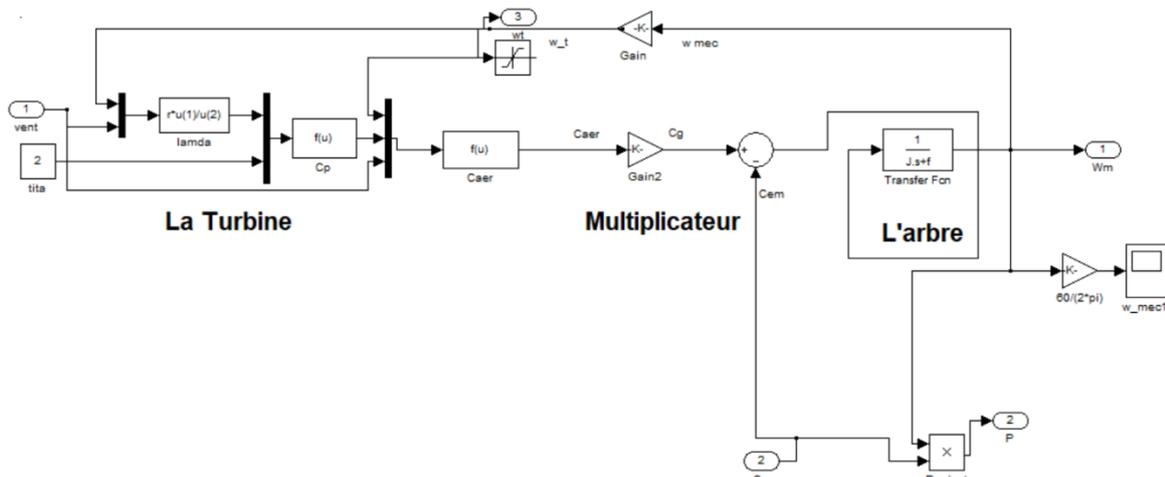


Figure II.13 : Schéma bloc de la turbine le multiplicateur et l'arbre

II.7.Stratégies de commande de la turbine éolienne :

Les stratégies de commande des systèmes de génération éoliens de moyenne et grande puissance à vitesses variables et à régulation de puissance « pitch », utilisées notamment pour les aérogénérateurs VESTAS et GAMESA de dernière génération, sont basées sur les deux courbes illustrées par la figure II.11, déduites des données aérodynamiques de la turbine [4],[36], [37].

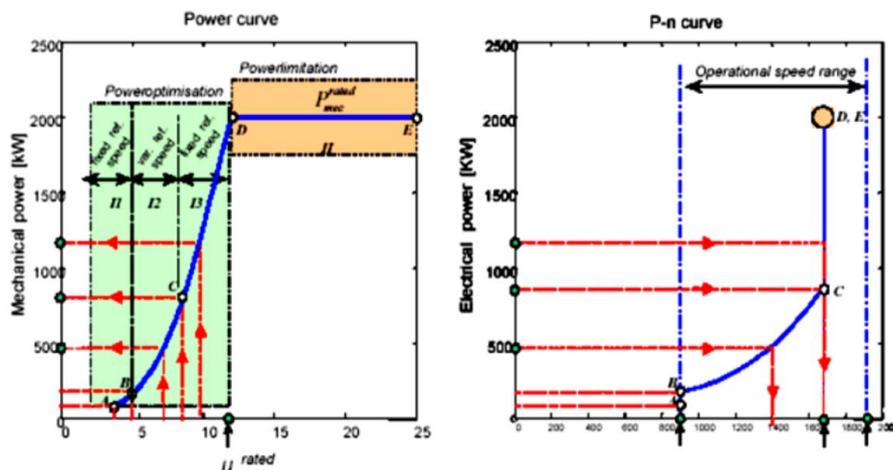


Figure. II.14 : Caractéristiques puissance, vitesse du vent et vitesse de rotation [37] [11]

(a) puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent (b) puissance électrique en fonction de la vitesse de rotation.

La figure suivante représente la vitesse de rotation de la turbine éolienne en fonction de la variation de la vitesse de vent [4], [29] [11] .

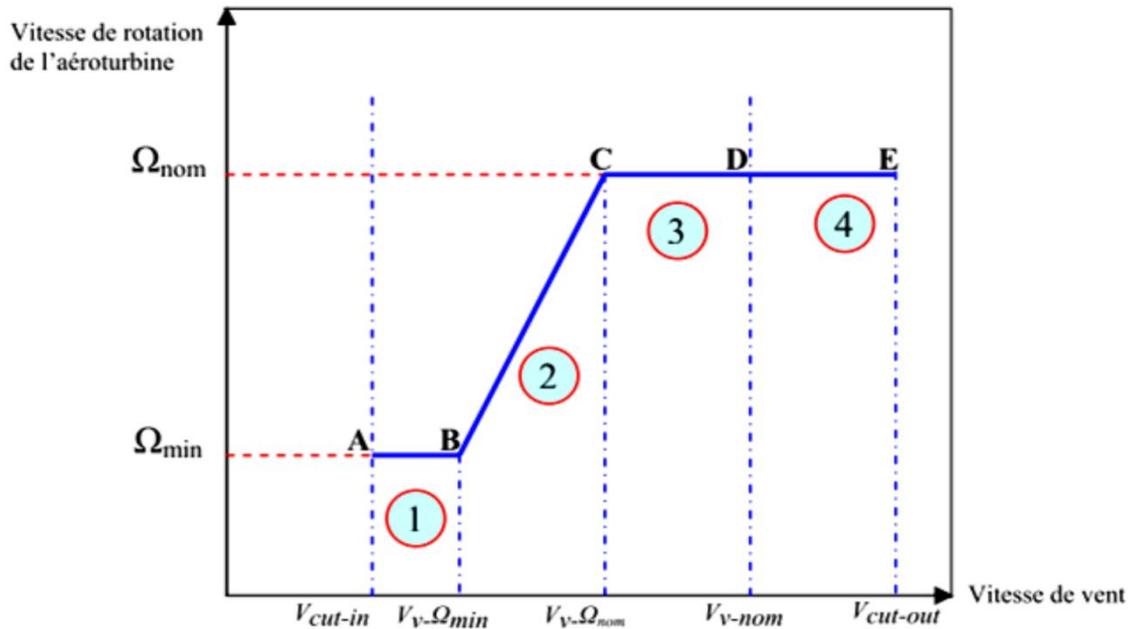


Figure II.15 : Caractéristiques vitesse de rotation, vitesse de vent [11].

Deux stratégies de commande de la turbine à vitesses variables sont indiquées sur la Figure précédente:

1. Stratégie d'optimisation de la puissance séquences « A-B-C-D » : l'énergie capturée est optimisée au-dessous de la vitesse nominale du vent.

2. Stratégie de limitation de la puissance « D-E »: son but est de limiter la puissance nominale de la turbine au-dessus de la vitesse nominale du vent.

Quatre zones de fonctionnement de la turbine peuvent être distinguées sur les figures (II.13) et (II.14)

- Zone 1 « A-B »: l'éolienne fonctionnant à la vitesse du vent de connexion V_{cut-in} a une vitesse de rotation minimale Ω_{t-min} .

- Zone 2 « B-C » : lorsque la vitesse de la génératrice est comprise entre les vitesses Ω_{min} et Ω_{nom} , un algorithme de commande est appliqué pour extraire la puissance maximale du vent. Dans ce cas, le coefficient de la puissance maximum correspond à un angle de calage optimal.

- Zone 3 « C-D » : correspond au cas où la vitesse de rotation nominale est atteinte, tandis que la puissance générée est encore inférieure à la puissance nominale.

- Zone 4 « D-E » : la puissance nominale étant atteinte, le système d'orientation des pales « pitch control » limite la puissance générée.
- Au-delà de la vitesse $\Omega_{cut-out}$, le dispositif de protection est actionné afin d'éviter des ruptures mécaniques.

II.8.Système de contrôle de l'aéroturbine :

Le contrôle de l'aéroturbine est assuré par deux boucles de régulation, fortement liées [11],[33], [37] :

- Boucle de régulation de la vitesse.
- Boucle de régulation de la puissance.

La boucle de régulation de la vitesse est le principal élément dans la stratégie d'optimisation de la puissance, où la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique.

Les deux boucles de régulation interviennent dans la stratégie de limitation de la puissance. Quand la vitesse de vent est inférieure à la vitesse nominale, l'angle de calage est maintenu constant à une valeur optimale β_{opt} . La vitesse de rotation de la turbine est alors ajustée par la boucle de régulation de la vitesse pour extraire le maximum de la puissance du vent. Lors de rafales de vent, la vitesse de rotation peut augmenter et dépasser la vitesse nominale, à cause de la lenteur du système d'orientation des pales [33] [11]. Dans ce cas, la boucle de vitesse réagit en augmentant la puissance de référence de la génératrice en anticipant l'action du dispositif d'orientation des pales par le réglage du couple électromagnétique, afin de contrôler la vitesse de rotation dans la zone 3 [33], [37], [11].

II.9.Méthodes de recherche du point maximum de puissance MPPT :

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est une courbe non linéaire en forme de «cloche» [11], [26]. Pour chaque vitesse du vent, le système doit atteindre sa puissance maximale qui correspond à sa vitesse de rotation optimale. La figure II .14 illustre la puissance en fonction de la vitesse de rotation de la turbine de l'éolienne. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent V_v donnée. L'ensemble des sommets (points optimaux recherchés) de ces caractéristiques définit la courbe de puissance optimale. L'équation de cette courbe est :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II.32})$$

Pour la zone 2, le fonctionnement idéal du système éolien nécessite l'utilisation de la commande Maximum Power Point Tracking (MPPT). Afin de maximiser la puissance électrique générée, la stratégie utilisée consiste à contrôler le couple électromagnétique pour régler la vitesse. On distingue deux approches possibles :

1. La première, la moins classique [26], considère que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ n'est pas connue.

2. La deuxième, la plus répandue, suppose que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ soit connue, pour que l'éolienne fonctionne dans des conditions optimales, il est nécessaire de suivre la courbe optimale de puissance.

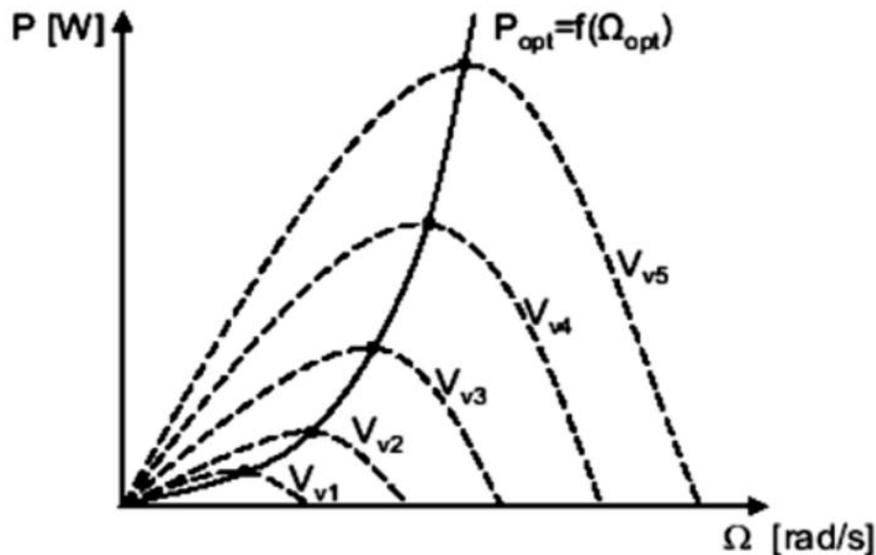


Figure II.16 : Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation [11].

II.9.1 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse :

Afin d'extraire un maximum de puissance, malgré les variations fréquentes de vitesse du vent, une commande par l'asservissement de la vitesse de rotation permet de maintenir le rapport entre la puissance extraite et celle du vent à sa valeur maximale. En d'autres termes, il faut maintenir le coefficient de puissance C_p à sa valeur maximale. Cette commande nécessite l'utilisation d'un régulateur de vitesse [33] [34].

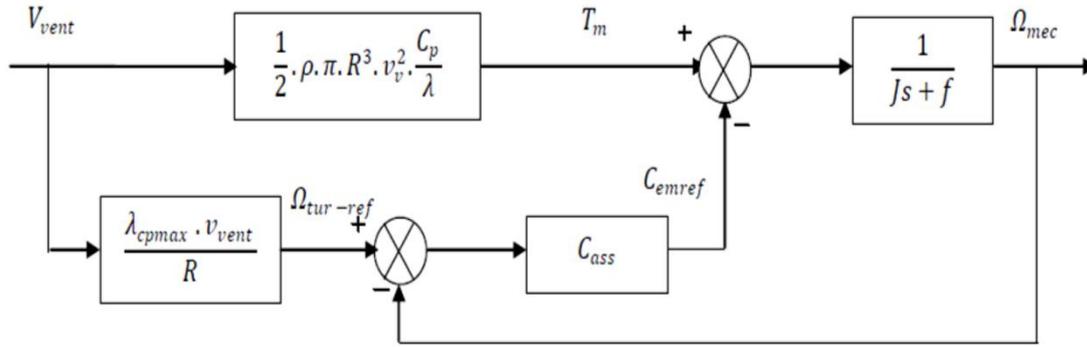


Figure II.17 : Schéma bloc de la turbine avec maximisation de la puissance extraite à l'aide d'un asservissement de la vitesse [34].

Le vent, source principale d'énergie de fonctionnement du système, fournit le couple aérodynamique T_m . Si de ce dernier est soustrait le couple électromagnétique créé dans la génératrice, le couple mécanique obtenu permet de calculer la vitesse de rotation. Pour générer le couple électromagnétique de référence, par l'utilisation d'un contrôleur, il est nécessaire de calculer la vitesse correspondante à CP max.

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_{pmax} est donné par la relation :

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{opt} V_v}{R} \quad (II.33)$$

II.10 Système de régulation de la turbine éolienne :

II.10.1 Calcul des paramètres du régulateur PI :

Sur la base du schéma de commande de la figure II.18, le couple électromagnétique de référence est obtenu grâce à l'action d'un contrôleur de type PI, qui agit sur l'écart entre la vitesse de référence et la vitesse de rotation.

La fonction de transfert décrivant cette action est donnée par :

$$C_{em-ref}(s) = \left(k_i + \frac{k_p}{s}\right) \cdot (\Omega_{tur-ref}(s) - \Omega_{mec}(s)) \quad (II.34)$$

Où :

- k_i : le gain intégral
- k_p : le gain proportionnel

Si on isole la partie du schéma de commande de la boucle de régulation de la vitesse on obtient le schéma suivant [39].

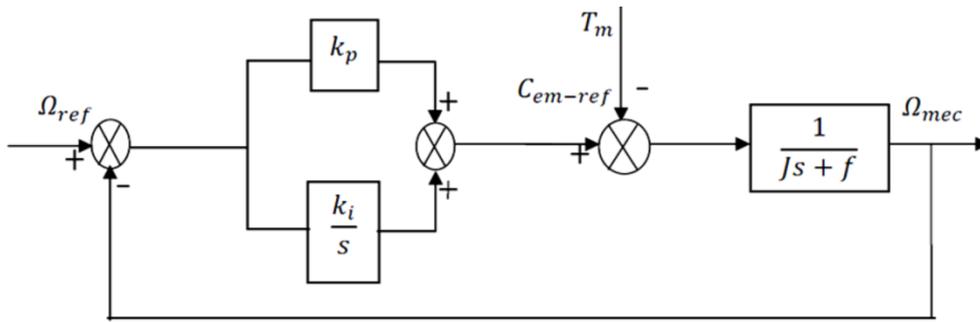


Figure II.18 : Schéma bloc de l'asservissement en utilisant un régulateur PI [34]

Le choix de la pulsation propre w_n et du facteur d'amortissement ξ_n permet de calculer les coefficients du régulateurs PI [34].

$$k_i = w_n^2 \cdot J \tag{II.35}$$

$$k_p = 2 \cdot \xi_n \cdot w_n \cdot J \cdot f \tag{II.36}$$

II.9.2 Calcul des paramètres du régulateur IP :

Le contrôle de la vitesse est assuré par un régulateur de type IP dont les gains sont respectivement K_i et K_p . la chaîne de régulation de la vitesse peut être représenté par le schéma fonctionnel suivant :

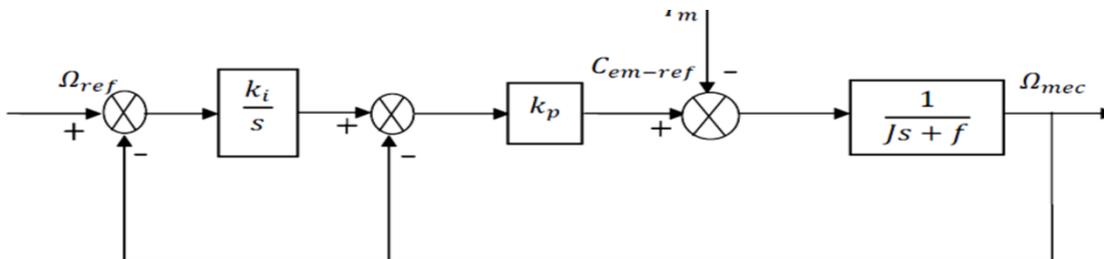


Figure II.19 : Schéma bloc d'un régulateur IP [34].

La fonction de transfert du système représenté par la figure II.9 peut être donnée sous la forme suivante :

$$\Omega_{mec} = F(S) \cdot \Omega_{ref} - P(S) \cdot T_m \tag{II.37}$$

$$F(S) = \frac{k_i \cdot k_p}{Js^2 + (f + k_p)S + k_i \cdot k_p} \tag{II.38}$$

$$P(S) = \frac{S}{Js^2 + (f + k_p)S + k_i \cdot k_p} \tag{II.39}$$

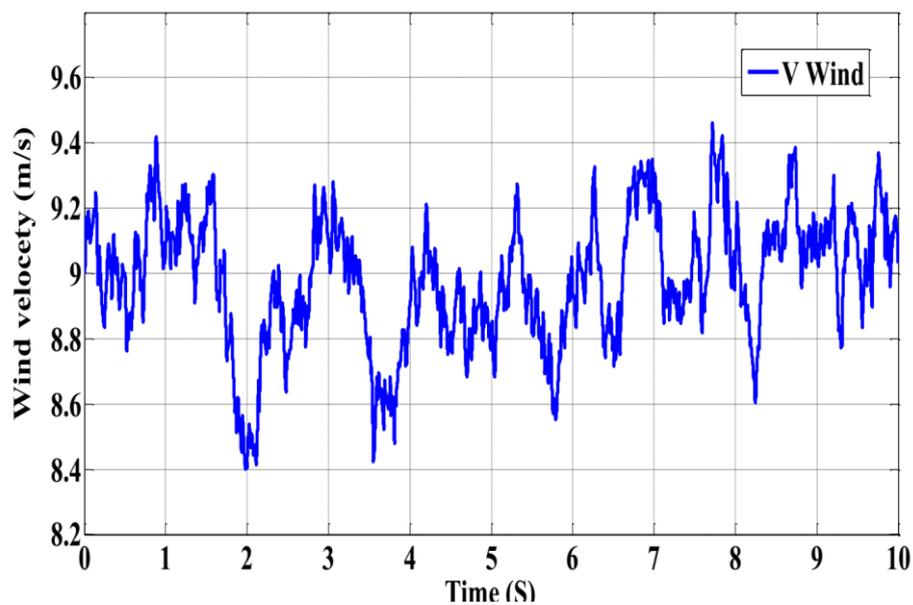
Le choix de la pulsation propre w_n et du facteur d'amortissement ξ_n permet de calculer les coefficients du régulateurs IP [34] :

$$k_i = \frac{w_n^2 \cdot J}{k_p} \quad (\text{II.40})$$

$$k_p = (2 \cdot \xi_n \cdot w_n \cdot J) - f \quad (\text{II.41})$$

II.9.2.1 Résultat de simulation PI :

La figure II .20 montre la variation de la vitesse du vent en fonction de la variation de temps (t=10s) entre les valeurs de $v = 9,4 \text{ m/s}$ et $v = 10,4 \text{ m/s}$. Cela donne un reflet d'un véritable profil de vent.



1

Figure II.20: modèle du profil de vent

La figure suivante représente la variation du coefficient de puissance C_p , qui est maintenu autour de sa valeur maximale 0,29.

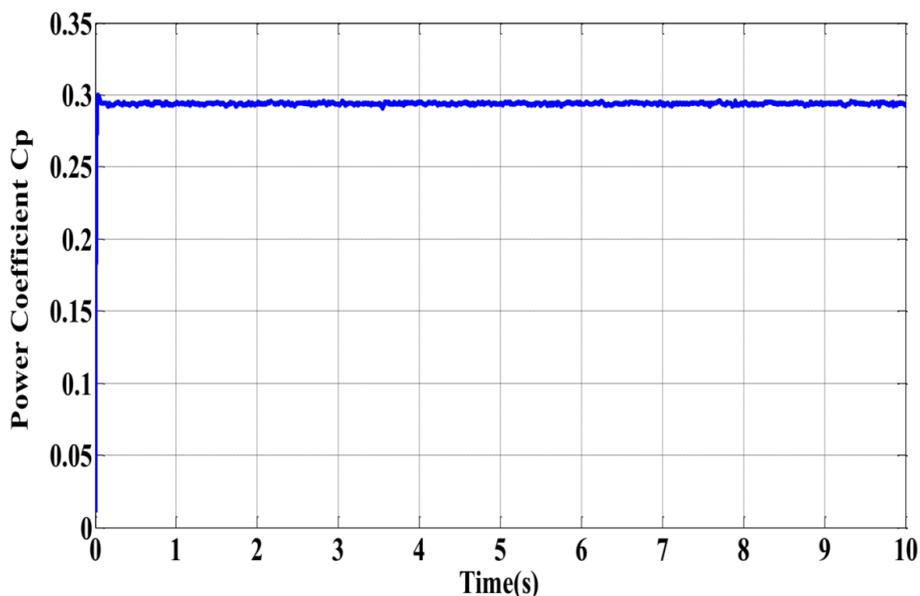


Figure II.21: Variation du coefficient de Puissance C_p

Les Figures Suivantes représentent la régulation de la vitesse mécanique utilisant un régulateur PI. Lorsque la turbine atteint son régime de fonctionnement permanent, sa vitesse est alors la réplique exacte de la vitesse de référence : ceci indique l'efficacité de la technique de contrôle utilisée.

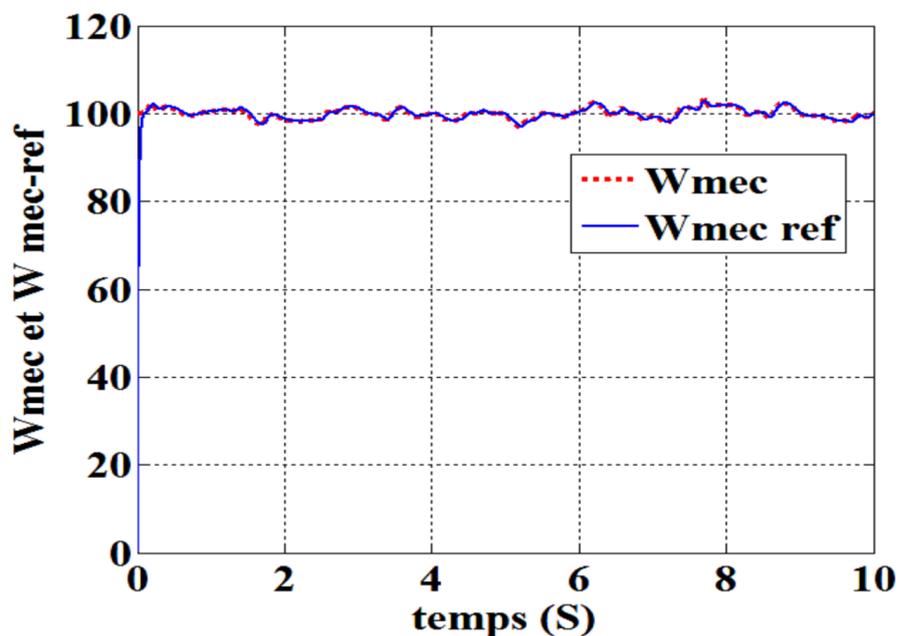


Figure II.22: Allure de la vitesse mécanique .

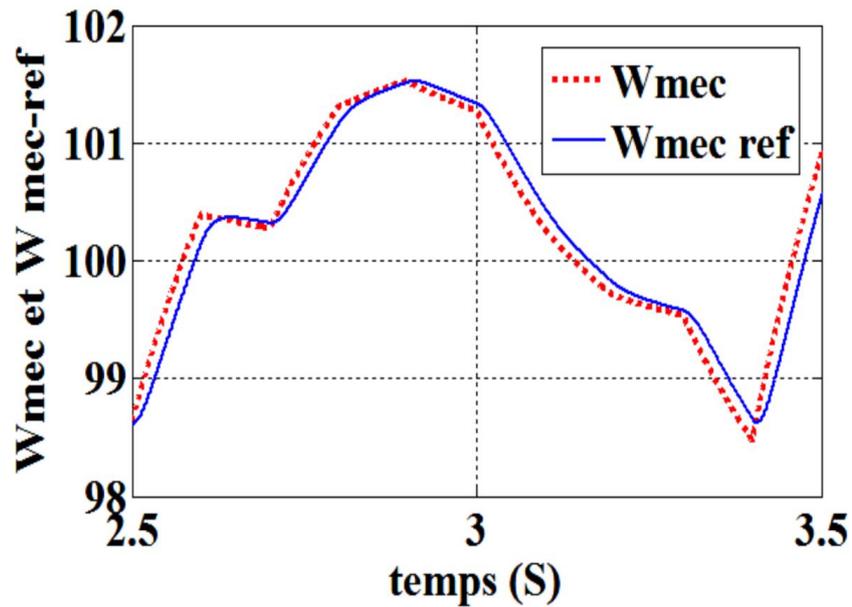


Figure II.23 :Zoom sur l'allure de la vitesse mécanique.

Les Figures suivantes représentent la régulation de la vitesse mécanique utilisant un régulateur IP

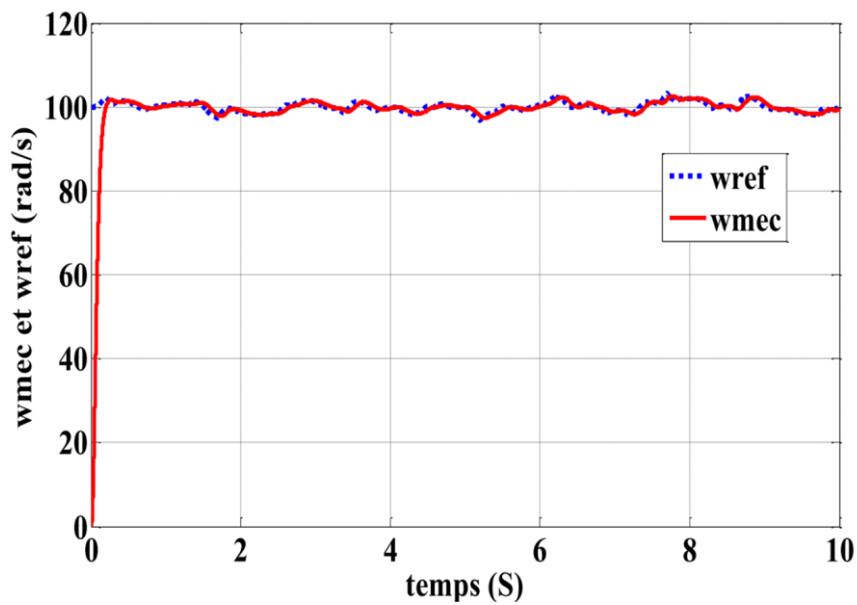


Figure II.24: Allure de la vitesse mécanique

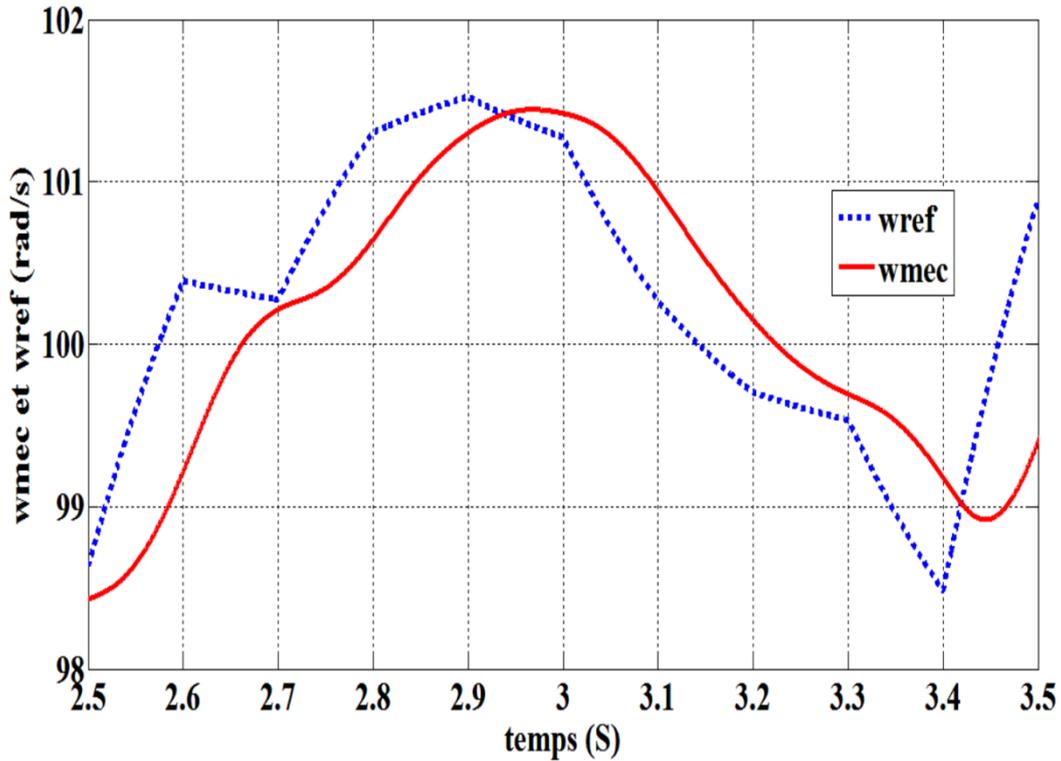


Figure II.25 : Zoom sur l'allure de la vitesse mécanique

II.11. Conclusion :

Ce chapitre traite la modélisation des éléments constituant la chaîne de conversion éolienne. Dans une première partie, un aperçu général sur la conversion d'énergie éolien est donné. Puis, les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine ont été présentés et développés. Ensuite, la stratégie de commande appliquée à la turbine éolienne utilisant le types de régulateurs PI a été étudiée et les résultats de la simulation sous Matlab ont été présenté.

Chapitre- III :

La génératrice synchrone à aimants permanent

(GSAP)

III.1. Introduction :

L'une des pièces maîtresses d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne est la génératrice [26]. A l'heure actuelle, grâce à la mise au point d'aimants permanents de grande qualité permettant l'obtention de couples massiques élevés, les machines à aimants sont de plus en plus utilisées. Lorsque leur nombre de pôles est élevé, leurs puissances peuvent atteindre quelques centaines de kilowatts. Toutefois, Elles sont surtout utilisées pour les petites et moyennes puissances de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts. Dans ce cas, l'aimant permanent permet d'obtenir, à taille égale, une induction dans l'entrefer plus élevée que pour les machines à rotor bobiné. Par ailleurs, l'emploi d'aimants permanents annule les pertes par effet joule au rotor et augmente le rendement [25], [40]

Le modèle mathématique de la machine synchrone est établi sur la base de certaines hypothèses simplificatrices essentielles [11]:

- absence de saturation dans le circuit magnétique,
- distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator,
- hystérésis, courants de Foucault et effet de peau négligés,
- effet d'encoche négligeable,
- résistance des enroulements ne variant pas avec la température.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air.

L'étude et l'analyse du comportement des MSAP nécessitent une bonne connaissance de leur modèle dynamique, ce qui permet de simuler leur comportement dans des différents modes de fonctionnement envisagé.

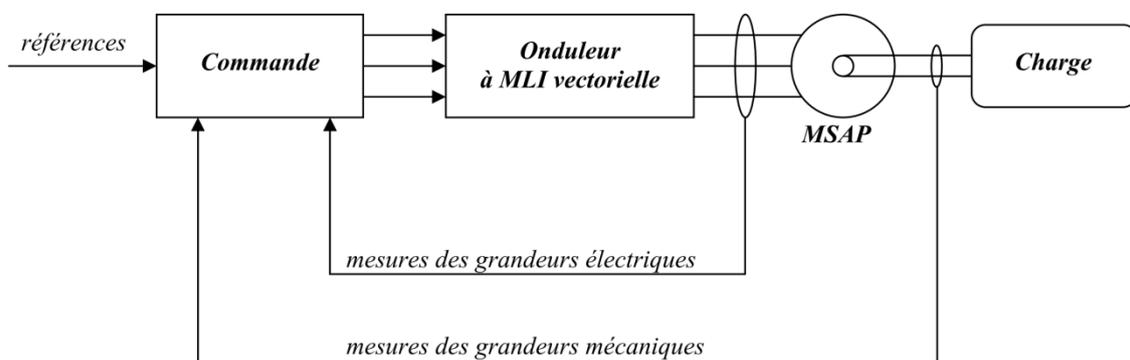


Figure III 2 Un ensemble de commande-onduleur-MSAP

III.1.2. C'est quoi une machine synchrones a aimants permanents ?

Les machines synchrones à aimants permanents se composent d'un stator comportant un bobinage qui est alimenté en triphasé représenté par trois axes (a,b,c) décalés l'un de l'autre par un angle de 120° électrique et produit un champ magnétique tournant à la fréquence d'alimentation et aux rotors où le champ magnétique est produit par des aimants permanents. Les moteurs à aimants permanents peuvent accepter des courants de surcharge importants pour démarrer rapidement. Associés à des variateurs de vitesse électroniques, ils trouvent leur place dans certaines applications de motorisation d'ascenseurs lorsque l'on cherche une certaine compacité et une accélération rapide (immeuble de grande hauteur par exemple). L'excitation, dans ce cas, est créée par les aimants permanents. Le couple instantané (dans n'importe quelle configuration de machine à aimants) est la somme de trois couples élémentaires : le couple reluant, le couple hybride et le couple de détente. De plus les machines synchrones à aimants permanent est limitées par rapport à une machines a rotor bobiné ;en fonction de la manière ou les aimants sont placés, on distingue deux structures principales de machines synchrones à aimants permanents : •Aimants en surface : (MSAP_S) les aimants permanents sont collés sur le rotor à l'aide de résine ou on les insère dans des encoches faites dans le rotor. Le couple total dans cette machine est la somme d'un couple hybride et d'un couple de détente. Le couple réluctant est nul, le rotor ne présentant aucune saillance (variation de réluctance) quand il tourne. dans ce cas le moteur est appelé à rotor lisse.

Aimants enterrés : (MSAP_I2) les aimants permanents sont démagnétisés et enterrés dans le rotor, puis ils sont remagnétisés. Le couple total dans ce type de machine est égal à la somme d'un couple hybride, d'un couple de détente et d'un couple réluctant.

Aimants à concentration de flux : (MSAP_CF) les aimants permanents sont disposés de telle sorte qu'ils fournissent une concentration de flux dans l'entrefer, le couple total est égal à la somme d'un couple hybride, d'un couple de détente et d'un couple réluctant.

Le moteur synchrone à aimants permanents remplace le commutateur mécanique du moteur à courant continu à balais par une commutation électronique, éliminant ainsi les balais et les problèmes qui leur sont associés. Cependant, ceci a pour effet de rendre le contrôle de ce moteur plus difficile. Les moteurs brushless (sans balai) ont besoin d'une boucle de retour délivrant l'information de la position électrique du rotor. Ce qui implique l'utilisation d'un capteur de position. Cette information sur la position électrique du rotor est utilisée pour

commander les phases des courants, avec comme but de maintenir un angle de commutation proche de l'angle optimal qui est de 90° .

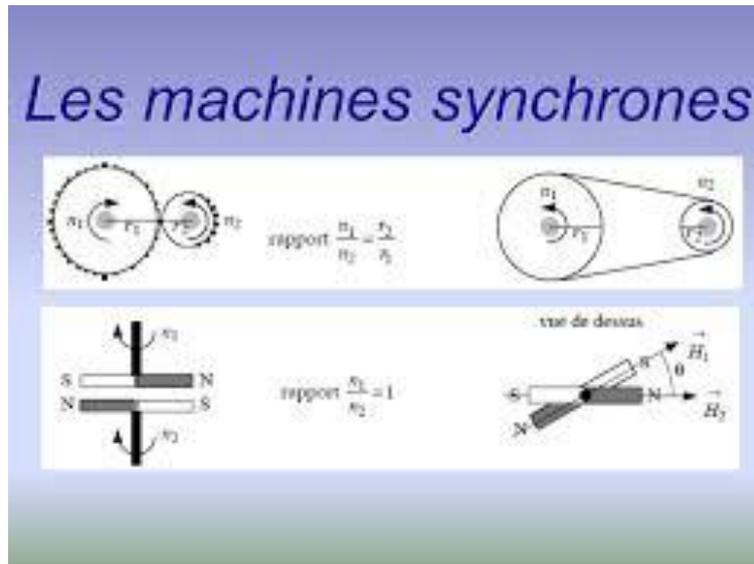


Figure III.2 : machines synchrones a aimants permanants

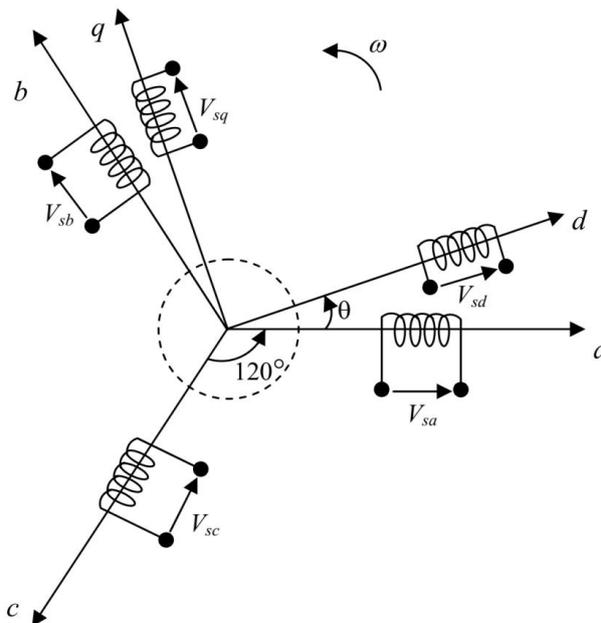


Figure III.3 : représentation d'une machine synchrone a aiment permanents

III.2 Modélisation de la génératrice synchrones a aiment permanents

III.2.1. Modèle mathématique de la MSAP :

Le modèle mathématique de la machine synchrone est établi sur la base de certaines hypothèses simplificatrices essentielles [11]:

- absence de saturation dans le circuit magnétique,
- distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator,
- hystérésis, courants de Foucault et effet de peau négligés,
- effet d'encochage négligeable,
- résistance des enroulements ne variant pas avec la température.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air.

III.2.2. Equations électriques :

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

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

Ou ;

$[V_a, V_b, V_c]$: Vecteur tension des phases statoriques.

$[i_a, i_b, i_c]$: Vecteur courant des phases statoriques.

$[\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c]$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

R_s : Résistance des phases statorique.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérée sont connectés en étoile à neutre isolé. Dans ce cas, la somme instantanée des courants statoriques est nulle, il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire, de tension ou de flux, elle n'intervient pas dans le calcul du moment du couple [41],[11]. Le comportement de la machine peut être défini par deux variables indépendantes.

III.2.3. Equations électriques dans le repère de Park (d, q) :

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, un changement de repère est nécessaire. Cette transformation mathématique permet de remplacer les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes, situées sur le rotor, déphasées de $\pi/2$ (Figure III .3) [11].

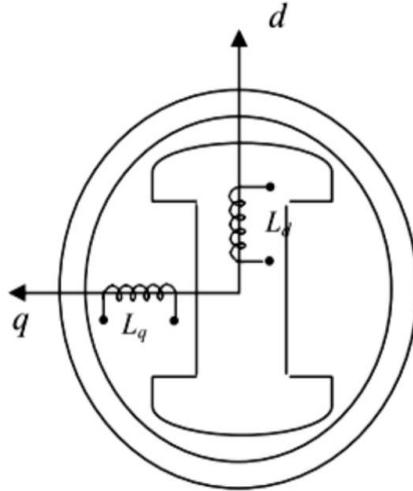


Figure III.3: Représentation de la MSAP dans le repère (d,q) de Park

La transformation de Park est:

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

Lorsque le passage du repère (d,q) au repère (a,b,c) , les équations sont obtenus par la transformation de park inverse :

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

Le changement de variable effectué, les équations des tensions, courants et flux obtenues

sont :

$$[i_{d,q}] = P(\theta)[i_{abc}] \quad (\text{III.4})$$

$$[V_{d,q}] = P(\theta)[V_{abc}] \quad (\text{III.5})$$

$$[\Theta_c] = P(\Theta)[\phi_{abc}] \quad (III.6)$$

Ainsi, les équations de la machine synchrone dans le repère de Park sont :

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p. \Omega t. L_d. i_d \quad (III.7)$$

$$v_d = R_s i_d + L_q \frac{di_d}{dt} + p. \Omega t. L_d. i_q \quad (III.8)$$

III.2.4. Equation magnétique :

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs, ψ_d et ψ_q sont fonctions linéaires des courants i_d et i_q :

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_d + \Psi_f \\ \Psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (III.9)$$

Ou :

- L_d et L_q : sont les inductances directe et en quadrature, elles sont supposées indépendantes de Θ .

- Ψ_f : représente le flux des aimants .

Les circuits électriques équivalents de la MSAP peuvent être représentés comme suit :

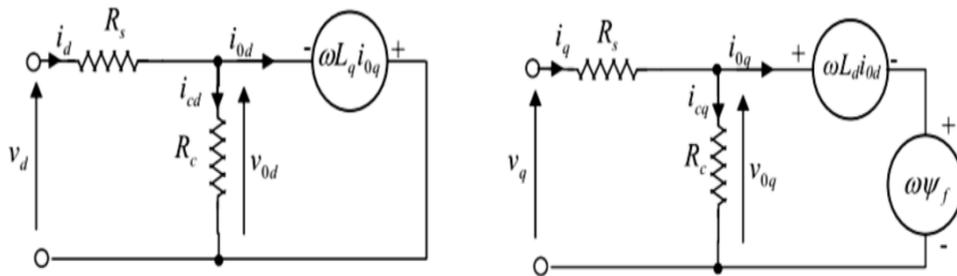


Figure III.4 : Circuit équivalent de MSAP –convention moteur-

Pour la convention génératrice, les sens des courant i_d et i_q dans les repères de Park sont inversés (figure III.5). Ainsi, le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents obtenu s'écrit sous la forme [11] :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - L_q \frac{di_d}{dt} + \omega. L_q. i_q \\ V_q = -R_s i_q - L_d \frac{di_q}{dt} + \omega. L_d. i_d + \omega \Psi_f \end{cases} \quad (III.10.11)$$

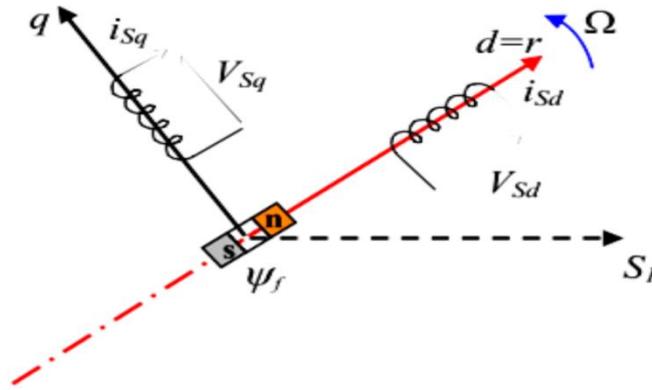


Figure III.5:Modèle de PARK pour la GSAP[11]

III.2.5.Expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{3}{2}P[(L_q - L_d)i_q i_d + i_q \Psi_f] \quad (III.12)$$

Où :

- P : nombre de paires de pôles .
- i_d :courant statorique selon l'axe d
- i_q :courant statorique selon l'axe q
- L_d :inductance statorique selon l'axe d
- L_q :inductance statorique selon l'axe q
- Ψ_f : flux inducteur

III.2.6.Equation mécanique :

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

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (III.13)$$

Ou :

- C_m : couple moteur appliqué sur la génératrice.
- $f\Omega$: couple de frottement.
- J : moment d'inertie .
- f :coefficient de frottement visqueux

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à la machine synchrone, celle qui consiste à imposer une référence du courant direct i_d à zéro est la plus répandue. Elle permet

de simplifier l'expression du couple électromagnétique de l'équation II.39 en une expression linéaire donnée par [34]:

$$C_{em} = \frac{3}{2} P i_q \Psi_f \tag{III.14}$$

$$C_{em} = K_t i_q \tag{III.15}$$

Le réglage(ou la variation) du couple est obtenu en agissant sur le courant en quadrature i_q .

Pour appliquer la commande vectorielle, il est nécessaire de prendre pour références :

$$i_{dref} = 0 \tag{III.16}$$

$$C_{em-ref} = C_{te} . \Omega^2 \tag{III.17}$$

$$i_{ref} = \frac{C_{em-ref}}{K_t} \tag{III.18}$$

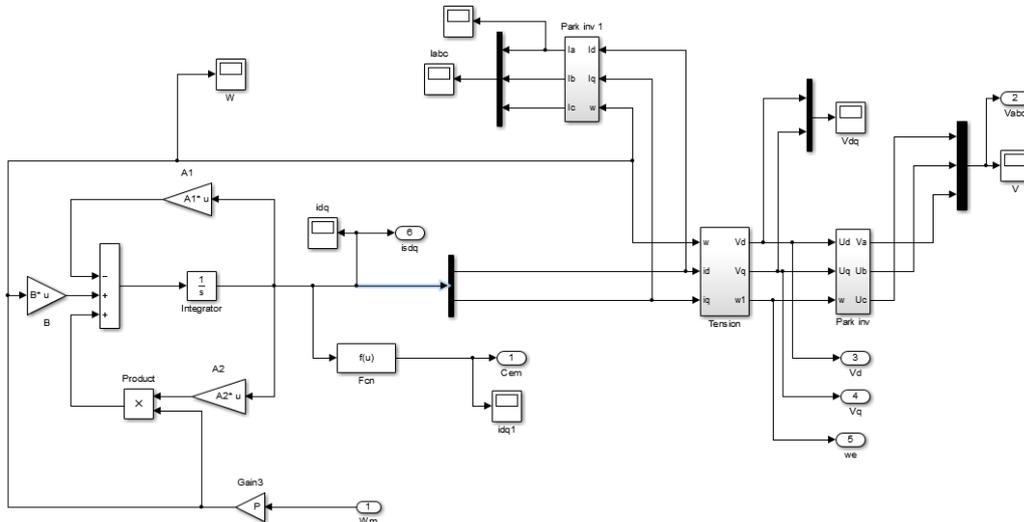


Figure III.6 :Schéma bloc de la Gsap

III.3.Commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation :

Pour justifier le recours à la commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation, il est utile d'examiner tout d'abord le modèle de la machine synchrone dans le repère de Park [34].

$$v_d = R_s i_s + L_q \frac{di_d}{dt} + \omega_r \cdot \phi_q \tag{III.19}$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r \cdot \phi_d \tag{III.20}$$

Ou :

$-e_q = \omega_r \cdot \phi_q$: f.e.m de la machine sur l'axe q.

$-e_d = \omega_r \cdot \phi_d$: f.e.m de la machine sur l'axe d .

La commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation permet de découpler les courants i_d et i_q et d'effectuer la régulation adéquate à chacun d'eux séparément. Cette commande permet d'obtenir un modèle de la machine synchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée.

Les termes de couplage en $E_{d,q} = \omega_r \phi_{d,q}$ sont considérés comme des perturbations mesurables [34], [42]. Ainsi la machine peut être représentée par la fonction de transfert suivante :

$$G_s(p) = \frac{1}{R_s + L_s p} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \tag{III.21}$$

Ou :

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

Si on tient compte de la perturbation, $G_s(p)$ sera sous la forme donnée en III.6, en vertu du théorème de superposition :

$$G_s(p) = \frac{i_{d,q}(p)}{V_{d,p}(p) + E_{d,q}(p)} \tag{III.22}$$

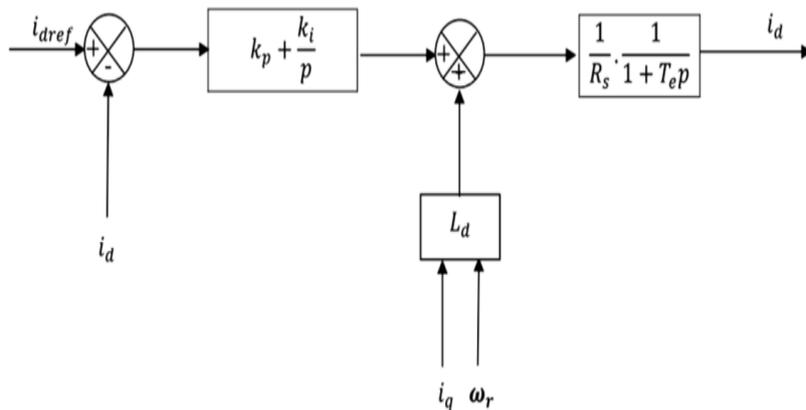


Figure III.7 : Boucle de régulation du courant i_d .

III.4. Calcul du régulateur PI :

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée comme suit [34] :

$$G_0(p) = \frac{k_{pd} p + k_{id}}{p} \frac{1}{R_s p + L_d} = \frac{k_{pd} p + k_{id}}{p} \cdot \frac{1}{L_d} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad (\text{III.23})$$

En fin :

$$G_s(p) = \frac{k_{pd} p + k_{id}}{p} \frac{G_0}{1 + T_e p} \quad (\text{III.24})$$

Ou :

- $T_e = \frac{R_s}{L_d}$: constante de temps électrique.

- $G_0 = \frac{1}{L_d}$: gain statique.

- La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$G_{bf}(p) = \frac{G_{b0}(p)}{1 + G_{b0}(p)} \quad (\text{III.25})$$

Les paramètres du régulateur sont calculés par la méthode de placement de pôle. La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$G_{bf}(p) = \frac{G_{b0}(p)}{1 + G_{b0}(p)} = \frac{K_p p + k_i}{R p^2 + (L_q + k_p) p + k_i} \quad (\text{III.26})$$

$$k_p = \frac{2\xi_n k_i}{\omega_n} - J \quad (\text{III.27})$$

$$k_i = \omega_n^2 J \quad (\text{III.28})$$

La boucle de régulation du courant i_q est donnée par le schéma bloc suivant :

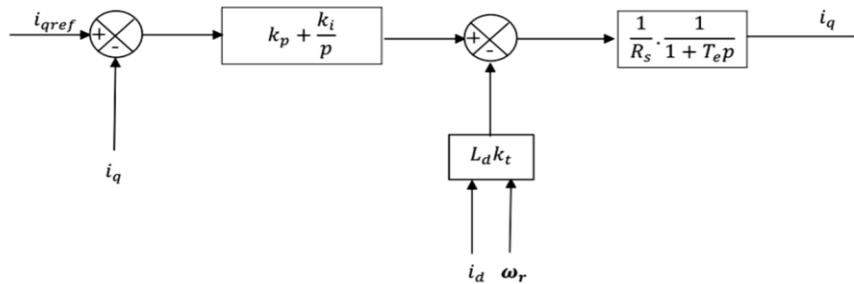


Figure III.8. : Boucle de régulation du courant i_q [34]

III.5. Les convertisseurs

La chaîne de conversion électronique est composée de deux onduleurs couplés sur un bus continu commun. De manière générale, l'onduleur permet la conversion de courants triphasés alternatifs en courant continu et vice versa. L'onduleur étudié est bidirectionnel en

courant et classiquement composé de trois cellules de commutation. Chacune est composée de deux transistors IGBT qui sont connectés à deux diodes en antiparallèle. Il est contrôlé par modulation de largeur d'impulsion (Figure. II.35-a). Les semi-conducteurs sont considérés idéaux : pas de pertes et les commutations sont instantanées. L'hypothèse de la conduction continue permet de considérer le convertisseur équivalent à des interrupteurs idéaux (Figure.II.35-b) [43] [25]. Ces interrupteurs peuvent être commandés en ouverture '1' et en fermeture '0', et la tension d'entrée V_i est fonction des états de ces interrupteurs [44]. Il y a 8 états de commutations possibles, (Figure. II-36) [45] .

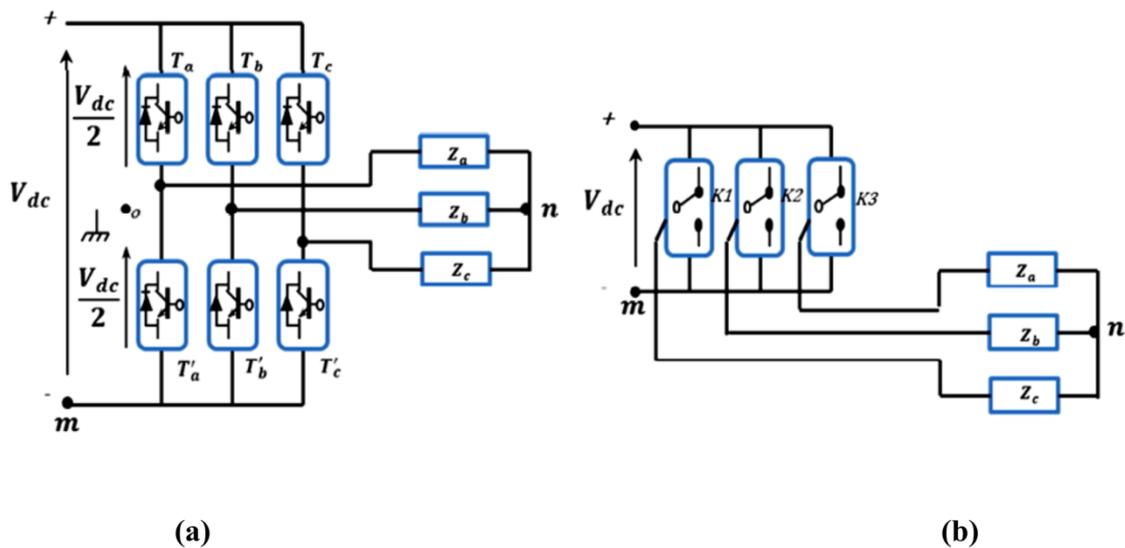


Figure III.9: modèle du convertisseur

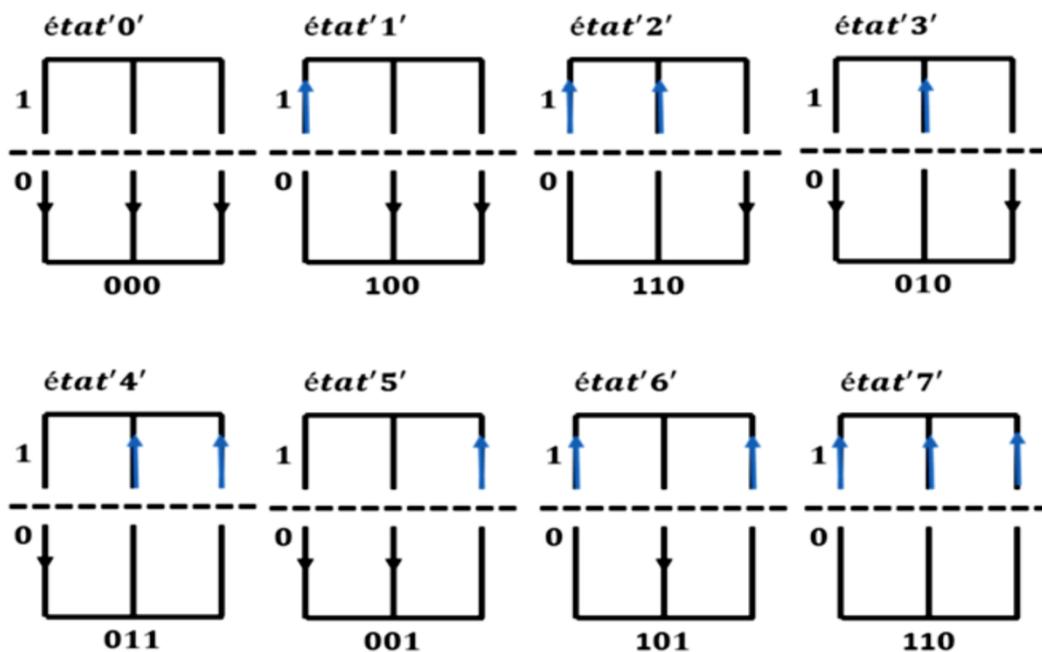


Figure III.10 : Etats de commutation des interrupteurs d'un convertisseur à 02 niveaux [25].

L'onduleur utilisé est piloté à partir de grandeurs logiques par l'intermédiaire d'un circuit de commande. T_i et T_i' représentent les transistors, S_i et S_i' les commandes logiques associées.

En négligeant le temps mort entre les interrupteurs du même bras, la commande de ces derniers est alternée ($S_i = \bar{S}_i'$), il existe deux états complémentaires [40], [25]:

- Si $S_i = 1$, alors T_i est passant et T_i' est ouvert ;
- Si $S_i = 0$, alors T_i est ouvert et T_i' est passant.

Pour simplifier l'étude, l'alimentation en tension est supposée être une source parfaite dans le sens où, quel que soit le courant i délivré ou absorbé, la tension V_{dc} à ses bornes reste toujours constante [40],[25].

La valeur des tensions entre les points a, b, c et le point m:

$$\begin{aligned} V_{am} &= V_a - V_m = S_a \cdot E (V_{am} = V_{dc} \text{ si } (T_a) \text{ est fermé, } V_{am} = 0 \text{ si } (T_a) \text{ est ouvert}) \\ V_{bm} &= V_b - V_m = S_b \cdot E (V_{bm} = V_{dc} \text{ si } (T_b) \text{ est fermé, } V_{bm} = 0 \text{ si } (T_b) \text{ est ouvert}) \\ V_{cm} &= V_c - V_m = S_c \cdot E (V_{cm} = V_{dc} \text{ si } (T_c) \text{ est fermé, } V_{cm} = 0 \text{ si } (T_c) \text{ est ouvert}) \end{aligned} \quad (\text{III.29})$$

Ainsi :

$$\begin{bmatrix} V_{am} \\ V_{bm} \\ V_{cm} \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.30})$$

$$\begin{cases} V_{am} = V_{an} + V_{nm} \\ V_{bm} = V_{bn} + V_{nm} \\ V_{cm} = V_{cn} + V_{nm} \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

$$\rightarrow V_{am} + V_{bm} + V_{cm} = (V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) + 3V_{nm} \quad (\text{III.32})$$

Pour une charge équilibrée :

$$(V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) = 0 \quad (\text{III.33})$$

Donc ;

$$V_{nm} = \frac{1}{3}(V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \quad (\text{III.34})$$

En remplaçant V_{nm} dans le système ci-dessous :

$$\begin{cases} V_{am} = V_{an} + \frac{1}{3}(V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \\ V_{bm} = V_{bn} + \frac{1}{3}(V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \\ V_{cm} = V_{cn} + \frac{1}{3}(V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \end{cases} \quad (\text{III.35})$$

$$\rightarrow \begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(V_{am} + 2V_{bm} + V_{cm}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(V_{am} + V_{bm} + 2V_{cm}) \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

Le modèle de l'onduleur en fonction de la tension d'entrée et des interrupteurs est :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{am} \\ V_{bm} \\ V_{cm} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.37})$$

$$\rightarrow \begin{cases} V_{an} = R \cdot i_a + L \frac{di_a}{dt} \\ V_{bn} = R \cdot i_b + L \frac{di_b}{dt} \\ V_{cn} = R \cdot i_c + L \frac{di_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.38})$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulosinusoidale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie.

III.6.Principe de la MLI :

La technique de modulation de largeur d'impulsion triangulo-sinusoidale consiste à comparer en chaque instant un signal triangulaire $w(t)$ de fréquence f_p , que nous appellerons porteuse, à trois signaux de commande, notés $u_a, u_b, et u_c$. Ces signaux u_i sont les images destensions que l'on souhaite appliquer sur chaque phase [39]. Les commutations des interrupteurs ont lieu quand on a une égalité du type : $u_i(t) = w(t)$

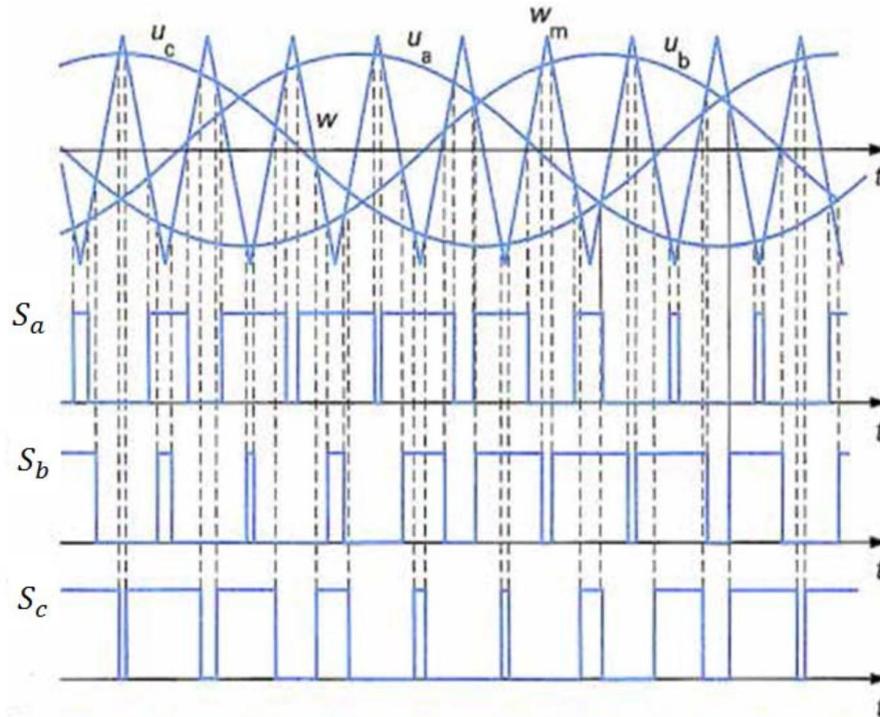


Figure III.11: Principe de la MLI triangulo-sinusoidale

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

- 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 :

$$m = \frac{f_p}{p} \quad (\text{III.40})$$

- 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) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{III.41})$$

Le choix d'un indice de modulation « m » multiple de trois nous permet d'éliminer les harmoniques d'ordre trois qui représente un handicap de cette technique. Cependant, le taux de modulation « r » varie suivant la référence imposée.

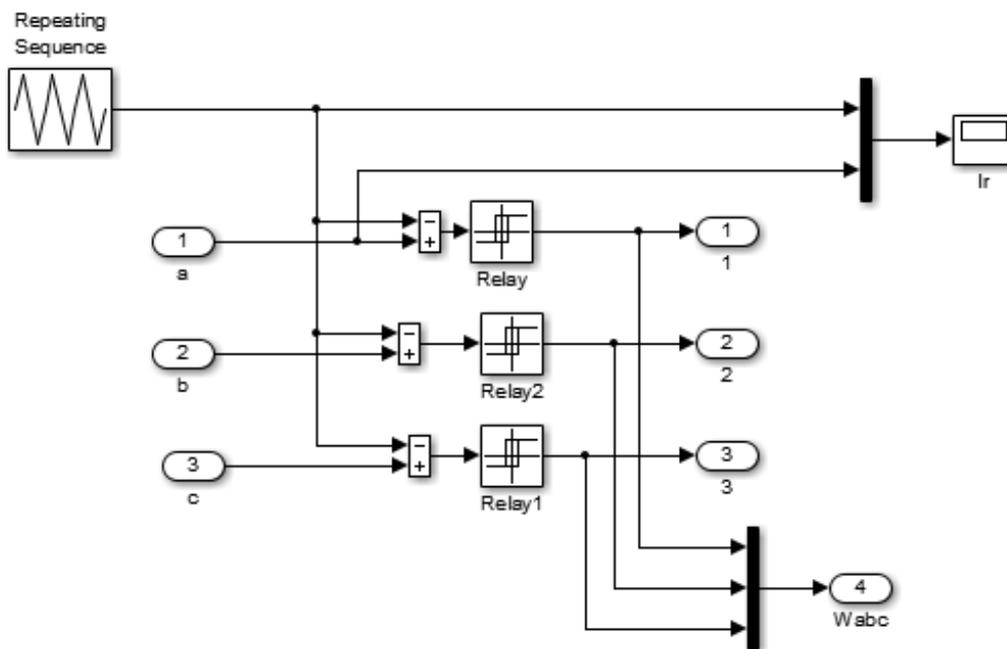


Figure III.12 : Schéma bloc de la MLI

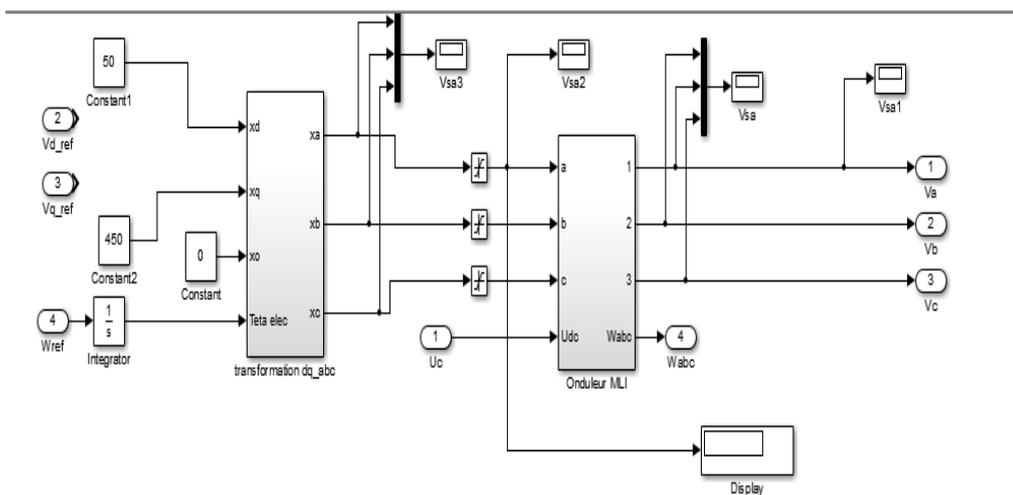


Figure III.13 : Schéma bloc de L'onduleur-MLI

III.7. Modélisation de la liaison au réseau :

III.7.1 Modélisation de bus continue :

Le schéma électrique du bus continu représenté sur la figure (III.19) montre que le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur :

$$i_c = i_{m-mac} - i_{m-res} \quad (III.42)$$

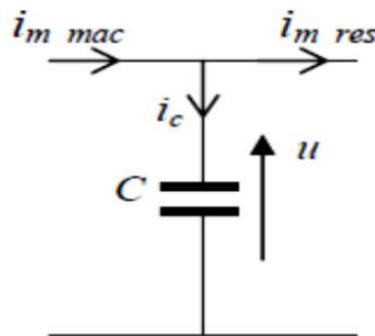


Figure III.14 Schéma électrique du bus continu

Le bus continu est modélisé par la connaissance de la tension aux bornes du condensateur obtenue en intégrant l'équation différentielle suivante :

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{c} i_c \quad (III.43)$$

D'où :

$$u = \int \frac{du}{dt} + u(t_0) \quad (III.44)$$

Ou :

$-u(t_0)$: la valeur de la tension à l'instant t_0

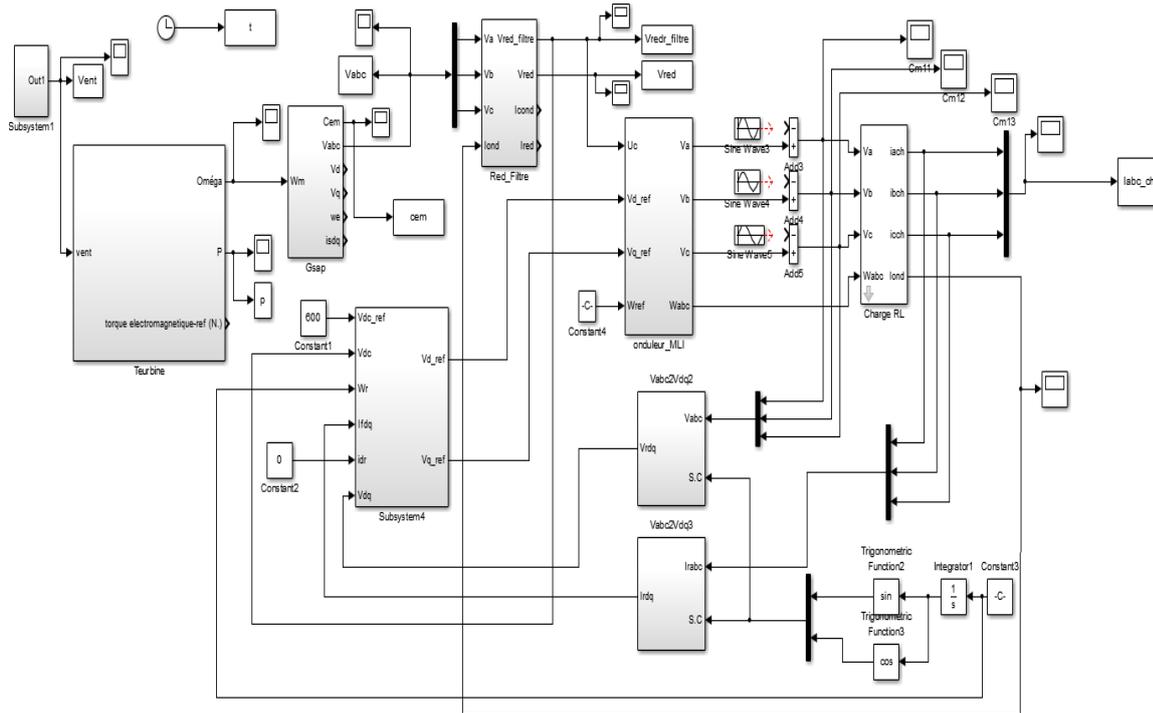


Figure III.15 : Schéma bloc sous Matlab-simulink de la chaîne de conversion éolienne étudiée

III.8. Résultats de simulations :

La validation du modèle choisi est effectuée par simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink, qui permet d'étudier le comportement de la génératrice synchrone, lors du fonctionnement en régime permanent, en visualisant sa vitesse de rotation et les tensions et courants suivants les axes d et q. Pour ce faire, pour la génération de l'énergie électrique un couple d'entraînement mécanique est appliqué. Au début ce couple est égale à $C_m = 5 \text{ N.m}$ pendant $t = 5\text{s}$, ensuite il est fixé à une valeur de $C_m = 10 \text{ N.m}$ pendant $t = 5\text{s}$. Les résultats de simulation obtenus sont montrés par les figures III.8-III.9. Lors de l'application du couple d'entraînement $C_m = (10 - 5)\text{N.m}$, le couple électromagnétique suit bien la valeur de la consigne

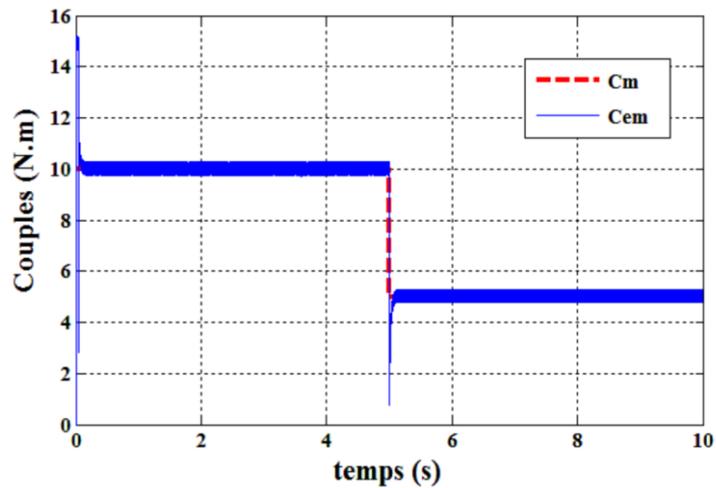


Figure III.16 : Couple électromagnétique et moteur

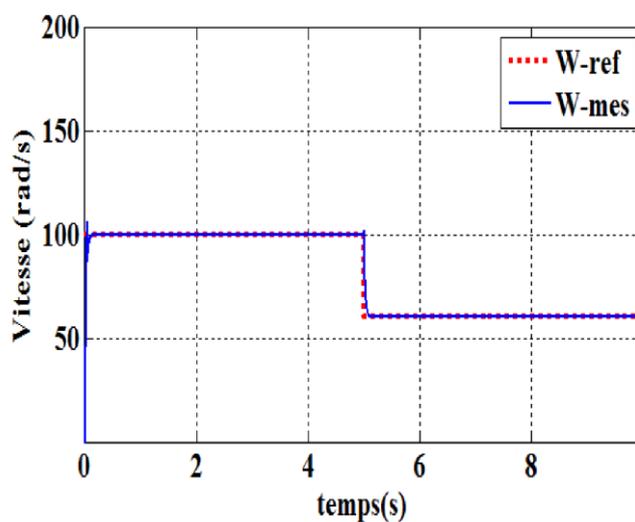


Figure III.17 : Vitesse de rotation

La figure précédente montre le contrôle de la vitesse de rotation à travers l'application d'un step variant entre (100 et 60) rad/s.

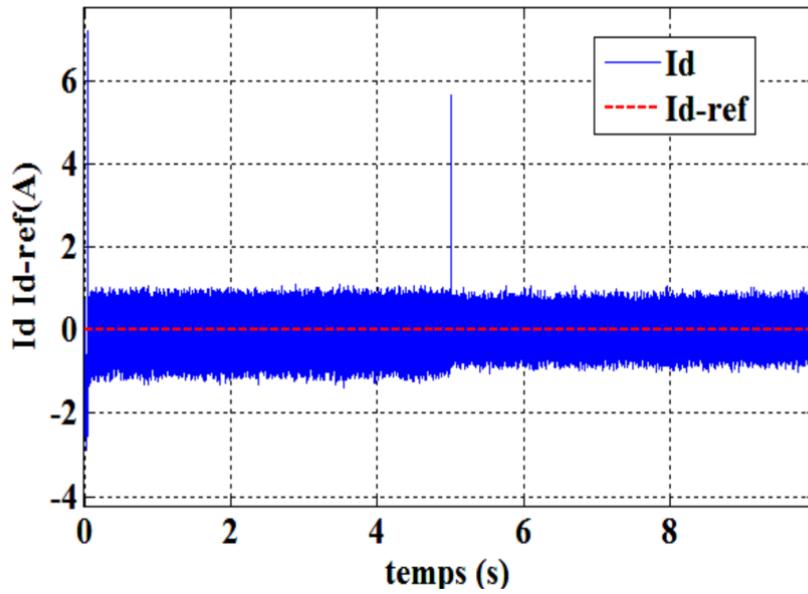


Figure III.18 :: Allure de courant id

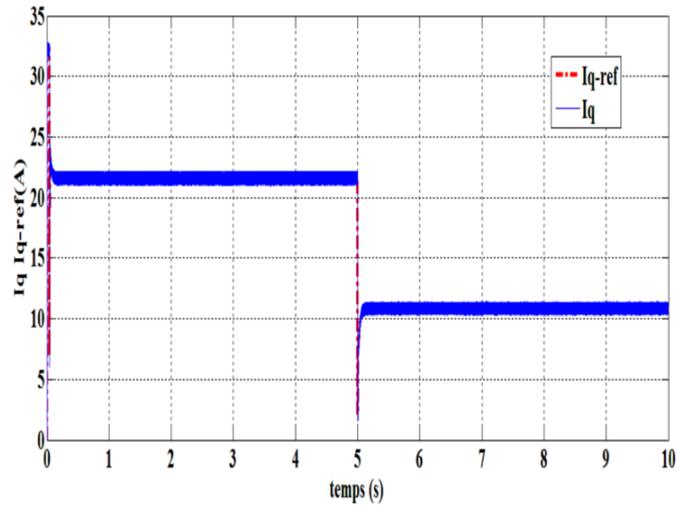


Figure III.19 : Allure de courant iq.

L'application de la transformée inverse de Park aux courants id et iq permet de tracer l'allure des courants des phases i_{abc} :

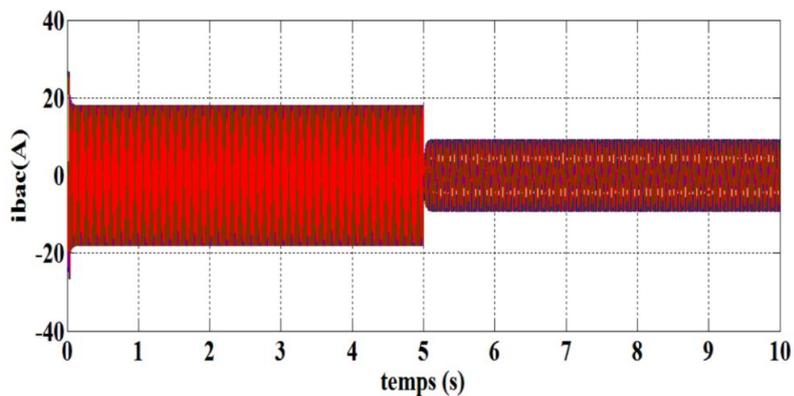


Figure III.20 : Allure des courants statorique i_{abc}

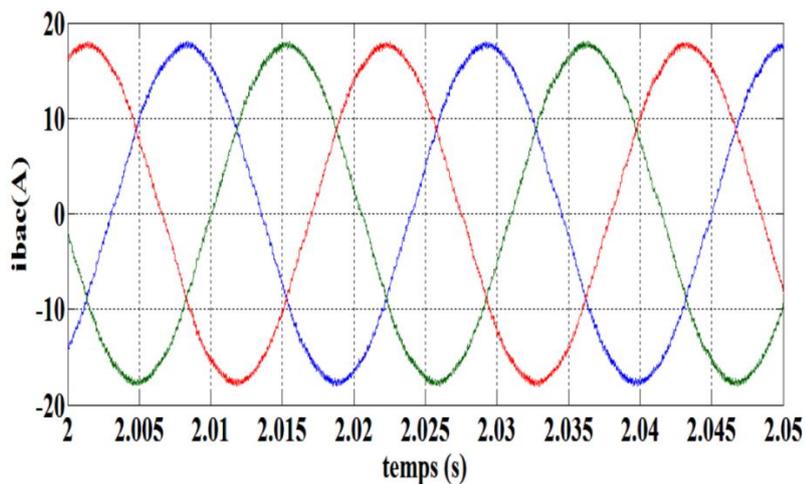


Figure III .21: Zoom sur les courants statoriques i_{abc}

L'allure de la tension d'une phase sur une durée de 10s est donnée par les deux figures suivantes :

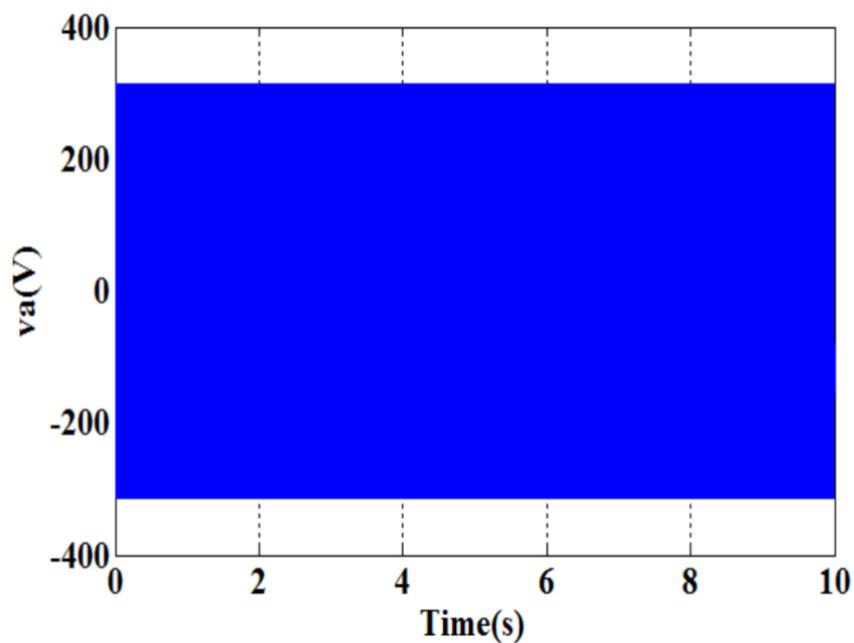


Figure III.22 : La tension d'une phase statoriques

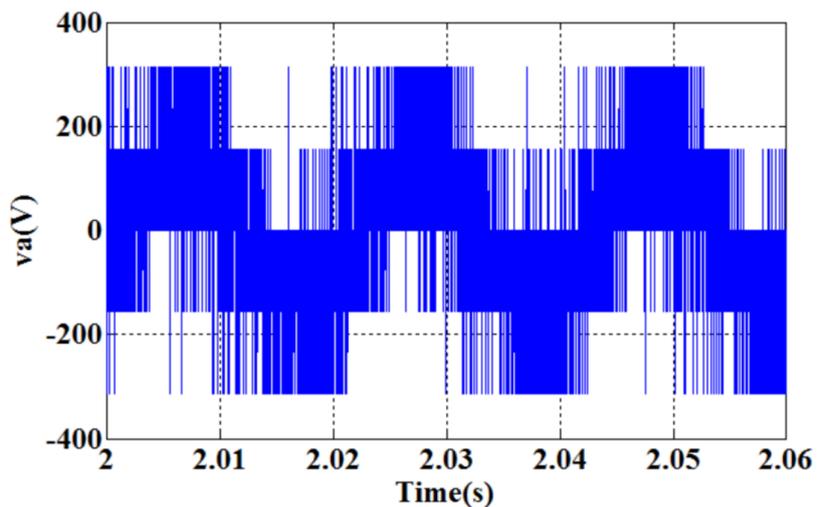


Figure III .23 : Zoom sur la tension d'une phase statorique

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{c} i_c \tag{III.43}$$

D'où :

$$u = \int \frac{du}{dt} + u(t_0) \tag{III.44}$$

Ou :

$-u(t_0)$: la valeur de la tension a l'instant t_0

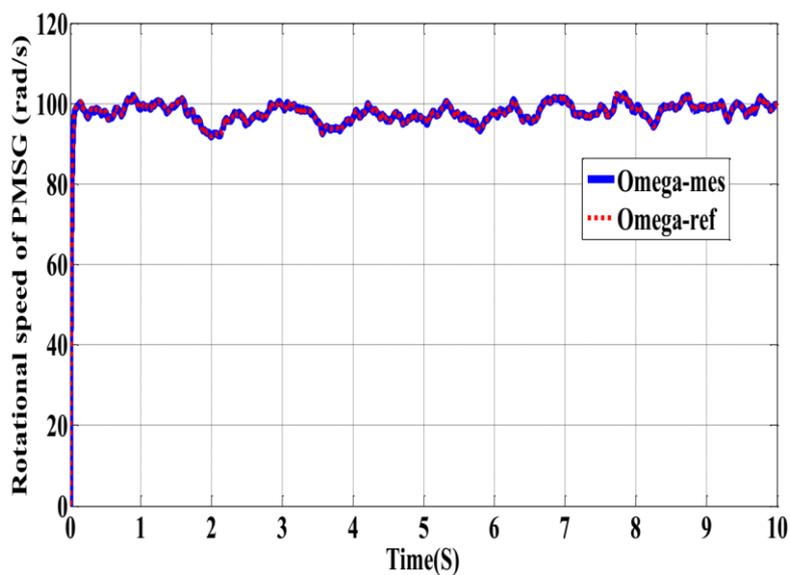


Figure III. 24 : Contrôle de la vitesse mécanique de la génératrice .

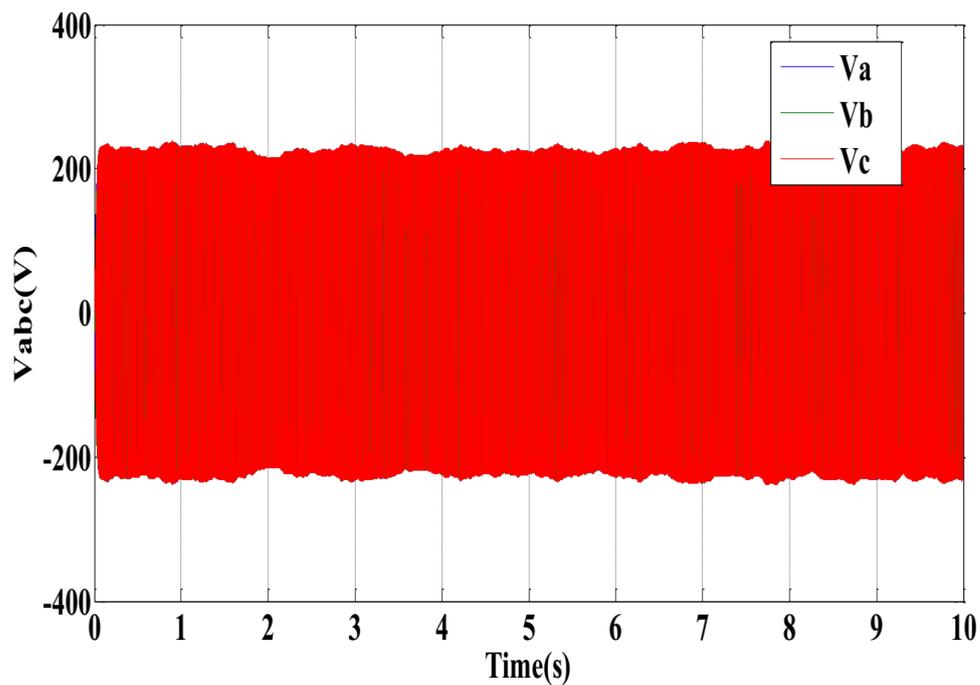


Figure.III.25 : Tension de sortie de la GSAP .

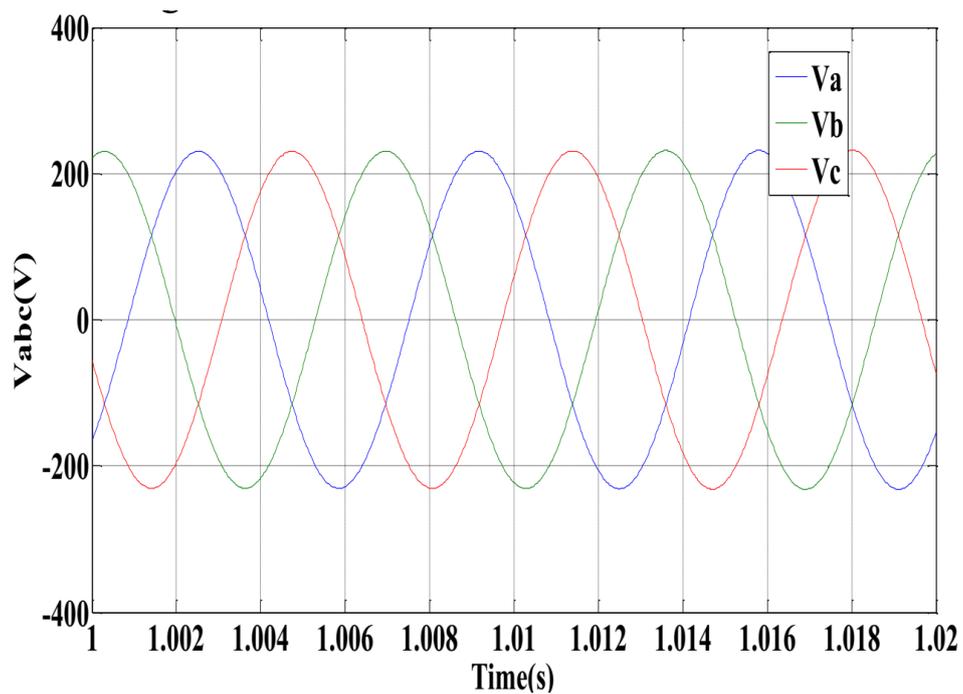


Figure III.26 : Zoom sur les tensions de sortie de la GSAP.

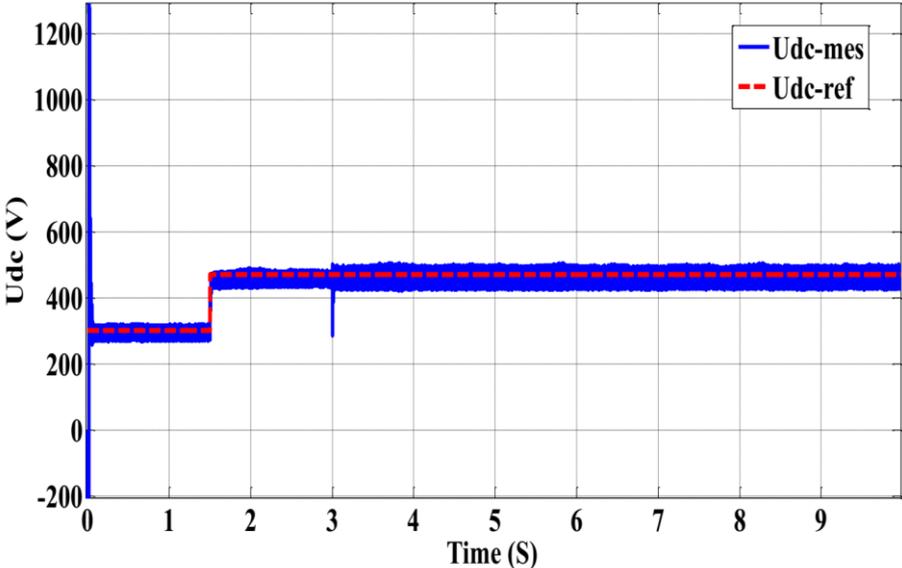


Figure III.27 : Control de la Tension du Bus continu.

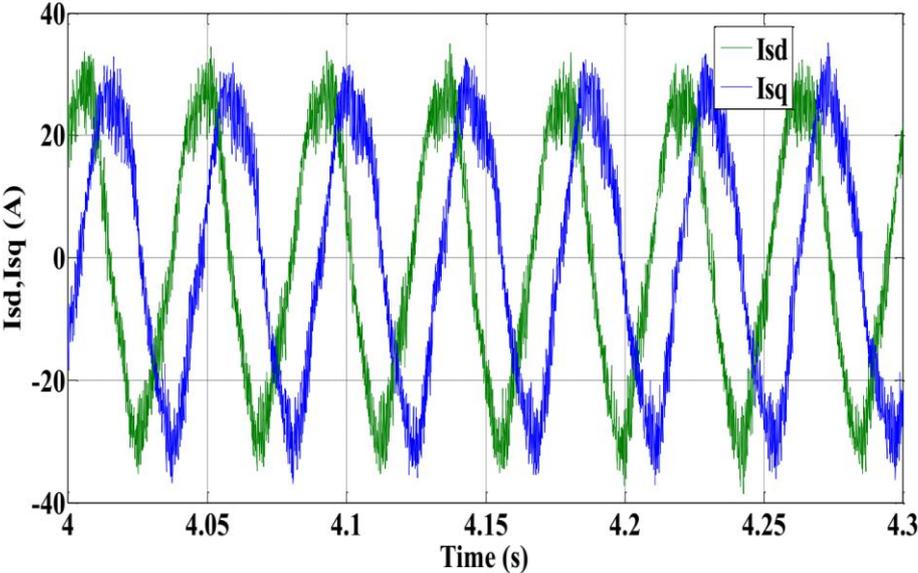


Figure III.28 : Les courants statorique dans le plan d,q

III.6.Conclusion :

Le chapitre précédent se base sur la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent, fonctionnement en génératrice, et un modèle mathématique établi pour cette dernière.

Dans la deuxième partie, une présentation des généralités sur la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) a été présentée. Par suite, les modélisations des convertisseurs statiques (onduleur à 2 niveaux), du bus continu, ont été abordées. Pour valider les modèles mathématiques, des simulations ont été effectuées et les résultats sont présentés.

Chapitre IV :

***Les perturbations électriques et solutions
de dépollution des systèmes électriques à l'aide
d'un filtre actif***

IV.1. Introduction :

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Habituellement, les systèmes électriques génèrent, transportent, et distribuent la puissance à une fréquence fixe telle que 50 ou 60 hertz tout en maintenant une tension raisonnablement constante sur la borne de connexion du consommateur. Le consommateur utilise beaucoup et différents produits électroniques ou électriques qui consomment l'énergie sous forme de C.C ou de A.C qui convertit le nouvel AC sous la forme exigée. Un des paramètres de ces systèmes est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont les suivants [18, 66, 57] :

- la fréquence.
- l'amplitude des trois tensions .
- la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

L'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes. En revanche, ils ont participé à détériorer la qualité du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non-sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale :

Ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques [57]. Ces harmoniques se propagent de la charge vers le réseau et engendrent des chutes de tension harmonique qui s'ajoutent à la composante fondamentale de la tension délivrée par le réseau. Ce qui résulte en une tension affectée d'un contenu harmonique et qui pourrait causer de sérieux problèmes de compatibilité électromagnétique et la déformation de qualité de puissance est devenue un problème sérieux dans les systèmes de puissance électrique [59]. La correction de la forme d'onde est devenue donc plus que nécessaire si la déformation dépasse certaines limites, souvent atteintes dans les réseaux possédant des sources de perturbations [67].

Dans ce but, ce chapitre est une contribution à une meilleure connaissance des problèmes d'harmoniques, de leurs causes, et des solutions les plus couramment pratiquées. Différentes topologies des filtres actifs, leurs applications, les configurations, les méthodes de contrôle, et les issues de stabilité sont également discutées en ce chapitre. Les filtres actifs ont

été connus comme un outil efficace pour la réduction harmonique aussi bien que la compensation de puissance réactive, l'équilibrage de charge, régulation de tension, et la compensation de clignotement de tension "flicker" et sont à ce jour les solutions avancées de dépollution les plus adéquats tant au niveau de la production que de la distribution. Leur réponse est instantanée et ils s'adaptent automatiquement aux évolutions des perturbations introduites par les charges du réseau électrique.

IV.2. Effets des harmoniques :

Les tensions et les courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés. Ces grandeurs harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés [64]:

IV.2.1. Effets instantanés:

Sur les systèmes électroniques, les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation. Elles peuvent influencer les conditions de commutation des thyristors lorsqu'elles déplacent le passage à zéro de la tension .

IV.2.2 Effets à terme dus aux échauffements

Provoquent des échauffements supplémentaires notamment dans les lignes, les transformateurs et les batteries de condensateurs, causent des vibrations et des bruits dans les matériels électromagnétiques, peuvent perturber les liaisons et les équipements "courant faible".

IV.3 Taux de distorsion:

Le mathématicien et physicien français Joseph Fourier a montré que tout signal périodique distordu pouvait être représenté par une somme de signaux sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale (dans le cas présent 50 Hz) : ces signaux sont appelés des harmoniques. Toute fonction périodique peut être représentée par une série de Fourier de la forme :

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(h\omega t - \varphi_h) \quad (\text{IV.1})$$

φ_h : phase de la composante h lorsque $t=0$.

Y_h : La valeur efficace de la composante de rang h .

Y_0 : Amplitude de la composante continue généralement nulle en régime permanent [67].

IV.4. Le facteur de puissance :

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D), apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la Figure IV.1 [57]

$$S_{trms} = U_{trms} \cdot I_{trms} = \sqrt{(S^2 + dP^2)} = \sqrt{(P^2 + Q^2 + dP^2)} \quad (IV.2)$$

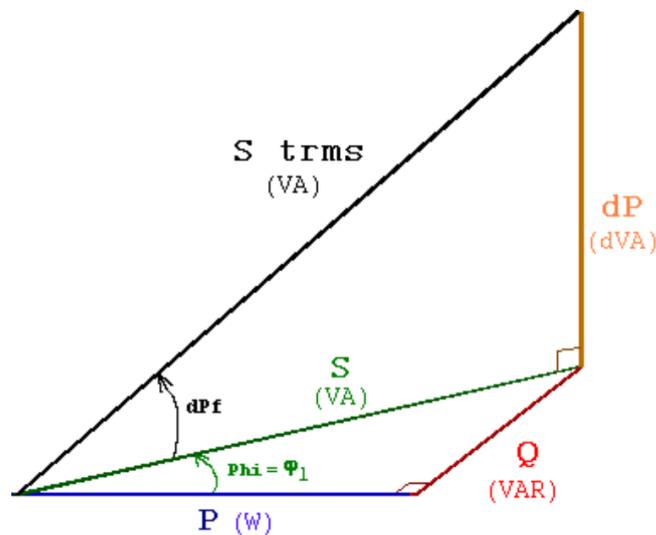


Figure IV .1 : Puissance déformante

IV.5. Les moyens de Réduction des perturbations harmoniques :

Il existe quelques méthodes permettant de minimiser la pollution harmonique provoquée par ces convertisseurs. Parmi les plus populaires et les plus efficaces, on retrouve le filtrage. Il existe deux voies pour le filtrage de la pollution harmonique, soit le filtrage passif et le filtrage actif. C'est cette dernière qui fera l'objet du présent chapitre.

VI.5.1 Filtrage passif :

Le principe consiste à insérer en amont de la charge un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonant série est placé en parallèle sur le réseau (figure IV.2a). Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Aussi, pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passe-haut du second ordre (figure IV.2b) est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Il est en général plus aisé et moins coûteux de rejeter par cette technique les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible [57, 64] .

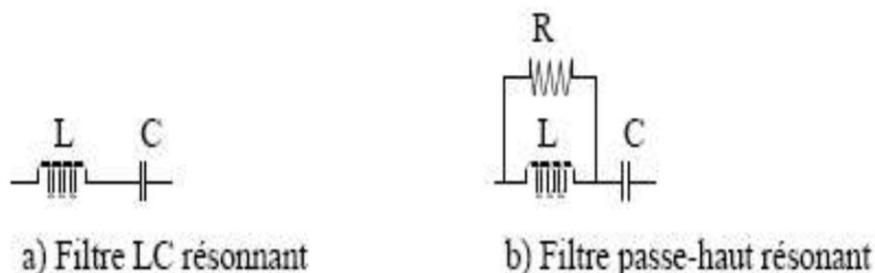


Figure IV.2: Filtre passif

IV.6 Les filtres actifs.

Les inconvénients inhérents aux filtres passifs (non adaptabilité aux variations de la charge et du réseau, phénomène de résonance) ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelés filtres actifs. Le filtre actif est connecté en série ou en parallèle suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques. En injectant un courant en opposition de phase avec les harmoniques de la charge (courants perturbateurs), le filtre actif permet d'améliorer la qualité de l'énergie électrique et répond ainsi à cette problématique [41].

Il existe plusieurs topologies de filtres actifs selon les critères de performance recherchés. Les filtres actifs peuvent être en série [57, 67], en parallèle [62,63] ou hybride, c'est-à-dire, l'association d'un filtre actif et d'un filtre passif [57, 66]. Il existe également l'association d'un filtre actif série et d'un filtre actif parallèle qui se nomme : conditionneur universel de la qualité d'onde [64]. Le filtre peut être à structure de courant ou à structure de tension selon le type d'élément lui servant de source d'énergie .

Une nouvelle configuration pour le convertisseur de puissance d'un filtre hybride triphasé est détaillée dans [48] Ce convertisseur de puissance utilise seulement une structure de pont en deux-bras et un condensateur. Le filtre hybride de puissance est configuré par le convertisseur de puissance proposé en série lié à un ensemble de filtres passifs (figure IV.3).

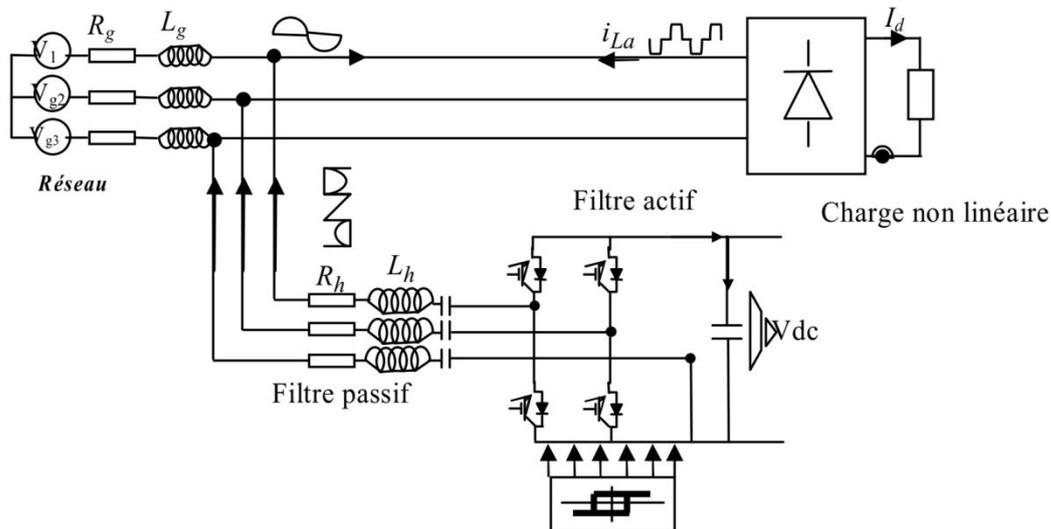


Figure IV.3 : Configuration du filtre hybride de puissance à l'aide du convertisseur de puissance proposé .

Pour identifier les déformations harmoniques, une nouvelle formulation de la théorie des puissances instantanées est introduite. L'objectif est d'améliorer la compensation des harmoniques et du déséquilibre. L'approche proposée dans [46] est fondée sur les réseaux neurologiques artificiels (RNA) pour calculer les composantes directe, inverse et homopolaire des tensions et des courants d'un système triphasé. D'ailleurs, les RNA sont employés pour apprendre une décomposition originale d'un signal triphasé. Ce signal de la tension ou du courant est converti en espaces $\alpha\beta$ et dq respectivement la transformé de Concordia et de

Park .L'espace dq autorise à décomposer le signal dans les expressions linéaires et séparer les composantes AC des composantes DC.

VI.7.Puissances instantanées dans le plan d_q [43] :

Plusieurs méthodes permettant l'identification des composantes harmoniques du courant à partir du calcul des puissances harmoniques. D'autres méthodes basées sur la soustraction de la partie active du courant fondamental du courant total peuvent être utilisées dans le cas où l'objectif du filtre actif est la compensation à la fois de l'énergie réactive et des harmoniques (figure IV.4. Dans notre travail, on a choisi de mettre en application la méthode des puissances Instantanées sous forme analogique vu sa rapidité [43.46] .

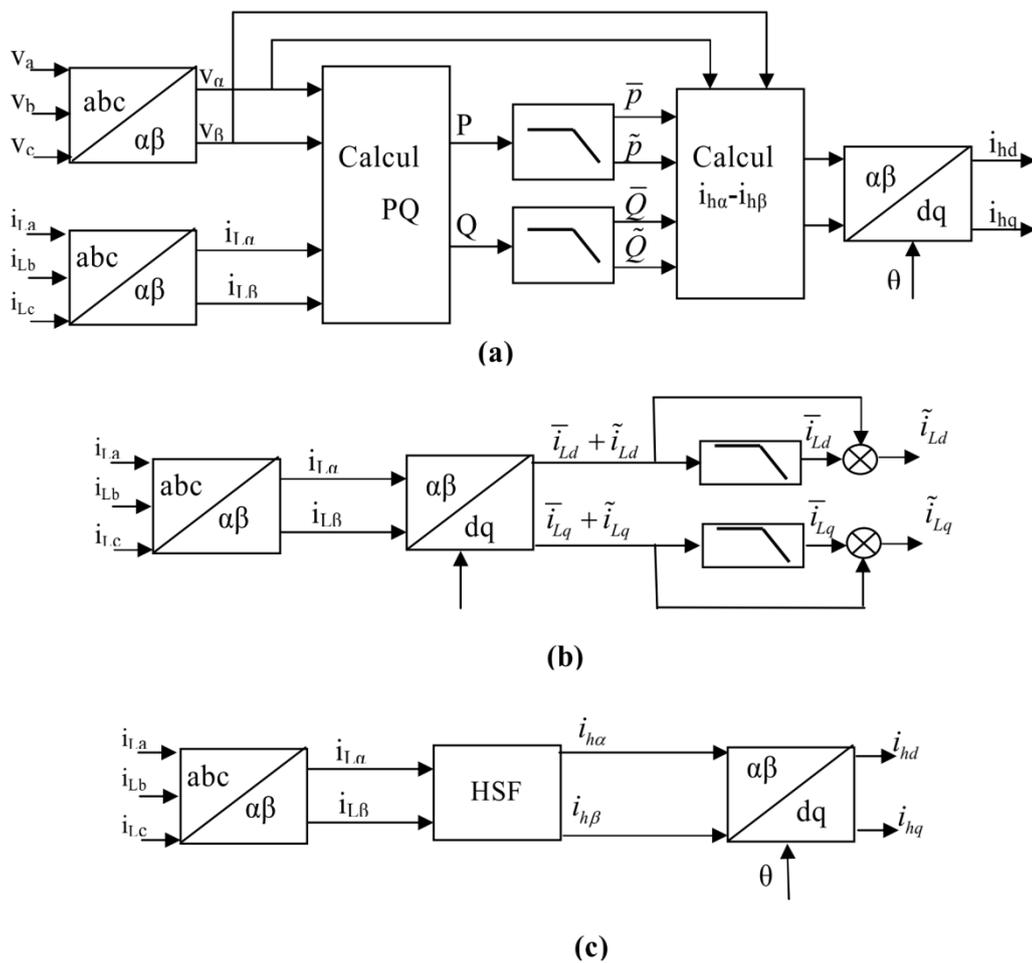


Figure IV.4 : Détection d'harmoniques dans un domaine temporel a) puissance instantanée b) plan synchrone fondamental dq c) méthode de détection basé sur HSF.

Les tensions et les courants dans le plan dq0 peuvent être obtenues à partir du référentiel d'axe ABC par la transformation de Clark, soit :

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.3})$$

La puissance instantanée est donnée par :

$$p = \frac{3}{2}(v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q) \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

$$q = \frac{3}{2}(v_d i_q - v_q i_d) \quad (\text{IV.5})$$

$$P_0 = 3v_0 i_0 \quad (\text{IV.6})$$

En outre nous avons :

$$P_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q + 2v_0 i_0) = p + p_0 \quad (\text{IV.7})$$

$$q_{3\phi} = \frac{3}{2}(v_a i_q - v_q i_d) = -\frac{1}{\sqrt{3}}[(v_a - v_c)i_c + (v_b - v_c)i_a + (v_c - v_a)i_b] \quad (\text{IV.8})$$

Nous pouvons réécrire l'équation ci-dessus comme :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} v_q & v_d & 0 \\ v_d & -v_q & 0 \\ 0 & 0 & 2v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$$

(IV.9)

L'un des avantages de l'équation (IV.9) est que nous pouvons compenser p, q et p0 individuellement. Si nous voulons compenser $0 \sim p, q, p$ puis :

$$\begin{bmatrix} i_{cq} \\ i_{cd} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_d^2 + v_q^2} \begin{bmatrix} v_q & v_d \\ v_d & -v_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\dot{P} & P_0 \\ -q & \end{bmatrix} \quad (\text{IV.10})$$

Avec la transformation inverse de Clark, nous pouvons trouver les courants de référence pour le filtre actif :

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cq} \\ i_{cd} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.11})$$

VI.8 Commande du filtre actif

Pour les méthodes de contrôle dans le domaine temporel, la plus connue de ces stratégies est sans doute la méthode des puissances instantanées. D'autres méthodes sont aussi utilisées comme le référentiel synchrone $d-q$ [57], le contrôle par le flux de base [64], le filtre de Notch [64], le contrôle PI [64], le contrôle par mode de glissement [43] et bien d'autres encore [62, 64, 67]. Le grand avantage des méthodes temporelles est leurs grandes rapidités de correction.

D'autres méthodes d'optimisation et d'estimation peuvent également être utilisées comme celle du filtre de Kalman [43, 44]. Cependant, à l'heure actuelle, les principaux développements portent sur des méthodes non classiques basées sur la théorie des réseaux de neurones artificielles et de la logique floue. Ces algorithmes de commande sont parfois utilisés en combinaison avec les méthodes déjà citées plus haut dans le but de les rendre plus performantes, alors que d'autres fois, elles forment la partie commande en entier. Une autre étape importante est celle de la génération des signaux de contrôle des semi-conducteurs de l'onduleur du filtre actif. Une grande variété d'approches comme celles de l'hystérésis, la modulation en largeur d'impulsion (MLI), la modulation vectorielle dans l'espace (MLI vectorielle), etc.

IV.8.1. Commande du filtre actif par hystérésis :

VI.8.1.1. Génération des signaux de contrôle par hystérésis :

Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste principalement à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation [64, 67]

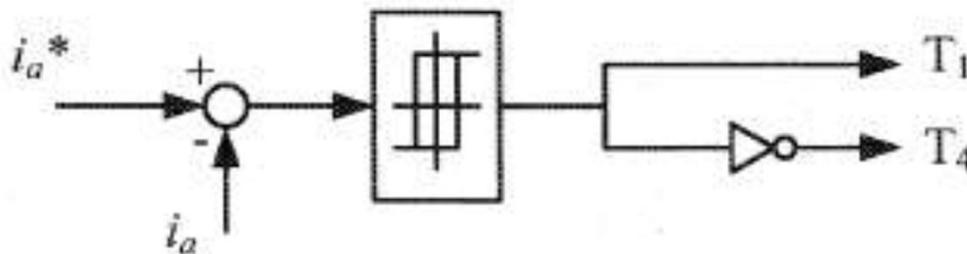


Figure IV.5: Principe de contrôle du courant par hystérésis

Ce type de commande est robuste et facile à mettre en œuvre. Elle possède un bon temps de réponse en régime dynamique, une bonne stabilité et une bonne précision. Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis qui détermine l'erreur sur les courants et la fréquence de commutation bien que cette dernière reste inconnue [67].

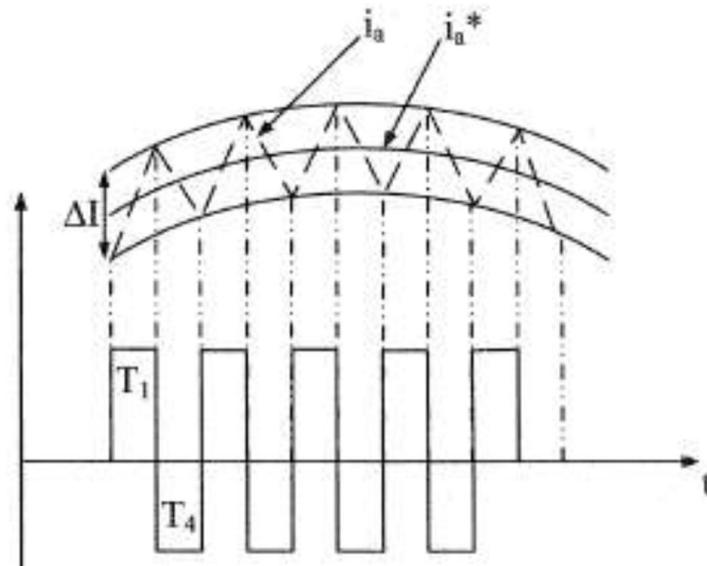


Figure IV.6 : Commande des interrupteurs par hystérésis.

Une autre commande avancée propose une amélioration importante de la technique de commande de la bande d'hystérésis de courant (HBCC) pour le filtre actif triphasé shunt de (APF) pour éliminer des harmoniques et pour compenser la puissance réactive développée par le redresseur triphasé. Dans cette technique, une prévision simple et rapide de la bande d'hystérésis est ajoutée à la commande (PLL) pour assurer une fréquence de commutation constante et la synchronisation des impulsions de modulation indépendamment sur des paramètres de système [45].

IV.8. Résultats de Simulation :

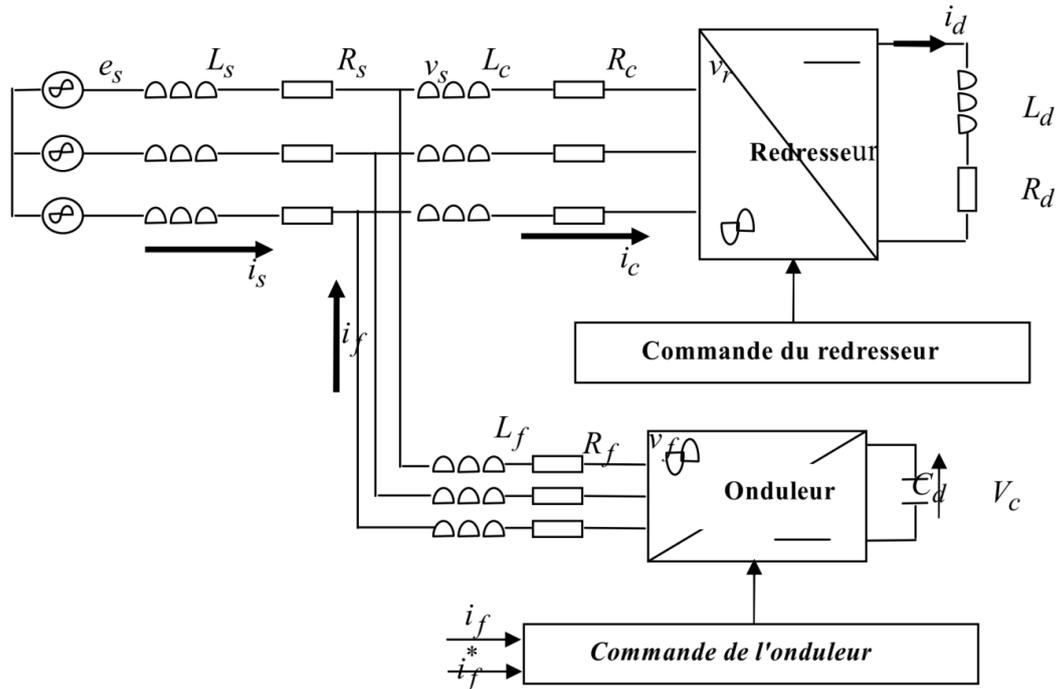


Figure IV.7:Schéma global du système à simuler

Dans cette partie on donnera les résultats de simulations qui nous permettent de mettre en évidence les caractéristiques et paramètres de la présente méthode de commande (Hystérésis).

La figure IV.8 montre les résultats comme suit, courant consommé par la charge polluante (redresseur à thyristors), le courant généré par la filtre et celui dans la source et la dernière c'est la régulation de la tension continue, pour le cas d'une bande de 100A et une inductance de découplage égale à $250\mu\text{H}$, telle que la tension continue est fixé pour une valeur de 900V.

Sous ces conditions on obtient une fréquence de commutation moyenne égale 2.6012kHz et un $\text{THD}_{50}=1.96\%$ et un $\text{THD}_{1000}=6.36\%$ (figures IV.8et IV.9). La figure IV.8 illustre la variation aléatoire de la fréquence de commutation.

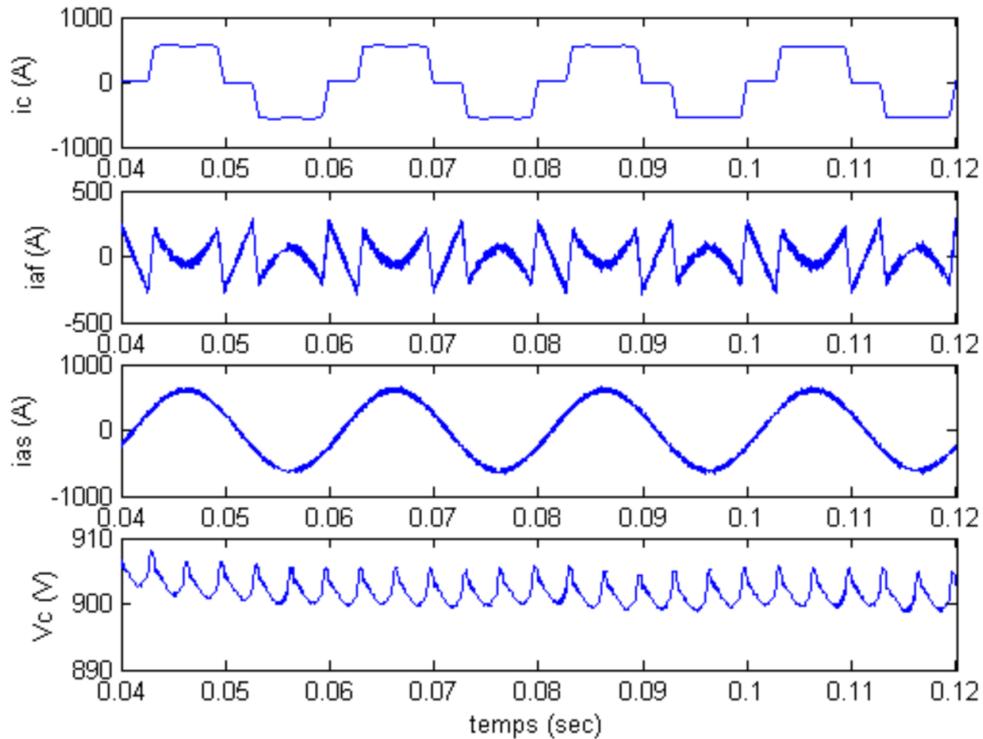


Figure IV.8 :De haut en bas (ic: courant de la charge, iaf: courant du filtre, ias: courant de source, Vc: tension aux bornes du condensateur)

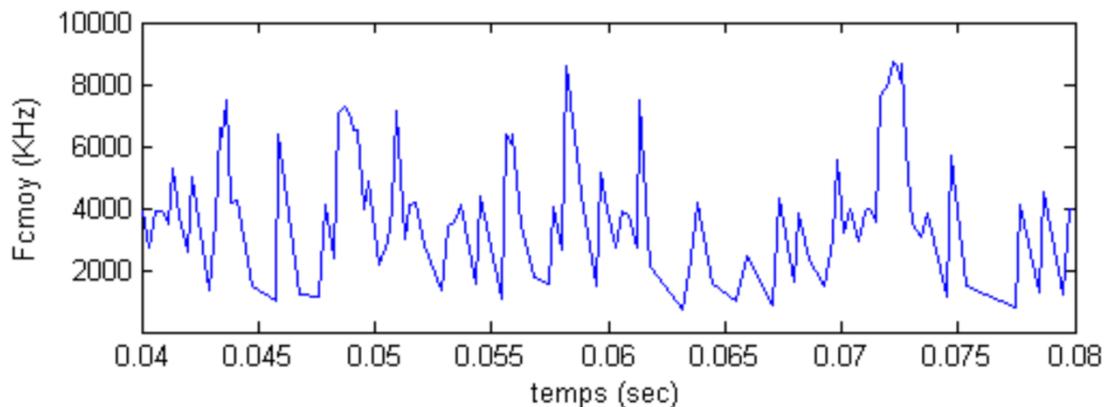


Figure IV.9 : Variation de la fréquence de commutation

La figure IV.10 présente l'analyse spectrale du courant de la phase 1 de la charge non linéaire et celui du réseau après filtrage. Le THD du courant de la charge est de $27,16\%$, et de $1,96\%$ côté réseau, ce qui confirme la bonne qualité de filtrage remarquée dans l'analyse temporelle.

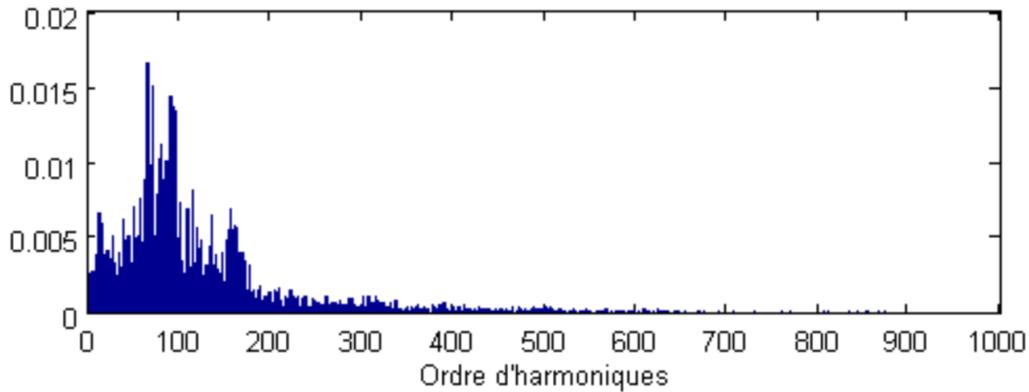


Figure IV.10: Spectre du courant filtré (rang d'harmoniques de 1 à 1000)

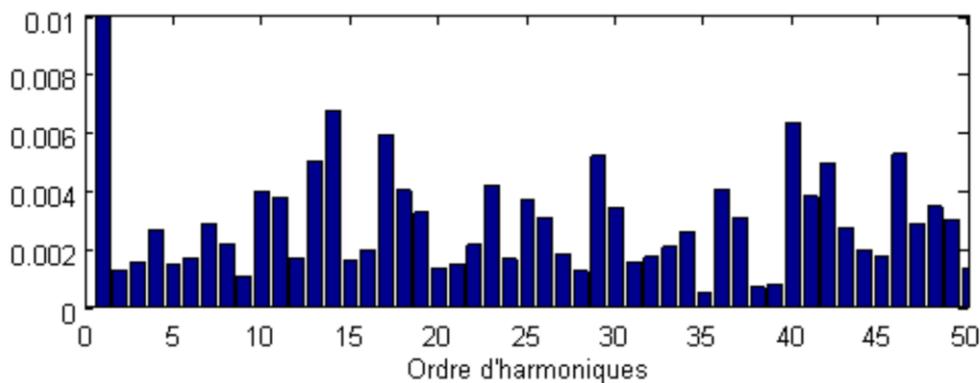


Figure IV.11 : Spectre du courant filtré (rang d'harmoniques de 1 à 50)

VI.8.2 Commande du filtre actif par la MLI intersective :

Cette commande est basée sur la comparaison d'une référence de tension (obtenue à partir de l'erreur entre les courants de référence et les courants mesurés) et une porteuse triangulaire. Le nombre des impulsions des porteuses est choisi multiple de trois pour s'assurer de la symétrie des trois phases, et impaire pour assurer la symétrie de fonctionnement entre les alternances positive et négative. Sachant que le courant de référence est composé des courants harmoniques avec des fréquences multiples de celle du courant fondamental. La bande passante du régulateur doit être assez large pour ne pas introduire un retard important.

La variation brusque des références des courants harmoniques pendant les intervalles de commutation, cause la saturation des régulateurs de courant. Ceci apparaît sous la forme des pics au niveau des courants filtrés. Ce qui dégrade sensiblement les performances de la compensation.

IV.9. Résultats de simulation et discussion

Dans cette section, on présente les résultats de simulation qui nous permettront d'évaluer les principales caractéristiques de la commande MLI intersective. Dans un premier temps on donnera le comportement du système et les résultats obtenus en régime permanent comme le montre la figure.2.15, le courant de phase avant filtrage, le courant du filtre, le courant de la source et enfin la régulation de la tension continue. Ces résultats sont obtenus pour une tension continue de 900 V, une inductance L_f égale à $250\mu H$, la fréquence de la porteuse est de 10 kHz, et la fréquence de coupure du régulateur est égale à 2kHz. Le THD calculé par rapport la 50ème harmonique égale à 0.798%(THD50), et pour le 1000ème harmonique (THD1000) égale à 2.68% (figures 2.17 et 2.18).

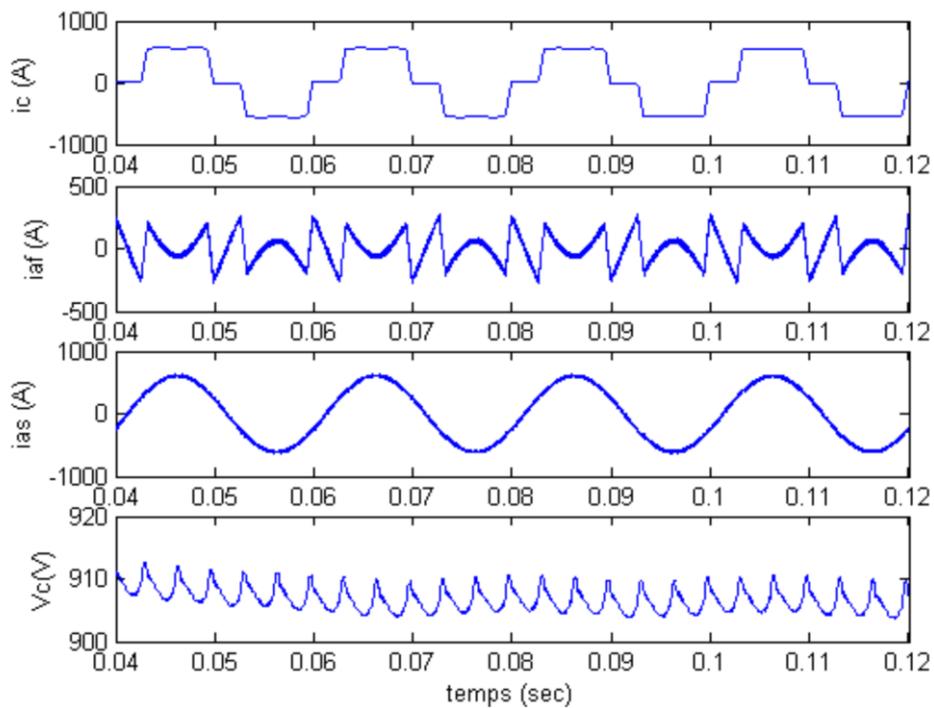


Figure IV.12: De haut en bas (i_c : courant de la charge, i_{af} : courant du filtre, i_{as} : courant de source, V_c : tension aux bornes du condensateur)

Dans un second temps, on présentera sur la Figure 2.16 le comportement du filtre actif pour une variation du courant de la charge polluante d'une valeur de 540A à 400 A.

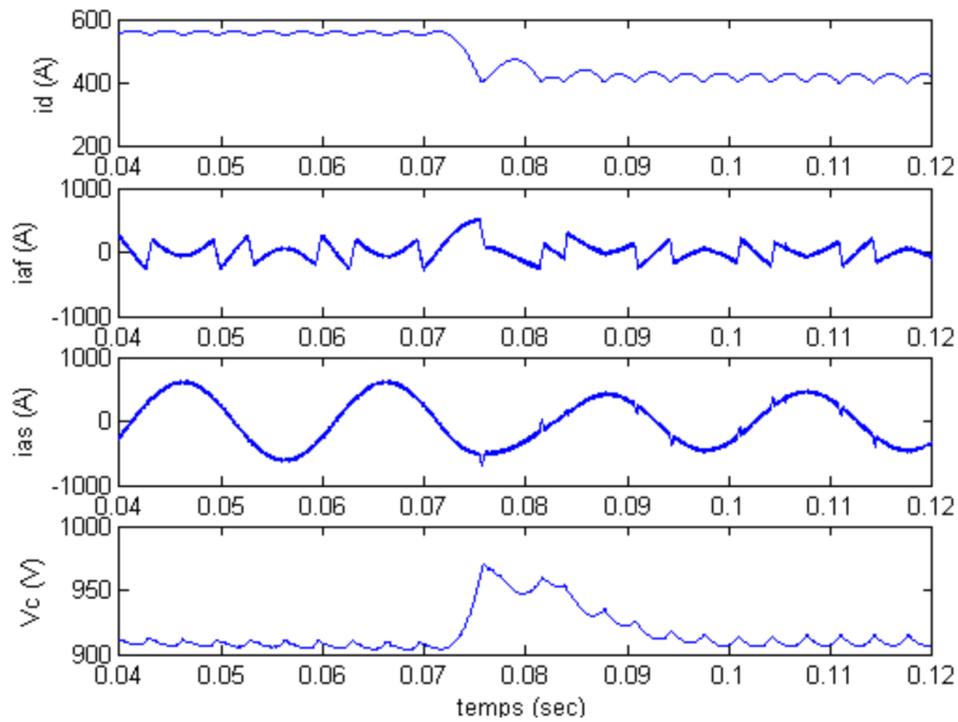


Figure.IV.13 : De haut en bas (i_d : courant redressé, i_{af} : courant du filtre, i_{as} courant de source, V_c : tension aux bornes du condensateur)

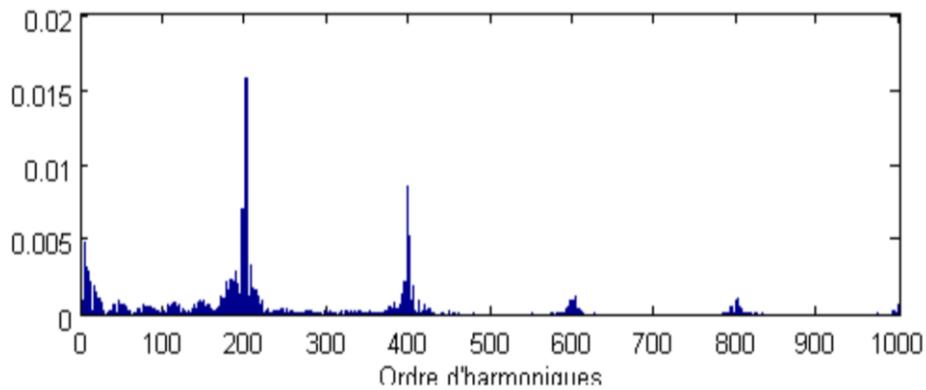


Figure IV.14 : Spectre du courant filtré (rang d'harmoniques de 1 à 1000)

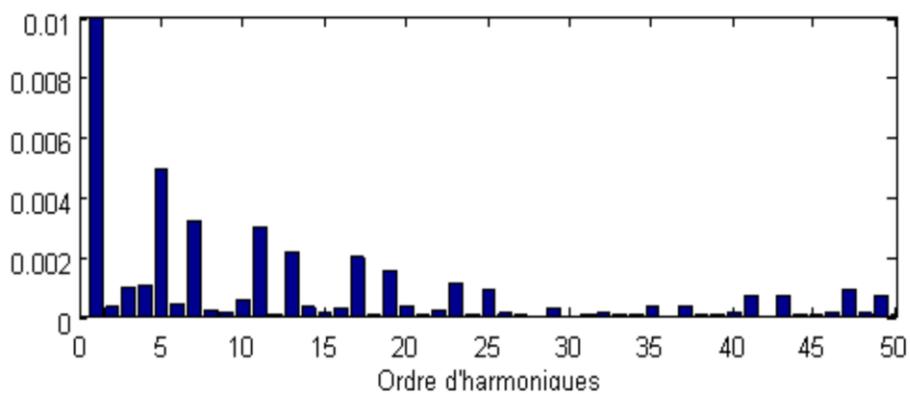


Figure IV.15 : Spectre du courant filtré (rang d'harmoniques de 1 à 50)

IV.10. Conclusion :

Dans le présent chapitre, nous avons vu l'origine, les effets ainsi que les normes qui s'appliquent au phénomène des harmoniques sur les réseaux électriques. Lorsque l'onde de la tension d'alimentation n'est plus sinusoïdale, il y a présence d'harmoniques. Cette pollution est principalement causée par la présence croissante des convertisseurs statiques qui sont vus par le réseau comme des charges non linéaires. Les dommages causés par la présence des harmoniques peuvent être plus ou moins importants selon la configuration du réseau et les équipements présents. Différentes normes existent afin d'établir les limites permissibles d'harmoniques sur les réseaux.

Dans ce chapitre, nous avons étudié le filtre actif shunt à structure tension, connecté en parallèle sur le réseau afin d'injecter les courants permettant d'éliminer la pollution harmonique des charges non linéaires. Ensuite, nous avons présenté deux types de contrôle du courant du filtre actif : le contrôle par hystérésis conventionnelle, le contrôle par modulation de largeurs d'impulsions ou MLI. Pour la suite de ce travail, avec une présentation de la simulation modulaire comme un outil puissant pour dépasser la complexité du système à étudier.

On constate que les THD obtenus avec les commandes dites hystérésis sont inférieurs à celui obtenu avec la MLI. Par contre, l'hystérésis conventionnelle, malgré sa simplicité, présente l'inconvénient d'une fréquence de commutation variable, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans l'onde du courant. La technique MLI, facile d'utilisation, assure alors un fonctionnement à fréquence fixe, un contenu harmonique parfaitement identifié mais possède aussi de par sa structure, des propriétés dynamiques limitées.

Dans les prochains chapitres, nous examinerons les principaux moyens de mitigation contre les harmoniques avec des nouvelles techniques utilisant des machines électriques (filtrage électromécanique).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

De nos jours, la qualité de l'énergie est un domaine de la plus haute importance. À l'heure où l'économie des pays industrialisés repose sur leurs capacités à produire ou à acheter l'énergie, l'utilisation adéquate et sans perte inutile est capitale. Cette thèse, bien que ne touchant qu'un de ces domaines de la qualité de l'énergie pourtant si vaste, a permis de faire un bref survol sur une chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents ainsi de donner des résultats de simulation de ce système sous environnement Matlab /Simulink, Dans le contexte d'énergie éolienne un état de l'art de système de conversion éolienne est présentée dans le premier chapitre, tel que la production éolienne commence à prendre une place très importante dans le monde moderne grâce aux avantages qu'elle présente, cette importance est due au développement des nouvelles technologies tel que les matériaux de construction, l'électronique de puissance et les techniques de commande. Une petite comparaison des génératrices est faite à la fin du premier chapitre, cette comparaison nous a mené à choisir la génératrice synchrone à aimants permanents.

Notre étude nous a permis de faire la modélisation générale de la chaîne de conversion éolienne, tel qu'en premier temps on a modélisé le vent à vitesse constante puis à vitesse variable, ce vent ayant une énergie cinétique entraîne la rotation des pales de l'aérogénérateur.

Ce dernier est lié au rotor de la GSAP avec l'arbre comme intermédiaire, on a vu le principe de la conversion de l'énergie mécanique en une énergie électrique dans la modélisation de la GSAP qui s'avère le meilleur moyen de production de l'électricité, cette énergie produite qui est sous forme sinusoïdale est redressée par un redresseur MLI, la sortie continue de ce dernier est liée avec le redresseur, cette capacité aide à maintenir la tension de bus continue et prend la place du source de tension. Cette tension continue et finalement convertie pour devenir sinusoïdale on utilisant un onduleur MLI, L'énergie produite est ensuite injectée dans le réseau pour être utilisé à volonté.

De plus on a présenté la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents afin d'avoir une commande similaire une machine à courant continu, Cette combinaison électrique nous a permis d'exécuter la stratégie de commande conçue à ce système éolien étudié qui était l'extraction du maximum de puissance appelée "MPPT" à l'aide d'un asservissement de vitesse réglée par un correcteur PI, les paramètres de ce dernier ont été calculés en utilisant la méthode de compensation de pôles.

Enfin, dans le quatrième chapitre des différentes topologies de filtres ont été examinées. Les filtres actifs de puissance ont de meilleures performances de compensation que les filtres passifs conventionnels. Une attention particulière a été portée sur les différents algorithmes de commande du filtre actif de puissance. En effet, ils sont beaucoup moins influencés par les variations de fréquence des harmoniques ainsi que de l'impédance de ligne. Il existe une grande variété de configuration pour le filtre actif. Dans ce travail, le filtre actif parallèle à structure de tension a été étudié. Différentes stratégies de commande ont été étudiées et simulées afin d'examiner quelques-unes de leurs caractéristiques. Les algorithmes de commande utilisés ont été basés principalement sur la méthode des puissances instantanées. Une comparaison entre les performances de compensation en régime transitoire et permanent, ainsi que le temps de réponse en régime transitoire a été effectuée.

Bibliographie

- [1] Bull, St.R. *Renewable energy today and tomorrow. Proc. IEEE*, vol. 89, 2001, pp. 1216–1226
- [2] M. Rapin, J.M. Noël, “*Energie Eolienne, principe - Etude de cas*”, Dunod, ISBN: 978-2-10-050801-3, 2010.
- [3] B. Sorensen, « *Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects* », Copyright. 2004 by Elsevier Science
- [4] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « *Éoliennes* », *Techniques de l'Ingénieur*, BM 4 640.
- [5] I. Munteanu, A. Iuliana Bratcu, N. Cutululis, E. Ceang, «*Optimal Control of Wind Energy Systems*», Copyright. 2008 by Springer.
- [6] T. GHENNAM, *Thèse de Doctorat*, «*Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation*», N° d'ordre: 162/2012.
- [7] M. Kassa IDJDARENE, «*Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes*», N° d'ordre : 40283/2010.
- [8] A. ABDELLI, «*Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive*»,
- [9] E. Hau, «*Wind-turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics*» Editions Springer, 2000.
- [10] A. Boyette, «*Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne*», thèse de doctorat de l'université de Heneri Poincaré, Nancy I, 11-12-2006.
- [11] Mayouf Mesaoud, *Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent*, thèse de magister de l'université de Batna, 13-02-2008
- [12] Frédéric Poitiers, *ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE - Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau*
- [13] Arnaud Davigny, *participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie*, Thèse de DOCTORAT de l'université de Lille, N° d'ordre : 4066/2007.
- [14] J. Marques, H. Pinheiro, H. A. Gründling, J. R. Pinheiro and H. L. Hey, «*A survey on*

Bibliographie

- variable-speed wind turbine system*», *Federal University of Santa Maria – UFSM. Group of Power Electronics and Control – EPOC. 97015-900, Santa Maria, RS, Brazil.*
- [15] LIVA ERIC RADAOROZANDRY, «*conception et optimisation des Machines synchrones avec des modèles analytiques en tenant compte de la saturation magnétique*», UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, 2007.
- [16] Hacene BENSAAFI, *Commande DTC-SVM d'une Machine Synchrones à Aimants Permanents, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2012.*
- [17] Noureddine BOUNASLA, «*Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrones à Aimants Permanents*», Université Ferhat ABBAS Sétif -1 (ALGERIE)/2014.
- [18] A. MIRECKI «*Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance* », *Thèse de doctorat de L'institut national polytechnique de Toulouse le 5 avril 2005.*
- [19] *Techniques de l'Ingénieur, « Convertisseurs et machines électriques », D 3 960*
- [20] Y. Chen, P. Pillay, A. Khan, «*PM Wind Generator Topologies* », *IEEE Transaction on industry application, vol. 41, No. 6, Novembre/Décembre 2005.*
- [21] F. Sahin, «*Design and development of a high-speed axial-flux permanent magnet machine* », *thèse de doctorat de l'Université de Eindhoven, 2001*
- [22] A. Davigny – «*Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertielle d'énergie* », *Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007.*
- [23] A. Schmidhofer, H. Weiss – «*Optimisation of Power Electronics for small stand alone wind power stations* », *10th European Conference on Power Electronics and Applications EPE'03, Toulouse, France, 2003, pp. 1-6.*
- [24] L. Leclercq – «*Apport du stockage inertielle associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes* », *Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004*
- [25] LATRECHE Mohammed Tahar «*Commande Floue de la Machine Synchrones à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien*», *Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012*
- [26] Adam MIRECKI «*Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance*», *THÈSE de Doctorat, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, N° d'ordre : 2213/2005.*
- [27] Fateh Louar, Fawzi Senani, Fares Bourourou, Ahmed Ouari «*Wind Conversion Chain Model Simulation with Closed Loop PI Controler*», *Int Conf Tunisia ACECS 2014.*
- [28] Dr. Gary L. Johnson, «*Wind Energy Systems* », *Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001*

Bibliographie

[39] J.-P LOUIS, C. BERGMANN. « *Commande numérique, régimes intermédiaires et transitoires* ». D 3 643

[40] M. Nayeripour, T. Niknam, “*Nonlinear Sliding Mode Control Design for Shunt Active Power Filter with the*

Minimization of Load Current”, *World Applied Sciences Journal* 4 (1): 124-132, 2008

[41] F. Defaÿ, “*Commande Prédictive Directe d’un Convertisseur Multicellulaire Triphasé Pour Une*

Application de Filtrage Actif”, *thèse de doctorat soutenue à l’université de Toulouse, France, 2008.*

[42] S. TADJER, “*Etude d’un système de compensation d’harmoniques en utilisant un générateur*

photovoltaïque GPV ”, *mémoire de magister en génie électrique soutenu à l’université de Boumerdes, 2008.*

[43] M. Nayeripour, T. Niknam, “*Design of a Three Phase Active Power Filter with Sliding Mode Control and*

Energy Feedback”, *World Academy of Science, Engineering and Technology* vol. 39, 2008.

[44] A. Munduate, E. Figueres, “*Robust Model-Following control of a three-level Neutral Point Clamped shunt*

active filter in the medium voltage range”, *elsevier; electrical power and energy systems, 2009.*

[45] N. Belhaouchet , L. Rahmani, “*A novel adaptive HBCC technique for three-phase shunt APF*”, *elsevier;*

electric power systems research vol. 79, pp. 1097-1104, 2009.

[46] D. Flieller a, D. Ould Abdeslam, “*Distortions identification and compensation based on artificial neural*

networks using symmetrical components of the voltages and the currents”, *elsevier, electric power systems*

Research, vol. 79, pp. 1145-1154, 2009.

[47] A. Emadi, A. Nasiri, B. Bekiarov, “*Uninterruptible Power Supplies and Active Filters*”, *Illinois institute of*

technology electrical and computer engineering department Chicago, IL, CRC PRESS 2005.

Bibliographie

- [48] B. Song, “Voltage Balancing Techniques For Flying Capacitors Used In Soft-Switching Multilevel Active Power Filters”, doctor of philosophy in electrical engineering, Blacksburg, Virginia, 2001.
- [49] G. Leslie, “Design and Analysis of A Grid Connected Photovoltaic Generation System With Active Filtering Function”, master of science in electrical engineering, Blacksburg, Virginia 2003.
- [50] M. T. Abolhassani, P. Niazi, “A Sensorless Integrated Doubly-Fed Electric Alternator/Active Filter (IDEA) for Variable Speed Wind Energy System”.
- [51] M. T. Abolhassani, P. Enjeti, “Integrated Doubly-Fed Electric Alternator/Active Filter (IDEA), a Viable Power Quality Solution, for Wind Energy Conversion Systems”
- [52] M. T. Abolhassani, P. Enjeti, “Stator Flux Oriented Control of an Integrated Alternator/Active Filter for Wind Power Applications”, IEMDC 2003.
- [53] M. T. Abolhassani, P. Enjeti, “A New Electrical Machine for Harmonic Compensation”, IECON, 2001.
- [54] M. T. Abolhassani, H.A. Toliyat, “An Electromechanical Active Filter”, IEMDC, Boston, 2001.
- [55] C. Collombet J. M. Lupin, “Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement”,
Cahier technique n° 152, Collection Technique de Schneider Electric.
- [56] P. Ferracci, «La qualité de l'énergie électrique», Cahier technique n°199, Collection Technique de schneider electric
- [57] M. Alali, «Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension», thèse
de doctorat en génie électrique, université Louis Pasteur – Strasbourg I, 2002.
- [58] T. Gourand, «Identification et Rejet de Perturbations Harmoniques Dans des Réseaux de Distribution Electrique», thèse de doctorat en automatique et informatique appliquée, école centrale de Nantes, 1997.

Bibliographie

- [59] S. Beaulieu, «*Etude et Mise au Point D'un Filtre Actif D'harmoniques en Vue D'améliorer la Qualité de L'alimentation Electrique*», mémoire de la maîtrise en ingénierie, université du Québec, Chicoutimi, Mai 2007.
- [60] H. Akagi, Y. Tsukamoto, A. Nabae, "Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 26, No. 1, January/February 1990. Application au Filtrage Actif Parallele Dans les Reseaux Electriques Basse Tension», thèse de doctorat en génie électrique, université de Haute-Alsace, France, 2005.
- [65] M. Abdusalam, «*Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales*», thèse de doctorat en génie électrique, université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2008.
- [67] M. Hacil, «*Filtrage actif des harmoniques des réseaux industriels avec l'optimisation des commandes robustes*», mémoire de magister en électrotechnique, université Mentouri, Constantine, Algérie, 2004
- and development of a high-speed axial-flux permanent magnet machine »*, thèse de doctorat de l'Université de Eindhoven, 2001
- [68] A. Davigny – « *Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie* », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007.
- [69] A. Schmidhofer, H. Weiss – « *Optimisation of Power Electronics for small stand alone wind power stations* », 10th European Conference on Power Electronics and Applications EPE'03, Toulouse, France, 2003, pp. 1-6.
- [70] L. Leclercq – « *Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes* », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004
- [71] LATRECHE Mohammed Tahar «*Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien*», Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012
- [72] Adam MIRECKI «*Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance*», THÈSE de Doctorat, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, N° d'ordre : 2213/2005.
- [80] Fateh Louar, Fawzi Senani, Fares Bourourou, Ahmed Ouari «*Wind Conversion ChainModel Simulation with Closed Loop PI Controler*», Int Conf Tunisia ACECS 2014.
- [81] Dr. Gary L. Johnson, « *Wind Energy Systems* », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001

Bibliographie

[82]. J.-P LOUIS, C. BERGMANN. « *Commande numérique, régimes intermédiaires et transitoires* ». D 3 643 une source spécifiée dans le document actif.

Annexe

Annexe A : Paramètres de la chaîne de conversion éolienne

Paramètres de la turbine éolienne	Masse volumique de l'air	$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$
Rapport de multiplicateur	$G=75$	
Rayon de la turbine	$R=4.5 \text{ m}$	
Paramètres de la GSAP	Résistance statorique	$R_s=0.895\Omega$
Inductance directe	$L_d=0.012 \text{ H}$	
Inductance transversale	$L_q=0.0211 \text{ H}$	
Coefficient d'inertie de la machine	$J=0.00141 \text{ N.m}$	
Coefficient du frottement	$f=0.001(\text{N.m.s/rad})$	
Nombre de paires de pôles	$p=3$	
Flux statorique	$\psi_f=0.9\text{Wb}$	
Paramètres de la charge MAS	Résistance statorique	$R_s=0.63\Omega$
Résistance rotorique	$R_r=0.4\Omega$	
Inductance statorique	$L_s=0.091\text{H}$	
Inductance rotorique	$L_r=0.091\text{H}$	
Inductance mutuelle	$L_m=0.091\text{H}$	
Coefficient du frottement	$f=0.001(\text{N.m.s/rad})$	
Nombre de paires de pôles	$p=3$	
Régulateur de vitesse	Paramètres des régulateurs PI	$C_{P_{max}} = 0.3406$ $t_{sd} = 0.005 \text{ s}$; $K_p = 18$; $K_i = 0.66$.
Paramètres des régulateurs IP	$C_{P_{max}} = 0.3406$ $t_{sd} = 0.02$ s ; $K_p = 6000$; $K_i = 98000$.	
Le régulateur du courant	Paramètres des régulateurs PI	$t_{ir} = 0.014 \text{ s}$; $K_{pi} = 31.3857$; $K_{ii} = 9415$
Le régulateur de puissance	Paramètres des régulateurs PI	$t_p = 0.015 \text{ s}$; $K_{pp} = 0.9333$; $K_{ip} = 0.033$
Le régulateur du Bus continue	Paramètres des régulateurs PI	$t_{sdc} = 0.025 \text{ s}$; $K_{pdc} = 4.9207$; $K_{idc} = 807.36$

Résumé

La mise en œuvre d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne nécessite une connaissance des moyens de production et de conversion de l'énergie. Dans ce contexte, deux structures, de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne utilisant la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) ont été modélisées avec des lois de comportement fines.

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

Différents techniques de commande de la MSAP (Commande vectorielle, contrôle de la tension du bus continu). Une commande vectorielle, permettant de découpler et réguler les puissances active et réactive produites par la MSAP a été établie. Le contrôle du convertisseur coté réseau, assurant le réglage de la tension du bus continu, et le contrôle des puissances sont présentés. ainsi que l'amélioration de la qualité d'énergie à l'aide d'une filtre actif .

Mots clés : Energie éolienne, MSAP, MLI ,GSAP .

المخلص

تنفيذ سلسلة تحويل طاقة الرياح يتطلب معرفة وسائل الإنتاج وتحويل الطاقة. في هذا السياق، نظامين لتحويل طاقة الرياح باستخدام آلة متزامنة مع مغناطيس دائم لأوضاع التشغيل (متصلة إلى الشبكة ووضع معزولة)، تمت ندمجها مع قوانين السلوك الدقيقة.

يتم تقديم نماذج من دائرة تحويل طاقة الرياح باستخدام مولد المغناطيس الدائم متزامن. استخدام تور بينات الرياح المغناطيس الدائم متزامن يجعل أنظمة تحويل طاقة الرياح أكثر جاذبية في سرعات متغير من تلك بسرعات ثابتة بسبب إمكانية استخراج الطاقة الأمثل في ظروف التشغيل المختلفة. وذلك راجع للطبيعة العشوائية للرياح التي تسبب في التغيير المتكرر في تردد المخرج للمولد، فمن الضروري ربط الحمولة عن طريق محولات ثابتة. تم تطوير نماذج تمثل السلوك الديناميكي لسلسلة التحويل في الوضعين معزولة ومتصلة بالشبكة. وقد تم تطوير تقنيات التحكم المختلفة (التحكم الشعاعي، السيطرة على طابق الجهد المستمر، السيطرة على عزم الدوران المباشر، التحكم المنفصل بين القوى الفعالة والإرتكاسية). وقد أنشئت تقنية التحكم الشعاعي بغرض فصل والسيطرة على القوى المنتجة من طرف المولد. السيطرة على العاكس من جهة الشبكة. وضمان السيطرة على طابق الجهد المستمر إضافة إلى السيطرة على القوى.

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح، المولد، العاكس، ووضع معزولة ومتصلة بالشبكة، السيطرة على عزم الدوران المباشر