

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة حسيبة بن بوعلي شلف

Université Hassiba Ben Bouali de Chlef (U.H.B.C)

Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique



Projet de Fin d'Etude en vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Domaine : Sciences & Technologies

Filière : Electrotechnique

Option : Commande Electrique

Thème :

**Commande robuste d'une chaine de conversion éolienne
à base de convertisseur multi niveaux**

Présenté par :

BENKAHLA Ahmed

BENABDELLAH Ibrahim

Soutenu le 26/06/2024 devant le jury composé de :

BOUNADJA Elhadj	UHBC	Président
TALEB Rachid	UHBC	Encadreur
KANSAB Abdelkader	UHBC	Examineur
BOUDJAMA Alabidine	UHBC	Examineur

Promotion : 2024

REMERCIEMENT

En préambule à ce mémoire nous remercions **ALLAH** de nous avoir aidé
et donner la patience et le courage d'accomplir ce modeste travail.

Au terme de ce travail, nous souhaitons remercier en premier lieu **Pr. TALEB
Rachid** et
Dr. BENBIGA Ahmed pour avoir dirigé notre travail, leurs supervisions,
leurs critiques constructives et leurs précieux conseils nous ont été très
utiles.

Nous remercions le président et les membres de jury de nous avoir
honorés en acceptant de juger et d'évaluer notre travail.

Un grand merci tous les professeurs du département d'électrotechnique, et
tous les étudiants de l'option commande électrique.

Enfin, que tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation
de ce travail, en particulier l'ensemble de nos enseignants qui sont à
l'origine de tout notre savoir,

Soient remerciés.

Dédicace

Tous d'abord, nous remercions Allah de nous avoir accordé santé,

énergie, courage, volanté et réussite

*À mes chère parents Quoi que je fasse ou que je dise,
je ne saurai point vous remercier comme il se doit.*

Votre affection me couvre,

*Votre bienveillance me guide et votre présence à mes côtés a
toujours été ma source de force pour affronter
les différents obstacles*

A mon cher père et A ma chère maman.

À mes très chers frères.

Dédicaces spéciales à mes amis.

A mes amis de la promo CE.

*Mon binôme **IBRAHIM***

À toute ma famille.

BENKAHLA Ahmed

Dédicace

Tous d'abord, nous remercions Allah de nous avoir accordé santé,

énergie, courage, volanté et réussite.

*À mes chère parents Quoi que je fasse ou que je dise,
je ne saurai point vous remercier comme il se doit. Votre affection me
couvre,*

*Votre bienveillance me guide et votre présence à mes côtés a
toujours été ma source de force pour affronter les différents
obstacles*

A mon cher père et A ma chère maman.

À mes très chers frères.

Dédicaces spéciales à mes amis.

A mes amis de la promo CE.

*Mon binôme **AHMED.***

À toute ma famille.

BENABDELLAH Ibrahim

الملخص:

تركز هذه الأطروحة على تطوير استراتيجية تحكم قوية لتحسين أداء سلسلة تحويل الرياح باستخدام محول متعدد المستويات. تُعرف المحولات متعددة المستويات بقدرتها على تقليل التوافقيات وتحسين جودة الطاقة التي تنتجها توربينات الرياح. يتم إجراء المحاكات في Matlab/ Simulink et simpower

تقدم هذه الدراسة مساهمة كبيرة في تحسين سلاسل تحويل الرياح، مع التركيز على التكامل الفعال للمحولات متعددة المستويات وتحسين متانتها في مواجهة ظروف التشغيل المختلفة والاضطرابات الخارجية.

كلمات مفتاحية: توربينات الرياح. مولد متزامن ذو مغناطيس دائم. التحكم قوي. التحكم في وضع الانزلاق

Résumé :

Cette thèse se concentre sur le développement d'une stratégie de contrôle robuste pour améliorer les performances d'une chaîne de convertisseurs éoliens utilisant un convertisseur multiniveau. Les convertisseurs multiniveaux sont connus pour leur capacité à réduire les harmoniques et à améliorer la qualité de l'énergie produite par les éoliennes. Les simulations sont réalisées sous Matlab/ Simulink et simpower

Cette étude apporte une contribution significative à l'optimisation des chaînes de convertisseurs éoliens, en se concentrant sur l'intégration efficace des convertisseurs multiniveaux et en améliorant leur robustesse face à différentes conditions de fonctionnement et perturbations externes.

Mots clés : éolienne, génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), commande robuste, commande par mode glissant (CMG).

Abstract :

This thesis focuses on developing a robust control strategy to improve the performance of a wind converter chain using a multilevel converter. Multilevel converters are known for their ability to reduce harmonics and improve the quality of power produced by wind turbines. Simulations are performed in Matlab/ Simulink et simpower

This study makes a significant contribution to the optimization of wind converter chains, focusing on the efficient integration of multilevel converters and improving their robustness against different operating conditions and external disturbances.

Keywords : wind turbine, permanent magnet synchronous generator (PMSG), robust control, sliding mode control (SMC).

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : Généralités sur les éoliennes

I.1. Introduction.....	4
I.2. Descriptif de la turbine éolienne	4
I.3. Principe de la production d'énergie électrique par les aérogénérateurs	4
I.4. Types d'éoliennes.....	5
I.4.1. Eoliennes à axe verticale.....	5
I.4.2. Eoliennes à axe horizontale	6
I.5. Classification des éoliennes	6
I.6. Principaux constituants de deux types des éoliennes.....	7
I.7. Les éoliennes à vitesse fixe et variable	9
I.7.1. Les éoliennes à vitesse fixe :.....	9
I.7.2. Eolienne à Vitesse variable :.....	10
I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	11
I.8.1. Avantages :.....	11
I.8.2. Les inconvénients :	12
I.9. Production de l'énergie électrique à partir de l'éolienne	12
I.10. Classification des machines à aimants permanents	13
I.10.1. Différents types de machines à aimants permanents	13
I.10.2 Différentes structures de la machines synchrones à aimants permanents.....	14
I.11. Turbine entraînant une génératrice synchrone à aimant permanent :	16
I.12. Situation actuelle de l'énergie éolienne dans l'Algérie.....	16
I.13. Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde.....	19
I.13.1 Capacité installé :	19
I.13.2 Production d'électricité.....	20
I.13.3 Investissements et tendances :	21
I.13.4 Réduction des coûts :	21

I.14. Conclusion :	22
--------------------	----

CHAPITRE II: MODELISATION DE LA CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE

II.1- INTRODUCTION :	24
II.2- Configuration globale du système éolienne étudié	25
II.3- Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne	25
II.3.1. Système de décrochage aérodynamique (Stall control)	25
II.3.2- Système d'orientation des pales (pitch control)	26
II.4 - Modélisation de la vitesse du vent	27
II.5 Conversion de l'énergie éolienne	28
II.5.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	28
II.5.2. Loi de Betz	29
II.5.3- Limite de BETZ	32
II.6- Modélisation de la chaîne de conversion éolienne	32
II.6.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine à vitesse variable	33
II.6.2. Modélisation mécanique de la turbine	33
II.6.3. Modélisation de la turbine	35
II.6.4. Modèle du multiplicateur	37
II.6.5. Equation dynamique de l'arbre de transmission	37
II.7- Différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable [25]	38
II.8. Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP)	39
II.8.1. Circuit équivalent d'un générateur synchrone	40
II.8.2. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la GSAP	41
II.8.3. Mise en équation de la MSAP	41
II.8.4. Transformation de Park	42
II.8.5. Modèle de la MSAP dans le repère de Park	44
II.9. Modélisation des convertisseurs électriques	46
II.9.1. Hypothèse simplifiée	46
II.9.2. Modélisation du redresseur à MLI :	46
II.9.3. Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux	50
II.9.4. Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC	54

II.10. CONCLUSION	60
CHAPITRE III: COMMANDE ET SIMULATION DE LA CHAINE EOLIENNE	
III.1 Introduction	62
III.2 Commande et simulation de la chaine éolienne du côté machine (turbine + GSAP).....	62
III.2.1 Commande de la vitesse de rotation de la machine par (MPPT)	62
III.2.2 Synthèse des régulateurs	63
III.2.3 Commande des puissances active et réactive côté GSAP	65
III.2.4 Réglage des courants direct et quadrature	66
III.2.5 Résultats des simulations	69
III.3 Contrôle des puissances entre l'onduleur et le réseau électriques	71
III.3.1 Commande de la tension de bus V_{dc} et des puissances actives et réactives injectées dans le réseau.....	71
III.3.2 Synthèse des régulateurs	72
III.3.3 Résultats des simulations	73
III.4. Commande robuste de la GSAP	76
III.5. Commande par mode glissant	77
III.5.1. Conception de la commande par mode glissant	78
III.6. Les avantages de la commande	83
III.7. Application de commande par mode glissant sur la GSAP	83
III.5.1. pour le régulateur de vitesse.....	84
III.5.2. pour la commande de la composante directe du courant statorique.....	85
III.5.3. pour la commande de la composante en quadrature du courant statorique.....	86
III.5.3 Résultats des simulations.....	86
III.4 Conclusion.....	87
CONCLUSION GENERALE.....	90
Annexe.....	92

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Principe de la conversion d'énergie	5
Figure I.2 Exemples des éoliennes	6
Figure I.3 Principaux composants d'une éolienne	7
Figure I.4. Profil de la pale.....	8
Figure I.5 composent de la nacelle.....	9
Figure I.6 Eoliennes à vitesse variable.....	10
Figure I.7 Représentation simplifiée d'un MCC-AP	13
Figure I.8 Vue schématique des machines.	15
Figure I.9 de gauche représente une MSAPFR intérieur et celle à droite représente MSAPFR extérieur.....	15
Figure I.10 Disposition d'un bobinage à double couche dans une MSAPFA ..	17
Figure I.11 Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).....	18
Figure I.12 Cartes saisonnières de la vitesse du vent (m/s)	16
Figure I.13 Capacité totale installée (MW) et prévisions 2001-2021.	20
Figure I.14 Les 10 meilleurs pays dans la production de l'énergie éolienne du monde.	20
Figure II.1 La configuration du système éolienne adopté	25
Figure II.2 Flux d'air sur un profil de pale (Stall)	26
Figure II.3 Variation de l'angle de calage d'une pale ...	27
Figure II.4 Bloc de simulation de vitesse de vent	28
Figure II.5 Profil du vent	28
Figure II.6 Colonne d'air animée d'une vitesse V ...	29
Figure II.7 Tube du courant autour d'une éolienne ...	30

Figure II.8	Caractéristique du coefficient de puissance.....	31
Figure II.9	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	31
Figure II.10	Vitesse du vent (V) et vitesse tangentielle ($\Omega_r R_t$)	32
Figure II.11	Définition de trois niveaux de vent (faible, moyen et fort)	33
Figure II.12	Représentation du système éolien.....	34
Figure II.13	Modèle simplifié de la turbine éolienne	35
Figure II.14	Schéma de la turbine éolienne	36
Figure II.15	Coefficient aérodynamique (C_p) en fonction du ratio de vitesse (λ).....	37
Figure II.16	schémas bloc du modèle de la turbine	38
Figure II.17	Zones de fonctionnement d'une éolienne.....	39
Figure II.18	Schéma électrique équivalent d'un générateur synchrone	40
Figure II.19	Bilan de puissance d'un générateur synchrone.....	41
Figure II.20	Représentation de la machine synchrone à aimants permanents	42
Figure II.21	Transformation triphasée-diphasée	43
Figure II.22	Schémas équivalents du GSAP selon les deux axes d et q	45
Figure II.23	Schéma bloc du modèle électromagnétique de la GSAP dans le repère (d,q)	46
Figure II.24	topologies de base d'un redresseur de tension.....	48
Figure II.25	Schéma fonctionnel du redresseur triphasé à MLI.....	50
Figure II.26	onduleur de tension triphasé à deux niveaux	52
Figure II.27	Principe de contrôle à MLI d'un bras de commutation	53
Figure II.28	Commande des interrupteurs par MLI sinus-triangulaire.....	54
Figure II.29	Schéma de l'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC	55
Figure II.30	Schéma block de l'onduleur triphasé à structure NPC	58
Figure II.31	Principe de la MLI à deux porteuses pour un onduleur à trois niveaux.....	59
Figure II.32	Tension simple V_a , à la sortie de l'onduleur à 3niveaux.....	59
Figure II.33	Courant de phase I_a , à la sortie de l'onduleur à 3niveaux	60
Figure III.1	Puissance maximale en fonction de la vitesse du vent	63
Figure III.2	Stratégie de contrôle de la vitesse	64
Figure III.3	Schéma bloc de MPPT par un PI	64
Figure III.4	Schéma bloc de MPPT par un PI après compensation du pôle.....	65
Figure III.5	Boucle de régulation du courant I_d	66
Figure III.6	Boucle de régulation du courant i_d après compensation du pôle	67
Figure III.7	Boucle de régulation du courant i_q	68

Figure III.8 Profil du vent	69
Figure III.9 Vitesse de rotation mécanique de la GSAP.....	70
Figure III.10 Allure de couple électromagnétique	70
Figure III.11 Courant direct et quadrature de GSAP coté machine.....	70
Figure III.12 Management de l'énergie entre la GSAP et le réseau	71
Figure III.13 Schéma bloqué du PLL.....	73
Figure III.14 Courant en quadrature coté réseau	74
Figure III.15 Courant en direct coté réseau.....	74
Figure III.16 Régulation de la tension de bus continue Vdc	74
Figure III.17 Courant de bus continue Idc.....	75
Figure III.18 Puissance active coté réseau	75
Figure III.19 Puissance réactive coté réseau	76
Figure III.20 Les différents mode pour la trajectoire dans le plan de Phase.....	77
Figure III.21 Différents modes de convergence pour la trajectoire d'état.....	79
Figure III.22 Commande équivalente	80
Figure III.23 Fonction signe.....	81
Figure III.24. Régulation de la vitesse de rotation de la GSAP.....	86
Figure III.25. Régulation du courant direct Id.....	87
Figure III.26. Régulation du courant en quadrature Iq.....	88
Figure III.27. Régulation du couple électromagnétique	88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.I.1 Classification des éoliennes selon leur puissance nominale.....	6
Tableau II.1 Huit états possibles des interrupteurs.....	48

SYMBOLES ET NOTATIONS

GSAP : Génératrice Synchrones à Aimants Permanents

MCC : Machine à Courant Continu

MAPSB : Machine à Aimants Permanents Sans Balais

MSAPFR : Machines Synchrones à Aimant Permanent Flux Radial

MSAPFA : Machines Synchrones à Aimant Permanent Flux Axial

MSAP : Machines Synchrones à Aimant Permanent

AIE : l'Agence Internationale de l'Energie

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

AC : Alternating Current

DC : Direct Current

NPC : Neutral Point Clamped

MPPT : Maximum Power Point Tracking

PLL : Phase Locked Loop

PI : Proportionnel Intégral

FTBF : Fonction de Transfert en Boucle Fermée

FTBO : Fonction de Transfert en Boucle Ouverte

CMG : Commande par Mode Glissant

E_c : énergie cinétique.

ρ : La masse volumique de l'air (Kg/m^3), approximativement $1.225 Kg/m^3$ à la pression atmosphérique à $15^\circ C$.

V : La vitesse du vent (m/s)

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

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

R_t : Rayon de la surface balayée en [m].

V_v : Vitesse du vent en [m/s].

Ω_t : Vitesse de rotation des pales de la turbine en [rad/s].

C_{aer} : Couple de l'aérogénérateur.

Ω_t : Vitesse de la turbine

J_t : Moment d'inertie de la turbine.

C_g : Couple de l'aérogénérateur appliqué sur le générateur.

Ω_{mec} : Vitesse appliquée sur le générateur

J_g : moment d'inertie du générateur.

f : Coefficient de frottement visqueux.

$[v_a v_b v_c]^T$: Vecteur tension de phases statoriques.

$[i_a i_b i_c]^T$: Vecteur courant de phases statoriques.

$[\Phi_a \Phi_b \Phi_c]^T$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

R_s : résistance des phases statoriques [Ω].

We : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

θ_{geo} : Ecart angulaire de la partie mobile par rapport à la partie fixe (rotor par rapport au stator)

p : Nombre de paires de pôles

θ_r : Angle électrique.

C_m : couple moteur.

$f\Omega$: couple de frottements visqueux.

f : coefficient des frottements visqueux.

J : moment d'inertie de la machine.

$Vr(t)$: signal de référence.

$Vp(t)$: signal triangulaire (porteuse)

e_q : f.é.m dans la machine sur l'axe q.

e_d : f.é.m dans la machine sur l'axe d.

constante du temps électrique.

K_P : Gain proportionnel

K_i : Gain Intégral

l_s : l'inductance propre statorique.

M_s : l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : les courants de phases statoriques.

i_d, i_q : représente l'image des courants statoriques dans le repère de Park.

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : sont les tensions statoriques.

V_d, V_q : l'image des tensions statoriques dans le repère de Park.

L_d : l'inductance cyclique statoriques sur l'axe directe dans le repère du Park.

L_q : l'inductance cyclique statoriques sur l'axe quadratique dans le repère du Park.

B : L'inductance magnétique créée dans l'aimant permanent.

Φ_f : Le flux magnétique créée par l'aimant permanent.

Face à l'augmentation croissante de la demande énergétique et à l'épuisement imminent des ressources fossiles, exacerbé par la crise pétrolière de 1973, la recherche de solutions alternatives de production d'énergie s'est intensifiée. Certains pays industrialisés se sont tournés vers l'énergie nucléaire, tandis que d'autres ont adopté des politiques d'énergies renouvelables, en particulier l'énergie éolienne. La finitude des réserves d'énergies fossiles, dont l'exploitation ne peut se prolonger que sur quelques décennies, pose un défi majeur pour l'avenir. De plus, les déchets radioactifs générés par les centrales nucléaires constituent une grave menace pour l'environnement.

Dans ce contexte et dans une perspective économique, l'énergie éolienne se présente comme une solution particulièrement avantageuse pour la production d'électricité et la protection de l'environnement. Outre les installations de grande capacité, des systèmes éoliens de petite taille se développent de plus en plus pour les sites isolés. Aujourd'hui, l'énergie éolienne s'affirme comme la source d'énergie la plus propre et la plus économique, justifiant l'enthousiasme croissant pour cette technologie. Cependant, il est essentiel de reconnaître qu'elle ne peut, à elle seule, définir une politique énergétique globale.

Le principe de l'aérogénérateur repose sur celui des moulins à vent. Les pales sont entraînées par le vent et sont connectées à un rotor et à une génératrice. Quand le vent est adéquat (15 km/h au moins), les pales tournent et entraînent la génératrice qui génère de l'électricité.

La génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) est une machine utilisée pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle se distingue par son nombre élevé de pôles et présente de nombreux avantages. Son utilisation dans la chaîne de conversion éolienne rend le système à vitesse du vent variable plus attrayant. Le couple volumique de la GSAP est élevé, l'inertie très faible et les inductances sont faibles, la génératrice présente toutes ces caractéristiques, ce qui lui confère des performances élevées, un rendement élevé et une meilleure contrôlabilité, ce qui en fait un véritable concurrent de la génératrice asynchrone.

Les convertisseurs statiques triphasés de tension bidirectionnels jouent un rôle crucial dans la chaîne de conversion électromécanique d'un système éolien, car ils permettent de réguler les puissances actives et réactives injectées sur le réseau électrique en fonction de la vitesse du vent.

La commande à structure variable qui par sa nature non linéaire, possède cette robustes. Le réglage par mode de glissement est fondamentalement une méthode qui force la réponse à glisser le long d'une trajectoire prédéfinie

Le présent mémoire sera organisé en trois chapitres comme suit :

Le premier chapitre contiendra des généralités sur les systèmes éoliens. Nous avons décrit le principe de fonctionnement des aérogénérateurs à vitesse fixe et celle à vitesse variable, ainsi que le potentiel de l'énergie éolienne en Algérie.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la chaîne éolienne complète, en commençant par la turbine passant par la GSAP en terminant par les convertisseurs statiques et leur stratégie de commande.

Dans le troisième chapitre on va voir la technique classique par régulation PI adoptée pour la commande du système éolien en mode de fonctionnement sain, tel qu'on va calculer ces paramètres avec deux méthodes, celle de placement de pôles et celle de compensation de pôles. Nous avons présenté la commande par mode glissant (CMG) qui, par sa nature, est une commande non linéaire. On y présente les principes théoriques de cette commande et la conception de ses régulateurs. Finalement, Une étude comparative entre cette dernière et la commande PI est accomplie à travers des simulations numériques appliquées à la chaîne éolienne.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR
LES EOLIENNES

I.1. Introduction

L'énergie éolienne est considérée comme une source d'énergie renouvelable non polluante et économique viable, ce qui en fait l'une des plus importantes et prometteuses solutions. L'énergie éolienne ne doit être considérée que comme une source d'énergie supplémentaire plutôt que comme un substitut aux solutions traditionnelles [1].

Actuellement, les éoliennes installées dans le monde sont basées sur des turbines tournantes à vitesse fixe ou variable grâce à la technologie de l'industrie éolienne. Les nouvelles éoliennes fonctionnent à différentes vitesses. Par rapport aux éoliennes à vitesse variable, ce mode de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de réduire les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite [2].

Le premier chapitre a abordé l'énergie éolienne et les principes de la production d'énergie électrique. Ensuite, nous avons discuté des caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal et des génératrices adaptées aux différents types et configurations d'éoliennes.

I.2. Descriptif de la turbine éolienne

Un aérogénérateur, également connu sous le nom de turbine éolienne, est un appareil qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique via une génératrice électromagnétique combinée à la turbine éolienne [3].

Si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre, ce couplage mécanique peut être effectué directement ou peut être effectué à l'aide d'un multiplicateur.

Enfin, l'énergie électrique produite peut être utilisée pour alimenter des charges isolées, stockée dans des accumulateurs ou distribuée par un réseau électrique.

I.3. Principe de la production d'énergie électrique par les aérogénérateurs

Une éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Les pales captent l'énergie du vent et la transforment en couple mécanique pour que la génératrice puisse la

convertir en électricité (Voir Figure. I.1).

Le rotor tourne en raison du vent. L'arbre principal de la nacelle entraîne un alternateur qui produit de l'électricité. Un multiplicateur de vitesse doit augmenter la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne jusqu'à une vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique (50 Hz) tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent [1].

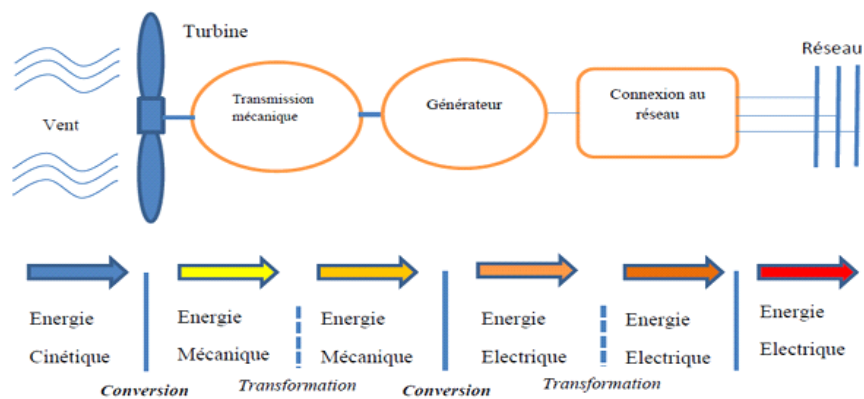


Figure I.1 : Principe de la conversion d'énergie.

I.4. Types d'éoliennes

Il existe principalement deux types de turbines éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol, on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal (Figure I.2) [4].

I.4.1. Eoliennes à axe verticale

Le fonctionnement repose sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air sous différents angles est soumis à des forces d'intensité et de direction variables. Un couple moteur est produit lorsque ces forces sont combinées. En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils sont le résultat de la combinaison de la vitesse du vent et de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical). Le Français Darrieus a utilisé brièvement ce principe au début des années 1930 [5].

I.4.2. Eoliennes à axe horizontale

Ils ont généralement un nombre de pales de 1 à 3 et peuvent produire des puissances élevées, allant jusqu'à plusieurs Mégawatts. L'éolienne à axe horizontal, en forme d'hélice, utilise la force de portance du vent pour générer un couple moteur entraînant sa rotation. La position de récepteur les rend plus efficaces et elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques [6].



(a)

(b)

(c)

(d)

Figure I.2 : Exemples des éoliennes : (a) à axe verticale type Darrieus de forme H, (b) à axe verticale de type DARRIEUS, (c) à axe verticale de type Savonius, (d) à axe horizontale.

I.5. Classification des éoliennes

Le choix d'une éolienne dépend également de sa taille et de sa puissance. Le tableau suivant présente les différentes tailles d'hélices et la puissance qu'elles peuvent générer

Tableau.I.1 : Classification des éoliennes selon leur puissance nominale [1].

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12m	Moins de 40KW
Moyenne	De 12 m à 45 m	de 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

I.6. Principaux constituants de deux types des éoliennes

Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux, même si il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences significatives, figure (I.3):

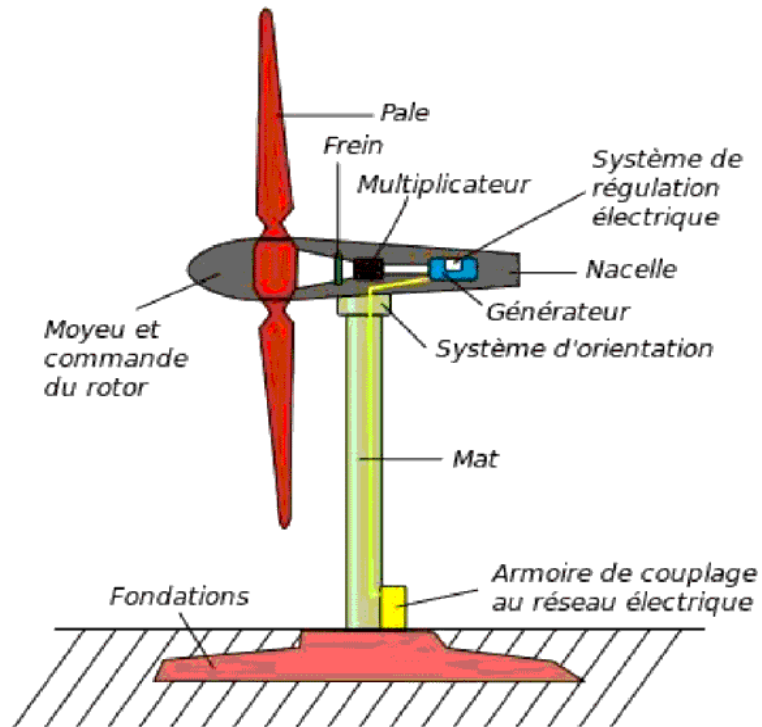


Figure I.3: Principaux composants d'une éolienne [7].

1) Le mât (la tour):

Pour éviter les perturbations près du sol, généralement un tube d'acier, ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible. Cependant, le poids doit être limité et la qualité de la matière utilisée représente un coût considérable. En général, un compromis implique l'utilisation d'un mât de taille légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur [8].

2) Le rotor (moyeu et pales):

Le rotor utilise les pales et l'arbre principal pour convertir l'énergie du vent en énergie mécanique. Le moyeu maintient l'équilibre entre ces éléments et l'énergie captée dépend de la surface balayée par l'hélice et de la vitesse du vent.

❖ **Les pales :**

Aérogénérateurs majoritairement possèdent trois pales, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et la stabilité. La conception de chaque pale exige un équilibre délicat entre rendement aérodynamique, légèreté, résistance statique, et tenue. Afin de parvenir à ce compromis, il est nécessaire de s'attacher à la sélection des profils, leur répartition en envergure, la forme en plan (évolution de la corde en fonction de l'envergure), et le vrillage de la pale, qui doivent être étudiés avec soin (voir Figure 1.4). De plus, le vrillage peut varier significativement d'une machine à l'autre en fonction du type de régulation et de la taille de l'éolienne [9].

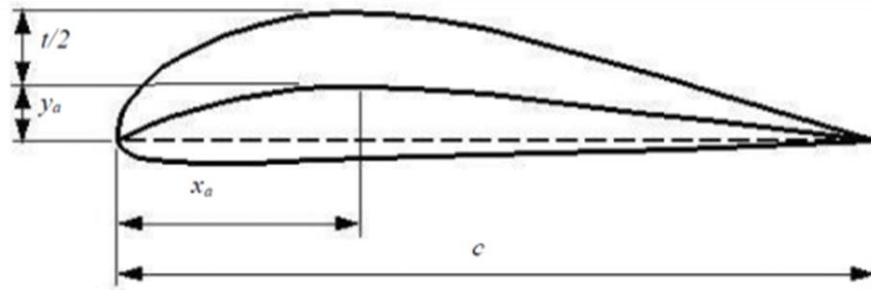


Figure. I.4: Profil de la pale.

❖ **Le moyeu :**

C'est la partie qui soutient les pales et qui doit pouvoir supporter des secousses importantes, surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de rapides variations de la vitesse du vent.

3) La nacelle :

Elle englobe tous les composants mécaniques nécessaires pour connecter la turbine éolienne à la génératrice électrique. Ses composants incluent :

❖ **Arbre lent** : lie le moyeu du rotor au multiplicateur.

❖ **Multiplicateur** : relie un arbre lent à un arbre rapide en augmentant la vitesse de rotation de plus de 10 fois au passage.

❖ **L'arbre rapide** : La génératrice électrique fonctionne à environ 1800 tours par minute et est alimentée par un frein mécanique à disque que l'on peut actionner en cas d'urgence.

❖ **La girouette** : indique la direction du vent et permet à la nacelle de rester

Orientée face au vent.

- ❖ **Le frein à disque** : permettant d'arrêter le système en cas de surcharge.
- ❖ Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (La surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction Du vent) Figure (I.5).
- ❖ **Système de refroidissement** : Des dispositifs de refroidissement sont employés pour maintenir la température des composants de l'éolienne tels que la génératrice et le multiplicateur à des niveaux appropriés. Ces dispositifs prennent la forme de ventilateurs et de radiateurs.

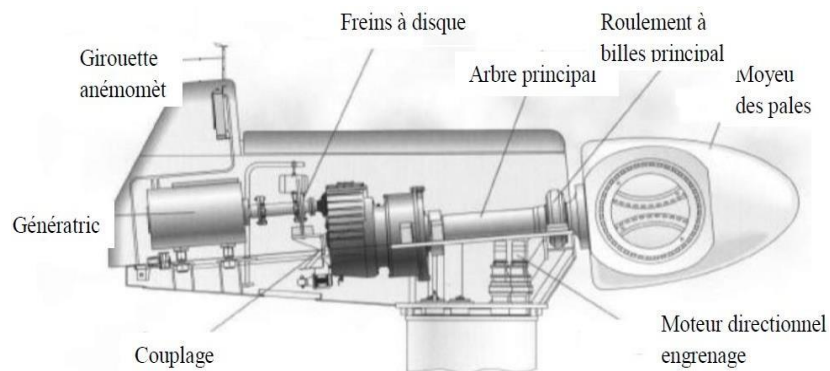


Figure I.5 : composent de la nacelle.

I.7. Les éoliennes à vitesse fixe et variable

I.7.1. Les éoliennes à vitesse fixe

Les premières éoliennes à vitesse fixe ont été créées. Dans cette technologie, la génératrice est connectée directement au réseau. La fréquence du réseau et le nombre de paires de pôles de la génératrice déterminent la vitesse $\Omega_{méc}$ [11].

La vitesse de la génératrice est généralement accélérée par le couple mécanique entraînant créé par la turbine. Ensuite, elle fonctionne en hyper synchrone et produit de l'électricité pour le réseau. La vitesse mécanique ($\Omega_{méc}$) d'une génératrice standard à deux paires de pôles est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme ($\Omega_s = 1500$ t/min), ce qui nécessite l'ajout d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne.

I.7.1.1. Avantages [12]

- 1- Un système électrique simplifié.
- 2- Plus économique et plus fiable, nécessitant moins d'entretien.
- 3- Aucune nécessité de dispositif électronique.

I.7.1.2. Inconvénients

- 1- L'énergie recueillie peut ne pas être maximale.
- 2- Il est difficile de réguler la puissance fournie au réseau.
- 3- Il y a des forces et des oscillations de couple dans le mécanisme de transmission de puissance [12].

I.7.2. Eolienne à Vitesse variable

Étant donné les inconvénients associés au fonctionnement à vitesse fixe, tels que les problèmes de système d'orientation, la maintenance régulière et le rendement médiocre, l'objectif est d'optimiser l'extraction de la puissance de l'énergie cinétique du vent. Pour y parvenir, il est nécessaire d'ajuster en continu la vitesse de la génératrice en fonction de la vitesse du vent (voir Figure I.6). Cette optimisation de la production peut être réalisée par le biais de commande sur la turbine et sur la partie électrotechnique, incluant le générateur électrique lui-même et/ou les paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance [11].

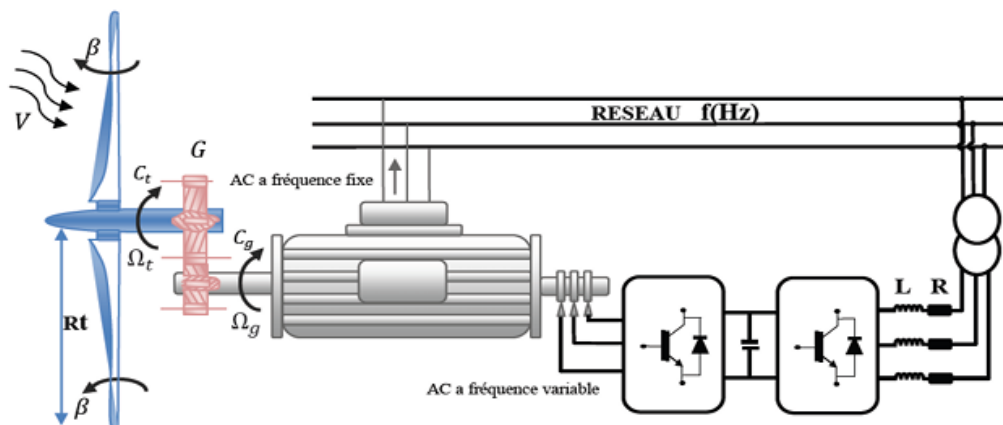


Figure 1.6: Eoliennes à vitesse variable. [13]

I.7.2.1. Avantages principaux de ce type

1. Optimisation de l'énergie captée en permettant de contrôler la vitesse du rotor [12].
2. Contrôle du transfert d'énergie propre et du transfert de puissance envoyé au réseau.
3. Réduire les contraintes mécaniques provoquées par le train de puissance. Les oscillations du couple peuvent être réduites en absorbant les turbulences et les rafales de vent [14].
4. Produire plus de puissance électrique.
5. Ce type de machines offre une constante de temps plus grande pour le système de contrôle de l'angle de calage, ce qui réduit sa complexité [14].

I.7.2.2. Inconvénients [12]

1. L'utilisation de machines spéciales.
2. Coûts accrus (convertisseur, commande, etc.)
3. La complexité des convertisseurs de puissance utilisés est importante.
4. Gérer le transfert de puissance entre les convertisseurs de puissance.

I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**I.8.1. Avantages**

L'énergie éolienne est principalement reconnue pour son respect de l'environnement [15].

- ❖ L'énergie éolienne est un type d'énergie renouvelable qui n'utilise pas de carburant, ne produit pas de gaz à effet de serre et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. L'énergie éolienne contribue à long terme au maintien de la biodiversité dans les milieux naturels en luttant contre le changement climatique.
- ❖ 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 objectifs de l'Union Européenne pour 2020 peuvent être atteints à moindre coût grâce à l'utilisation de l'énergie éolienne. 20% de la consommation d'énergie renouvelable (éolienne et autres).

I.8.2. Les inconvénients

Les désavantages de l'énergie éolienne sont les suivants :

- ❖ Le bruit a considérablement diminué, en particulier le bruit mécanique qui a presque complètement disparu grâce aux avancées apportées au niveau du multiplicateur. En revanche, le bruit aérodynamique est lié à la vitesse de rotation du rotor, il doit donc être limité [15].
- ❖ La qualité de la puissance électrique : la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante car la source d'énergie éolienne est stochastique.
- ❖ Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie conventionnelles est le suivant : Bien que la plupart des sources d'énergie traditionnelles soient encore plus chères sur les sites moins ventés, leur coût reste encore plus élevé [15].
- ❖ La topographie, la météo et l'environnement affectent l'énergie éolienne.

I.9. Production de l'énergie électrique à partir de l'éolienne

Il existe cinq méthodes courantes pour produire de l'électricité à partir du vent :

1. Turbine entraînant une génératrice à courant continue.
2. La turbine alimente une génératrice asynchrone à vitesse constante. La génératrice à cage d'écureuil est généralement directement connectée au réseau d'énergie, ce qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques.
Quelle que soit la vitesse du vent, la vitesse de la génératrice reste pratiquement constante. Cette technologie ne peut pas maximiser la puissance du vent à toutes les vitesses.
3. Turbine alimentant une génératrice à vitesse variable asynchrone.
4. Turbine entraînant une génératrice asynchrone à double alimentation à vitesse variable.
5. Turbine entraînant une génératrice synchrone à aimants permanents à vitesse variable (c'est la machine qu'on va utiliser dans notre étude).

I.10. Classification des machines à aimants permanents

I.10.1. Différents types de machines à aimants permanents

Les machines à aimant permanent peuvent être classées dans les catégories suivantes en fonction de leur principe de fonctionnement :

- Les machines à courant continu (MCC) avec des aimants permanents
- Les machines à aimants permanents (MAPSB) sans balais.

I.10.1.1. Les machines à courants continu et aimants permanents (MCC)

Les machines à courant continu utilisent des aimants permanents pour remplacer le champ magnétique des électroaimants. Ainsi, les pertes joules associées aux bobinages d'excitation sont éliminées, mais le champ d'excitation n'est plus contrôlable. C'est pourquoi ils ne peuvent être utilisés que pour des applications à haute dynamique et à faible puissance qui ne nécessitent pas une fonction de défluxage [16].

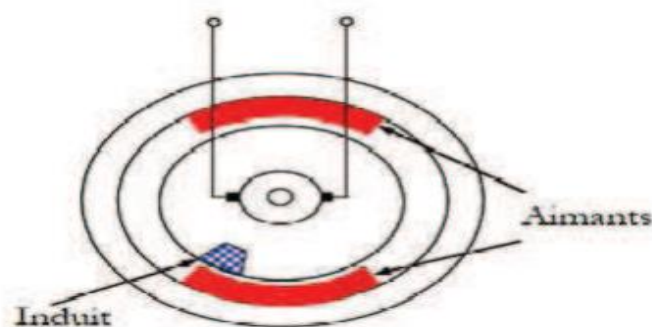


Figure I.7 : Représentation simplifiée d'un MCC-AP

I.10.1.2. Les machines à aimants permanents sans balais (MAPSB)

Les autres types de machines à courant continu ont été créés grâce aux avancées de la technologie des semi-conducteurs. Dans ces types de machines, la partie tournante remplace la commutation du système balais collecteur et le stator est constitué de trois enroulements alimentés par les formes d'onde carrées fournies par un convertisseur. Le contrôle de la commutation du convertisseur garantit que seules deux phases conduisent à chaque instant. Ce système de commutation électronique fonctionne de la même manière que les balais mécaniques d'une machine à courant continu. Par conséquent, ce type de machine à aimants permanents est

appelé machine à aimants permanents sans balais (MASPSB) ou machine à aimants permanents avec forme d'onde carrée (PMDC). Du fait qu'elle ne nécessite que peu d'entretien, qu'elle présente un rendement élevé et qu'elle a une loi de commande relativement simple, la machine MAPSB est préférable pour de nombreuses applications [17].

I.10.2 Différentes structures de la machines synchrones à aimants permanents

Le classement des structures des machines synchrones à aimant permanent est basé sur la disposition des aimants sur le rotor. Les machines à flux radial, à flux axial et à flux transverse font partie de leurs différentes configurations. La figure suivante présente une vue schématique des machines à aimants à flux radial et à flux axial [18].

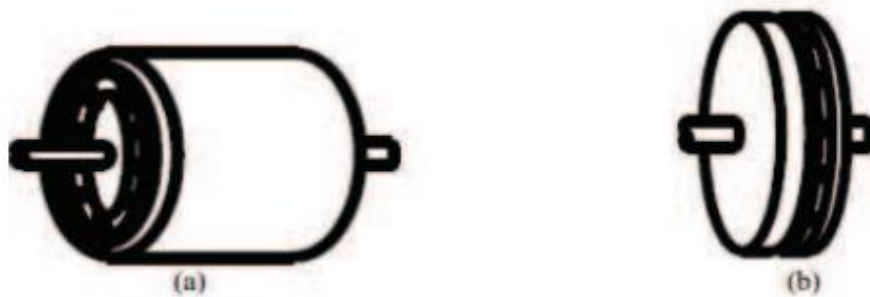


Figure I.8 : Vue schématique des machines : (a) flux radial, (b) flux axial

I.10.2.1. Machines à flux radial

La première machine à aimants permanents dans l'industrie était la machine synchrone à flux radial. Elle commence à remplacer la machine asynchrone grâce aux avancées de l'électronique de puissance et aux performances des aimants permanents. Une machine dont le bobinage est reparti et les aimants sont placés en surface est la première machine synchrone à flux radial à avoir été créée. Il peut être trouvé dans la littérature pour équiper un turbo compresseur (50 kW, 70000 tr/min, 8 pôles) ou pour des applications dans le domaine de l'automobile (40 kW, 6000tr/min, 4 pôles) ou pour des applications dans le domaine de l'automobile. Par rapport aux machines asynchrones, ces études ont révélé une augmentation significative du rendement et de la puissance massique. À l'heure actuelle, cette structure à aimants et simple entrefer est souvent utilisée comme moteur de référence pour comparer avec

des moteurs innovants. L'emplacement des aimants est le principal inconvénient de cette machine. En effet, lorsque vous les exposez, il est difficile d'utiliser des applications à grande vitesse.

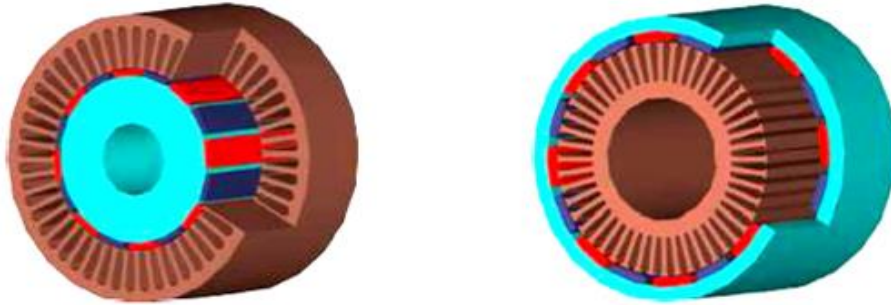


Figure I.9 la fig. de gauche représente une MSAPFR intérieur et celle à droite représente MSAPFR extérieur [19].

I.10.2.2. Machines à flux axial

Lorsque le cahier des charges de l'application visée limite considérablement l'encombrement axial, les MSAPFA, également appelés MSAPs discoïdes, sont utilisés. En disposant plusieurs étages sur le même arbre, ils permettent d'optimiser l'encombrement et la masse et d'augmenter le couple. Leur surface active est supérieure à celle des machines traditionnelles. L'augmentation du nombre de pôles a le même effet que dans les structures cylindriques : il augmente le diamètre et diminue la longueur axiale. Cependant, dans le cas des machines à flux axial, le volume des parties actives est mieux occupé, contrairement aux structures cylindriques qui deviennent creuses.

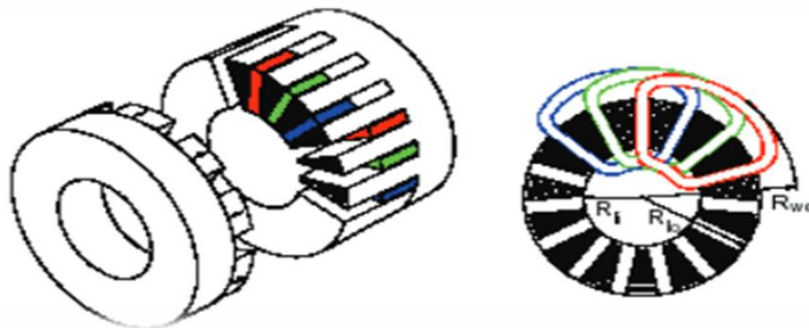


Figure I.10 Disposition d'un bobinage à double couche dans une MSAPFA.

I.11. Turbine entraînant une génératrice synchrone à aimant permanent :

Avec l'avancement de l'électronique de puissance et l'amélioration des matériaux magnétiques, les machines synchrones à aimant permanent (MSAP) ont fait leur entrée sur le marché, devenant ainsi un concurrent sérieux des machines asynchrones à double alimentation. Leur principal avantage réside dans l'absence de système de balais collecteurs, ainsi que dans leur capacité à avoir un nombre élevé de pôles, ce qui leur permet de produire des couples mécaniques considérables. De plus, elles présentent des pertes joules rotoriques nulles. Cependant, les alternateurs doivent être de grande taille en raison de leur faible vitesse de rotation, qui est d'environ 50 tr/min. Malgré cela, l'utilisation d'une MSAP est préférable dans les applications éoliennes pour générer des puissances allant jusqu'à 2MW à 5MW.

I.12. Situation actuelle de l'énergie éolienne en l'Algérie

Le domaine de l'énergétique éolienne a connu un grand essor avec l'élargissement de l'installation d'aérogénérateurs pour la production électrique dans les pays industrialisés. De plus, la volonté de réduire les émissions de gaz responsables de l'effet de serre, a poussé beaucoup de pays à s'intéresser davantage aux énergies renouvelables dont fait partie l'éolien. Les réalisations algériennes dans le domaine de l'énergie propre dite renouvelable sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution du parc énergie renouvelable mondial ou européen, qui a atteint des objectifs très avancés. Par ailleurs, l'étude de la rentabilité des systèmes éoliens est étroitement liée à la source elle-même, à savoir, le vent.

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifié. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent, a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie. Cette représentation

de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers l'Algérie. La carte représentée en figure (I.11) montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-Ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran,

Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au Nord et Biskra au sud.

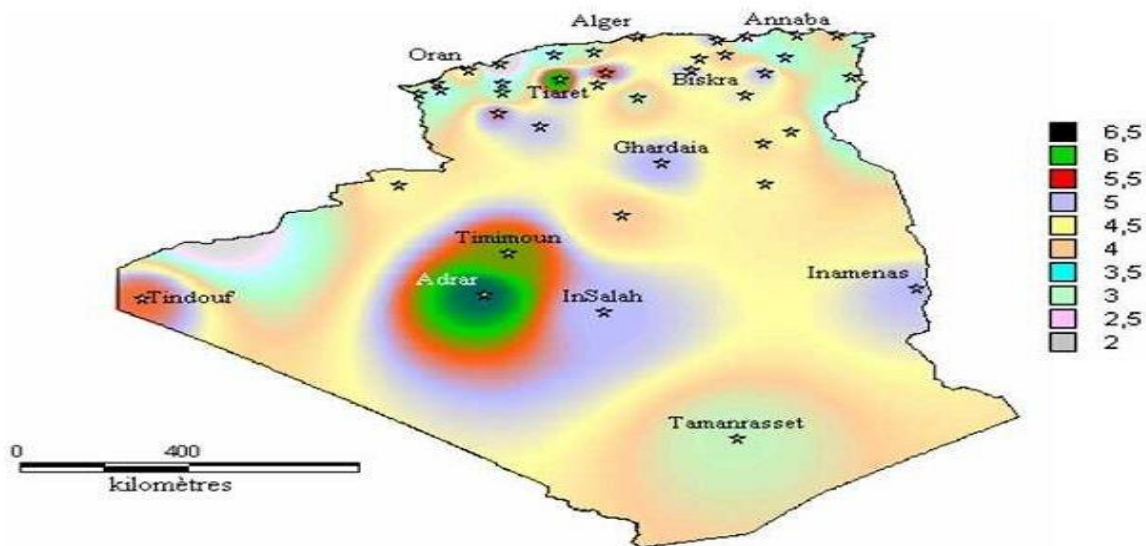


Figure I.11: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) [52].

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Les cartes saisonnières représentées en figure (I.12) montrent clairement que l'automne

et l'hiver sont moins ventées que le reste des saisons et que le printemps en est la plus ventée. Néanmoins, on remarque que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver. D'un autre côté, des régions telles que Biskra, Adrar et Annaba sont caractérisés par une vitesse relativement constante tout au long de l'année [35].

La première expérience du pompage d'eau avec un éolien en Afrique a été effectuée à Adrar l'an 1957 au Ksar sidiassa, pour l'irrigation de 50 Hec, ce système éolien a été saboté en 1962 à la sortie des français de l'Algérie [36] [37].

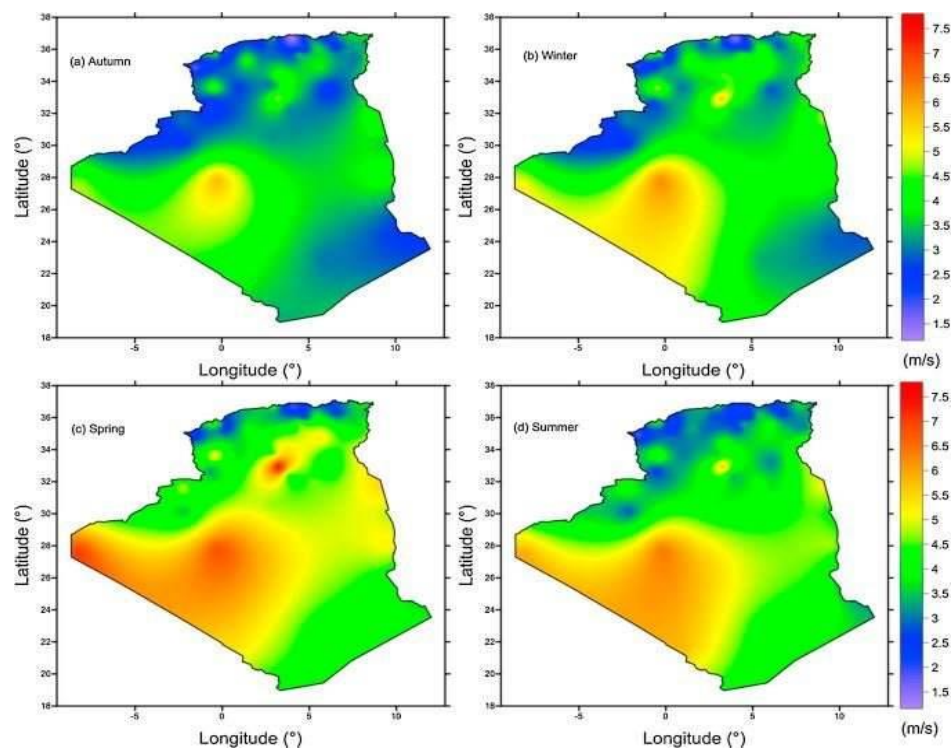


Figure I.12: Cartes saisonnières de la vitesse du vent (m/s).

L'intérêt d'utiliser l'éolien pour la production d'électricité en Algérie a fait que le Centre de Développement des Energies Renouvelables s'est muni de moyens importants pour la réalisation d'études poussées à l'échelle régionale afin de détecter des sites ventés dans les régions prédéfinies. En effet, en considérant les paramètres suivants [38]:

- L'accessibilité de la région, (topographie).
- L'identification des régions protégées.

- La capacité de raccordement au réseau.
- Les contraintes environnementales.
- Le risque foncier.
- Et autres contraintes.

Différents résultats utiles au bon choix des systèmes éoliens selon les régimes des vents locaux sont produits, à savoir :

- L'Analyse de la climatologie du site.
- L'établissement des Atlas éoliens de la région (vent et potentiel).
- Le choix optimal de l'emplacement de la ferme éolienne.
- L'estimation de la production d'énergie électrique de la ferme éolienne.
- L'efficacité des fermes éoliennes.
- Et le coût du KWh produits.

Trois raisons principales plaident en faveur d'un développement des énergies renouvelable en Algérie [36]:

- Elles constituent une solution économiquement viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées notamment dans les régions du Grand sud.
- Elles permettent un développement du fait de leur caractère inépuisable et de leur impact limité sur l'environnement et contribuent à la préservation de nos ressources fossiles.
- La valorisation de ces ressources énergétiques ne peut qu'avoir des retombées positives en matière d'équilibre régional et de création d'emploi.

I.13. Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde

L'énergie éolienne continue de croître à l'échelle mondiale, tant en termes de capacité installée que de contribution à la production d'électricité. Voici quelques points sur la situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde

I.13.1 Capacité installé :

- La capacité éolienne installée dans le monde a continué de croître au cours des dernières années. Selon les données de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et d'autres sources, la capacité éolienne installée totale dans le monde dépasse désormais les 700 gigawatts (GW) à la fin de 2023.

- La Chine est le plus grand marché de l'énergie éolienne, avec une capacité installée dépassant les 300 GW, suivie par les États-Unis, l'Union européenne et d'autres pays.

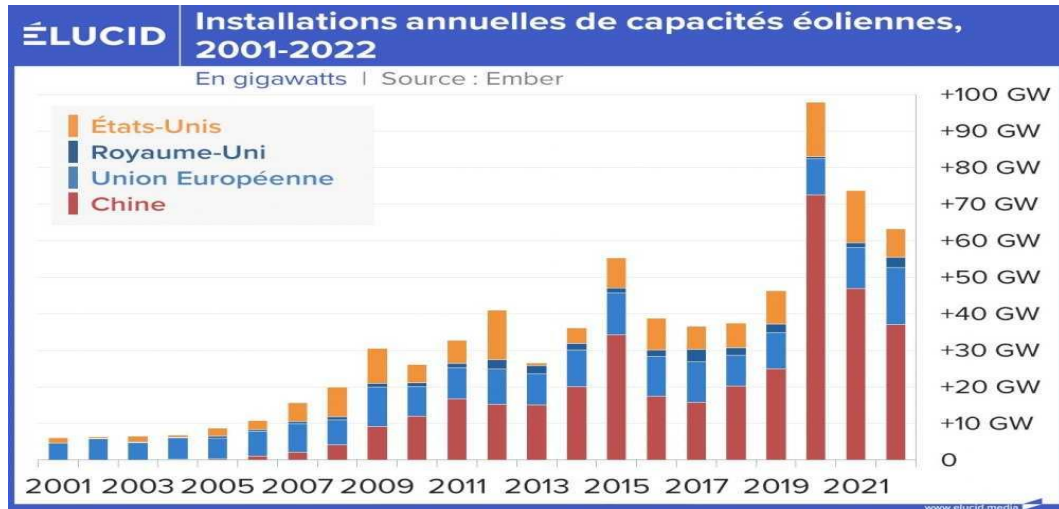


Figure I.13: Capacité totale installée (MW) et prévisions 2001-2021

I.13.2 Production d'électricité

- L'énergie éolienne représente une part significative de la production mondiale d'électricité. En 2020, l'énergie éolienne a produit environ 1,2 térawatt heure (TWh) d'électricité dans le monde.
- Dans de nombreux pays, l'énergie éolienne contribue de manière importante à la production totale d'électricité, parfois dépassant les autres sources d'énergie renouvelable telles que le solaire photovoltaïque ou l'hydroélectricité.



Figure I.13: Les 10 meilleurs pays dans la production de l'énergie éolienne du monde [10].

I.13.3 Investissements et tendances :

➤ Les tendances technologiques incluent le développement de turbines plus grandes et plus efficaces, ainsi que l'exploration de nouvelles technologies telles que les éoliennes en mer (offshore) et les systèmes de stockage d'énergie pour pallier la variabilité de la production éolienne.

I.13.4 Réduction des coûts :

➤ Les coûts de l'énergie éolienne ont considérablement diminué au cours des dernières années, rendant cette source d'énergie de plus en plus compétitive par rapport aux combustibles fossiles dans de nombreux marchés.

➤ Selon certaines estimations, le coût de l'énergie éolienne terrestre est devenu compétitif, voire inférieur, à celui des nouvelles centrales électriques au charbon ou au gaz dans de nombreuses régions du monde.

I.13.5 Politiques et réglementations :

- Les politiques de soutien, telles que les tarifs de rachat garantis, les crédits d'impôt et les objectifs de production d'énergie renouvelable, continuent de jouer un rôle crucial dans le déploiement de l'énergie éolienne à l'échelle mondiale.
- De nombreux pays ont fixé des objectifs ambitieux en matière d'énergie renouvelable et d'émissions de gaz à effet de serre, ce qui stimule davantage l'expansion de l'énergie éolienne.

Ces statistiques et tendances illustrent la croissance continue et la pertinence croissante de l'énergie éolienne dans le mix énergétique mondial, en tant que composante essentielle de la transition vers un système énergétique plus durable et à faible émission de carbone.

I.14. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'examiner diverses solutions électrotechniques envisageables pour la production d'énergie électrique à l'aide de turbines éoliennes. Après avoir révisé les concepts fondamentaux nécessaires à la compréhension du processus de conversion de l'énergie éolienne, nous avons décrit différents types d'éoliennes ainsi que leur mode de fonctionnement. Ensuite, nous avons exploré les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptés aux systèmes éoliens. Deux principales catégories de machines ont été présentées : les machines asynchrones et les machines synchrones.

À la lumière des sections précédentes, il est évident que la puissance mécanique d'une éolienne varie en fonction de la vitesse du vent. Pour maximiser cette puissance pour différentes vitesses du vent, il est nécessaire d'utiliser une génératrice à vitesse variable, telle qu'une génératrice synchrone à aimants permanents.

Le prochain chapitre est consacré à modélisation de la chaîne de conversion éolienne.

CHAPITRE II

Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

II.1- INTRODUCTION

Dans un système de génération éolienne, une turbine éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique utile sur son arbre, cette énergie est ensuite transformée en une énergie électrique au moyen d'une génératrice électrique. Différents types de machines électriques sont utilisées pour assurer la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Parmi elles, les machines synchrones à aimants permanents (MSAPs) sont les plus utilisées. La prédominance de ces dernières sur les autres machines revient principalement à leur caractéristique d'auto excitation par aimants permanents. Cette auto excitation permet à la MSAP de fonctionner à un bon rendement et avec un facteur de puissance élevé. De plus, l'éolienne à base d'une MSAP peut fonctionner à des faibles vitesses, de ce fait elle ne nécessite pas un multiplicateur. Ceci améliore donc la fiabilité du système en réduisant ses coûts de fabrication et d'entretien [20].

Dans ce chapitre, nous allons expliquer le fonctionnement général d'une éolienne, et on s'intéresse essentiellement à la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique on va citer les différentes zones de fonctionnements de l'éolienne à vitesse variable.

✚ Dans la première partie nous nous intéressons à la modélisation et au contrôle éolienne, on commence par la description des différentes parties constituant une éolienne, puis une étude aérodynamique de la turbine est présentée afin de comprendre ses principaux paramètres de fonctionnement, à savoir Coefficient de puissance (C_p), le couple et limites de BETZ.

✚ La deuxième partie est dédiée à la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent pilotée par des convertisseurs contrôlés par modulation de largeur d'impulsion (MLI), ainsi le modèle général de la machine dans le repère naturel (a, b, c) et dans le repère de Park (d, q) sera rappelé et présenté.

II.2 Configuration globale du système éolien étudié :

Le système éolien adopté dans notre travail, dont l'architecture globale est illustrée par la figure II.1 Il est principalement composé d'une turbine raccordée au rotor d'une GSAP. Le stator de cette génératrice est connecté à un redresseur triphasé à MLI. La sortie du redresseur est raccordée à un bus continu de tension U_{dc} constante, ce dernier alimente un onduleur triphasé à MLI avec injection de courants sinusoïdaux dans le réseau.

L'amélioration de la commande de l'onduleur triphasé à MLI est une piste intéressante pour

satisfaire les exigences imposées par les distributeurs d'énergie.

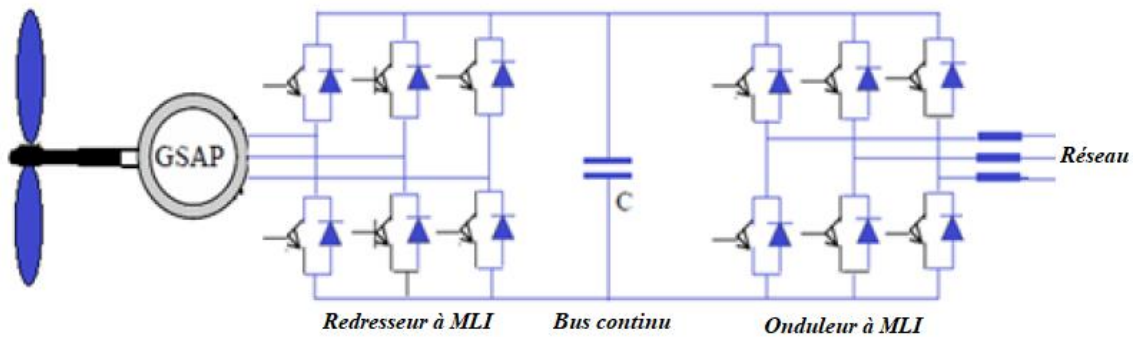


Figure II.1: La configuration du système éolienne adopté

II.3- Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

Les éoliennes sont généralement dimensionnées et construites pour atteindre leurs performances à une puissance nominale P_n , calculée à partir de la vitesse du vent V_n .

En cas de vitesse du vent supérieure à V_n , une partie de l'énergie supplémentaire contenue dans le vent doit être perdue pour éviter tout endommagement de l'aérogénérateur.

Il existe deux manières de contrôler en toute sécurité la puissance extraite de la turbine par rapport à la puissance nominale du générateur.

II.3.1. Système de décrochage aérodynamique (Stall control)

Ce système consiste à concevoir la géométrie de la pale de façon à mettre à profil, en cas de vitesses du vent trop élevées, le décrochage aérodynamique en provoquant de la turbulence sur la partie de la pale qui n'est pas face au vent, (figure II.2), ce qui empêche la portance d'agir sur le rotor [25] :

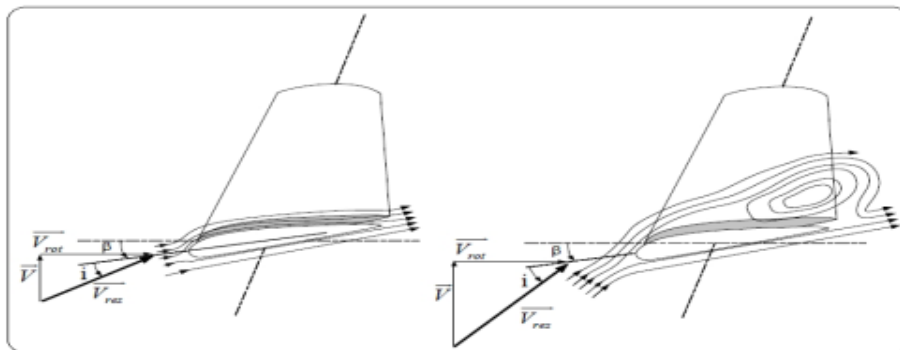


Figure II.2 : Flux d'air sur un profil de pale " Stall ".

Le système de régulation par décrochage aérodynamique est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale), il a l'avantage d'éviter l'installation de pièces mobiles dans le rotor donc il est plus simple et le moins coûteux. L'inconvénient est qu'une telle régulation pose de grands défis à la conception aérodynamique des pales afin d'éviter l'apparition de vibrations par décrochage. Ainsi il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté.

II.3.2- Système d'orientation des pales (pitch control)

La régulation consiste à conserver la force F_{ax} constante, donc une fréquence de rotation constante de l'hélice pour toute une gamme de vitesse du vent comprise entre la vitesse nominale V_n et la vitesse maximale admissible par la machine [12]. Cette régulation est obtenue en faisant varier l'angle de calage, en pivotant les pales face aux fortes vitesses du vent par un dispositif de commande appelé « Pitch control » (Figure II.3).

Ceci ajuste la portance des pales à la vitesse du vent et limite ainsi la puissance générée. À la vitesse maximale du vent, les pales atteignent leurs positions extrêmes et se disposent. Inversement, les pales seront pivotées de manière à pouvoir mieux capter de nouveau l'énergie du vent, dès que le vent aura baissé d'intensité [21].

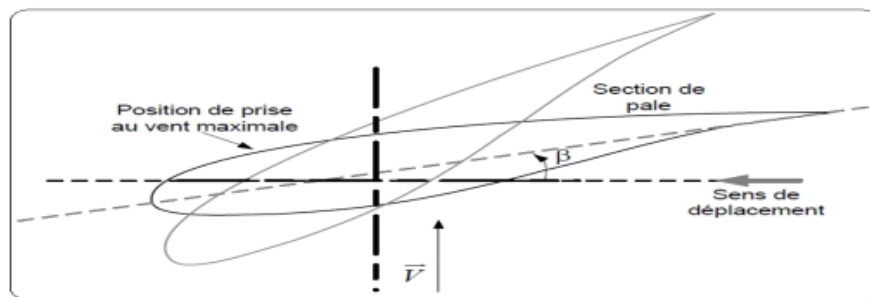


Figure II.3: Variation de l'angle de calage d'une pale.

Il existe divers types de systèmes de régulation de l'angle de calage de pales. Le pas peut être variable tout le long de la pale, ou uniquement sur le bout des pales. L'angle de calage est commandé soit par des masses en rotation utilisant la force centrifuge, soit par un système hydraulique ou des moteurs électriques. Le système hydraulique est le plus utilisé dans les aérogénérateurs de petites et moyennes puissances, alors que le système électrique est utilisé uniquement pour les grandes éoliennes.

Le système de régulation de la puissance par orientation des pales possède l'avantage d'offrir un contrôle actif de puissance dans une large variation de la vitesse du vent, facilite le freinage de l'éolienne et l'énergie produite correspond aux grandes vitesses du vent est plus importante par rapport au premier système [28].

II.4 - Modélisation de la vitesse du vent

Le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps : $V = f(t)$

Dans 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 de grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent. Donc la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes [22] :

$$V(t) = V_{\text{moy}} + v_T(t) \quad (\text{II.1})$$

- Une composante turbulente du vent $v_T(t)$ est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent).
- Composante lente V_{moy} ; c'est la moyenne de vitesses de vent variant régulièrement sur une période prolongée à un endroit donné.

La vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques [22] :

$$V(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_v \cdot t)) \quad (\text{II.2})$$

$$V(t) = 6.5 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t) \quad (\text{II.3})$$

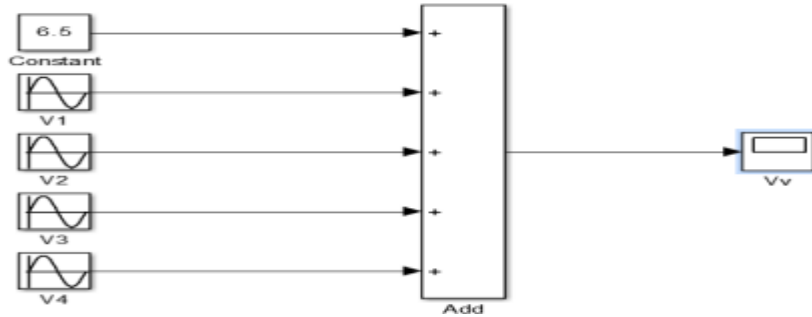


Figure II.4: Bloc de simulation de vitesse de vent.

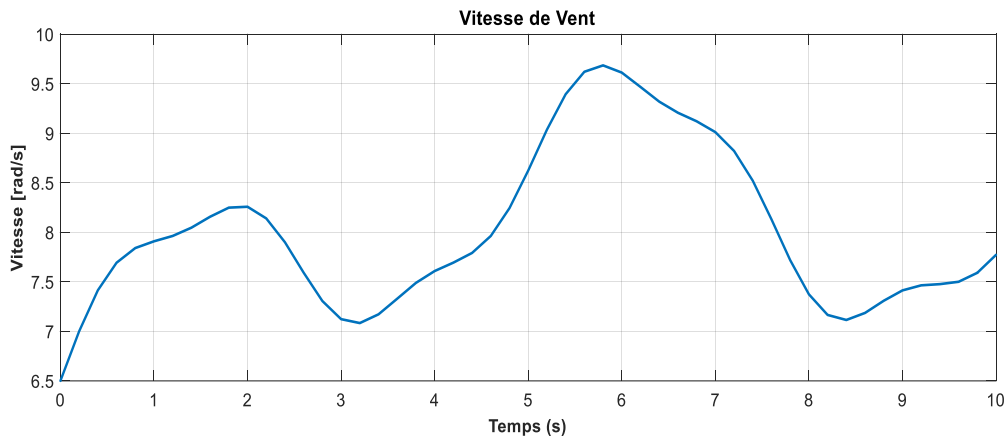


Figure II.5 : Profil du vent adapté.

II.5 Conversion de l'énergie éolienne

II.5.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

On peut écrire l'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx , de section S , de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v , comme suite (figure II.6) [23]:

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dx v^2 \tag{II.4}$$

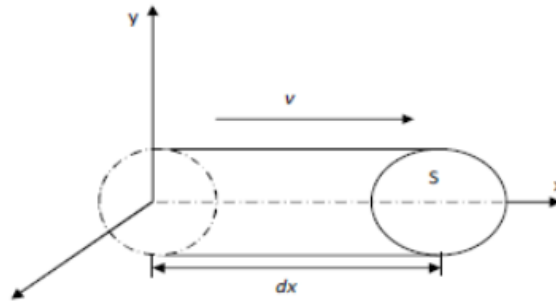


Figure II.6: Colonne d'air animée d'une vitesse V .

La puissance de la masse d'air P_m qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par [24] :

$$P_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S V^3, \quad S = \pi R^2 \quad (\text{II.5})$$

Avec :

E_c : énergie cinétique.

ρ : La masse volumique de l'air (Kg/m^3), approximativement 1.225 Kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15° C .

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

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

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

II.5.2. Loi de Betz

Considérons le système de la figure (II.7) qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal. La vitesse du vent de l'aérogénérateur en amont et en aval est représentée par V_1 et V_2 [26]. En supposant que la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 sont égales, soit :

$$V_m = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{II.6})$$

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant ce tube de la surface S des pales en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface et la vitesse moyenne [25] :

$$m = \rho \cdot S \cdot V_m = \rho S \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.7})$$

La puissance réelle P_m extraite par le rotor des pales s'exprime par [26] :

$$P_m = m \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} \tag{II.8}$$

En remplaçant m par son expression, on obtient :

$$P_m = \rho S \frac{(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \tag{II.9}$$

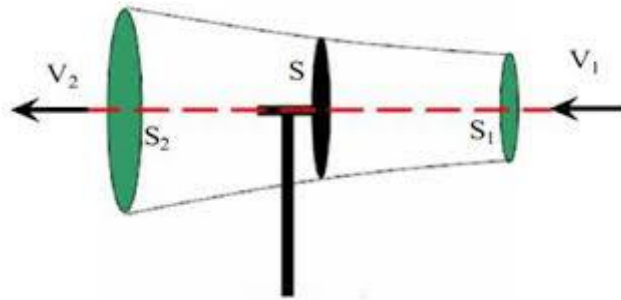


Figure II.7 : Tube du courant autour d'une éolienne.

La puissance totale théoriquement disponible P_{mt} sur cette même surface S , soit à la vitesse V_1 , peut être trouvée en utilisant [26] :

$$P_{mt} = \rho S \frac{V_1^3}{2} \tag{II.10}$$

Le coefficient de puissance C_p est le rapport entre la puissance totale théoriquement disponible et la puissance extraite du vent [23] :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{(1 + (V_2/V_1))(1 - (V_2/V_1)^2)}{2} \tag{II.11}$$

La caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus est simulée et montrée par la figure (II.8)

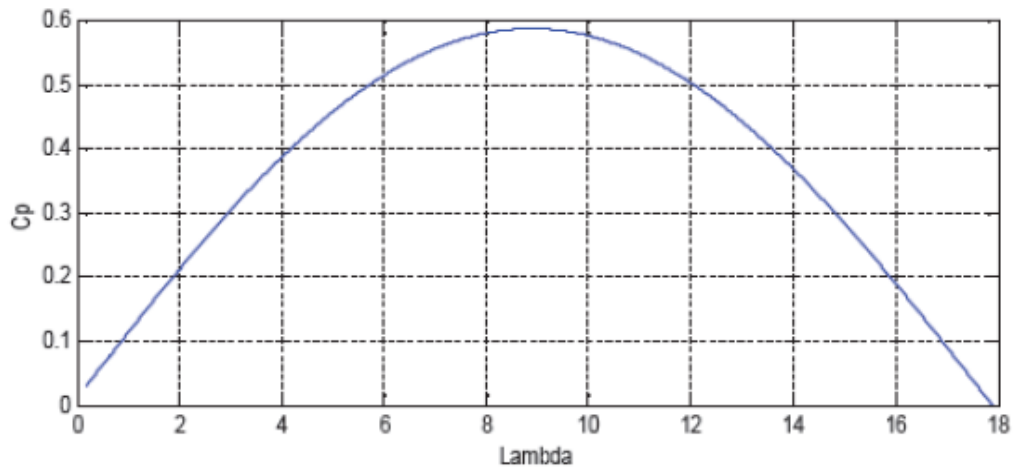


Figure II.8: Caractéristique du coefficient de puissance

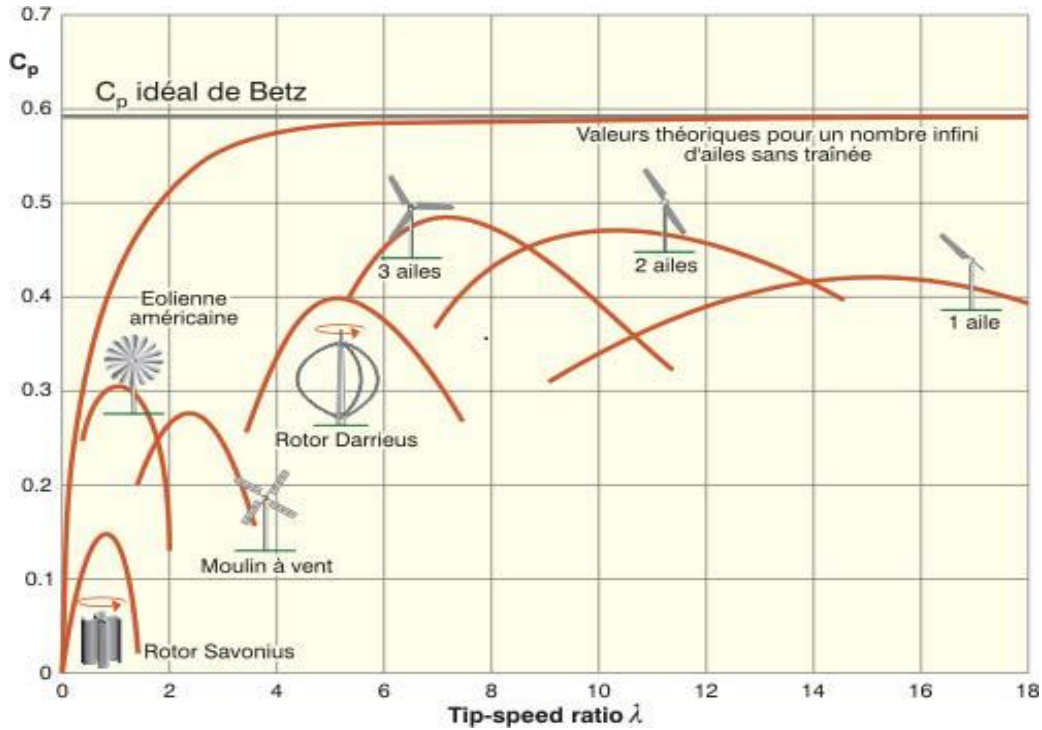


Figure. II.9 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

Le coefficient C_p varie selon la vitesse du vent, la vitesse de rotation de la turbine Ω_t et les paramètres des pales de la turbine tels que l'angle de calage. Mais il est souvent représenté en fonction d'une vitesse λ , également connue sous le nom de vitesse spécifique, qui représente le rapport entre la vitesse instantanée du vent et la vitesse linéaire de l'extrémité des pales de la turbine $\Omega_t R_t$ est donnée par l'expression suivante (Figure.II.10) [26] :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \tag{II.12}$$

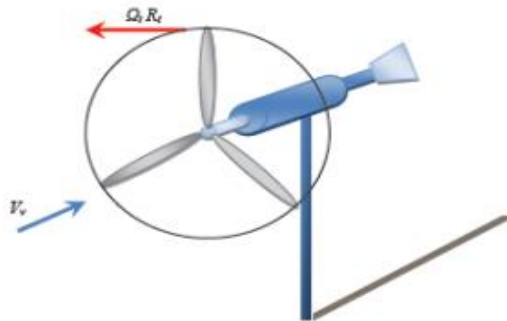


Figure II.10 : Vitesse du vent (V) et vitesse tangentielle ($\Omega_t R_t$).

Où :

R_f : Rayon de la surface balayée en [m].

V_v : Vitesse du vent en [m/s].

Ω_f : Vitesse de rotation des pales de la turbine en [rad/s].

II.5.3- Limite de BETZ

La puissance de l'éolienne sera alors maximale quand sa dérivée dP_m/dt sera nulle, soit pour $V_2 = V_1/3$. La puissance est alors maximale et vaut [27]:

$$P_{m-max} = \frac{dP_m}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\rho S \frac{(V_1+V_2)(V_1^2+V_2^2)}{4} \right) \quad (\text{II.13})$$

$$P_{m-max} = \frac{16}{27} \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad \text{et} \quad C_{pmax} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (\text{II.14})$$

Ainsi, il est possible de calculer que même si la forme des pales permet d'obtenir $V_2 = V_1/3$.

Le coefficient de puissance C_p atteint une valeur maximale de 0,593 soit 16/27 (Figure II.8). La limite de Betz est la limite théorique qui indique qu'une éolienne ne pourra jamais convertir à partir d'énergie mécanique plus de 59 % de l'énergie cinétique du vent [23].

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ (spécifique) [27].

Les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale ne récupèrent que 40% de l'énergie due au vent et se situent entre 60 et 65 % de la limite de BETZ. Le rendement est ensuite calculé.

Aérodynamique [29]:

$$\eta = \frac{16}{27} C_{pmax} \quad (\text{II.15})$$

La valeur maximale que le coefficient de puissance C_p peut prendre est appelée C_{pmax} . Cette valeur est liée à la vitesse nominale spécifique λ_{opt} pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent standard V_n et une vitesse de rotation standard Ω_n [29].

II.6- Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

Les aérogénérateurs fonctionnent grâce au vent. La turbine transforme en partie l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et ensuite en énergie électrique par le générateur. La mesure du vent est assez difficile à la hauteur des turbines. Il existe trois catégories distinctes de degrés de vent (Figure II.11).

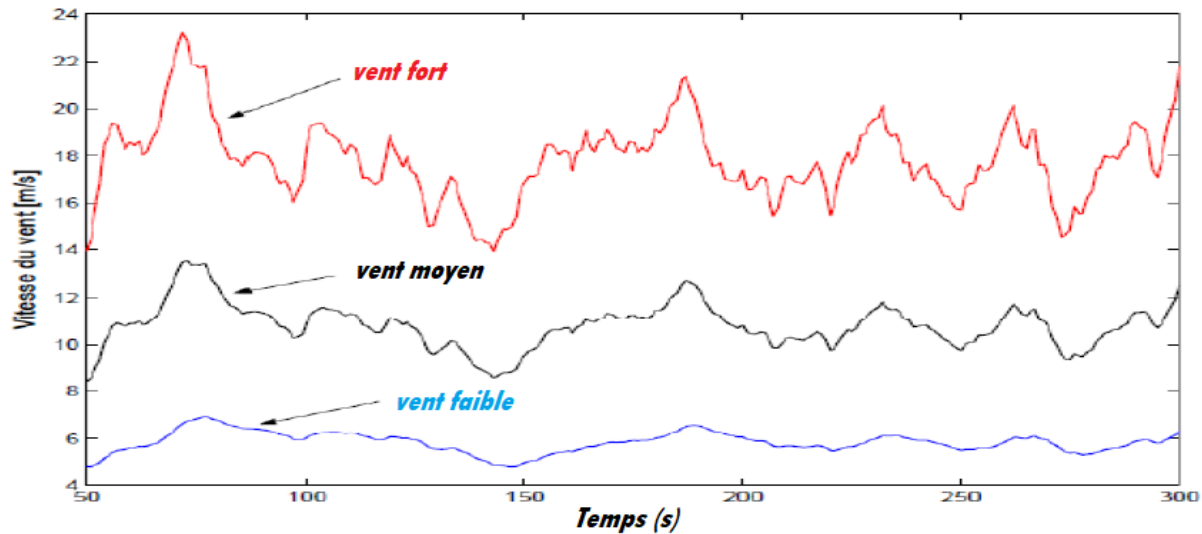


Figure. II.11: Définition de trois niveaux de vent (faible, moyen et fort).

Les éoliennes à trois pales à axe horizontal, qui sont plus de 80 % des éoliennes actuelles, ont un meilleur rendement énergétique et engendrent moins de perturbation que les autres modèles à deux pales et à axe vertical. Dans cette section, nous nous concentrons sur la modélisation d'éolienne à axe horizontal tri-pales [30].

II.6.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine à vitesse variable

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes [25] :

- ❖ La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.
- ❖ Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est très faible et peut être négligé.
- ❖ Les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté générateur.

II.6.2. Modélisation mécanique de la turbine

Pour comprendre le comportement de la turbine, il est nécessaire d'avoir un modèle dynamique qui regroupe tous ces paramètres. et le recours à la modélisation est devenu une

nécessité pour contrôler ces performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues le système mécanique de L'éolienne est composée de quatre organes, comme le montre la figure (II.12) [28].

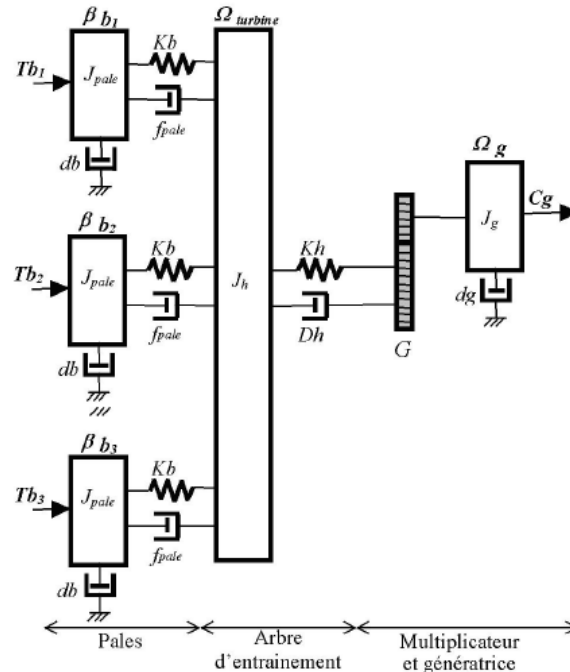


Figure II.12: Représentation du système éolien [28]

1- Trois pales considérées de conception identique et ayant les mêmes paramètres à savoir l'inertie J_{pale} , élasticité K_b , et coefficient de frottement d_b . Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notés β_{b1} , β_{b2} , β_{b3} . Chaque pale reçoit une force T_{p1} , T_{p2} , T_{p3} qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée [28].

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

- Son inertie J_h
- Son élasticité K_h
- Son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h

3 - Le rotor de la génératrice possède :

- Une inertie J_g
- Un coefficient de frottement d_g

Ce rotor transmet un couple C_g à la génératrice électrique et tourne à une vitesse Ω_{mec} .

Le dispositif mécanique de la turbine, qui sera étudié, est constitué d'une turbine éolienne comprenant trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_t qui entraîne un générateur.

On peut ainsi aboutir à un modèle mécanique plus simple de la figure (II.13) [25].

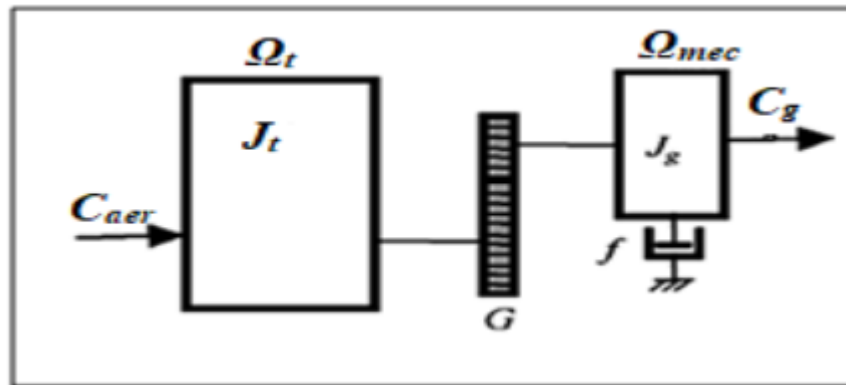


Figure II.13 : Modèle simplifié de la turbine éolienne.

Où :

C_{aer} : Couple de l'aérogénérateur.

Ω_t : Vitesse de la turbine

J_t : Moment d'inertie de la turbine.

C_g : Couple de l'aérogénérateur appliqué sur le générateur.

Ω_{mec} : Vitesse appliquée sur le générateur

J_g : moment d'inertie du générateur.

f : Coefficient de frottement visqueux.

II.6.3. Modélisation de la turbine

La théorie de Betz permet d'expliquer simplement le processus d'extraction de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Cette théorie aboutit à l'expression de la puissance de l'éolienne

P_V :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_V^3, = \pi R^2 \quad (\text{II.16})$$

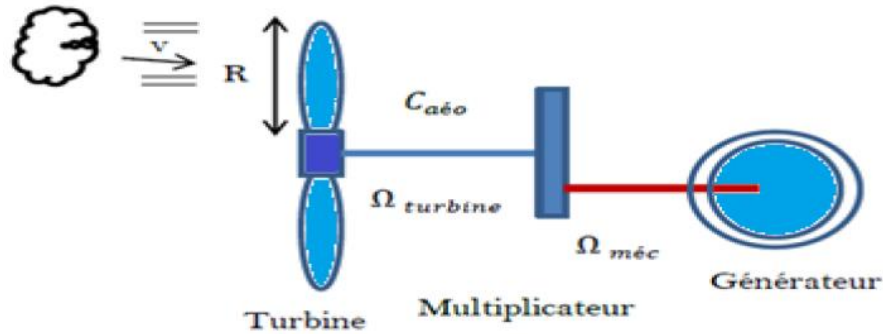


Figure II.14 : Schéma de la turbine éolienne.

La puissance aérodynamique P_{aer} apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors [27]:

$$P_{aer} = C_p P_V = \frac{1}{2} C_p (\lambda, \beta) V^3 \quad (II.17)$$

Avec (λ, β) : Le coefficient de puissance de l'éolienne, il est fonction de l'angle d'orientation β des pales et du ratio de vitesse :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (II.18)$$

L'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante [27]:

$$C_p (\lambda, \beta) = C_1 * (C_2 * \frac{1}{\lambda_i} - C_3 * \beta - C_4) * \exp(\frac{-C_5}{\lambda_i}) + C_6 * \lambda \quad (II.19)$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.008 * \beta} \quad (II.20)$$

Et $C_1=0.5176$, $C_2=116$, $C_3=0.4$, $C_4=5$, $C_5=21$, $C_6=0.0068$.

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. La figure II.15 représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse λ , et de l'angle de l'orientation de la pale β .

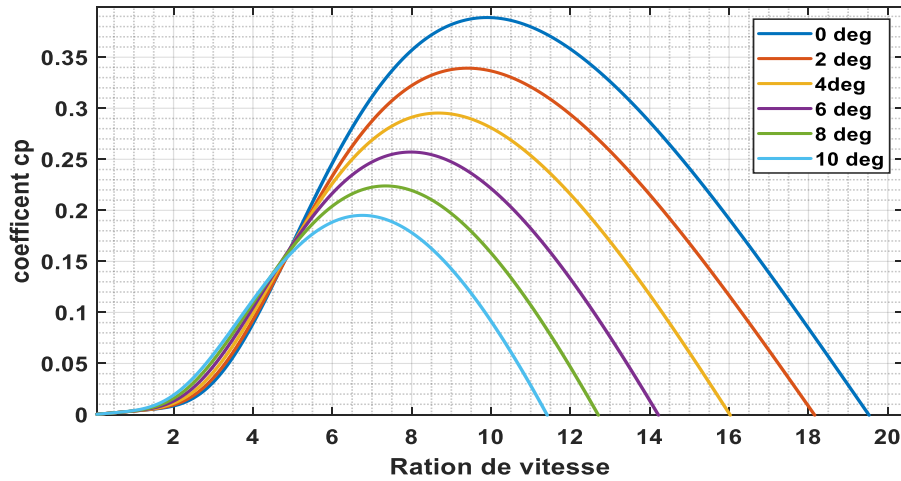


Figure II.15 : Coefficient aérodynamique (C_p) en fonction du ratio de vitesse (λ).

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique C_{aer} est donc directement déterminé par [27] :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S V_V^3 \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{II.21})$$

II.6.4. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$G = \frac{C_{aer}}{C_g} \text{ et } G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_t} \quad (\text{II.22})$$

II.6.5. Equation dynamique de l'arbre de transmission

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [22] :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (\text{II.23})$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne de 2 MW, une pale à une longueur de 39m et pèse 6.5 tonnes. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué

au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{II.24}$$

J : L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant les inerties de la turbine, de la génératrice, des deux arbres. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} [12]

$$C_{mes} = C_g - C_{em} - C_{vi} \tag{I.25}$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f : [1]

$$C_f = C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \tag{I.26}$$

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc : le couple électromagnétique C_{em} .

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est présenté sur la figure (II-16)

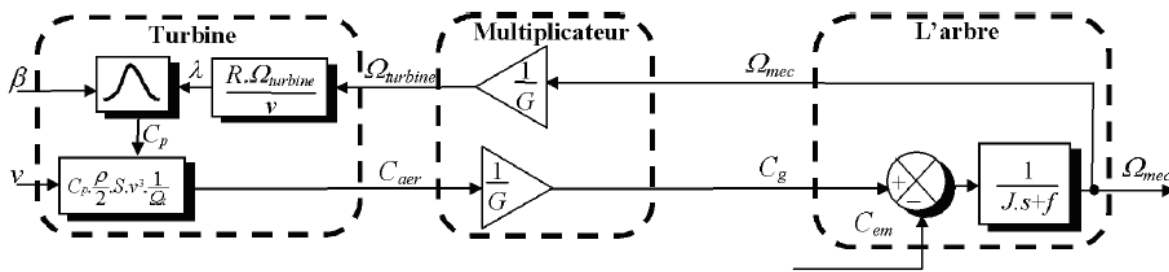


Figure II.16 : schéma bloc du modèle de la turbine [26].

II.7- Différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable [25]

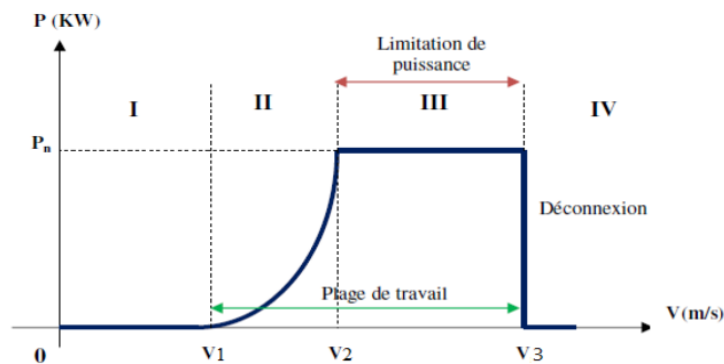


Figure II.17: Zones de fonctionnement d'une éolienne.

V_1 : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine

V2: Vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale du générateur.

V3: Vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales.

Quatre zones de fonctionnement de la turbine peuvent être distinguées sur la figure (II.16).

–Zone I : $V < V_1$

La vitesse du vent est trop faible, la turbine ne fonctionne pas, par conséquent la puissance extraite est nulle.

–Zone II : $V_1 < V < V_2$

Dans cette zone un algorithme de commande est appliqué pour extraire la puissance maximale pour chaque vitesse du vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Le coefficient de puissance maximum correspond dans ce cas à un angle de calage optimal et constant. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

–Zone III : $V_2 < V < V_3$

La vitesse de rotation nominale est atteinte, tandis que la puissance disponible arrive à des valeurs trop importantes, la puissance extraite est donc limitée à l'aide du système d'orientation des pales « pitch control », tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

–Zone IV : $V > V_3$

La vitesse du vent devient trop forte. Un dispositif de protection est actionné pour éviter des ruptures mécaniques, la turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

II.8. Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP)

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

II.8.1. Circuit équivalent d'un générateur synchrone

On peut représenter un GSAP triphasé par un circuit qui montre trois tensions induites E correspondant à chacune des phases. Chaque phase contient une résistance R_s en série avec une réactance X_s au moins 10 fois plus grand que la valeur de R_s . On peut donc négliger la résistance, ce qui donne le circuit simple de la Figure II.17.

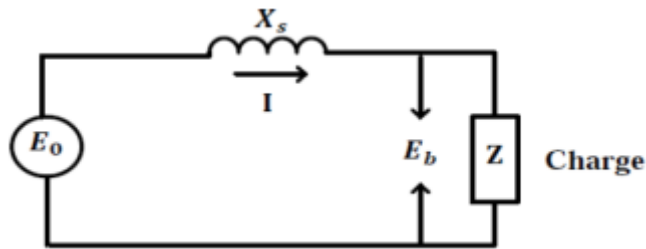


Figure II.18 : Schéma électrique équivalent d'un générateur synchrone.

Avant de présenter la modélisation de la GSAP, il est intéressant d'établir le bilan de puissance sous forme graphique (II.19) avec l'utilisation des paramètres suivants : la puissance électrique P_{elec} puissance mécanique P_{mec} , les pertes fer P_{fer} , les pertes joule P_{joul} et les pertes frottements P_{frot} la puissance électromagnétique [24].

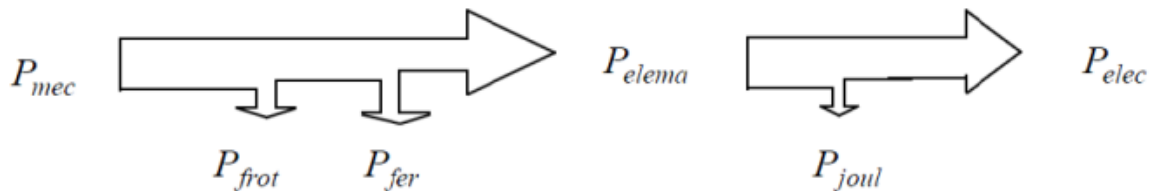


Figure II.19: Bilan de puissance d'un générateur synchrone.

Dans le cadre de ce mémoire, nous présentons l'une des différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. Dans la littérature on distingue deux familles de structures de commande pour la maximisation de la puissance extraite [51]

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

Dans notre travail, nous supposons que l'éolienne fonctionne toujours dans la zone 2 ($v_1 < v < v_2$) où la turbine est tout le temps pilotée par un algorithme MPPT, le contrôle du couple électromagnétique par asservissement de la vitesse mécanique est assuré par un régulateur de type classique Proportionnel Intégral (PI).

II.8.2. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la GSAP

La modélisation de la machine synchrone à aimants permanents obéit aux hypothèses simplificatrices suivantes [2]:

- ✓ Le circuit magnétique est considéré linéaire (absence de saturation),
- ✓ La répartition du champ inducteur dans l'entrefer ainsi que les forces magnétomotrices (FMM) sont sinusoïdales,
- ✓ Les harmoniques d'encoches et d'espace ne sont pas pris en compte,
- ✓ L'hystérésis, les courants de Foucault, l'effet de peau sont négligés,
- ✓ Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température,
- ✓ L'excitation est créée par les aimants permanents au niveau du rotor, ces derniers sont supposés de perméabilité voisine de celle de l'air.

II.8.3. Mise en équation de la MSAP

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte trois enroulements statoriques triphasés (a, b, c) décalés entre eux par un angle de $(2\pi/3)$. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. L'angle θ_r donne la position du rotor par rapport au stator.

$$\theta_r = \omega t + \theta_0 \quad (\text{II.27})$$

D'habitude, l'axe de la phase (a) est considéré comme référence pour les transformations ultérieures. Le modèle de la MSAP qui sera développé dans notre travail est basé sur le schéma de la figure (II.20).

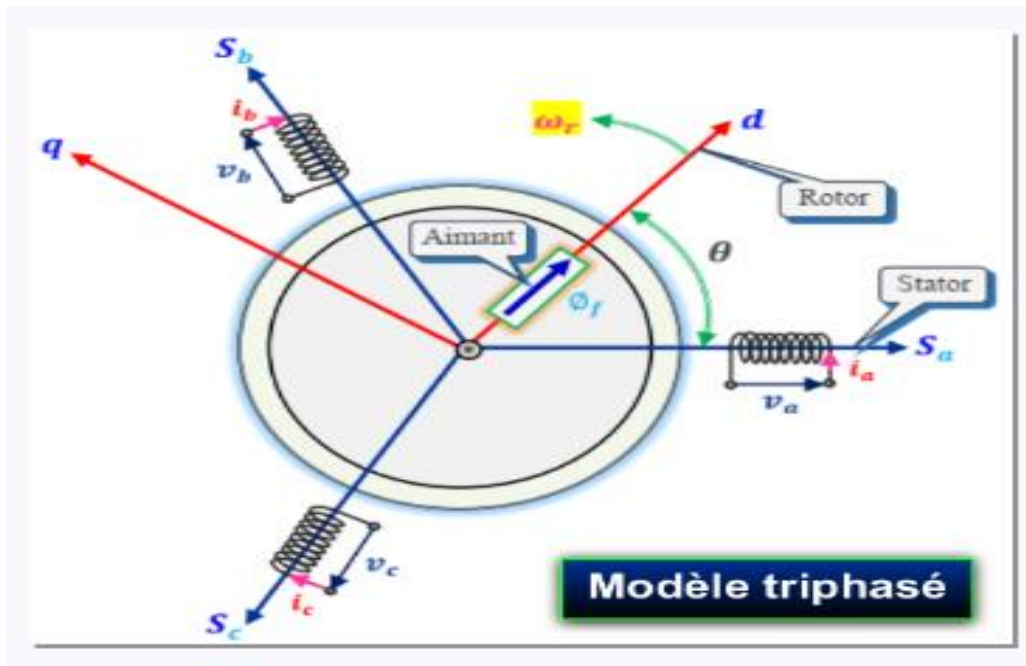


Figure II.20: Représentation de la machine synchrone à aimants permanents [52].

II.8.3.1. Equations électriques dans le repère triphasé

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

$[v_a v_b v_c]^T$: Vecteur tension de phases statoriques.

$[i_a i_b i_c]^T$: Vecteur courant de phases statoriques.

$[\Phi_a \Phi_b \Phi_c]^T$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

R_s : résistance des phases statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérée connectés en étoile à neutre isolé, d'où la somme instantanée des courants statoriques est nulle et donc il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple [31]. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

II.8.4. Transformation de Park

Après établissement du modèle électromagnétique de la machine dans le repère triphasé

en tenant compte des hypothèses simplificatrices, on peut noter sa complexité. Ce qui nous oblige à faire appel à la transformation de Park qui permet de transformer les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et inversement (FigureII.21)

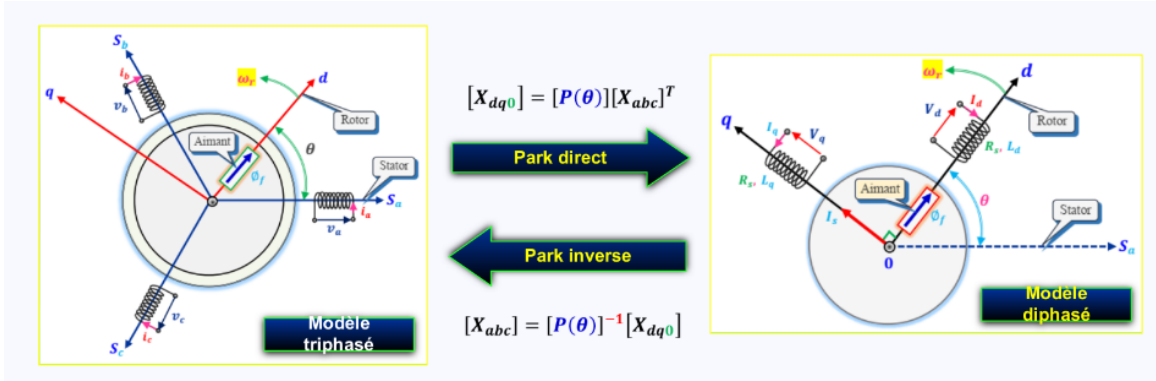


Figure II.21: Transformation triphasée-diphasée [52].

La transformation de Park est définie par la matrice $[P(\theta_r)]$ [25]:

$$[X_{dq0}] = [P(\theta_r)] [X_{abc}] \quad (II.29)$$

Où X peut-être un courant, une tension ou un flux et θ_r représente la position du rotor. Les termes X_d , X_q représentent les composantes longitudinale et transversale des variables statoriques (tensions, courants, flux et inductances).

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

$$P(\theta_r) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (II.30)$$

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

$$P^{-1}(\theta_r) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (II.31)$$

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

On définit aussi une autre transformation qui est celle de Concordia qui définit d'autres axes fictifs α et β tel que l'axe α est confondu avec l'axe a_s ce qui revient à poser $\theta_r = 0$ dans la

transformation de Park (équation II-31):

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

II.8.5. Modèle de la MSAP dans le repère de Park

Le schéma simplifié du GSAP dans le repère de Park est représenté sur la Figure II.21, le modèle de la MSAP est défini par les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques suivantes :

II.8.5.1. Equations électriques

Les équations électriques de la MSAP convention moteur sont données par [20]:

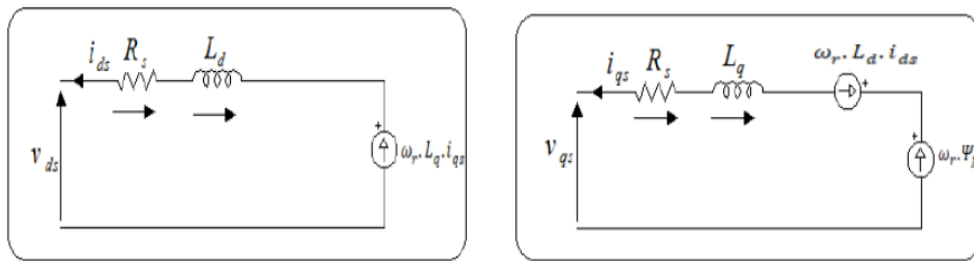
$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r \cdot L_q \cdot i_{qs} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r \cdot L_d \cdot i_{ds} + \omega_r \cdot \Phi_f \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

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

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s \cdot i_{ds} - L_s \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r \cdot L_q \cdot i_{qs} \\ v_{qs} = -R_s \cdot i_{qs} - L_s \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r (L_d \cdot i_{ds} - \Phi_f) \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

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

À partir de l'équation (II.33), on peut déduire le schéma équivalent du GSAP selon les deux axes **d** et **q** représenté par la figure (II.22) :



(a) Selon l'axe d : (b) Selon l'axe q

Figure II.22 : Schémas équivalents du GSAP selon les deux axes *d* et *q*.

II.8.5.2. Equations magnétiques

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_d \cdot i_{ds} + \Phi_f \\ \Phi_{qs} = L_q \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

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

II.8.5.3. Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor [20]:

$$C_{em} = \frac{dw_e}{d\theta_{geo}} = p \cdot \frac{dw_e}{d\theta_r} \quad (II.36)$$

W_e : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

θ_{geo} : Ecart angulaire de la partie mobile par rapport à la partie fixe (rotor par rapport au stator) :

p : Nombre de paires de pôles, θ_r : Angle électrique.

L'expression de la puissance transmise est donnée par : [20]

$$P(t) = (v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs}) \quad (II.37)$$

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

$$P(t) = [-R_s \cdot (i_{ds}^2 - i_{qs}^2) - \left(i_{ds} \cdot \frac{d\Phi_{ds}}{dt} + i_{qs} \cdot \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \right) + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot (\Phi_{ds} \cdot i_{qs} - \Phi_{qs} \cdot i_{ds})] \quad (II.38)$$

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

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

$\frac{d\theta_r}{dt} \cdot (\Phi_{ds} \cdot i_{qs} - \Phi_{qs} \cdot i_{ds})$: La puissance électromagnétique.

Sachant que : $P = C_{em} \cdot \Omega$ et $\omega_r = p \cdot \Omega$: vitesse mécanique alors :

$C_{em} = p \cdot (\Phi_{ds} \cdot i_{qs} - \Phi_{qs} \cdot i_{ds})$ et après la substitution des valeurs de flux on aura :

$$C_{em} = p \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs} + i_{qs} \cdot \Phi_f] \quad (II.39)$$

II.8.5.4. Equations mécaniques :

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

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad (II.40)$$

Tel que :

- C_m : couple moteur.
- $f\Omega$: couple de frottements visqueux.
- f : coefficient des frottements visqueux.
- J : moment d'inertie de la machine.

Selon les équations précédentes, le schéma bloc du GSAP dans le repère (d, q) est représenté par la figure (II.23)

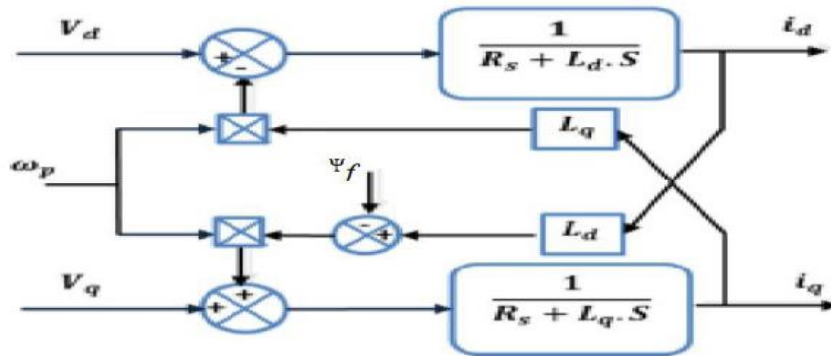


Figure II.23 : Schéma bloc du modèle électromagnétique de la GSAP dans le repère (d, q) .

II.9. Modélisation des convertisseurs électriques

L'étude de convertisseur triphasé à modulation de largeur d'impulsion (MLI) est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie connectée au réseau [2].

II.9.1. Hypothèse simplifiée

Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, il est important de faire les hypothèses suivantes [25]:

- Les sources de tension sont supposées parfaites : l'impédance série est nulle.
- La commutation des interrupteurs est instantanée. (Temps mort nul, temps de commutation nul, courant de fuite nul).
- La tension d'alimentation continue et constante.
- Le condensateur est initialement déchargé.
- La charge triphasée et le comportement du réseau triphasé sont équilibrés.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.

II.9.2. Modélisation du redresseur à MLI :

Le redresseur est un convertisseur de l'électronique de puissance qui permet de convertir une tension alternative en une tension continue unidirectionnelle.

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de Semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture

permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée.

Il y a deux manières de mettre en application des redresseurs MLI ; comme redresseur à source de courant, et redresseur à source de tension [32].

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée. Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu V_c est mesurée et comparée avec une tension de référence V_{cref} , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu V_c mesurée aux bornes condensateur 'C'.

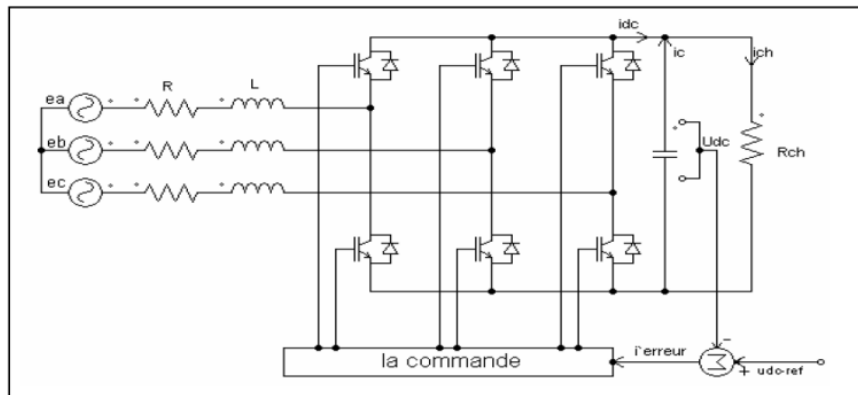


Figure II.24 : topologie de base d'un redresseur de tension.

La commande MLI non seulement peut contrôler la puissance active, mais également la puissance réactive, ce type du redresseur permet la correction du facteur de puissance. En outre, les formes d'onde des courants de la source peuvent être maintenues comme presque sinusoïdales, ce qui réduit la distorsion de la source [32].

Le courant de ligne i est commandé par la chute de tension produite par l'inductance L et la résistance R de la ligne et la tension d'entrée du redresseur V . Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors (MOS, IGBT, ...) en antiparallèle avec des diodes

Tableau II .1 : Huit états possibles des interrupteurs

K	S _a	S _b	S _c	V _{ab}	V _{bc}	V _{ca}
0	1	0	0	U _{dc}	0	- U _{dc}
1	1	1	0	0	U _{dc}	- U _{dc}
2	0	1	0	- U _{dc}	0	U _{dc}
3	0	1	1	- U _{dc}	0	- U _{dc}
4	0	0	1	0	- U _{dc}	U _{dc}
5	1	0	1	U _{dc}	- U _{dc}	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

De cette table on peut écrire les tensions d'entrée redresseur d'une manière générale comme suite [32]:

$$\begin{cases} u_{ab} = (S_a - S_b)U_{dc} \\ u_{bc} = (S_b - S_c)U_{dc} \\ u_{ca} = (S_c - S_a)U_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

D'où on peut déduire les tensions simples :

$$\begin{cases} v_a = f_a u_{dc} \\ v_b = f_b u_{dc} \\ v_c = f_c u_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Avec :

$$\begin{cases} f_a = \frac{2S_a - (S_b + S_c)}{3} \\ f_b = \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3} \\ f_c = \frac{2S_c - (S_a + S_b)}{3} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

II.9.2.1. Représentation fonctionnelle du redresseur à MLI dans le référentiel triphasé

Les équations de tensions pour le système triphasé équilibré sans neutre peuvent être écrites Comme suit :

$$\begin{cases} \bar{e} = \bar{v}_l + \bar{v} \\ \bar{e} = Ri + L \frac{di}{dt} + \bar{v} \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.45})$$

Et la tension d'entrée du redresseur peut être écrite comme suite

$$v_n = u_{dc} (S_n - 1/3 \sum_{n=a}^c S_n) \quad (\text{II.46})$$

On $S_n = 0$ ou 1 , sont l'état des interrupteurs, où ($n=a, b, c$). Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme :

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = i_c \quad (\text{II.47})$$

Le courant dans la capacité peut aussi écrire :

$$i_c = i_{dc} - i_{dc_g} \quad (\text{II.48})$$

Aussi, le courant i_c est la somme du produit des courants de chaque phase par l'état de son interrupteur.

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{dc_g} \quad (\text{II.49})$$

Donc, le coté alternatif du redresseur

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + R i_a = e_a - U_{dc} \left(S_a - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_a - U_{dc} \left(S_a - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_b}{dt} + R i_b = e_b - U_{dc} \left(S_b - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_b - U_{dc} \left(S_b - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_c}{dt} + R i_c = e_c - U_{dc} \left(S_c - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_c - U_{dc} \left(S_c - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

Où les tensions du réseau sont exprimées par :

$$\begin{cases} e_a = E_m \sin(\omega t) \\ e_b = E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_c = E_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.51})$$

L'équation précédent peut résumer comme suit:

$$\left(L \frac{d}{dt} + R \right) i_n = e_n - U_{dc} \left(S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \quad (\text{II.52})$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \sum_{k=a}^c i_n S_n - i_{ch} \quad (\text{II.53})$$

La combinaison des équations (II.53), (II.54) peut être représentée comme le schéma fonctionnel triphasé, qui montré dans la figure II.25.

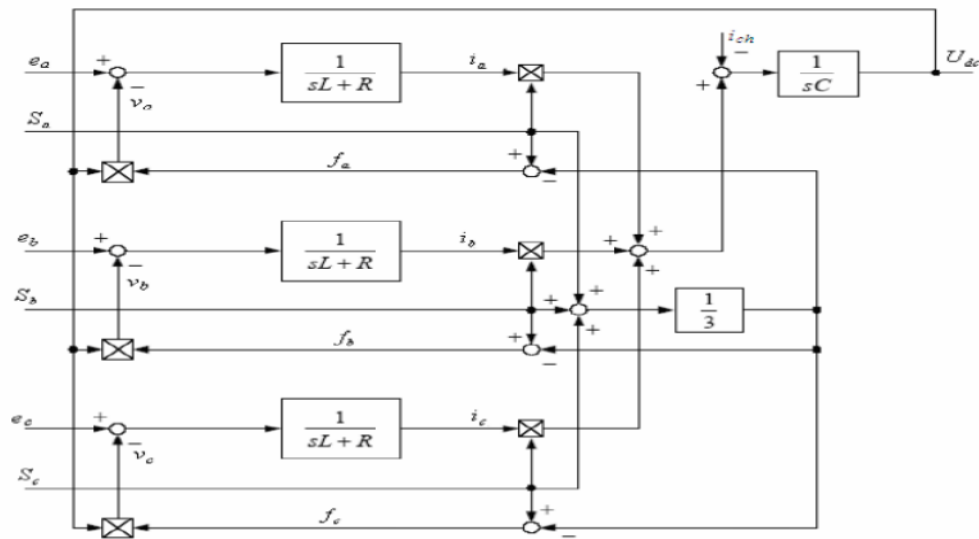


Figure II.25 : Schéma fonctionnel du redresseur triphasé à MLI.

II.9.3. Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux

L'onduleur est un convertisseur statique qui permet de transformer un signal d'entrée continu (DC) en un signal de sortie alternatif (AC). La commande des états passant et bloqué des transistors permet d'obtenir une tension alternative caractérisée par la fréquence nécessaire pour la charge alimentée. Le signal de commande de ces derniers est fourni par la commande MLI.

L'alimentation à fréquence variable de la machine se fait à l'aide d'un convertisseur statique généralement continu-alternatif qui représente aujourd'hui un composant essentiel dans les systèmes d'interfaçage avec le réseau. La source d'entrée peut être du type source de courant ou du type source de tension, la génération d'une onde de tension ayant des caractéristiques spécifiques d'amplitude de fréquence et de contenu harmonique. Un onduleur est donc une source de tension contrôlable en amplitude fréquence et « forme ».

L'onduleur triphasé à deux niveaux est constitué de trois onduleurs monophasés regroupés en parallèle et commandés de façon à obtenir à la sortie trois tensions décalées de 120 degrés, chaque bras est constituée deux interrupteurs. Ces interrupteurs ($S1, S4$), ($S2, S5$), ($S3, S6$) sont contrôlés de manière complémentaire pour éviter le court-circuit de la source [11]. Les interrupteurs peuvent être soit des MOSFET pour les faibles puissances et fréquences très élevées, des IGBT pour les grandes puissances et fréquences élevées, ou des GTO pour les très grandes puissances et fréquences faibles. Pour assurer la circulation du courant dans les deux sens,

l'interrupteur doit être placé en antiparallèle avec une diode [33].

Les tensions simples sont:

$$\begin{cases} v_{aN} = S_1 \times V_{dc} \\ v_{bN} = S_2 \times V_{dc} \\ v_{cN} = S_3 \times V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.54})$$

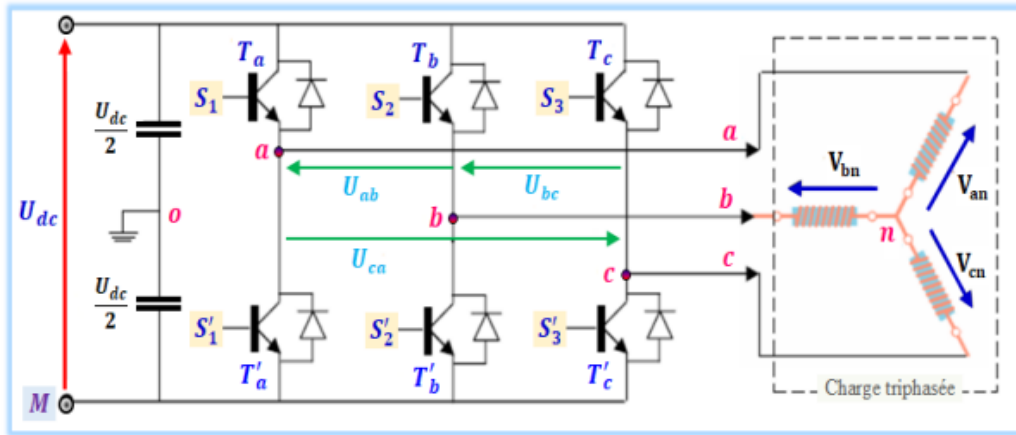


Figure II.26 : onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

Où S_1 , S_2 et S_3 désignent les états des interrupteurs des phases a , b et c respectivement, V_{dc} est la borne négative de la tension continue [25].

Les tensions composées sont :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{aN} + V_{Nb} = V_{aN} - V_{bN} = (S_1 - S_2) \\ V_{bc} = V_{bN} + V_{Nc} = V_{bN} - V_{cN} = (S_2 - S_3) \\ V_{ca} = V_{cN} + V_{Na} = V_{cN} - V_{aN} = (S_3 - S_1) \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

Sous la forme matricielle, on a :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.56})$$

Les tensions simples sont :

$$\begin{cases} V_{an} = \left(\frac{2}{3}\right) V_{aN} - \left(\frac{2}{3}\right) (V_{bN} + V_{cN}) \\ V_{bn} = \left(\frac{2}{3}\right) V_{bN} - \left(\frac{2}{3}\right) (V_{aN} + V_{cN}) \\ V_{cn} = \left(\frac{2}{3}\right) V_{cN} - \left(\frac{2}{3}\right) (V_{aN} + V_{bN}) \end{cases} \quad (\text{II.57})$$

V Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.58})$$

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu-alternatif.

$$[V_{AC}] = [T] \times [V_{dc}] \quad (\text{II.59})$$

Tel que :

$$[V_{AC}] = [V_{an} \ V_{bn} \ V_{cn}]^T \quad (\text{II.60})$$

$$[V_{dc}] = V_{dc} \cdot [S_a \ S_b \ S_c]^T \quad (\text{II.61})$$

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.62})$$

II.9.3.1. MLI sinus-triangulaire

La M.L.I sinus-triangulaire est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire bipolaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, les trois références sinusoïdales.

Le principe de commande d'un onduleur triphasé présenté sur la Figure II.27, valable pour un bras de commutation.

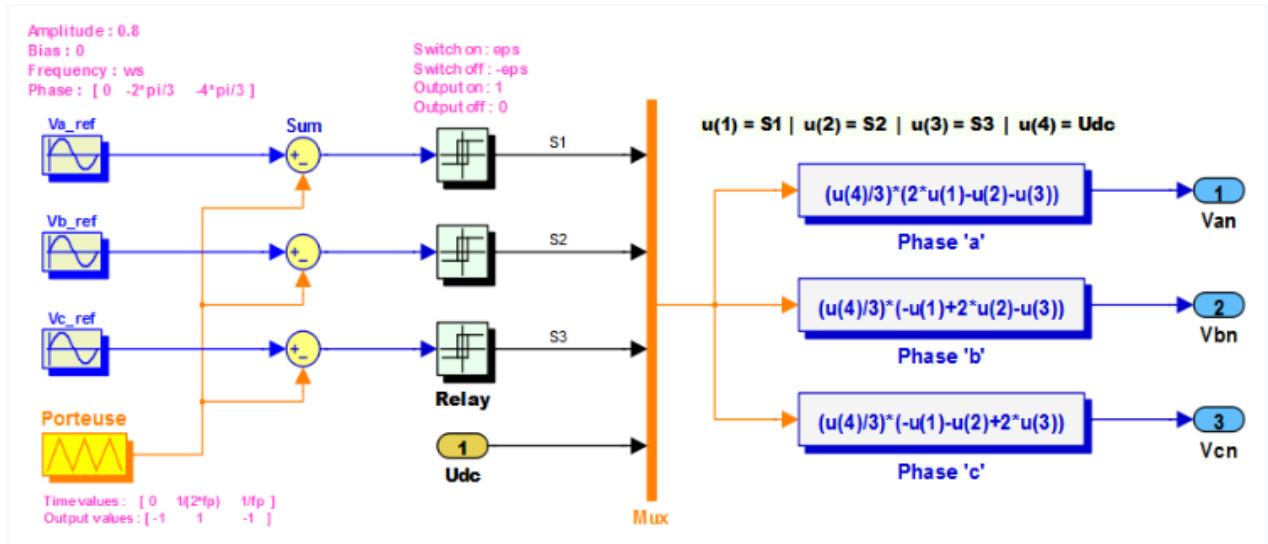


Figure II.27 : Principe de contrôle à MLI d'un bras de commutation.

$V_r(t)$: signal de référence.

$V_p(t)$: signal triangulaire (porteuse)

Si $V_r(t) > V_p(t) \rightarrow T$ fermé et T' ouvert

Si $V_r(t) < V_p(t) \rightarrow T$ ouvert et T' fermé

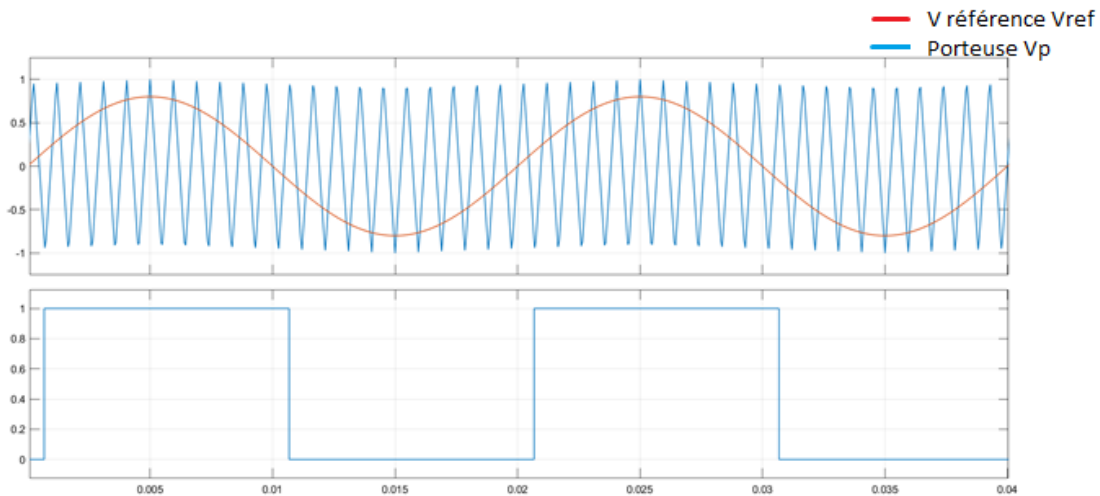


Figure II.28 : Commande des interrupteurs par MLI sinus-triangulaire

La commande MLI triangulé-sinusoidale est caractérisé par deux paramètres [34]:

✚ L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f_r

de la référence : $m = \frac{f_p}{f_r}$

Le coefficient de réglage r égale au rapport de l'amplitude A_r de la référence à l'amplitude crête A_p de la porteuse : $r = \frac{A_r}{A_p}$

La commande en MLI est utilisée pour l'onduleur car elle permet d'obtenir un courant dont la forme est très proche d'une sinusoïde et pour pouvoir repousser les harmoniques de la tension de sortie vers des fréquences élevées, ce qui facilite le filtrage et permet le réglage de l'amplitude du fondamental de la tension de sortie.

II.9.4. Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC

La présentation de l'onduleur de tension triphasé à structure NPC peut être formulée de manière plus scientifique et sophistiquée de la manière suivante :

L'onduleur triphasé à trois niveaux, illustré dans la Figure II.29, se compose de trois bras identiques. Chacun de ces bras est composé de quatre interrupteurs bidirectionnels et de deux diodes de bouclage. Il convient de noter que chaque interrupteur bidirectionnel est constitué d'un transistor couplé à une diode en configuration antiparallèle. Dans cette analyse, nous supposons que les interrupteurs en question sont idéaux, c'est-à-dire que nous négligeons les effets associés à la commutation ainsi que les pertes de tension aux bornes des interrupteurs actifs. De plus, nous faisons l'hypothèse que les tensions aux bornes des deux condensateurs d'entrée sont maintenues constantes et égales à la moitié de la tension du bus continu.

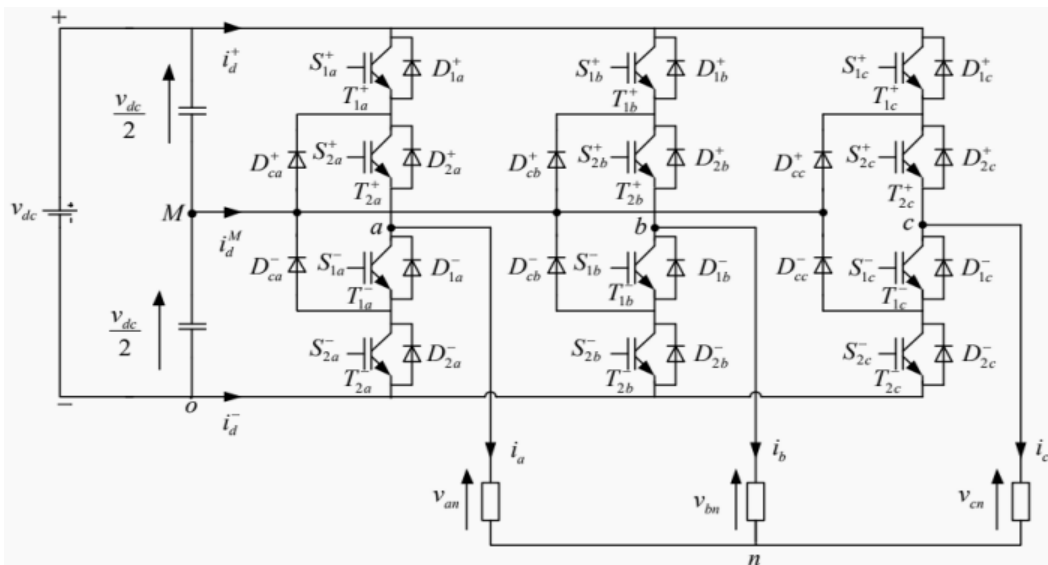


Figure II.29 : Schéma de l'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC

II.9.4.1. Modélisation de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure

➤ Fonction de connexion d'un interrupteur

Chaque interrupteur supposé idéal est modélisé par une fonction logique de connexion définie par :

$$S_n = \begin{cases} 1 & \text{Si } T_{ik}^* \text{ est fermé et } T_{ik}^* \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{si } T_{ik}^* \text{ est ouvert et } T_{ik}^* \text{ est fermé} \end{cases}$$

Les fonctions de connexion des interrupteurs situés sur les demi-bras supérieur et inférieur sont liées par la commande complémentaire suivante :

$$s_{ik}^- = \overline{s_{ik}^+} = 1 - s_{ik}^+$$

(II.63)

➤ Fonctions de connexion d'un demi-bras

La fonction de connexion d'un demi-bras, notée F_k^* , est exprimée à l'aide des fonctions de connexion des interrupteurs par :

$$F_k^* = S_{1k}^* S_{2k}^*; * = +, -; k = a, b, c \quad (\text{II.64})$$

Donc les fonctions de connexion des six demi-bras d'un onduleur triphasé à trois niveaux sont exprimées par :

$$\begin{aligned} F_a^+ &= S_{1a}^+ S_{2a}^+, F_a^- = S_{1a}^- S_{2a}^- \\ F_b^+ &= S_{1b}^+ S_{2b}^+, F_b^- = S_{1b}^- S_{2b}^- \\ F_c^+ &= S_{1c}^+ S_{2c}^+, F_c^- = S_{1c}^- S_{2c}^- \end{aligned}$$

(II.65)

➤ Tensions de phase par rapport au point milieu du bus continu

Le potentiel du nœud « k » d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux par rapport au point milieu «M» est donné par :

$$v_{kM} = F_k^+ \frac{V_{dc}}{2} - F_k^- \frac{V_{dc}}{2} = (F_k^+ - F_k^-) \frac{V_{dc}}{2} = (S_{1k}^+ S_{2k}^+ - S_{1k}^- S_{2k}^-) \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II.66})$$

Les trois tensions V_{aM} , V_{bM} et V_{cM} sont exprimées donc par :

$$\begin{aligned} v_{aM} &= (S_{1a}^+ S_{2a}^+ - S_{1a}^- S_{2a}^-) \frac{V_{dc}}{2} \\ v_{bM} &= (S_{1b}^+ S_{2b}^+ - S_{1b}^- S_{2b}^-) \frac{V_{dc}}{2} \\ v_{cM} &= (S_{1c}^+ S_{2c}^+ - S_{1c}^- S_{2c}^-) \frac{V_{dc}}{2} \end{aligned} \quad (\text{II.67})$$

➤ Tensions composées

Les tensions composées u_{ab} , u_{bc} et u_{ca} sont obtenues à partir des relations suivantes (équation II.68)

$$\begin{cases} u_{ab} = v_{aM} - v_{bM} = (\mathbf{S}_{1a}^+ \mathbf{S}_{2a}^+ - \mathbf{S}_{1a}^- \mathbf{S}_{2a}^-) \frac{v_{dc}}{2} - (\mathbf{S}_{1b}^+ \mathbf{S}_{2b}^+ - \mathbf{S}_{1b}^- \mathbf{S}_{2b}^-) \frac{v_{dc}}{2} = ((\mathbf{S}_{1a}^+ \mathbf{S}_{2a}^+ - \mathbf{S}_{1a}^- \mathbf{S}_{2a}^-) - (\mathbf{S}_{1b}^+ \mathbf{S}_{2b}^+ - \mathbf{S}_{1b}^- \mathbf{S}_{2b}^-)) \frac{v_{dc}}{2} \\ u_{bc} = v_{bM} - v_{cM} = (\mathbf{S}_{1b}^+ \mathbf{S}_{2b}^+ - \mathbf{S}_{1b}^- \mathbf{S}_{2b}^-) \frac{v_{dc}}{2} - (\mathbf{S}_{1c}^+ \mathbf{S}_{2c}^+ - \mathbf{S}_{1c}^- \mathbf{S}_{2c}^-) \frac{v_{dc}}{2} = ((\mathbf{S}_{1b}^+ \mathbf{S}_{2b}^+ - \mathbf{S}_{1b}^- \mathbf{S}_{2b}^-) - (\mathbf{S}_{1c}^+ \mathbf{S}_{2c}^+ - \mathbf{S}_{1c}^- \mathbf{S}_{2c}^-)) \frac{v_{dc}}{2} \\ u_{ca} = v_{cM} - v_{aM} = (\mathbf{S}_{1c}^+ \mathbf{S}_{2c}^+ - \mathbf{S}_{1c}^- \mathbf{S}_{2c}^-) \frac{v_{dc}}{2} - (\mathbf{S}_{1a}^+ \mathbf{S}_{2a}^+ - \mathbf{S}_{1a}^- \mathbf{S}_{2a}^-) \frac{v_{dc}}{2} = ((\mathbf{S}_{1c}^+ \mathbf{S}_{2c}^+ - \mathbf{S}_{1c}^- \mathbf{S}_{2c}^-) - (\mathbf{S}_{1a}^+ \mathbf{S}_{2a}^+ - \mathbf{S}_{1a}^- \mathbf{S}_{2a}^-)) \frac{v_{dc}}{2} \end{cases}$$

➤ Tensions simples

Soit « n » le point neutre du coté alternatif de la charge, alors on a :

$$\begin{cases} v_{aM} = v_{an} + v_{nM} \\ v_{bM} = v_{bn} + v_{nM} \\ v_{cM} = v_{cn} + v_{nM} \end{cases} \quad (\text{II.69})$$

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

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \quad (\text{II.70})$$

La somme des tensions V_{aM} , V_{bM} et V_{cM} conduit, en utilisant l'équation précédente, à l'expression de la tension V_{nM} donnée par :

$$v_{nM} = \frac{1}{3}(v_{aM} + v_{bM} + v_{cM}) \quad (\text{II.71})$$

Les trois tensions simples de sortie de l'onduleur en fonction des tensions V_{aM} , V_{bM} et V_{cM} sont calculées donc par :

$$\begin{cases} v_{an} = v_{aM} - v_{nM} = v_{aM} - \frac{1}{3}(v_{aM} + v_{bM} + v_{cM}) = \frac{2}{3}v_{aM} - \frac{1}{3}v_{bM} - \frac{1}{3}v_{cM} \\ v_{bn} = v_{bM} - v_{nM} = v_{bM} - \frac{1}{3}(v_{aM} + v_{bM} + v_{cM}) = -\frac{1}{3}v_{aM} + \frac{2}{3}v_{bM} - \frac{1}{3}v_{cM} \\ v_{cn} = v_{cM} - v_{nM} = v_{cM} - \frac{1}{3}(v_{aM} + v_{bM} + v_{cM}) = -\frac{1}{3}v_{aM} - \frac{1}{3}v_{bM} + \frac{2}{3}v_{cM} \end{cases} \quad (\text{II.72})$$

Les trois tensions simples de sortie de l'onduleur NPC sont exprimées en termes des fonctions de connexion des interrupteurs par :

$$\begin{cases} v_{an} = \frac{2}{3}(\mathbf{S}_{1a}^+ \mathbf{S}_{2a}^+ - \mathbf{S}_{1a}^- \mathbf{S}_{2a}^-) \frac{v_{dc}}{2} - \frac{1}{3}(\mathbf{S}_{1b}^+ \mathbf{S}_{2b}^+ - \mathbf{S}_{1b}^- \mathbf{S}_{2b}^-) \frac{v_{dc}}{2} - \frac{1}{3}(\mathbf{S}_{1c}^+ \mathbf{S}_{2c}^+ - \mathbf{S}_{1c}^- \mathbf{S}_{2c}^-) \frac{v_{dc}}{2} \\ v_{ba} = -\frac{1}{3}(\mathbf{S}_{1a}^+ \mathbf{S}_{2a}^+ - \mathbf{S}_{1a}^- \mathbf{S}_{2a}^-) \frac{v_{dc}}{2} + \frac{2}{3}(\mathbf{S}_{1b}^+ \mathbf{S}_{2b}^+ - \mathbf{S}_{1b}^- \mathbf{S}_{2b}^-) \frac{v_{dc}}{2} - \frac{1}{3}(\mathbf{S}_{1c}^+ \mathbf{S}_{2c}^+ - \mathbf{S}_{1c}^- \mathbf{S}_{2c}^-) \frac{v_{dc}}{2} \\ v_{cn} = -\frac{1}{3}(\mathbf{S}_{1a}^+ \mathbf{S}_{2a}^+ - \mathbf{S}_{1a}^- \mathbf{S}_{2a}^-) \frac{v_{dc}}{2} - \frac{1}{3}(\mathbf{S}_{1b}^+ \mathbf{S}_{2b}^+ - \mathbf{S}_{1b}^- \mathbf{S}_{2b}^-) \frac{v_{dc}}{2} + \frac{2}{3}(\mathbf{S}_{1c}^+ \mathbf{S}_{2c}^+ - \mathbf{S}_{1c}^- \mathbf{S}_{2c}^-) \frac{v_{dc}}{2} \end{cases} \quad (\text{II.73})$$

Finalement, les tensions simples aux bornes de la charge triphasée équilibrée s'expriment en fonction des fonctions de connexions des interrupteurs par la relation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_{an} \\ \mathbf{v}_{bn} \\ \mathbf{v}_{cn} \end{pmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{S}_{1a}^+ \mathbf{S}_{2a}^+ - \mathbf{S}_{1a}^- \mathbf{S}_{2a}^- \\ \mathbf{S}_{1b}^+ \mathbf{S}_{2b}^+ - \mathbf{S}_{1b}^- \mathbf{S}_{2b}^- \\ \mathbf{S}_{1c}^+ \mathbf{S}_{2c}^+ - \mathbf{S}_{1c}^- \mathbf{S}_{2c}^- \end{pmatrix} \quad (\text{II.74})$$

➤ **Courants d'entrée**

Les courants d'entrée de l'onduleur i_d^+ , i_d^- et i_{dM} s'expriment en fonction des courants de phase i_k , $k = a, b, c$ et les fonctions de connexion des demi-bras comme suit :

$$\begin{aligned} i_d^+ &= \mathbf{F}_a^+ i_a + \mathbf{F}_b^+ i_b + \mathbf{F}_c^+ i_c \\ i_d^- &= \mathbf{F}_a^- i_a + \mathbf{F}_b^- i_b + \mathbf{F}_c^- i_c \\ i_{dM} &= -(i_d^+ + i_d^-) \end{aligned} \quad (\text{II.75})$$

II.9.4.2 Simulation de l'onduleur NPC à trois niveaux commandés par la technique LSPWM

➤ **Principe du technique LSPWM**

Le principe de la technique de modulation sinusoidale SPWM à porteuses décalées verticalement (LSPWM) dans le contexte d'un onduleur NPC à trois niveaux implique la comparaison de trois tensions de référence avec deux porteuses triangulaires ayant la même fréquence et la même amplitude. Ces trois tensions de référence sont configurées de manière à constituer un système triphasé équilibré, conformément à l'équation suivante :

$$v_{\text{aref}} = r \frac{v_{dc}}{2} \sin(2\pi f_r t) \quad v_{\text{bref}} = r \frac{v_{dc}}{2} \sin\left(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad v_{\text{cref}} = r \frac{v_{dc}}{2} \sin\left(2\pi f_r t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.76})$$

Où $r \in [0 \ 1]$ est le taux de modulation et f_r est la fréquence de la référence fixée dans notre cas à 50Hz.

Le bloc « Three-phase NPC inverter » représente le circuit de puissance de l'onduleur donné par :

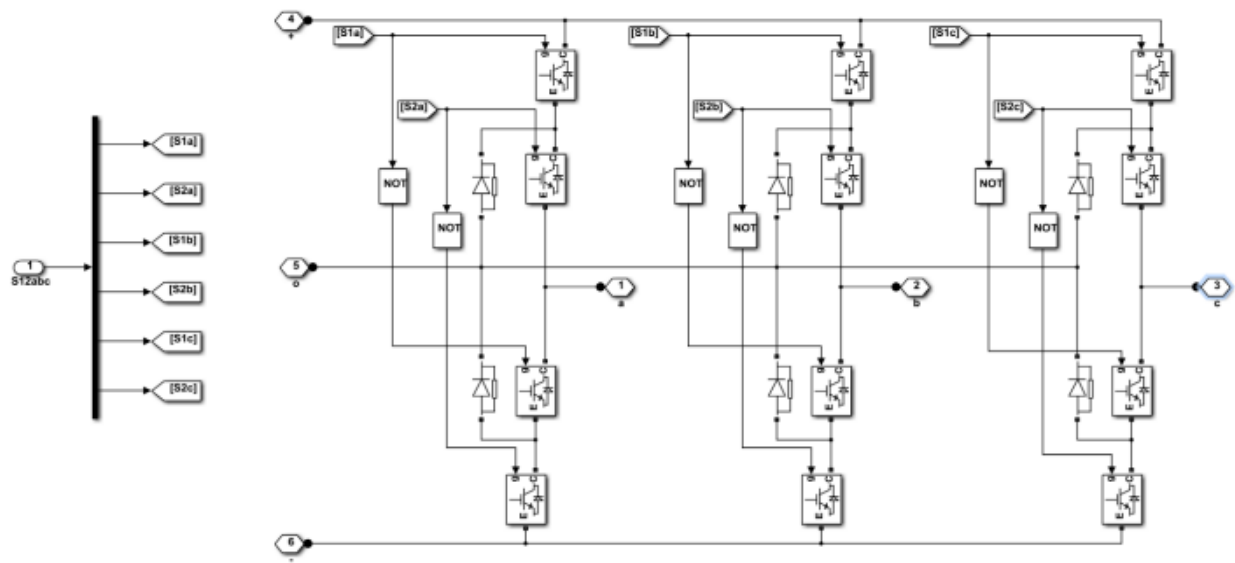


Figure II.30 : Schéma block de l'onduleur triphasé à structure NPC

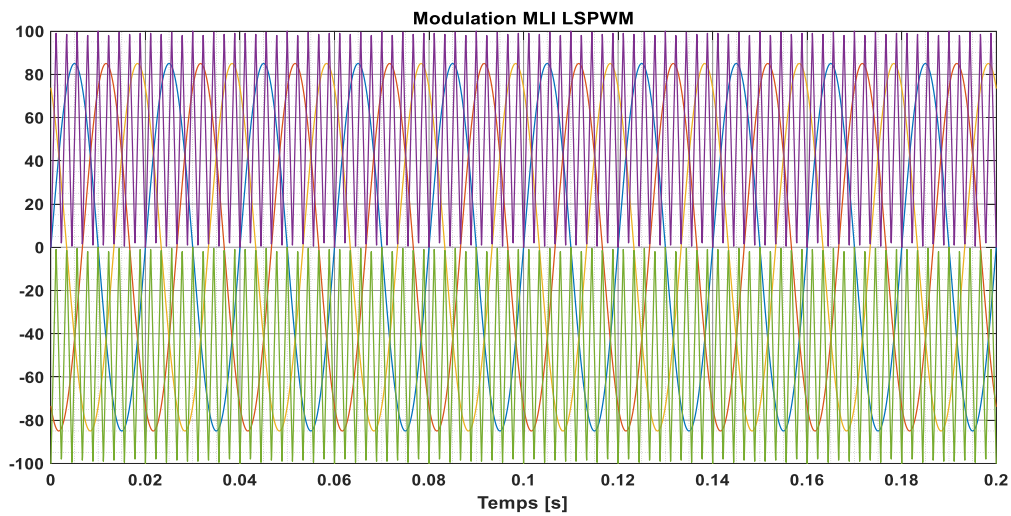


Figure II.31 : Principe de la MLI à deux porteuses pour un onduleur à trois niveaux.

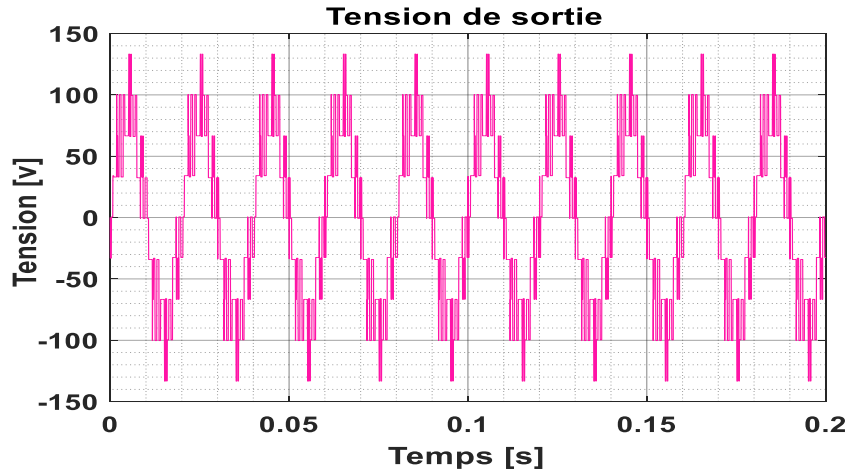


Figure II.32 : Tension simple, à la sortie de l'onduleur à 3niveaux.

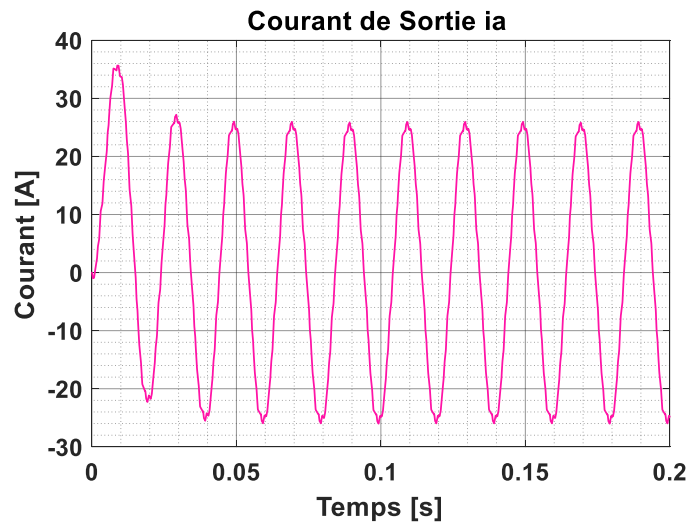


Figure II.33 : Courant de phase, à la sortie de l'onduleur à 3niveaux.

II.10. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons décrit les différentes structures d'éoliennes à vitesse variable basées sur une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), notamment la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (Loi de Betz), et la régulation mécanique de la puissance. Après avoir présenté les différentes zones de fonctionnement de l'aérogénérateur nous avons présenté le modèle mathématique de la génératrice à l'aide de la transformation de Park. Nous avons modélisé aussi les convertisseurs associés à notre chaîne de conversion, en adoptant la stratégie de commande à modulation de largeur d'impulsions (MLI).

Dans le prochain chapitre, nous présenterons: commande et simulation de la chaîne éolienne.

CHAPITRE III

COMMANDE ET

SIMULATION DE LA

CHAINE EOLIENNE

III.1 Introduction

Il a été montré dans le premier chapitre que l'utilité de la GSAP est de permettre le fonctionnement à vitesse variable, ceci est nécessaire pour extraire le maximum de puissance à partir du vent et ainsi augmenter le rendement de la machine.

Pour avoir un fonctionnement à vitesse de rotation donnée correspondant à une vitesse de vent, il faut que la machine impose un couple résistant permettant ce fonctionnement. Etant donné que la puissance est le produit de la vitesse et du couple il suffit d'avoir une puissance qu'il faut suivre pour fonctionner à vitesse optimale. Ainsi une commande vectorielle de la GSAP sera réalisée, celle-ci sera détaillée dans la suite de notre travail.

Dans ce chapitre on s'intéresse sur l'impact de la régulation classique par un PI sur le réglage de la chaîne éolienne. Le calcul et la synthèse des valeurs exactes des régulateurs PI se fait par les deux méthodes suivantes :

- La méthode de placement des pôles.
- La méthode par compensation.

III.2 Commande et simulation de la chaîne éolienne du côté machine (turbine + GSAP)

De cette étude est principalement basée sur la stratégie de contrôle du système de production d'énergie basé sur la GSAP. Pour montrer les performances des correcteurs PI, quelques résultats de simulations du système Turbine-GSAP sont présentés et analysés.

III.2.1 Commande de la vitesse de rotation de la machine par (MPPT)

Le but de la méthode MPPT est d'extraire un maximum de puissance en prenant en compte la variation de la vitesse du vent. La (Figure III.1) montre qu'à chaque vitesse du vent il existe un point où la vitesse de rotation de la turbine optimale qui correspond à la puissance extraite maximale. La vitesse de référence de la turbine Ω_{ref} (vitesse de rotation optimale) est calculée à l'aide du rapport de vitesse optimale λ_{opt} qui à son tour correspond à la valeur maximale du coefficient de puissance C_p

Les vitesses des vents pour lesquelles on a fait ces résultats sont (7.5m/s, 9m/s, 10m/s, 11m/s, 11.5m/s).

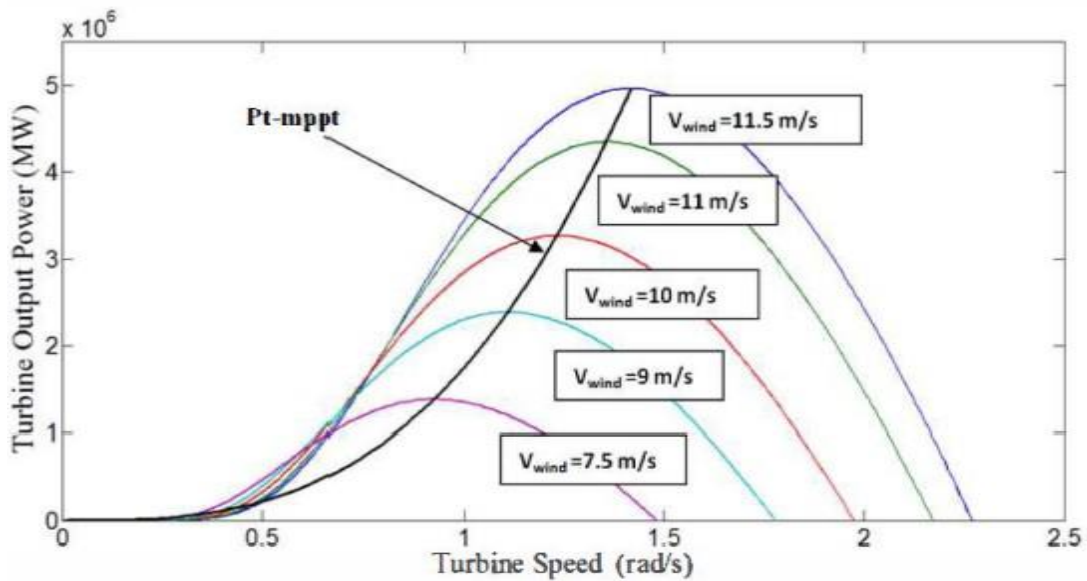


Figure III.1. Puissance maximale en fonction de la vitesse du vent.

Pour contrôler la vitesse de la GSAP, la référence optimale de la vitesse exprimée Ω_{ref} a été utilisée. Cette référence est obtenue à partir de la technique de MPPT (Maximum Power Point Tracking).

$$\text{Tel que : } \Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt}.v}{Rt} \quad (\text{III.1})$$

L'angle de calage des pales dans cette étude est nul ($\beta = 0$).

III.2.2 Synthèse des régulateurs

III.2.2.1. Réglage de la vitesse de rotation

Dans un premier temps une commande à base de régulateurs PI sera réalisée. Cette dernière est simple et rapide à mettre en œuvre, procure l'avantage d'avoir des performances acceptables.

Le schéma de commande donné par la (Figure III.2) illustre le fonctionnement du régulateur de vitesse PI, tel que l'entrée du régulateur est la différence entre la vitesse de référence de la turbine et la vitesse mesurée, la sortie donne le couple électromagnétique de référence.

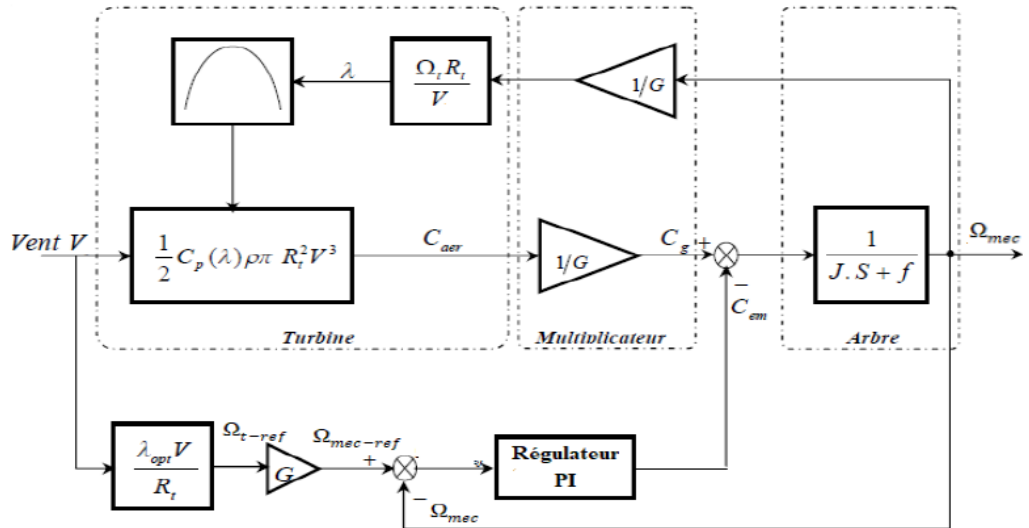


Figure III.2. Stratégie de contrôle de la vitesse.

a) Synthèse de PI par placement de pôles

Puisque le système étudié est linéaire on peut écrire le bloc représentant la boucle de commande de vitesse, on appliquant le théorème de superposition, en boucle fermée comme suit :

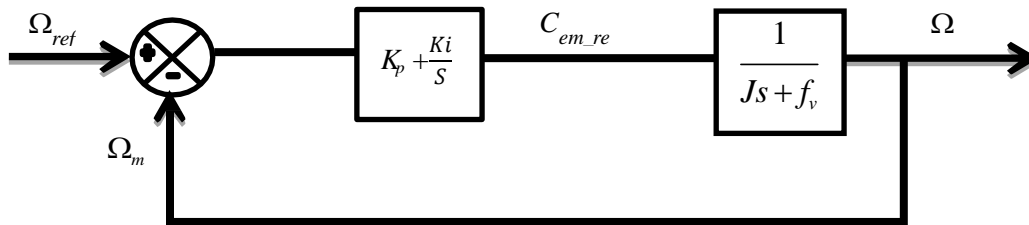


Figure III.3 Schéma bloc de MPPT par un PI.

La fonction de transfert en boucle ouverte est comme suit :

$$FTBO = \frac{S.k_p + k_i}{S(Js + f_v)} \tag{III.2}$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime alors par :

$$FTBF = \frac{S.k_p + k_i}{J.S^2 + s.f_v + S.k_p + k_i} = \frac{s \cdot \frac{k_p}{J} + \frac{k_i}{J}}{s^2 + \left(\frac{f_v + k_p}{J}\right)s + \frac{k_i}{J}} \tag{III.3}$$

Cette fonction de transfert est du second ordre, elle est de la forme :

$$\text{FTBF} = \frac{W_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot W_n \cdot s + W_n^2} \quad (\text{III.4})$$

$$\begin{cases} k_p = 2 \cdot \xi \cdot W_n \cdot J - f_v \\ k_i = J \cdot W_n^2 \end{cases} \quad \text{Avec: } W_n = \frac{5.8}{t_{sd}}$$

b) Calcul des paramètres du PI par compensation des pôles

Cette méthode consiste à compenser les pôles lents du système par les zéros du régulateur PI. Le schéma bloc devient alors :

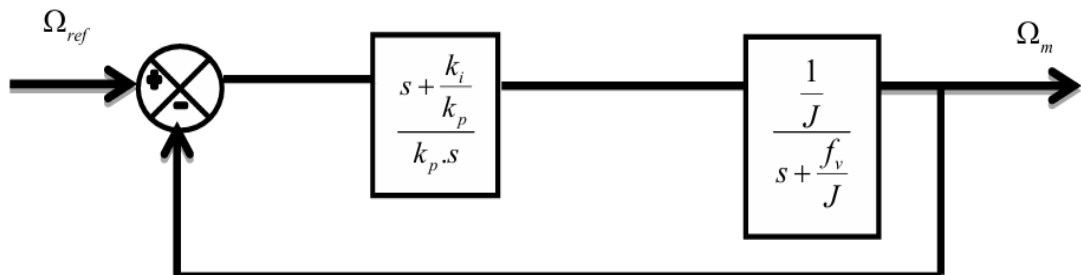


Figure III.4 Schéma bloc de MPPT par un PI après compensation du pôle

$$\begin{cases} k_i = k_p \cdot \frac{f_v}{J} \\ \text{avec: } \tau = \frac{J}{f_v} \end{cases}$$

La fonction de transfert en boucle fermée :

$$\text{FTBF} = \frac{1}{1 + J \cdot k_p \cdot s}$$

Par identification avec un premier ordre, on peut déterminer k_p puis k_i sera déterminé.

III.2.3 Commande des puissances active et réactive côté GSAP

On sait que l'image de la puissance active est représentée par le courant I_q et l'image de la puissance réactive est représentée par le courant I_d , donc la régulation des courants nous permet indirectement de réguler les puissances actives et réactives.

La commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation permet de découpler les courants I_d et I_q , ce qui nous permet de faire la régulation des deux courants séparément.

On a:

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{qs} \\ V_q = R_s \cdot I_q + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{ds} \end{cases} \quad (III.5)$$

Les termes de découplage sont :

$$\begin{cases} e_q = \omega_r \cdot \phi_q \\ e_d = \omega_r \cdot \phi_d \end{cases} \quad (III.6)$$

Tel que :

e_q : f.é.m dans la machine sur l'axe q.

e_d : f.é.m dans la machine sur l'axe d.

Ainsi la machine peut se présenter par la fonction de transfert suivante :

$$G_{\text{machine}}(s) = \frac{1}{R_s + s \cdot L_s} - \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + \tau_e \cdot s} \quad (III.7)$$

Tel que:

$$\tau_e = \frac{L_s}{R_s} : \text{Est la constante du temps électrique.}$$

III.2.4 Réglage des courants direct et quadrature

L'entrée du régulateur est prise comme étant la différence entre le courant de référence $I_{d \text{ ref}}$ et la valeur du courant I_d mesuré. Le schéma block suivant montre la procédure de la commande.

Dans le but d'obtenir un facteur de puissance unitaire (la puissance réactive $Q=0$) on pose le courant direct de référence nul ($I_{d \text{ ref}}=0$).

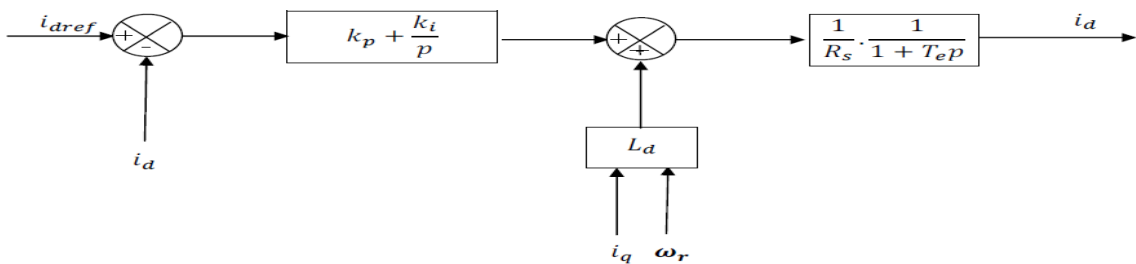


Figure III.5 Boucle de régulation du courant I_d .

a) Calcul des paramètres du PI en utilisant la méthode de placement de pôles.

Il faut d'abord calculer la fonction de transfert en boucle fermée pour qu'on puisse calculer les paramètres du régulateur.

$$FTBO = \frac{s \cdot k_{pd} + k_{id}}{s \cdot (s \cdot L_s + R_s)} = \frac{s \cdot k_{pd} + k_{id}}{s^2 \cdot L_s + s \cdot R_s} \quad (III.8)$$

$$FTBF = \frac{s.k_{pd}+k_{id}}{s(s.L_s+R_s)+s.k_{pd}+k_{id}} = \frac{s.k_{pd}+k_{id}}{s^2.L_s+(R_s+k_{pd})s+k_{id}} \quad (III.9)$$

Le choix d'une pulsation propre ω_n et un facteur d'amortissement ξ permet de calculer les coefficients du régulateur PI.

Par l'identification on trouve les valeurs comme suit :

$$\begin{cases} k_{pd} = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot L_s - R_s \\ k_{id} = L_s \cdot \omega_n^2 \end{cases} \quad (III.10)$$

b) Calcul des paramètres du régulateur PI par compensation de pôles :

Le schéma bloqué de la boucle de régulation de vitesse est le suivant :

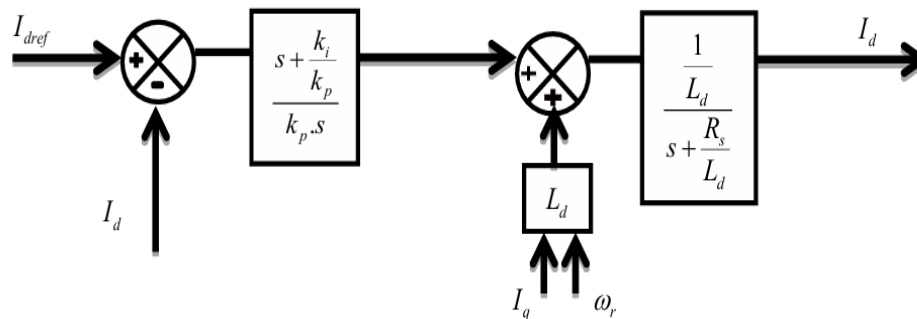


Figure III.6 Boucle de régulation du courant i_d après compensation du pôle.

Donc la fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$FTBO = \frac{1}{L_d \cdot k_p \cdot s} \quad (III.11)$$

Tel que: $S + \frac{k_i}{k_p} = S + \frac{R_s}{L_d}$

$$\begin{cases} k_{id} = k_{pd} \cdot \frac{R_s}{L_d} \\ avec: \tau_{0d} = \frac{L_d}{R_s} \end{cases}$$

La fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + L_d \cdot k_p \cdot s} \quad (III.12)$$

Et on a donc :

$$\begin{cases} \tau_{fd} = L_d \cdot k_p \\ avec: \tau_{fd} = \frac{\tau_{0d}}{h_1} \end{cases}$$

h_1 : constant positif.

On déduit alors les paramètres du régulateur PI :

$$\begin{cases} k_{pd} = \frac{1}{R_s \cdot h_1} \\ k_{id} = \frac{1}{L_d \cdot h_1} \end{cases} \quad (III.13)$$

De même en ce qui concerne la régulation du courant I_q , l'entrée du régulateur est la différence entre le courant quadratique de référence i_{qref} et le courant quadratique mesuré i_q , le schéma bloc suivant montre la boucle de régulation du courants i_q (donc la régulation de la puissance active P).

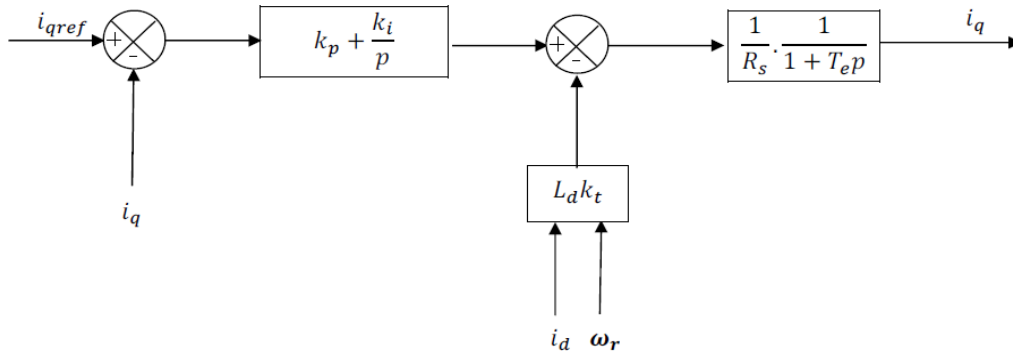


Figure III.7 Boucle de régulation du courant i_q .

Le courant en quadrature de référence i_{qref} est calculé comme suite :

On a:

$$P_{mec} = C_{em} \cdot \Omega = C_{em} \cdot \frac{\omega_r}{p} \quad (III.14)$$

$$C_{em_ref} = p \cdot (\phi_{ds} \cdot i_{qref} - \phi_{qs} \cdot i_{dref}) \quad (III.15)$$

Et puisque $I_{dref} = 0$ pour éliminer la puissance réactive, on aura alors :

$$i_{qref} = \frac{C_{em_ref}}{p \cdot \phi_{qs}} \quad (III.16)$$

Avec :
$$\begin{cases} \phi_{sq} = L_q \cdot i_q \\ \phi_{sd} = L_d \cdot i_d + \phi_f \end{cases}$$

Puisque la boucle de régulation du courant quadratique i_q est la même que celle du courant direct i_d (à l'exception du référence) on déduit qu'ils ont les mêmes paramètres du régulateur PI précédents, on a donc :

a) Les paramètres du PI par la méthode du placement de pôles :

$$\begin{cases} k_{pq} = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot L_s - R_s \\ k_{iq} = L_s \cdot \omega_n \end{cases} \quad (III.17)$$

b) Les paramètres du PI par compensation des pôles :

$$\begin{cases} k_{pq} = \frac{1}{R_s \cdot h_1} \\ k_{iq} = \frac{1}{L_d \cdot h_1} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

III.2.5 Résultats des simulations

Dans cette partie, on présente les résultats de simulation de la chaîne éolienne à base de la GSAP avec l'injection de la puissance sur un réseau triphasé équilibré de 220V/50Hz simple. Des régulateurs classiques de type PI sont employés pour le contrôle des grandeurs coté GSAP et coté réseau. Les simulations sont effectuées sous le logiciel Matlab/simulink. Les paramètres des différents éléments de la chaîne turbine sont présentés en annexe A. Les coefficients des différents régulateurs PI ainsi que les paramètres de simulations sont présentés en Annexe B. Dans un premier lieu on va présenter les résultats de simulation de la commande par placement de pôles,

Résultats de simulation par placement de pôles

On impose une vitesse du vent (v) variable suit une fonction bien déterminée. La Fig.III-8 montre la vitesse de variation du vent durant une période de 10(s), où cette vitesse varie entre une valeur maximale estimée à 9.8 (m/s) et une valeur minimale estimée à 6.5 (m/s).

Remarque : le profil du vent reste le même durant toutes les sections qui suites et la commande des convertisseurs sera assurée par la commande à MLI.

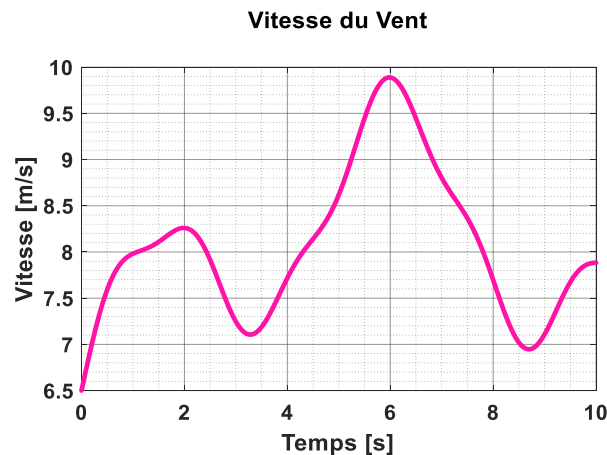


Figure III.8. Profil du vent.

La fig. III-9 représente le contrôle de la vitesse de rotation ω_m , la référence de la

vitesse de la GSAP ω_{m_ref} est calculée à partir d'une équation déjà déterminée dans la commande MPPT, on voit clairement que la vitesse de rotation suit très bien sa référence tel que l'erreur statique est presque nulle. Cette réponse de vitesse est presque instantanée pour les différentes variations du vent, grâce à l'absence de bobinage au niveau de rotor (l'inductance augmente le temps de réponse), ce qui rend l'emploi de la GSAP plus performant relativement aux plusieurs types de générateurs.

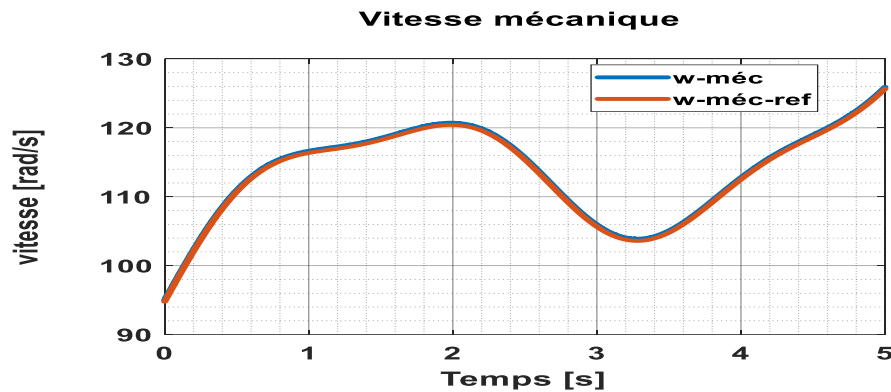


Figure III.9. Vitesse de rotation mécanique de la GSAP

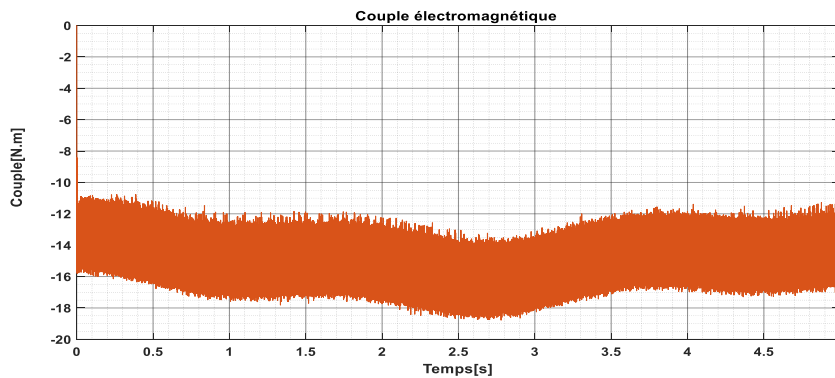


Figure III.10. Allure de couple électromagnétique.

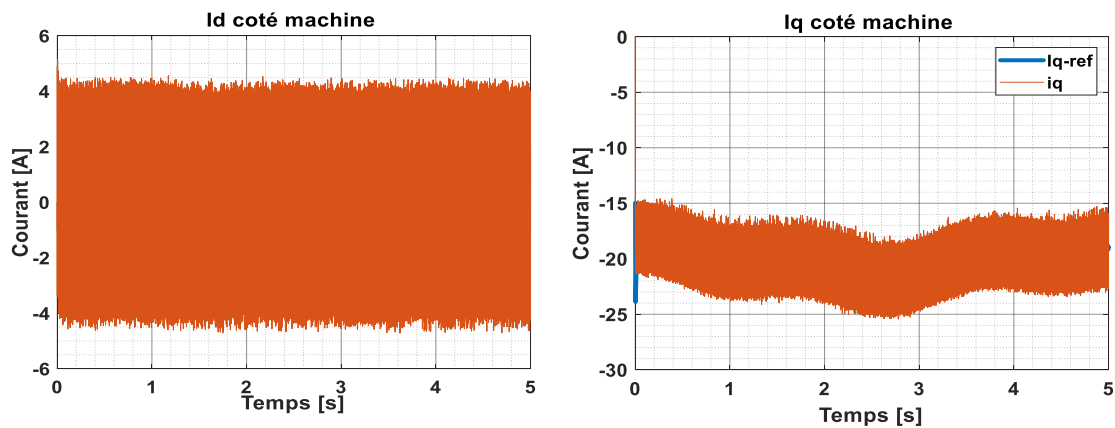


Figure III.11. Courant direct et quadrature de GSAP coté machine.

D'après les figures (III.10) et (III.11) le couple est commandé par le courant i_q et présente son image tandis que le courant i_d est maintenu à la valeur nulle (figure.III.11). Donc le découplage entre le contrôle des deux courants est bien assuré et par conséquent un bon fonctionnement de la commande vectorielle.

III.3 Contrôle des puissances entre l'onduleur et le réseau électriques

Dans cette section nous allons proposer une stratégie de commande à fin de mieux contrôler les puissances injectées dans le réseau, ainsi la tension de bus V_{dc} .

III.3.1 Commande de la tension de bus V_{dc} et des puissances actives et réactives injectées dans le réseau

La figure III.12 illustre la stratégie de commande de la tension de bus V_{dc} et les puissances active et réactive injectées dans le réseau.

On sait que la puissance active et réactive dans le réseau sont données par :

$$P_r = \frac{3}{2} (V_{rd} \cdot I_{rd} + V_{rq} \cdot I_{rq}) \tag{III.19}$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (V_{rq} \cdot I_{rd} - V_{rd} \cdot I_{rq})$$

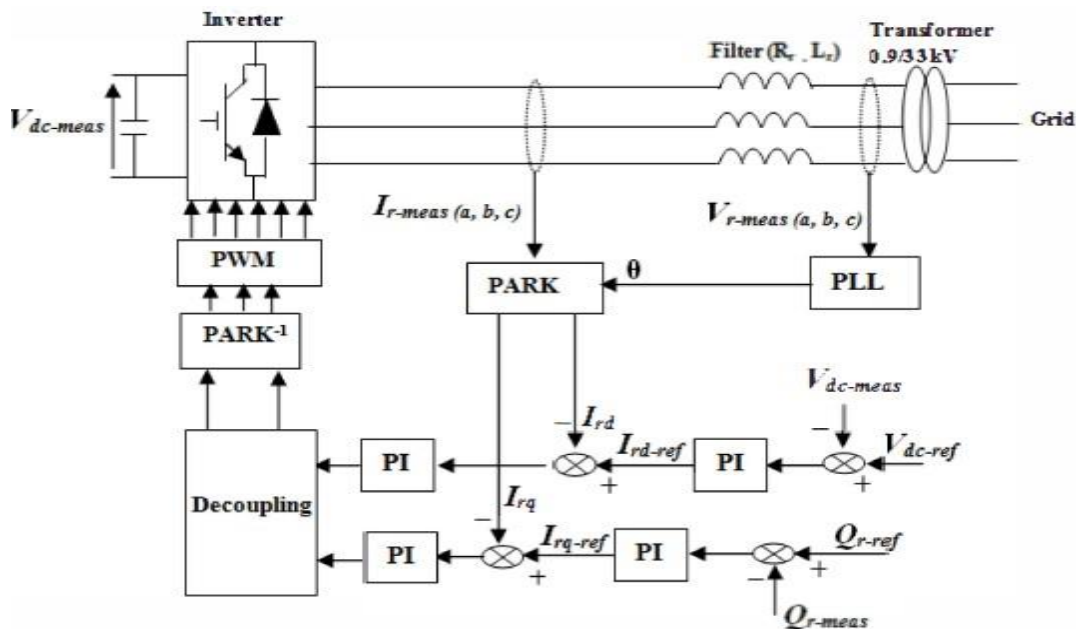


Figure III.12. Management de l'énergie entre la GSAP et le réseau.

La tension de bus continu et la puissance active échangées avec le réseau est donné par

l'équation suivante :

$$V_{dc} \cdot I_{dc} = \frac{3}{2} (V_{rd} \cdot I_{rd}) \quad (III.20)$$

La tension V_{rq} est imposée nulle, ce qui permet le découplage des puissances active et réactive, donc les équations des puissances dans le réseau deviennent :

$$\begin{cases} P_r = \frac{3}{2} V_{rd} \cdot I_{rd} \\ Q_r = -\frac{3}{2} V_{rq} \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (III.21)$$

III.3.2 Synthèse des régulateurs

Les paramètres du régulateur de la tension de bus continu sont donnés comme suit :

$$\begin{cases} K_{p-v_{dc}} = \sqrt{2} \cdot \omega_n \cdot C \\ K_{i-v_{dc}} = C \cdot \omega_n^2 \end{cases} \quad (III.22)$$

Les paramètres de la régulation des puissances :

$$\begin{cases} k_p = \sqrt{2} \cdot \omega_n \cdot L_f - R_f \\ k_i = L_f \cdot \omega_n^2 \end{cases} \quad (III.23)$$

Afin d'injecter la puissance produite par la GSAP dans le réseau il faut synchroniser la fréquence de l'onduleur avec celle du réseau, l'outil le plus souvent utilisé pour réaliser ce synchronisme est Phase Locked Loop (PLL). Le schéma bloc suivant illustre la topologie de fonctionnement du PLL :

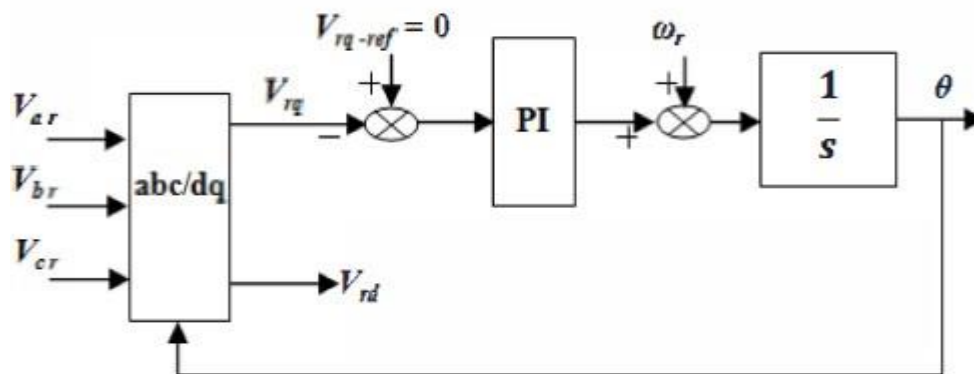


Figure III.13. Schéma bloque du PLL.

Dans cette partie on a appliqué une commande classique basée sur un PI, et on a calculé les paramètres de la régulation en utilisant deux méthodes utilisés auparavant.

III.3.3 Résultats des simulations

Les résultats ont été trouvés en utilisant les mêmes paramètres qu'avant, tels que les figures III-15, III.16 et III.17 représentent respectivement le résultats de la commande des courants quadratique et directe dans le réseau ainsi la tension de bus continue, sachant que le courant directe dans le repère de Park reflète la puissance active et le courant quadratique dans le repère de Park reflète la puissance réactive .

La figure III.14 met en évidence que le courant en quadrature suit parfaitement sa référence en oscillant avec une valeur moyenne nulle autour du zéro, cela montre l'efficacité de régulateur PI.

La figure III.15 met en évidence que le courant directe suit parfaitement sa référence avec moins de perturbation et une dynamique rapide, ce qui montre la bonne régulation avec le PI.

La tension du bus continu contrôlée par le convertisseur coté réseau est montrée sur la figure (III.16). Elle suit sa référence grâce à la boucle d'asservissement en présentant de faibles fluctuations due aux perturbations du vent

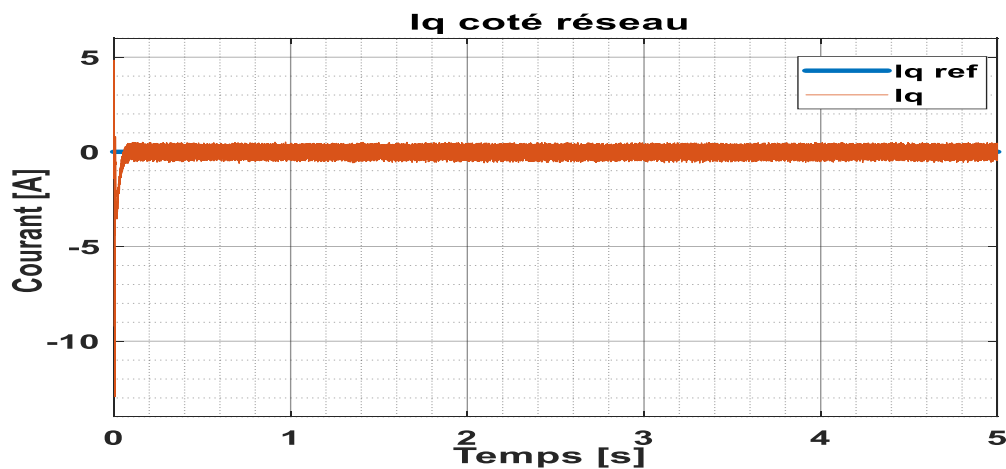


Figure III.14. Courant en quadrature coté réseau

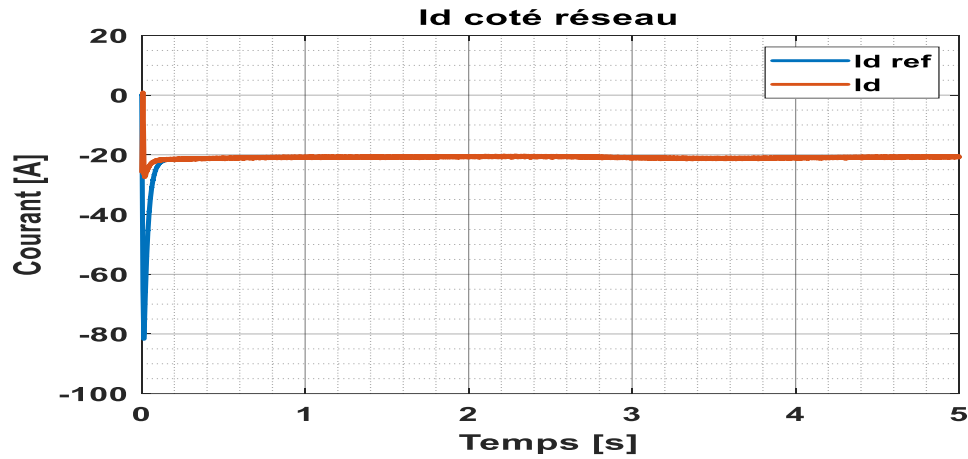
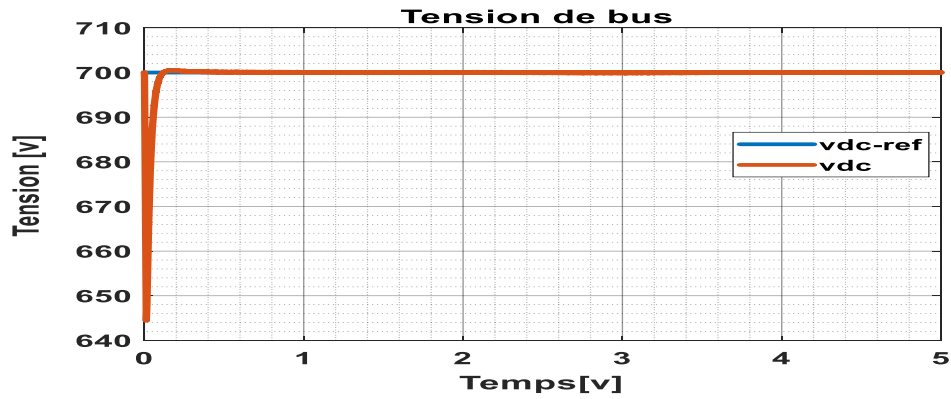
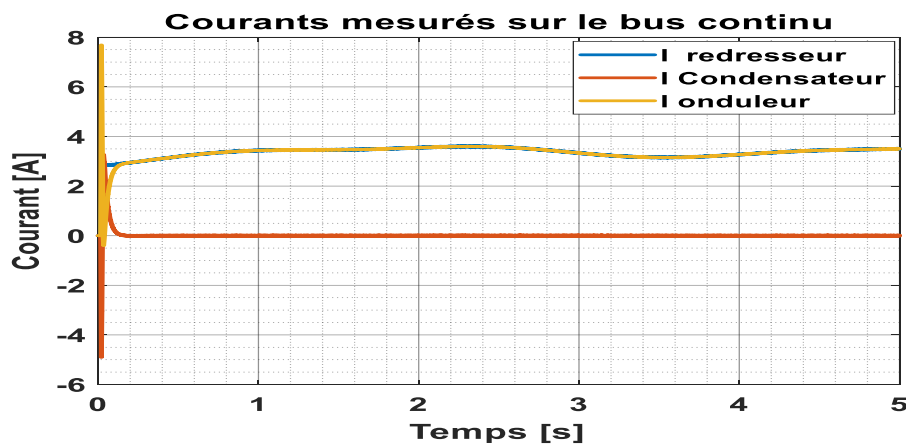


Figure III.15. Courant en direct coté réseau

Figure III.16. Régulation de la tension du bus continu V_{dc} .Figure III.17. Courant de bus continu I_{dc} .

La figure III-18 représente le résultat de contrôle de puissance active Le résultat de contrôle

de puissance réactive est représenté par la fig.III-19, On remarque que la puissance réactive est 0 VA, ce qui donne un facteur de puissance unitaire, permettant de conclure que notre commande proposée avec le PI fonctionne très bien, cependant il y a quelques perturbations durant le régime transitoire.

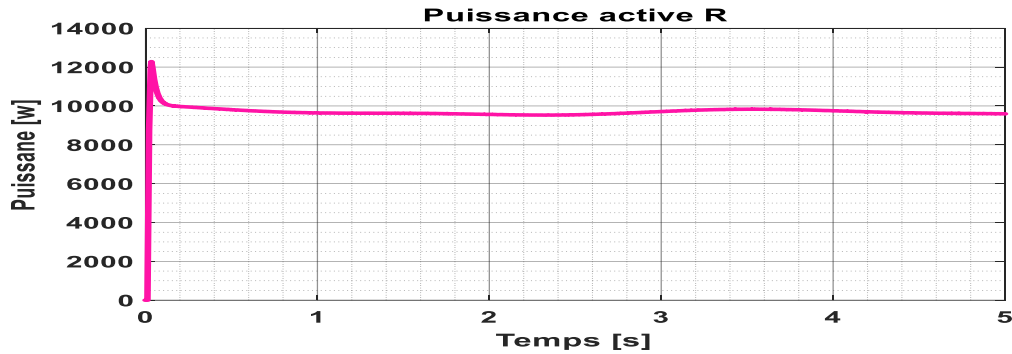


Figure III.18. Puissance active coté réseau.

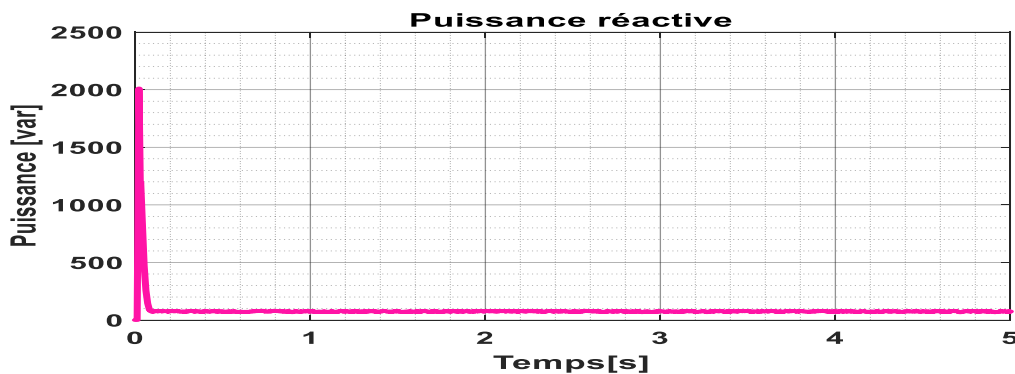


Figure III.19. Puissance réactive coté réseau.

Nous allons appliquer quelques la commande CMG sur notre chaîne de conversion éolienne afin d'améliorer les performances. Dans cette partie, nous exposons la technique de commande CMG ainsi que leurs résultats de simulation.

III.4. Commande robuste de la GSAP

Les systèmes linéaires à paramètres constants sont très performants en utilisant les lois de commande classiques du type PI. Ces lois de commande peuvent être insuffisantes pour des systèmes non linéaires ou avec des paramètres non constants, car elles ne sont pas solides, en particulier lorsque les exigences en termes de précision et d'autres caractéristiques dynamiques du système sont strictes. Il est nécessaire d'utiliser des lois de commande qui ne sont pas affectées par les fluctuations des paramètres, les perturbations et les non linéarités.

Les lois de commande appelées lois à structure variable offrent une réponse à ces difficultés. La commande robuste est un type des commandes qui vise à garantir les performances et la stabilité d'un système face à des incertitudes au milieu et celle du modèle.

a) Perturbations extraites

Ce sont des signaux et des actions à caractère aléatoire qui perturbent les systèmes, on les identifie en fonction de leur point d'entrée en boucle fermée (par exemple le vent pour un avion). Ses facteurs sont mal connus mais on dispose généralement des informations sur leurs amplitudes maximales (l'intensité du vent).

A noté que ces actions extrêmes ne modifient pas le comportement dynamique interne des systèmes, mais seule la trajectoire de ses sorties.

b) Incertitude du modèle

Pour des raisons pratiques on distingue deux types de ces incertitudes :

Incertitudes dynamiques : elles reflètent une importance critique pour la flexibilité des systèmes asservis, en effet l'asservissement est typiquement conçu à partir d'un modèle idéalisé et simplifié du système réel, pour fonctionner correctement il doit être robuste aux imperfections du modèle, c.-à-d. aux écarts entre le modèle parfait et le système réel.

Incertitude paramétrique : qui est lié aux variations des erreurs d'estimation sur certains paramètres physiques du système qui peuvent être varié sensiblement avec le temps ou dans certaines conditions de fonctionnement.

III.5. Commande par mode glissant

La commande par mode de glissement est un mode de fonctionnement à structure variable. La théorie de la commande par mode de glissement est une technique de commande non linéaire. Elle est caractérisée par la discontinuité de la commande au passage par une surface de commutation appelée surface de glissement.

La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'un état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une commutation appropriée autour de celle-ci et de maintenir la trajectoire à glisser sur la surface jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement. Cette technique se fait en trois étapes [19] :

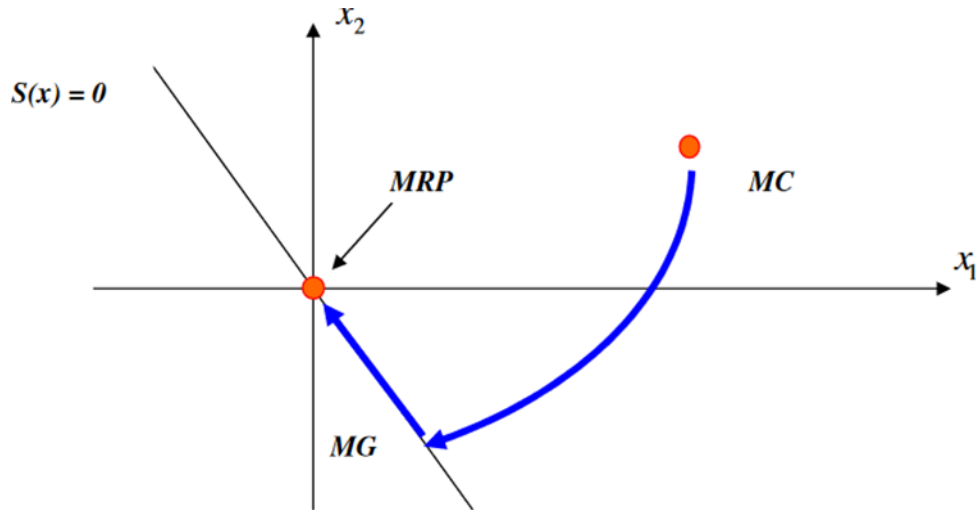


Figure III.20 : Les différents mode pour la trajectoire dans le plan de Phase [23].

➤ **Mode de convergence (MC) :**

C'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de commutation $s(x, y) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.

➤ **Mode de glissement (MG) :**

C'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phases. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $s(x, y) = 0$.

➤ **Mode du régime permanent (MRP) :**

Ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase), il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande.

III.5.1. Conception de la commande par mode glissant :

La structure d'un contrôleur comporte deux parties : une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode glissant et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette dernière est importante dans la commande non linéaire car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécisions et des perturbations sur le modèle [21].

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes principales dépendantes l'une de l'autre :

Choix de la surface de glissement.

Définition des conditions d'existence et de convergence du régime glissant.

Déterminer la loi de commande qui permet d'atteindre la surface et d'y demeurer.

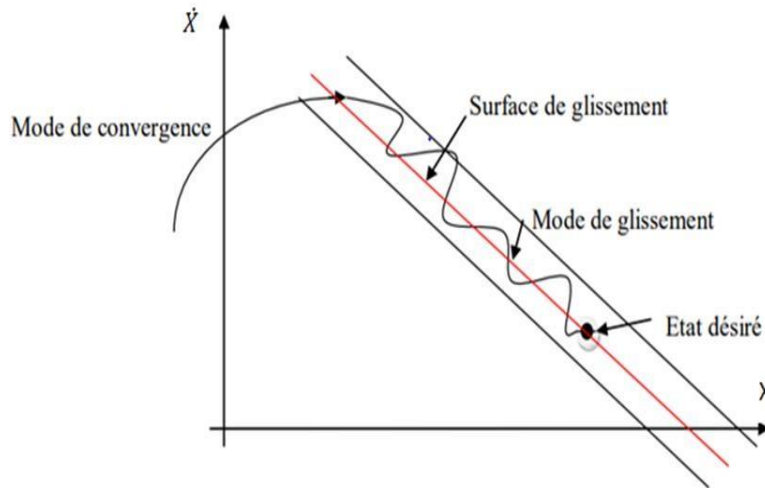


Figure III.21 Différents modes de convergence pour la trajectoire d'état [20].

1) Choix de la surface de glissement :

Pour expliquer cette commande, on considère le système suivant :

$$\dot{X} = f(x, t) + g(x, t) u \quad (\text{III.23})$$

Avec :

f, g Fonctions non linéaires, (g supposée inversible).

u Entrée du système.

x état du système.

Soit x_d la consigne désirée, e l'erreur de poursuite définie par :

$$e = x_d - x \quad (\text{III.24})$$

La formule générale de la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée est définie en fonction de l'ordre du système comme suit [22] :

$$s(x) = (\partial + \lambda)^{n-1} e(x) \quad - \quad (\text{III.25})$$

Avec :

λ Paramètre de la surface de glissement, ($\lambda > 0$).

n Le degré relatif du système par rapport à la sortie (t).

Il représente le nombre minimum de fois qu'il faut dériver la sortie (t) par rapport au temps, pour y voir apparaître l'entrée.

2) Condition d'existence du mode de glissement

Pour que le système converge vers la surface de glissement, la commande doit être conçue pour que cette dernière soit attractive. Pour cela nous trouvons les deux conditions suivantes :

➤ Fonction discrète de commutation

Elle a été proposée par EMILYANOV et UKTIN, elle est donnée sous la forme [22] :

$$s \cdot \dot{s} < 0 \quad (\text{III.26})$$

s Surface de glissement.

\dot{s} Dérivée de la surface de glissement.

➤ Fonction de Lyapunov

La fonction de Lyapunov est une fonction scalaire positive ($V(x) > 0$), pour les variables d'état du système. Elle est utilisée pour estimer les performances de la commande pour l'étude de la robustesse, elle garantit la stabilité du système non linéaire et l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence, elle a la forme suivante [20]:

$$V(s) = \frac{1}{2} S^2 \quad (\text{III.27})$$

Sa dérivée est :

$$V(x) = s \cdot \dot{s} \quad (\text{III.28})$$

La loi de commande doit faire décroître cette fonction ($V(x) < 0$), l'idée est de choisir une fonction scalaire $s(x)$, pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence, et concevoir une commande 'U' tel que le carré de la surface correspond à une fonction de Lyapunov. Pour que la fonction (x), puisse décroître il suffit d'assurer que sa dérivée est négative d'où la condition de convergence exprimée par l'équation (IV.4) [23].

Le temps de convergence, ou le temps d'atteinte « reaching time » tr dépend directement du choix de S. Pour une convergence en temps fini, la condition (IV.4) qui ne garantit qu'une

convergence asymptotique vers la surface de glissement est remplacée par une condition plus restrictive dite de η -attractivité et donnée par [20] :

$$s\dot{s} \leq -\eta|s| \quad (\text{III.29})$$

Avec :

η Coefficient d'attractivité. ($\eta > 0$).

3) Détermination de la commande

La commande globale ‘‘u’’ est composée de deux autres commandes, la commande continue (équivalente ‘‘u_{eq}’’), et la commande discontinue ‘‘u_n’’.

$$u = u_{eq} + u_n \quad (\text{III.30})$$

1) Commande continue

La partie continue est amène à réduire autant que nous voulons l'amplitude de la partie discontinue. En présence d'une perturbation [24].

Elle peut être aussi interprétée autrement comme étant une valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre les valeurs u_{min} et u_{max} [25].

U_n Vecteur de commande équivalente est défini pour obtenir les équations du régime glissant idéal (sans retard, sans seuil, sans hystérésis), ce régime ayant lieu sur la surface $S(x, t) = 0$, on exprime que [26] :

$$\frac{d s(x,t)}{dt} = 0 \quad (\text{III.31})$$

On utilise cette équation pour déterminer ‘‘u_{eq}’’

$$\frac{ds}{dt} - \frac{\partial s}{\partial x} * \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial x} [f(x, t) + g(x, t)u_{eq}(t)] + \frac{\partial s}{\partial x} [g(x, t)u_n] \quad (\text{III.32})$$

En mode glissement et en régime permanent, le dérivé de la surface est nul (parce que $\dot{s}(x) = 0$).

Ainsi nous obtenons [27]

$$u_{eq} = \left[\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \right]^{-1} \cdot \left[\frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) \right]; u_n = u \quad (\text{III.33})$$

En portant ‘‘u_{eq}’’ dans l'équation (III.1), on obtient l'équation du régime glissant idéal :

$$\dot{X}(t) = f(x, t) - g(x, t) \cdot \left[\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \right]^{-1} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) \quad (\text{III.34})$$

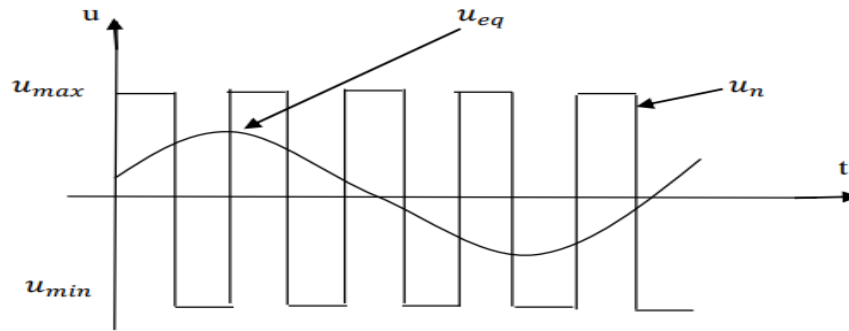


Figure III.22 : Commande équivalente.

u_{eq} Valeur moyenne de la commande discontinue.

2) Commande discontinue

La partie discontinue a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivité [24]. L'addition du terme " u_n " à la loi de commande permet d'assurer l'attractivité de la surface de glissement " S ", celle-ci est attractive si seulement si : $\dot{s}(x)s(x) < 0$

Cette condition permet de définir la région dans laquelle le mode glissement existe [28].

Durant le mode de convergence, on remplace le terme " u_{eq} " par sa valeur donnée par (IV.7).

Dans l'équation (IV.6) nous obtenons donc une nouvelle expression de la dérivée de surface [23].

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \{g(x, t) \cdot u_n\} \quad (\text{III.35})$$

Le problème revient à trouver " u_n " tel que :

$$S(x)\dot{S}(x) = s(x) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \{g(x, t) \cdot u_n\} < 0 \quad (\text{III.36})$$

La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète " u_n " est celle d'un relais [21].

$$u_n = -k \cdot \text{sign}(S(x, t)) \text{ ou } u_n = (M \cdot S(x, t) + k \cdot \text{sign}(S(x, t))) \quad (\text{III.37})$$

Avec :

K Paramètre d'attractivité, $K > 0$ (généralement petit).

M Coefficient de glissement

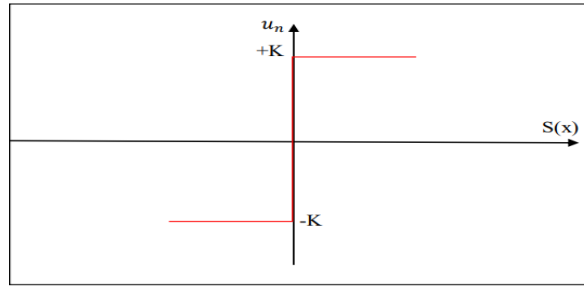


Figure III.23 : Fonction signe [28].

III.6. Les avantages de la commande

Les avantages de la commande par mode glissant sont importants et multiples ; la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité, l'invariance, la robustesse. Ceci lui permet d'être particulièrement adapté pour les systèmes ayant un modèle imprécis [30].

III.7. Application de commande par mode glissant sur la GSAP

1. Condition d'existence :

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive, Pour déterminer la condition d'attractivité, considérons la fonction de Lyapounov suivante :

$$V(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} S^2(\mathbf{x})$$

Une condition nécessaire et suffisante, appelée condition d'attractivité, pour qu'une variable de glissement $S(x, t)$ tende vers 0 est que la dérivée temporelle dev soit définie négative.

$$\dot{V}(x) = \frac{\partial V(x)}{\partial S(x)} \cdot \frac{dS(x)}{dt} = S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0$$

Si la condition est vérifiée, alors la variable de glissement et sa dérivée sont de signe contraire quel que soit le temps et que 0 est un centre attracteur pour S .

2. Choix de la surface de glissement

Pour expliquer cette commande, on considère le système suivant : [53]

On a :

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{r-1} \cdot e(x) \quad (\text{III.38})$$

Tel que :

$e(x) = x - x_d$: l'écart entre l'état mesurée et l'état désirée.

λ : Vecteur constant positif qui interprète la bande de contrôle désirée.

r : degré relatif égale au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaitre la

commande.

Pour $r = 1 \Rightarrow S(x) = e(x)$.

Surface de glissement de la commande CMG du 1^{er} ordre.

3. Calcul de la commande

La structure de la commande CMG est constituée en deux parties.

U_{eq} : une partie équivalente qui sert à converger les variables d'états vers leurs comportements désirés.

U_{glis} : une partie glissante qui sert à converger les variables d'états vers la surface de glissement.

$$U = U_{eq} + U_{glis} \quad (III.39)$$

La commande équivalente est une fonction continue qui sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement ($S(x) = 0$). Elle est obtenue grâce aux conditions d'invariance de la surface :

$$\begin{cases} S(x) = 0 \\ \dot{S}(x) = 0 \end{cases}$$

Où U_{eq} est déduite de la relation $\dot{S}(x) = 0$.

Physiquement la commande équivalente présente la valeur moyenne de la commande U . Cependant, cette commande ne force pas les trajectoires du système à converger vers la surface de glissement.

On écrit le modèle des courants dans le repère de Park et de la vitesse de rotation (I_d, I_q, Ω) sous la forme suivante :

$$\dot{X} = AX + Bu$$

L'équation d'état général représentant le modèle est donnée par:

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_d}{dt} \\ \frac{dI_q}{dt} \\ \frac{d\Omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_q} & \frac{\Phi_f}{P.L_q} \\ 0 & -\frac{3}{2} \cdot \frac{P.\Phi_f}{J} & -\frac{f_v}{P.J} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ C_m \end{bmatrix} \quad (III.40)$$

Synthèse de la commande par mode glissant :

On prend les surfaces suivantes :

$$S(\Omega) = \Omega_{ref} - \Omega \quad (III.41)$$

$$S(I_{ds}) = I_{dsref} - I_{ds} \quad (III.42)$$

$$S(I_{qs}) = I_{qsref} - I_{qs} \quad (III.43)$$

II.7.1. Pour le régulateur de vitesse

L'erreur de la vitesse est défini par :

$$e = \Omega_{ref} - \Omega \quad (III.44)$$

Pour $r=1$, l'équation de contrôle de la vitesse peut être obtenue à partir de l'équation comme suit :

$$\dot{S} = (S) = \dot{S}_{ref} + \frac{F}{J}\Omega - \frac{P\varphi}{J}I_{qs} + \frac{1}{J}C_r \quad (III.45)$$

Le contrôle du courant I_{qs} est définie par :

$$I_{qsref} = I_{qs}^{eq} + I_{qs}^n \quad (III.46)$$

Dans laquelle :

$$I_{qs}^{eq} = \frac{J}{P\varphi_f} \left(\dot{\Omega}_{ref} + \frac{F}{J}\Omega + \frac{1}{J}C_r \right) \quad (III.47)$$

$$I_{qs}^n = K \operatorname{sgn}(S(\Omega)) \quad (III.48)$$

III.7.2. pour la commande de la composante directe du courant statorique

L'erreur du courant I_{ds} est définie par :

$$e_d = I_{dsref} - I_{ds} \quad (III.49)$$

$$\dot{S}(I_{ds}) = I_{dsref} - I_{ds} \quad (III.50)$$

D'après la dérivée de la surface du courant I_{ds} , on peut générer la tension sur l'axe d,

$$\dot{S}(I_{ds}) = I_{dsref} \frac{R_s}{L_{ds}} I_{ds} - P\Omega \frac{L_{qs}}{L_{ds}} I_{qs} - \frac{1}{L_{ds}} u_{ds} \quad (III.51)$$

La tension de commande u_{dsref} est définie par

$$u_{dsref} = u_{ds}^{eq} + u_{ds}^n \quad (III.52)$$

$$u_{ds}^{eq} = \left(\dot{I}_{dsref} + \frac{R_s}{L_{ds}} I_{ds} - P\Omega \frac{L_{qs}}{L_{ds}} I_{qs} \right) L_{ds} \quad (III.53)$$

$$u_{ds}^n = K_d \operatorname{sgn}(S(I_{ds})) \quad (III.54)$$

III.7.3. pour la commande de la composante en quadratique du courant statorique

L'erreur de courant I_{qs} est définie par :

$$e_q = I_{qsref} - I_{qs} \quad (III.55)$$

$$\dot{S}(I_{qs}) = I_{qsref} - I_{qs} \quad (III.56)$$

D'après la dérivée de la surface du courant I_{qs} , on peut exprimer la tension du contrôle sur l'axe q

La tension de commande U_{qsref} est définie par :

$$u_{qsref} = u_{qs}^{eq} + u_{qs}^n \tag{III.57}$$

$$u_{qs}^{eq} = \left(\dot{I}_{qsref} + \frac{R_s}{L_{ds}} I_{qs} - P\Omega \frac{L_{qs}}{L_{ds}} I_{qs} \right) L_{ds} \tag{III.58}$$

$$u_{qs}^n = K_q \text{sgn} \left(S(I_{qs}) \right) \tag{III.59}$$

III.7.4. Résultats des simulations

La figure III.24 représente la variation de la vitesse de rotation de la GSAP régulée par la commande CMG (par mode glissant), on peut bien remarquer que la vitesse de rotation suit parfaitement sa référence.

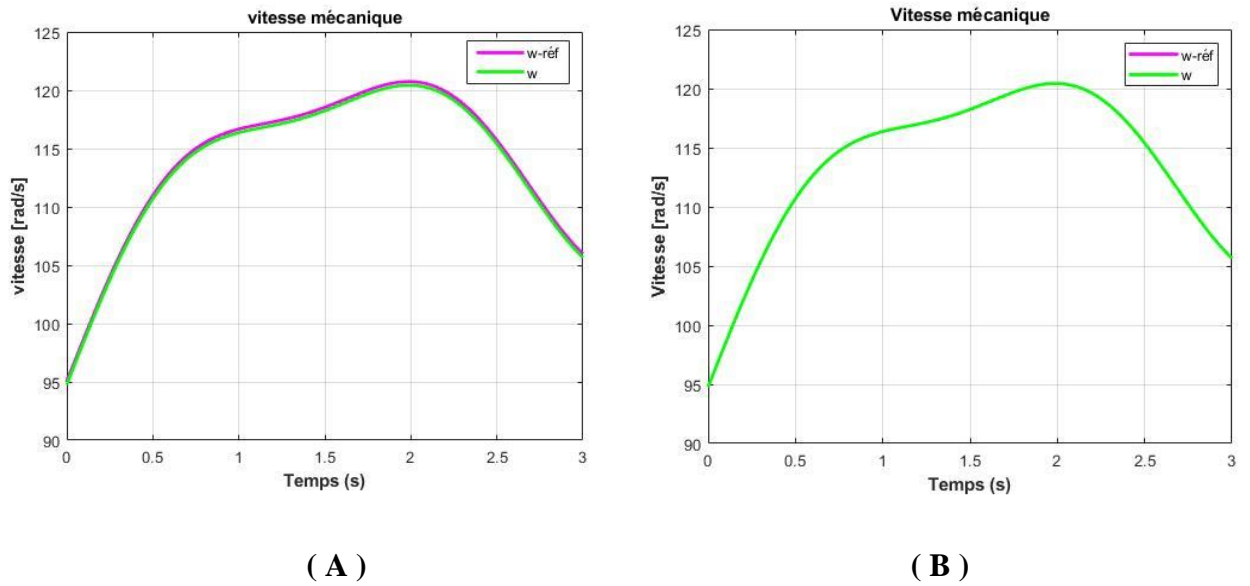


Figure III.24. Régulation de la vitesse de rotation de la GSAP

A) par PI ,B) Par la commande CMG.

La figure III.25 met en évidence que le courant direct I_d suit sa référence avec peu de perturbations, ce qui montre la bonne régulation par le CMG.

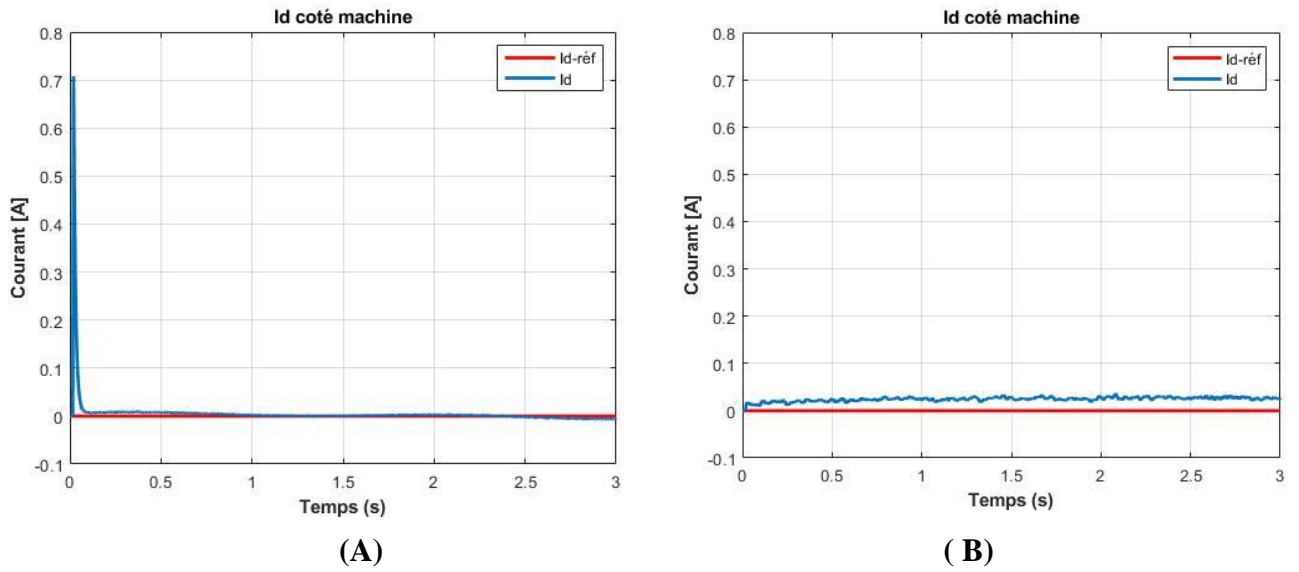


Figure III.25. Régulation du courant direct I_d

A) par PI , B) Par la commande CMG.

La figure III.26 met en évidence que la commande CMG appliquée sur le courant en quadrature I_q fonctionne très bien, tel qu'on remarque que le courant suit sa référence avec une erreur statique quasi nulle, ce qui montre l'efficacité de CMG.

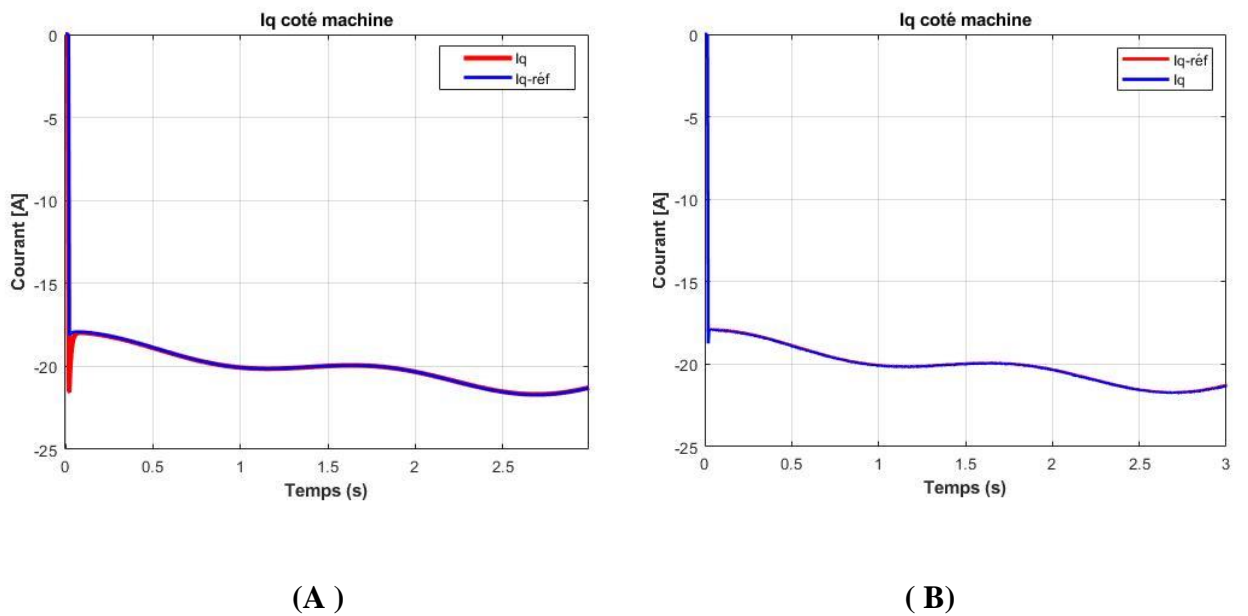


Figure III.26. Régulation du courant en quadrature I_q

A) par PI , B) Par la commande CMG.

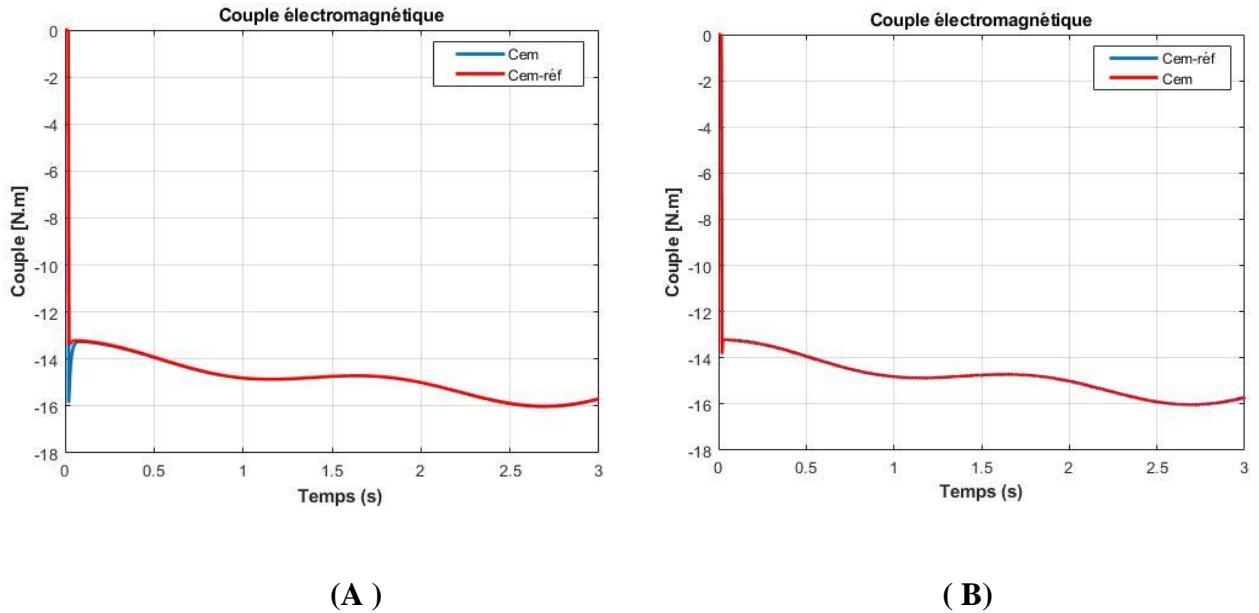


Figure III.27. Régulation du couple électromagnétique

A) par PI , B) Par la commande CMG.

On remarque dans la figure III.27 que le couple est directement lié au courant I_q . Le courant I_q contrôle le couple produit par la GSAP, et une régulation précise de ce courant est essentiel pour un contrôle efficace du couple. La commande CMG peut réguler le courant I_q de manière robuste permettant un contrôle précis du couple même en présence de perturbation. Le régulateur PI est également couramment utilisé pour cette tâche est bien qu'il soit moins robuste que la commande CMG.

Les avantages de la commande par mode glissant sont importants et multiples ; la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé les commandes appliquées pour contrôler les différents éléments du système de conversion d'énergie éolienne jusqu'à l'injection de la puissance au réseau (GSAP, redresseur à MLI et Onduleur à MLI). Une commande côté génératrice a été utilisée pour suivre la puissance maximale générée à partir d'une éolienne à vitesse variable en contrôlant la vitesse de rotation de la turbine à l'aide de la technique MPPT. Le redresseur à MLI a été commandé par des références générées par la commande vectorielle. L'onduleur triphasé nous a permis de commander le bus de tension continue. Les résultats de simulation montrent que les performances statiques et dynamiques correspondantes à la commande de la chaîne de conversion sont à niveaux meilleurs.

nous avons optimisé et contrôlé la chaîne de conversion éolienne par une commande robuste à savoir le mode glissant. Les résultats auxquels nous avons aboutis, confirment que l'utilisation de ces commandes avancées, permet de réduire le temps de réponse du système de commande et de diminuer les fluctuations du régime transitoire.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'application d'une commande robuste sur un système éolien.

Les nouvelles technologies des systèmes éoliens exigent de plus en plus un contrôle précis et continu de la vitesse et du couple, tout en garantissant la stabilité, la rapidité et le rendement le plus élevé possible.

Notre travail s'est déroulé selon les étapes suivantes :

La première partie a été consacrée à des généralités sur le système éolien et la GSAP accompagnées d'un état de l'art sur la conversion électromécanique.

La deuxième partie nous a permis de faire la modélisation générale de la chaîne de conversion éolienne, tel qu'en premier temps on a modélisé le vent, ce dernier ayant une énergie cinétique entraîne la rotation des pâles 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 à un condensateur placé en parallèle 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, la tension produite est ensuite filtré on utilisant un filtre RLC placé en étoile. L'énergie produite est ensuite injectée dans le réseau pour être utilisé à volonté.

En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi.

Dans la troisième partie, on a présenté la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents pilotée à l'aide d'un redresseur triphasé à commande MLI vectorielle. 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 deux méthodes, la première est celle de placement de pôles et la deuxième est la méthode de compensation de pôles.

Nous avons adopté la commande par mode glissant, c'est une commande robuste liée aux systèmes à structures variables, dont le but est de palier les inconvénients des commandes classiques, vu que la commande à structures variables est par nature une commande non

linéaire et que leur loi de commande se modifié d'une manière discontinue.

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

Annexe

Annexe A

Le tableau suivant donne les différents paramètres utilisés dans la simulation de la chaîne éolienne :[]

Elément de la chaîne	Paramètres	Valeurs numériques
Turbine éolienne	Masse volumique de l'air (kg/m^3)	$\rho = 1.225$
	Rayon de l'éolienne (m)	$R= 3$
	Gain du multiplicateur	$G=5.4$
	Nombre des pales	$P= 3$
	Coefficient de frottement ($kg.m^2.s^{-1}$)	$f=0.017$
	Moment d'inertie ($kg.m^2$)	$J_t=0.48$
	Vitesse spécifique optimale	$\lambda_{opt} = 8.1$
GSAP	Puissance nominale (kW)	$P_n=1.5$
	Inductance statorique selon l'axe d (mH)	$L_d=0.002$
	Inductance statorique selon l'axe q (Mh)	$L_q=0.002$
	Inertie du générateur ($kg.m^2$)	$G=0.048$
	Flux des aimants (Wb)	$\Phi=0.1$ 23
	Nombre de paires de pôles	$P = 4$
	Résistance statorique (Ω)	$R_s = 0.18$
	Coefficient de frottement	$f_r=0.0017$
Bus continu	Tension nominale du bus continu (V)	$V_{dc} = 700$
	Capacité équivalente (μF)	$C=100$
Liaison au réseau	Inductance entre onduleur et réseau (mH)	$L_n=20$
	Résistance entre onduleur et réseau (Ω)	$R_n=0.8$
Réseau	Tension du réseau (V)	$V=220 (3\sim)$
	Fréquence de la tension du réseau (Hz)	$F= 50$

Annexes B

Le tableau suivant donne les gains des différents régulateurs utilisés dans la simulation de la chaîne éolienne.

Réglage de vitesse de la turbine (MPPT)	Kp_t	48
	Ki_t	0.17
Réglage des courants id et iq deGSAP	Kp_id	9
	Ki_id	810
	Kp_iq	5.4
	Ki_iq	486
Réglage du la tension du bus continue	Kp_continu	0.06
	Ki_continu	1.8005
Réglage du courant id_g, coté de réaux	Kp_id	4
	Ki_id	160
Réglage du courant iq_g, coté deréseau	Kp_iq	4
	Ki_iq	160

- [1] Redjem Radia, "Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne", Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [2] Bouhedda Ali, "Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2011.
- [3] K. Ferkous, "Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne", Mémoire de magister, Université Mentouri– Constantine (2009).
- [4] W. Tong, «Wind Power Generation and Wind Turbine Design », WIT Press, 2010.
- [5] «Laurent Beaudet. Etude expérimentale et numérique du décrochage dynamique sur une éolienne à axe vertical de forte solidité - document ».Thèse en doctorat. 7 aout 2006.
- [6] D. A. Spera, "Wind Turbine Technology", New York ASME Press, 2009.
- [7] B. MERIEM "Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation GADA " Mémoire De Magister En Génie Electrique Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2013 / 2014.
- [8] S. MOKRANE, " modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération", université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie. Août 2013.
- [9] M. BILLEL," Contribution à l'amélioration de performance d'une chaine énergétique éolienne. Thèse de Doctorat 3ème Cycle. Université badai Mokhtar Annaba, 2015.
- [10] « Microsoft Word - WorldWindEnergyReport2008.doc World wind energy report 2008_s.pdf ».
- [11] BENKHALED Bilal, " Etude et Modélisation d'une Chaîne de Production Eolienne", université de m'sila, 2013.
- [12] Mayouf Messaoud, "Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents", université de Batna, 2008.
- [13] Rouabhi Riyadh, «Étude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Application: Energie éolienne», Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2012.
- [14] H. Camblong, «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », thèse de doctorat de

l'Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux, Décembre 2003.

[15] HARITZA CAMBLONG, «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable », thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.

[16] J.A.Farooq, « Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents », Thèse de doctorat, UTBM ,2008.

[17] T.Wildil et G.Sybille, « Electrotechnique »,4eme édition de Boeck, 2005.

[18] R.Lateb, « Modélisation des machines asynchrones et synchrones a aimants avec prise en compte des harmoniques d'espace et de temps : application à la propulsion marine par POD», Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 2006.

[19] « LATRECHE Mohammed Tahar »_ Commande floue de la machine synchrone à aimants permanents utilisée dans une chaîne éolienne. Mémoire de Magistère en commande électrique Université Ferhat Abbas de Sétif. 24-06-2012.

[20] HASSINI ABD ELHAKIM, "Comparaison entre les techniques de commande de la puissance de vent dans une éolienne à vitesse variable", Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2016

[21] F. POITIERS, «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau», Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.

[22] Dione Fatou, " Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne A base de machine synchrone à aimants permanents ", Mémoire De Master, Université d'Annaba, 2018.

[23] C. G. Justus, J. L. Plazy, " Vent et performances des éoliennes ", Franklin Institute Press, SCM Paris, France, 1980.

[24] Soltane Belakehal, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010.

[25] DAHBI Abdeldjalil, "Étude des performances et commande d'une machine synchrone à aimants permanents utilisée dans les éoliennes", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2012.

[26] LOUAR FATEH, "Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent", Thèse de doctorat, université badji Mokhtar Annaba, 2016.

- [27] BOUZID Mohamed Amine, " Commande Prédicative d'un Site Isolé Eolien Photovoltaïque", université Djilali liabes de Sidi-Bel-Abbès, Thèse de doctorat, 2017.
- [28] M. Aimé, « Evaluation et optimisation de la bande passante des convertisseurs statiques Application aux nouvelles structures multicellulaires », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
- [29] Dr. Gary L. Johnson, "Wind Energy Systems ", Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001.
- [30] V. ROGEZ, "Modélisation simplifiée de source de production décentralisée pour des études dynamique du réseau. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire ", Thèse de doctorat, université d'ARTOIS - France, 2004.
- [31] B. N. Mobarkah, " Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification 'en ligne' des paramètres ", thèse de doctorat de l'Université de Téhéran, Iran. Décembre 2001.
- [32] Abdelmalek BOULAHIA, " Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique », Mémoire de magister de Université de Constantine, 2009.
- [33] Hind Djeghloud, « Filtrage Actif de Puissance », Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, Décembre 2007.
- [34] Y. A. BENCHERIF, "Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne ", Mémoire d'Ingénieur en Électrotechnique, Ecole National Polytechnique, Alger, 2008.
- [35] L. Hamane, "Les ressources éoliennes de l'Algérie". Bulletin des Energies Renouvelables - N°3 Juin 2003.
- [36] Khettache Laid, "Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée". Thèse de Magister. Soutenu en 2007. Faculté des sciences de l'ingénieur « Université de Batna » Algérie.
- [37] Ferrai Ahmed, "Dimensionnement des infrastructures utilisant diverses sources énergétiques renouvelables potentielles pour l'alimentation électrique d'un village ". Thèse de Magister. Année universitaire 2007/2008. École nationale supérieure polytechnique d'Alger « Département d'électronique ». Algérie.
- [38] Dr Nachida Kasbadji Merzouk « Directrice de Recherche ». Chef de Division Energie Eolienne, "Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ?". bulletin_014_04. N°14 Décembre 2008.

- [39] B. Lu and S. K. Sharma, "A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 5, pp. 1770–1777, 2009.
- [40] J. Mavier, "Convertisseurs génériques à tolérance de panne-Applications pour le domaine aéronautique," *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT*, 2007.
- [41] A. Gaillard, "Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service," *Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré- Nancy I*, 2010.
- [42] N. Mehala, "Short Winding Fault Detection Using Park's Vector," *International Journal of Enterprise Computing and Business Systems (Online)*, vol. 2, no. 2, 2012.
- [43] K. Rothenhagen and F. W. Fuchs, "Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in three phase voltage source inverters for AC variable speed drives," in *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on*, 2005, p. 10–pp.
- [44] R. L. A. Ribeiro, C. B. Jacobina, E. Silva, and A. M. N. Lima, "Compensation strategies in the PWM VSI topology for a fault tolerant induction motor drive system," in *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003. SDEMPED 2003. 4th IEEE International Symposium on*, 2003, pp. 211–216.
- [45] G. Mohammed, "Diagnostic par Reconnaissance des formes: Application à la machine asynchrone." *Mémoire de Magister, Université Mouloud Maamari de Tizi Ouzou*, 2012.
- [46] F. Yanhui, Z. Junwei, Q. Yingning, and F. Kai, "Fault tolerance for wind turbine power converter," in *Renewable Power Generation Conference (RPG 2013), 2nd IET*, 2013, pp. 1–4.
- [47] H. Polinder, H. Lendenmann, R. Chin, and W. M. Arshad, "Fault tolerant generator systems for wind turbines," in *Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC'09. IEEE International*, 2009, pp. 675–681.
- [48] A. Gaillard, S. Karimi, P. Poure, S. Saadate, and E. Gholipour, "A fault tolerant converter topology for wind energy conversion system with doubly fed induction generator," in *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*, 2007, pp. 1–6.
- [49] A. Gaillard, P. Poure, and S. Saadate, "FPGA-based reconfigurable control for switch fault tolerant operation of WECS with DFIG without redundancy," *Renewable energy*, vol.

55, pp. 35– 48, 2013.

[50] S. El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse du doctorat en génie électrique préparée dans laboratoire L2EP de l'école Centrale de Lille, le 06/12/2004.

[51] A.HAMOUDI : commande électrique 3, Polycopié de Cours Master 2, École Supérieure en génie électrique et énergétique d'Oran (ESG2E), 2019/2020.

[52] Dahmani Kahina, "contribution au développement de méthodes numériques utilisant les réseaux de neurone artificiels pour la caractérisation du gisement solaire en Algérie". Thèse de Doctorat, Université HOUARI BOUMEDIENE, Alger, 2014/2015.

[53] Ch. Bennour, 2012." Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation ", Mémoire de Magister, université Mohamed Khider de Biskra.