

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



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Energies Renouvelables

Mémoire présenté en vue de l'obtention

Du Diplôme

Master en Electrotechnique

Option : solaire photovoltaïque

Commande par mode glissant d'ordre
supérieur d'une chaine de conversion
d'énergie éolienne

Présenté par : Hamici islam Et Remita yaaqoub

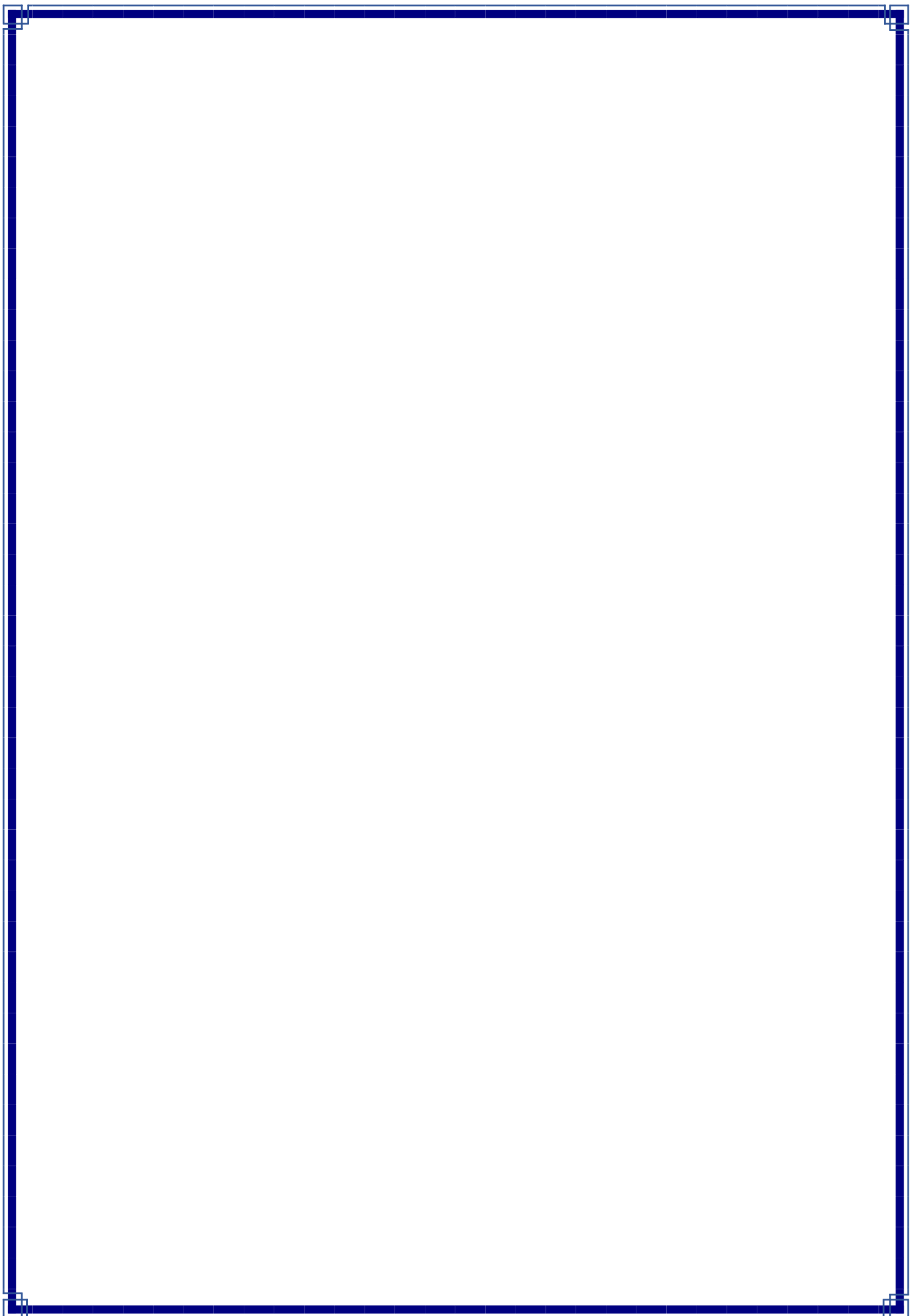
Devant le jury composé de

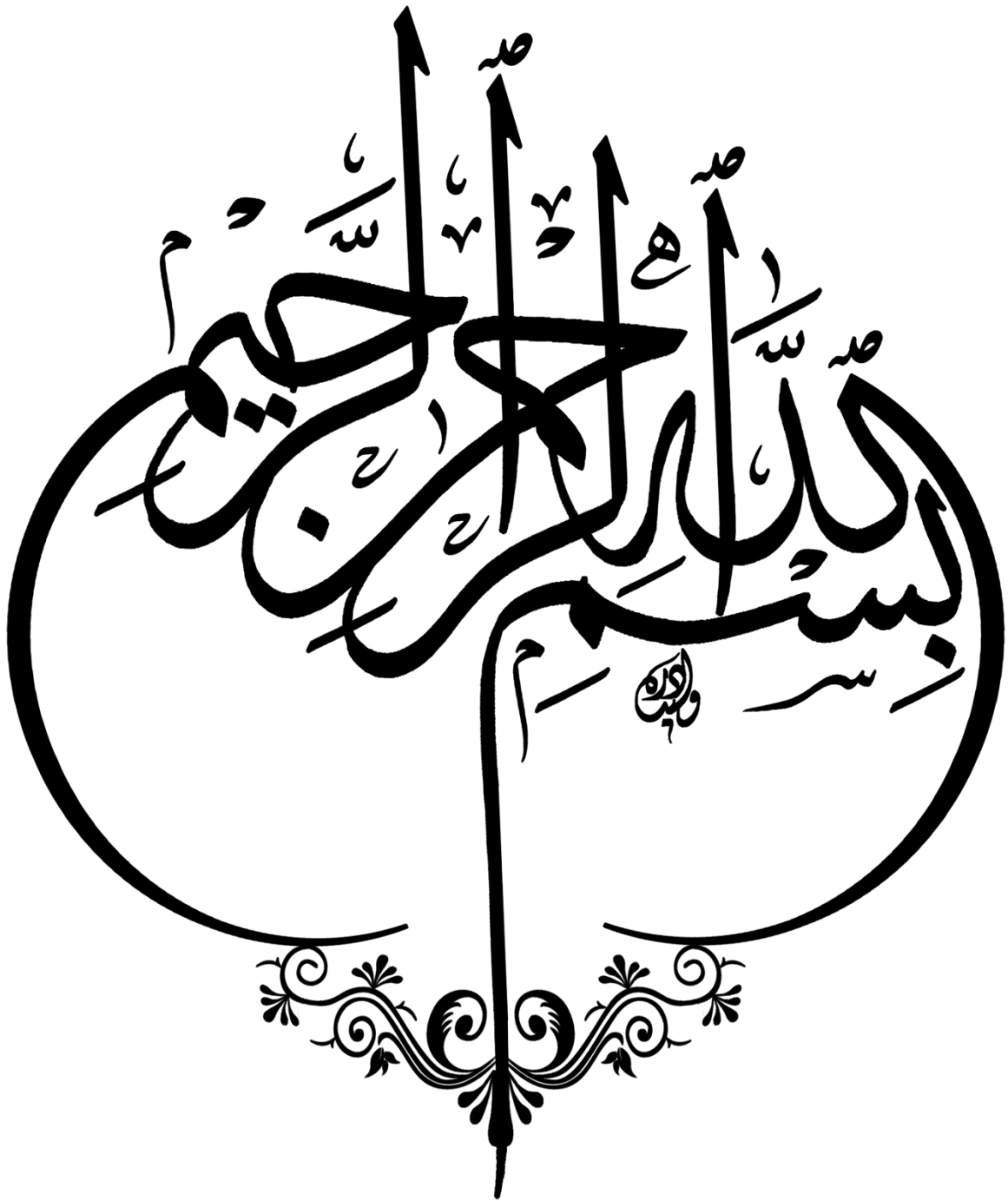
Président : Dr. Terki Amel

Encadreur : Dr. Charrouf Omar

Examineur : Dr. Derraji Belloume Karima

Année universitaire : 2019/2020





Remerciements

Tout d'abord, Mes louanges à DIEU le Tout Puissant pour m'avoir donné le courage, la Volonté, la patience durant ces années d'étude et que grâce à Lui ce travail a été réalisé.

Que messieurs CHARROUF OMAR trouvent ici l'expression de nos plus vifs remerciements pour nous avoir aidés et suivis patiemment dans l'élaboration de ce travail.

Nos remerciements vont également aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.

Nous remercions vivement tous les enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation.

Des remerciements vont à toute personne ayant contribué de prêt ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail

Dédicace

Je dédie de travail :

A mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu

A mes grands parents

A mes frère set mes sœurs

A toutes ma famille

A tous mes amis.

Résumé

Dans ce travail nous avons étudié, la modélisation et la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents.

Le plan de travail constitué de trois parties organisées comme suit :

- Dans la première partie, nous avons étudié le système de conversion d'énergie éolienne (généralité et l'état de l'art).
- Dans la deuxième partie, on a présenté la modélisation d'un système éolien.
- Dans la troisième partie, nous avons analysé et simulé la commande par mode glissant de GSAP.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale.

Mots clés : Système éolien, conversion d'énergie, Turbine, GSAP, R. MGO2.

Abstract

In this work we studied, modeling and controlling a wind energy conversion system based on a synchronous machine with permanent magnets.

The outline plan consists of three parts organized as follows:

- In the first part, we study the wind energy conversion system (generality and state of the art)
- in the second part, the modeling of a wind system was presented,
- In the third part, we analyzed and simulated the GSAP with sliding mode control.

We conclude this work with a general conclusion.

Key words: Wind system, energy conversion, Turbine, GSAP, R. MGO2.

ملخص

في هذا العمل قمنا بدراسة النمذجة والتحكم في نظام تحويل طاقة الرياح على أساس مولد متزامن ذو مغناطيس دائم. تتكون خطة العمل من ثلاثة أجزاء منظمة على النحو التالي:

- في الجزء الأول، درسنا نظام تحويل طاقة الرياح (لمحة عن طاقة الرياح) ،
- في الجزء الثاني، تم تقديم نمذجة نظام تحويل طاقة الرياح
- في الجزء الثالث، قمنا بتحليل ومحاكاة الآلة المتزامنة ذات المغناطيس الدائم التحكم في الوضع الزلقة

وفي الأخير ننهي هذا العمل بخاتمة عامة .

كلمات مفتاحية : نظام طاقة الرياح، تحويل الطاقة، التوربينات، متزامنة ذات مغناطيس دائم، التحكم في الوضع الزلقة.

Liste des Abréviations et des Symboles

<i>Liste des Abréviations</i>	
CMGO2	Commande par mode glissant ordre deux
VAWT	Les éoliennes à axe vertical (Vertical Axis Wind Turbines).
HAWT	Les éoliennes à axe horizontal (Horizontal Axis Wind Turbines).
SMC	Commande par mode glissant d'ordre 1
GSAP	Générateur Synchrone à Aimants Permanents.
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.
TWG	Twisting
<i>Liste des Symboles</i>	
Ω_s	La vitesse de synchronisme (rad/s).
C_{em}	Le couple électromagnétique (Nm).
ω	La pulsation du réseau (rad/s).
P	Nombre de paires de pôles.
ρ	La densité de l'air (Kg/m^3).
S	La surface circulaire balayée par la turbine (m^2), $S = \Pi \cdot R^2$.
V	La vitesse du vent (m/s).
C_p	Le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.
R	Rayon de la pale (m).
$\Omega_{méc}$	La vitesse mécanique (rad/s).
$\Omega_{turbine}$	Vitesse angulaire de la turbine (rad/s).
λ	Ratio de vitesse.
β	Angle d'orientation des pales (degré).
C_{aer}	Le couple aérodynamique (Nm).

$[P(\theta)]$	La matrice de Park.
θ	L'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé (rad).
P_{aer}	La puissance aérodynamique de la turbine (w).
$V_a, V_b, V_c,$	Tension de la génératrice (v).
I_a, I_b, I_c	Courant de la génératrice (A).
$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$	Flux aux phases a, b et c (Web).
R_s	Résistance de chaque enroulement du stator (Ω).
φ_f	Flux des aimants permanents (Web).
V_d	Tension selon l'axe d (V).
V_q	Tension selon l'axe q (V).
I_d	Courant selon l'axe d (A).
I_q	Courant selon l'axe q (A).
$\varphi_d,$	Flux selon l'axe d (Web).
φ_q	Flux selon l'axe q (Web).
ω	Vitesse de rotation électrique (rad/s).
L_d	Inductance statorique selon l'axe d (H).
L_q	Inductance statorique selon l'axe q (H).
W_e	Energie emmagasinée dans le circuit magnétique (J).
θ_{geo}	Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).
C_m	Le couple moteur appliqué sur la génératrice (Nm).
J	Moment d'inertie total de la machine ($Kg.m^2$).
f	Coefficient de frottement visqueux (Nm/rad.s).
R_{ch}	Résistance de charge (Ω).

S	Opérateur dérive de Laplace.
I_{sd}, I_{sq}	Composant direct du stator dans le repère Park.
Tb1, Tb2, Tb3	Forces appliquées sur les pales (N)
I_{α}, I_{β}	Les composantes du vecteur courant de ligne dans le repère stationnaire (α, β).
V_{α}, V_{β}	Les composantes du vecteur courant de ligne dans le repère stationnaire (α, β).
C	Capacité côté continu (F).
R_{ch}	Résistance de la charge (Ω).
V_{dc}	Tension au bus continu (V)
Dg	Coefficient de frottement du rotor
I_{dc}	Courant du bus continu (A).
P_{ref}	La puissance active de référence (w).
q_{ref}	La puissance réactive de référence (VAR).
\hat{p}	Puissance active instantanée (W).
\hat{q}	Puissance réactive instantanée (VAR).
Δ_p	Différences de la puissance active (w).
Δ_q	Différences de la puissance réactive (VAR).
V_{sd}, V_{sq}	Tensions statoriques selon les axes dq de la GSAP (V)
i_{sd}, i_{sq}	Courants statoriques selon les axes dq de la GSAP (A)

Liste de figure

Liste des Figures

CHAPITRE I: Le système de conversion d'énergie éolienne.

Figure I.1 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne.	05
Figure I.2 : Correspondance taille-puissance des éoliennes	06
Figure I.3 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius)	07
Figure I.4 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus).	07
Figure I.5: éolien à axe horizontale.	08
Figure I.6 : Schéma d'une éolienne à axe horizontal amont et en aval.	09
Figure I. 7 : Éléments constituant une éolienne à axe horizontal.	11
Figure I.8 : Eolienne à vitesse fixe.	11
Figure I.9 : Eolienne à vitesse variable.	12
Figure I.9 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.	13
Figure I.9: Machine synchrone connectée directement au réseau.....	15
Figure I.10 : Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.	15

CHAPITRE II: La modélisation d'un système éolien.

Figure II.1 : Schéma représentatif du système de conversion d'énergie éolien.....	18
Figure II.3 : Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse de la turbine.....	19
Figure II.2 : Tube d'air en mouvement.....	21
Figure II.4 : Schéma bloc d'une turbine éolienne.....	22
Figure II.5 : Schéma bloc du modèle de la turbine.....	23
Figure II.6: Représentation d'une MSAP dans le plan (a,b,c).....	25
Figure II.7 : Représentation de la génératrice à aimants permanents sur l'axe (d,q).....	27
Figure II.8 : Schémas équivalents du GSAP selon les deux axes d et q.....	28
Figure II.9 : Schéma de principe d'un redresseur MLI.....	30
Figure II.10 : Schéma fonctionnel d'un redresseur MLI.....	33
Figure II.11: Configuration du convertisseur côté rotor (CCM).....	33
Figure II.12 : Principe de la MLI triangulosinusoidale.....	35

CHAPITRE III : La commande par mode glissant d'un système de conversion d'énergie éolienne

Figure (III.1) : différents modes de convergence pour la trajectoire d'état.....39
 Figure (III.2) : Principe de la commande en mode glissant avec commande équivalent...41
 Figure (III.3) : Le phénomène de broutement.....42
 Figure(III.4): Trajectoire du mode glissant d'ordre 2.....44
 Figure(III.5) : Convergence en temps fini de l'algorithme Twisting.....46
 Figure(III.6) : Schéma bloc de réglage par mode glissement d'ordre2 de la GSAP.....49
 Figure(III.7) : Schéma bloc de mode glissement d'ordre2sous Simulink.....50
 Figure(III.8) : Profil du vent moyen.....51
 Figure(III.9) : Allure du coefficient de puissance C_p51
 Figure(III.10) :Allure de la Puissance fournie par la GSAP.....52
 Figure(III.11) :Tension au bus continu.....52
 Figure(III.12) : Allure du Le courant direct et en quadrature i_d et i_q53
 Figure (III.13) : Allure du vecteur des courants des phases.....54
 Figure(III.14) : Allure du couple électromagnétique.....55

Liste des Tableaux

Tableau I.1: Comparaison des éoliennes a vitesse fixe et a vitesse variable.13
 Tableau II.1 : états possibles des interrupteurs et tensions d'entrée associées.....31

Sommaire

Introduction générale	01
------------------------------------	----

CHAPITRE I: Le système de conversion d'énergie éolienne

I.1. Introduction	05
I.2. Définition de l'énergie éolienne ..	05
I.3. Les Types d'aérogénérateurs	06
I.3.1. Aérogénérateurs à axe vertical (VAWT)	06
I.3.1.1. Le rotor de Savonius	07
I.3.1.2. Le rotor de Darrieus	07
I.3.1.3. Avantages et inconvénients des aérogénérateurs à axe vertical.....	08
I.3.2. Aérogénérateurs à axe horizontal (<i>HAWT</i>)	08
I.3.2.1. Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontale	09
I.3.2.2. Avantages et inconvénients des aérogénérateurs à axe horizontal.....	10
I.4. Les différentes technologies d'éoliennes	11
I.4.1. Les éoliennes à vitesse fixe	11
I.4.2. Les éoliennes à vitesse variable :	12
I.4.3. Avantages et inconvénients des différentes technologies d'éoliennes :	13
I.5. Principe de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique.....	13
I.6. Les types des machines utilisées dans l'aérogénérateur.....	14
I.6.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone :	14
I.6.2. Systèmes utilisant la machine synchrone	14
I.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	15
I.7.1. Avantages	15
I.7.2. Inconvénients	16
I.8. Conclusion	16

CHAPITRE II: La modélisation d'un système éolien

II.1.Introduction.....	18
II.2.Configuration du système de conversion d'énergie éolien.....	18
II.3.Modélisation de la turbine éolienne.....	19
II.4.Modèle du multiplicateur.....	22
II.5. Equation dynamique de l'arbre.....	22
II.6. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	23

II.6.1. Description	24
II.6.2. Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone.....	24
II.6.3. Hypothèses simplificatrices.....	24
II.6.4. Equations de la machine électrique généralisée triphasée	25
II.6.4.1. Equations des tensions statoriques et rotoriques.....	25
II.6.4.2. Equations des flux.....	26
II.6.5. Mise en équations.....	27
II.6.5.1. Equations des tensions	27
II.6.5.2. Equations des flux.....	27
II.6.6. Expression de la puissance.....	28
II.6.7. Equation de couple	29
II.6.8. Equation mécanique.....	29
II.7. Modélisation des convertisseurs statiques.....	30
II.7.1. Modélisation du redresseur cote réseau (CCR... ..	30
II.7.1 .1. Principe de fonctionnement en redresseur MLI.....	30
II.7.1. 2. Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé.....	32
II.7.2 Modélisation de l'onduleur (CCM).....	33
II.7.2.1 Modèle du bus continu.....	35
II.7.2.2 La commande MLI d'onduleur.....	35
II.8. Conclusion.....	36

CHAPITRE III : La commande par mode glissant d'un système de conversion d'énergie éolienne

III.1. Introduction	38
III.2. Principe de la commande mode glissant	38
III.3. Commande par modes glissants d'ordre 1	38
III.3.1. Synthèse de la loi de commande	39
III.3.1.1 Choix de la surface de glissement	39
III.3.1.2. Condition d'existence du mode de glissement	40
III.3.1.3 calculs de la commande	40
III.3.2. Le broutement (chattering)	41
III.3.3. Solutions pour atténuer le phénomène de réticence	42
III.3.3.1. Solution par des modes glissants d'ordre supérieur	42

III.4 Commande par mode de glissement d'ordre supérieur de la MSAP	42
III.4.1. Description	42
III.4.2. Position du problème	43
III.4.3. Principe	43
III.4.4. Commande par mode glissant d'ordre deux	44
III.5. Algorithmes glissants d'ordre supérieur	46
III.5.1 Algorithme de Twisting	46
III.5.2. L'algorithme du super-twisting	47
III.6. Application sur la commande de la turbine éolienne	48
III.7. Résultats de simulation et discussions	50
III.7.1. Résultats de simulation du système pour un vent moyen	50
III.7.2. Résultats de simulation de l'aérogénérateur	51
III.8 Conclusion.....	55
Conclusion général	55
ANNEXES.....	57
Références bibliographiques.....	60

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie est l'un des facteurs essentiels au développement socio-économique. Le taux de l'énergie consommée par une nation reflète souvent le niveau de prospérité qu'il pourrait atteindre. Le bien-être social et économique de l'Homme est lié étroitement à son confort énergétique d'après les critères des nations unies.

La population globale augmente de jour en jour. La croissance démographique est plus rapide dans les pays en développement que les pays industrialisés. À la suite de cette croissance démographique et les activités de développement, la demande d'énergie est également en augmentation. Au cours des 10 dernières années, la consommation d'énergie primaire dans les pays ont augmenté de 1,5 % par an. La modification correspondante dans les pays en développement était de 3,2 %. Avec cette tendance qui prévaut, le la demande d'énergie augmenterait considérablement dans les années à venir. Les projections futures indiquent que l'approvisionnement total en énergie primaire (TPES) devrait être augmenté à 12 100 MW d'ici 2010 et 16 300 MW d'ici 2030.

La demande mondiale d'énergie provient de diverses sources. Les combustibles fossiles constitués du charbon, du pétrole et du gaz naturel répondent à environ 80 % des besoins. La part de l'énergie nucléaire est d'environ 7%. Les énergies renouvelables fournissent 13,7 % à laquelle la biomasse traditionnelle et la grande hydroélectricité contribuent la part principale. À l'heure actuelle, la part des nouvelles énergies renouvelables (éolienne, solaire, etc.) n'est que de 2,2 pour cent. Par conséquent, si le scénario actuel se poursuit, nous devons compter fortement sur les combustibles fossiles pour répondre à notre Énergie.

Malheureusement, ces combustibles fossiles sont des ressources limitées et seront complètement épuisés un jour ou l'autre. Les réserves prouvées de charbon ne sont que 566 Gigatonnes Même les réserves de pétrole et de gaz naturel sont limitées respectivement à 143 Gigatonnes et 138 Gigatonnes. Même au taux de consommation actuel de 2,26 Go par an, le réserve de charbon prouvée est suffisante pour seulement les 250 prochaines années.

Les réserves de pétrole et de gaz naturel sont également confrontées à une situation similaire. Bien que nous puissions découvrir de nouvelles réserves de ces ressources, le taux de découverte a diminué depuis 40 ans. Par conséquent, alors que notre demande d'énergie augmente de jour en jour, les ressources disponibles s'épuisent. Cela nous mènera certainement à la très discutée crise énergétique. Toutefois, la crise n'est peut-être pas une

réalité l'échelle de temps peut se prolonger en raison de la découverte de nouvelles ressources.

Les effets néfastes sur l'environnement des centrales à base de combustibles fossiles ajoutent une autre dimension à ce problème. Ces centrales chargent l'atmosphère de serre (GES) et les particules, ce qui entraîne le réchauffement climatique et le changement climatique. La production et la consommation d'énergie sont responsables de 50 à 60 % des GES rejetés dans l'atmosphère à l'échelle mondiale. Avec l'augmentation de l'énergie pollution atmosphérique du secteur de l'énergie devrait encore augmenter dans un avenir proche. Plusieurs délibérations sont faites à l'échelle mondiale pour et des mesures visant à réduire le niveau de pollution atmosphérique due aux activités humaines. Il est largement admis que, pour réduire les émissions d'au moins 10 p. 100 de notre approvisionnement énergétique devrait provenir d'énergies renouvelables Sources.

Parmi les sources d'énergies renouvelables, l'énergie éolienne est considérée comme le moyen le plus efficace et économique pour la production d'électricité. Elle coûte entre 4-6cents par kilowatt heure. De plus, le vent est un carburant propre, gratuit et suffisamment disponible à travers le monde pour faire face à la demande d'électricité qui augmente constamment. Les systèmes éoliens modernes ont diverses topologies commerciales disponibles dans le marché utilisant des génératrices asynchrones (à vitesse fixe) et des Génératrices Asynchrones à Double Alimentation (GADA) ou encore des Génératrices Synchrones à Aiment Permanent (GSAP) (à vitesse variable).

Aujourd'hui, l'importance de la production d'énergie éolienne a conduit les gens du domaine à mener des recherches approfondies pour améliorer l'efficacité de ces systèmes par un meilleur transfert d'énergie et une bonne qualité de l'énergie produite à travers le choix d'une architecture optimale du système, et des techniques de commandes adéquates qui seront capables de compenser l'effet des perturbations paramétriques et extérieures du système.

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à l'étude d'une chaîne complète de conversion d'énergie éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents à attaque directe. Nous allons également étudier des stratégies de commande permettant l'optimisation de l'énergie extraite par la turbine. Ce travail qui comprend trois chapitres, est organisé de la manière suivante.

Nous allons entamer ce travail avec un premier chapitre qui traitera des généralités sur l'énergie éolienne, à commencer par la définition de l'énergie éolienne Puis nous allons parler des différents types d'éoliennes existant en abordant leurs différentes structures leurs

fonctionnements, leurs qualités et éventuellement leurs défauts. Puis nous avons expliqué les différentes technologies d'éoliennes les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable, Aussi, les différents types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens.

Dans la deuxième chapitre, nous avons décrit les trois parties essentielles du système de conversion éolienne, la première représente la partie mécanique qui contient la turbine et l'arbre de la génératrice. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine à aimant permanent, fonctionnement en génératrice. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi. Dans la dernière partie nous avons présenté le modèle du convertisseur statique composé du redresseur de courant commandé et onduleur de tension, son principe de fonctionnement et la technique de commande MLI.

Dans la troisième chapitre Nous avons présenté l'application de la technique de commande par mode glissant d'ordre supérieur. Premièrement, nous avons parlé des bases de commande par mode glissant d'ordre 1 Comme La synthèse de la commande et dans un deuxième lieu nous avons donné en détail les principaux algorithmes de commande par mode glissant d'ordre deux, tels que les Algorithmes de Twisting et Super Twisting qui sont les plus utilisés dans la littérature. Les résultats de la simulation numérique obtenus lors de l'application de ces commandes sur le système seront affichés et commentés.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus.

Chapitre I

*Le système de
conversion d'énergie
éolienne*

I.1. Introduction :

L'énergie disponible dans le vent est essentiellement l'énergie cinétique de grandes masses d'air se déplaçant sur la surface de la terre. Les pales de l'éolienne reçoivent cette cinétique l'énergie, qui est ensuite transformée en formes mécaniques ou électriques, selon notre utilisation finale. L'efficacité de la conversion du vent en d'autres formes d'énergie utiles dépend grandement de l'efficacité avec laquelle le rotor interagit avec le vent courant. Dans ce chapitre, nous discutons des principes fondamentaux impliqués dans ce processus de conversion de l'énergie éolienne.

I.2. Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Comme le montre la **Figure I.1.**

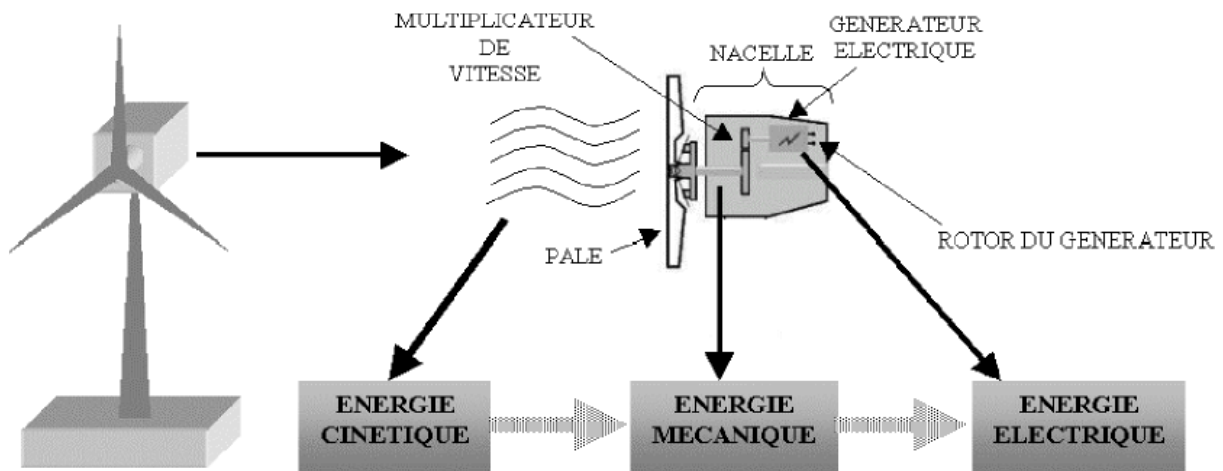


Figure I.1 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne.[1]

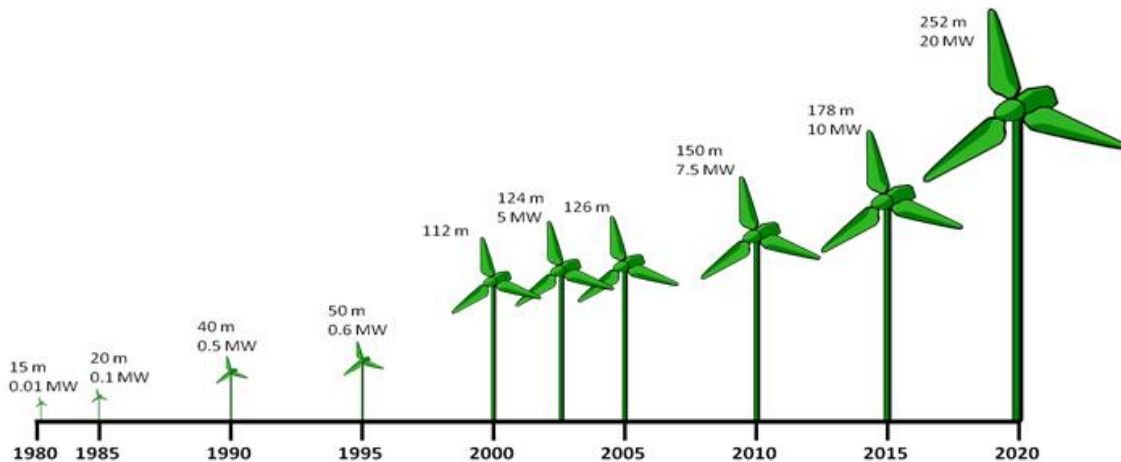
L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences. [1]

I.3. Les Types d'aérogénérateurs :

Selon la gamme de puissance produite par l'aérogénérateur, on distingue les catégories des Eoliennes suivantes :

- éoliennes de petite puissance : inférieure à 40 KW.
- éoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de KW.
- éoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW. [3]

La figure (I.2) illustre la correspondance taille-puissance des éoliennes.



La figure (I.2) : Correspondance taille-puissance des éoliennes.

Du point de vue conception, les éoliennes peuvent être divisées en deux familles selon l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On note : les éoliennes à axe vertical (VAWT) et les éoliennes à axe horizontal (HAWT). [2]

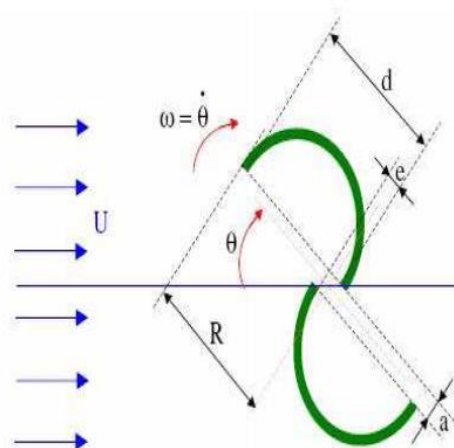
I.3.1. Aérogénérateurs à axe vertical (VAWT) :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation. [3]

- **Le rotor de Savonius.**
- **Le rotor de Darrieus.**

I.3.1.1. Le rotor de Savonius :

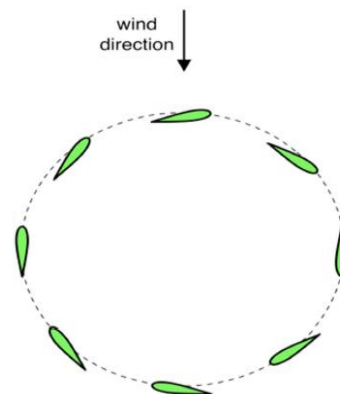
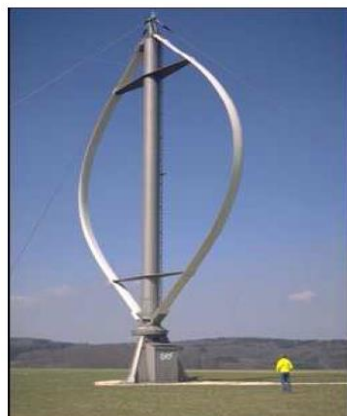
Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur.[4]



La figure (I.3) : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius). [5]

I.3.1.2. Le rotor de Darrieus :

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variable selon l'orientation de ce profil (voir Fig.I.4). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif. [5]



La figure (I.4) : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus). [5]

I.3.1.3. Avantages et inconvénients des aérogénérateurs à axe vertical :

Les avantages théoriques d'une éolienne à axe vertical sont les suivants :

- Le mécanisme de direction n'est pas nécessaire pour diriger le rotor dans la direction du vent.
- Permet de placer la génératrice, le multiplicateur, à terre (il n'y a pas besoin de monter la machine d'une tour). [6]

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- Les vents sont plus faibles à proximité de la surface du sol.
- Un inconvénient, pour certaines VAWT, est de nécessiter un dispositif auxiliaire de démarrage.
- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas satisfaisante.
- D'autres VAWT utilisent la poussée (drag) plutôt que la portance aérodynamique (lift, effet qui permet à un avion de voler), ce qui se traduit par une réduction du coefficient de puissance et un moindre rendement. [6]

I.3.2. Aérogénérateurs à axe horizontal (HAWT) :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. [7]



Figure (I. 5) : éolien à axe horizontale.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal :

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif d'orientation. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable. [6]

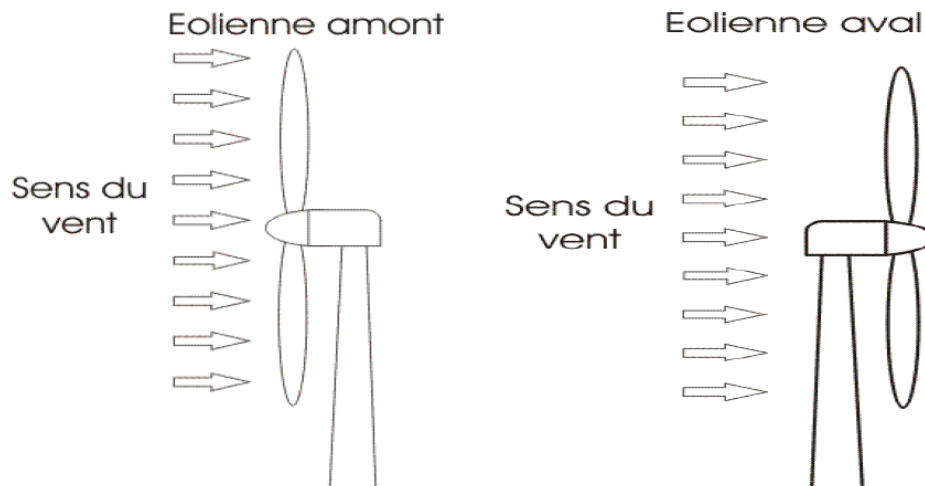


Figure (I. 6) Schéma d'une éolienne à axe horizontal amont et en aval. [8]

I.3.2.1. Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontale :

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne à axe horizontale, le rotor, la nacelle et la tour. Comme illustré sur la figure (I.7) :

Les pales :

Elles sont directement exposées aux variations du vent ce qui provoque leur rotation. Le contrôle de la puissance éolienne captée se fait de deux façons :

- Le contrôle de la surface exposée au vent par la méthode du PITCH, qui consiste en le réglage de l'angle d'exposition des pales à l'onde incidente du vent.

- Le contrôle de cette surface par la méthode du STALL, qui consiste en la variation de l'angle de calage de la pale ce qui mène à un décrochage aérodynamique et un freinage des pales. [9]

Le Rotor :

C'est la partie tournante dans une éolienne. Il capte et transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Il est constitué des pales (d'un nombre variable) et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle et le moyeu. Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variable, freinage du rotor....). [9]

La Nacelle :

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants :

- arbres lent et rapide.
- Multiplicateur.
- Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
- Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.
- les systèmes d'orientation des pales.
- le système de refroidissement. [10]

I.3.2.2. Avantages et inconvénients des aérogénérateurs à axe horizontal :

Les avantages théoriques d'une éolienne à axe horizontal sont les suivants :

- Coût limité.
- Peu de contraintes mécanique.
- Grande efficacité. [11]

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- Bruit conséquent.
- Vibrations non négligeables.
- Grande sensibilité au flux éolien et sa variation. [11]

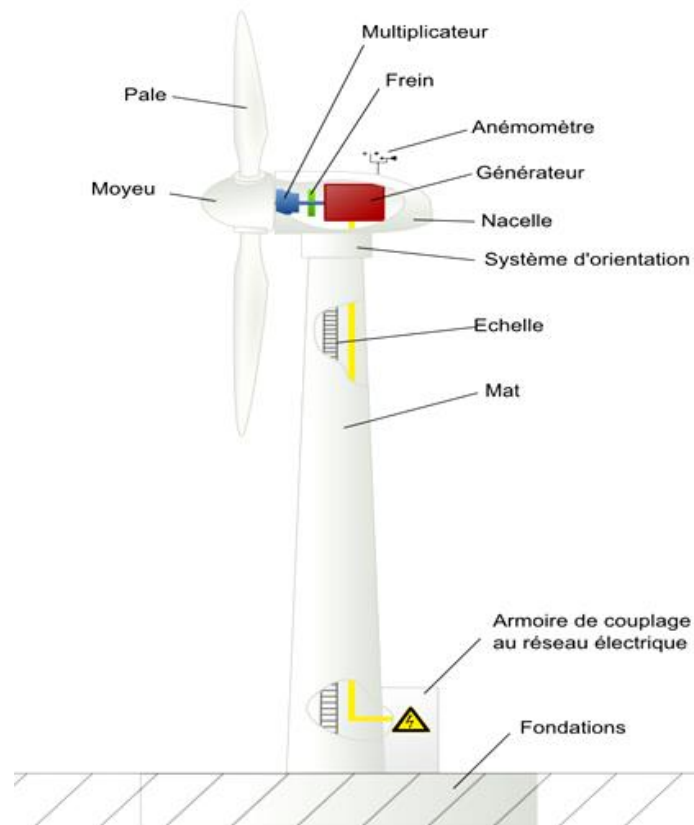


Figure (I. 7) : Éléments constituant une éolienne à axe horizontal.

I.4. Les différentes technologies d'éoliennes :

I.4.1. Les éoliennes à vitesse fixe :

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne est composée de la turbine, le multiplicateur de vitesse et de la génératrice. [12]

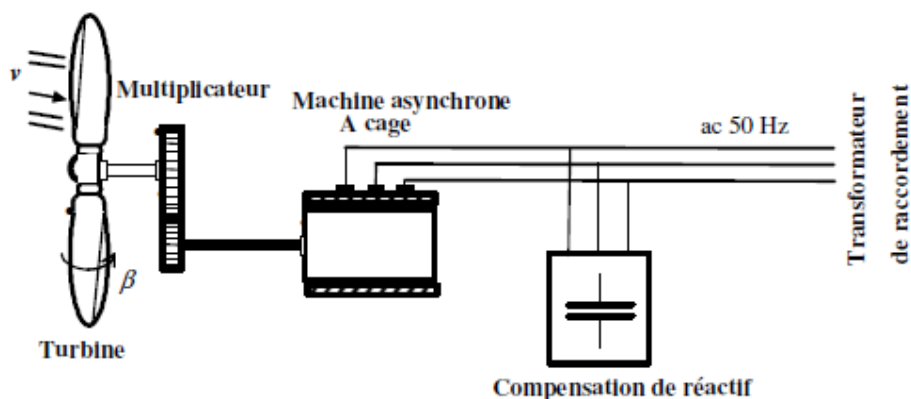


Figure I.8 : Eolienne à vitesse fixe.

I.4.2. Les éoliennes à vitesse variable :

D'une autre part les turbines à vitesse variable, peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. La turbine change constamment sa vitesse de rotation dépendamment de la vitesse du vent pour maximiser la puissance. Dans ce cas, la vitesse spécifique λ , qui représente la vitesse du bout de la pale par rapport à la vitesse du vent, peut être maintenue dans ces valeurs optimales de manière à réaliser une extraction maximale de la puissance électrique. Afin que la vitesse de la turbine soit ajustable, l'éolienne est connectée au réseau électrique via des convertisseurs de puissance. Comme le montre le tableau ci-dessous, les principales avantages des turbines à vitesse variable sont leurs rendements de conversion d'énergie élevé, une énergie électrique de bonne qualité et qui ne présente aucune nuisance pour le réseau électrique, et finalement le stress mécanique réduit sur l'ensemble de la chaîne mécanique. Leurs principaux inconvénients sont le coût de construction et les pertes énergétiques dues à l'utilisation des convertisseurs de puissance. Toutefois, ce coût additionnel et les pertes sont compensés par la forte production d'énergie électrique. [13]

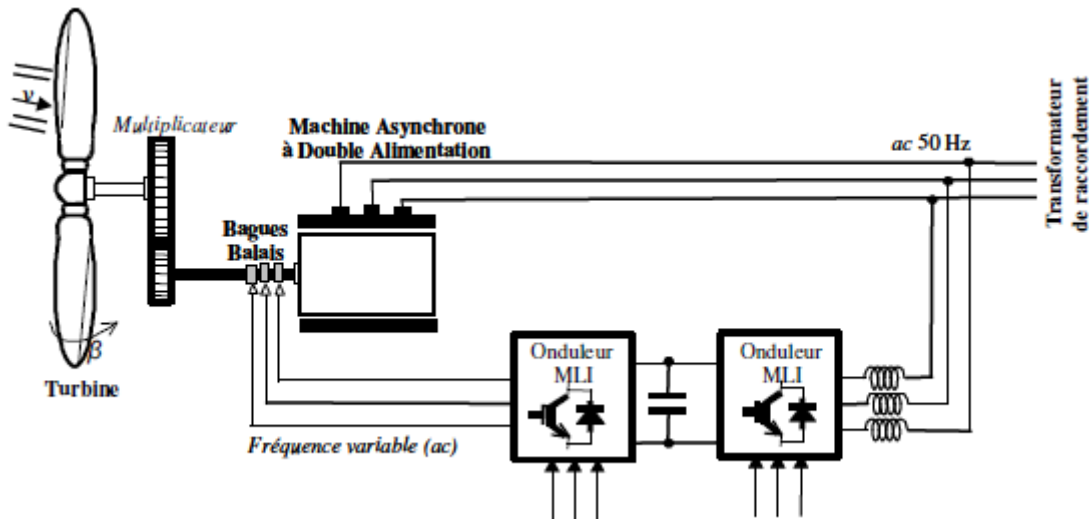


Figure I.9 : Eolienne à vitesse variable.

I.4.3. Avantages et inconvénients des différentes technologies d'éoliennes :

technologies d'éoliennes :	Avantages	Inconvénients
Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Simple, robuste, fiable. ➤ Faible cout déconstruction et maintenance. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Rendement de conversion d'énergie faible. ➤ Fort stress mécanique qu'augmente le coût de la structure devant supporter ceci. ➤ Fluctuation importante de la puissance.
Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Fort rendement de conversion d'énergie. ➤ Puissance électrique de meilleure qualité. ➤ Stress mécanique réduit. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Cout et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs. ➤ Contrôle du système plus compliqué.

Tableau I.1: Comparaison des éoliennes a vitesse fixe et a vitesse variable. [13]

I.5. Principe de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique :

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passent par la surface active *S* de la voilure. [14]

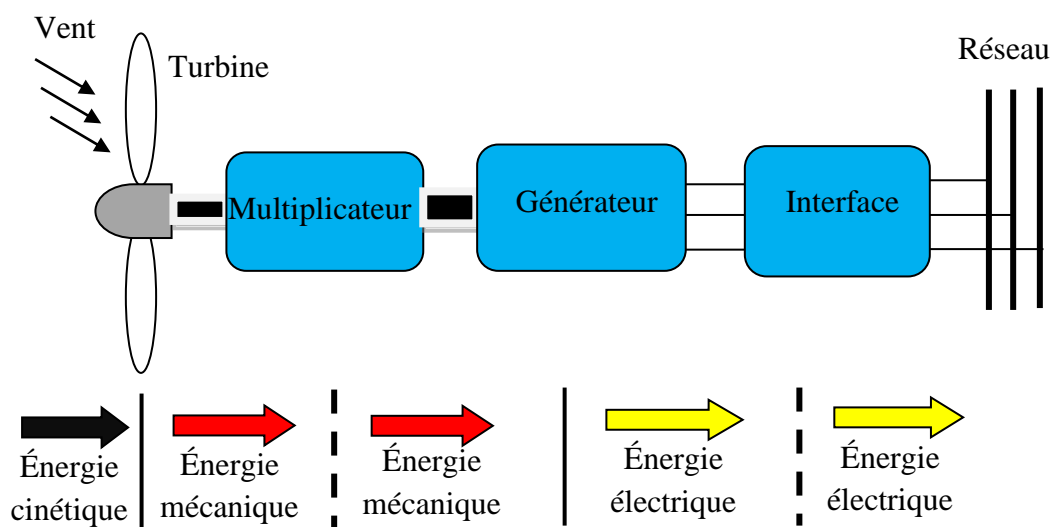


Figure I.10 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.6. Les types des machines utilisées dans l'aérogénérateur:

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

I.6.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone :

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. [15] ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur les bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator..Il existe plusieurs types de configurations utilisant la machine asynchrone dans toutes ses formes (Machine asynchrone à rotor bobiné, Machine asynchrone à cage, Machine asynchrone à double stator, MADA...etc.) [16]

I.6.2. Systèmes utilisant la machine synchrone :

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau (**Figure I.10**), sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés du réseau ; elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (**figure I.11**).

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance. Certaines variantes de machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer

du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demande un important travail de maintenance. [17]

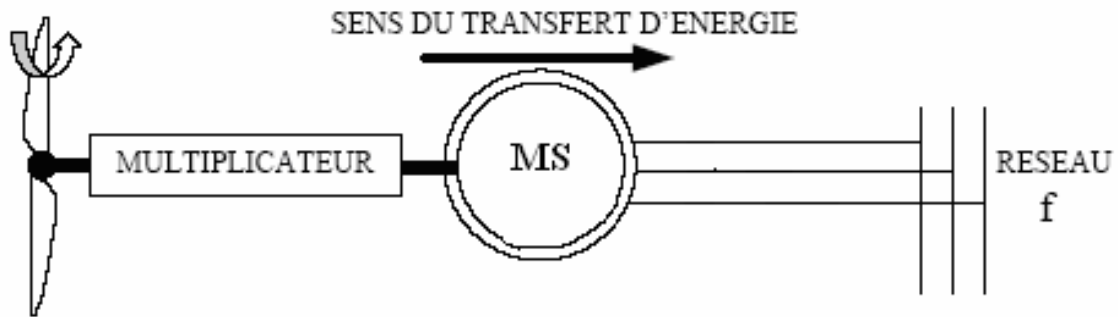


Figure I.10 : Machine synchrone connectée directement au réseau.

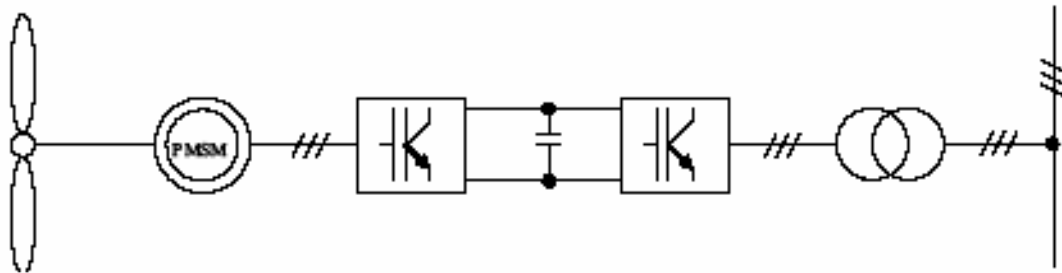


Figure I.11 : Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

I.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

I.7.1. Avantage :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- L'énergie éolienne est une énergie propre.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. L'énergie éolienne possède d'autre part des atouts économiques certains.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont minimales. [18]

I.7.2. Inconvénients :

- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.
- Le cout de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classiques surtout sur les sites moins ventés.
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.

[18]

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique et les différents types et composants et leur principe de fonctionnement, Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes puis nous avons examiné les principales familles des éoliennes actuelles selon le principe de commande, qui sont des éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable.

Chapitre II

***La modélisation d'un
système éolien***

II.1. Introduction :

Pour aborder le principe de commande d'un système, il est impératif de passer par la modélisation mathématique de ses différents composants. Comme pour tout système, la conception de la turbine, de la machine et de convertisseur dépend du modèle de représentation. La modélisation est donc essentielle à l'étude et au suivi de ce groupe, en fonction des objectifs, qui peuvent être plus ou moins complexes et précis. Trouver une très bonne précision conduit souvent à des systèmes mathématiques relativement difficiles à résoudre, ce qui prend beaucoup de temps arithmétique. D'autre part, un modèle basé sur un certain nombre d'hypothèses simplistes nécessite un temps arithmétique limité, mais dans la plupart des cas conduit à une précision limitée. Le but de ce chapitre sera donc la présentation des modèles mathématiques de la turbine, la machine synchrone et le convertisseur formant la chaîne de conversion d'énergie éolienne.

II.2. Configuration du système de conversion d'énergie éolien :

Le système présenté dans la figure II.1, a été proposé pour un central de conversion d'énergie éolien. Le système est raccordé au réseau et sans stockage dans des batteries.

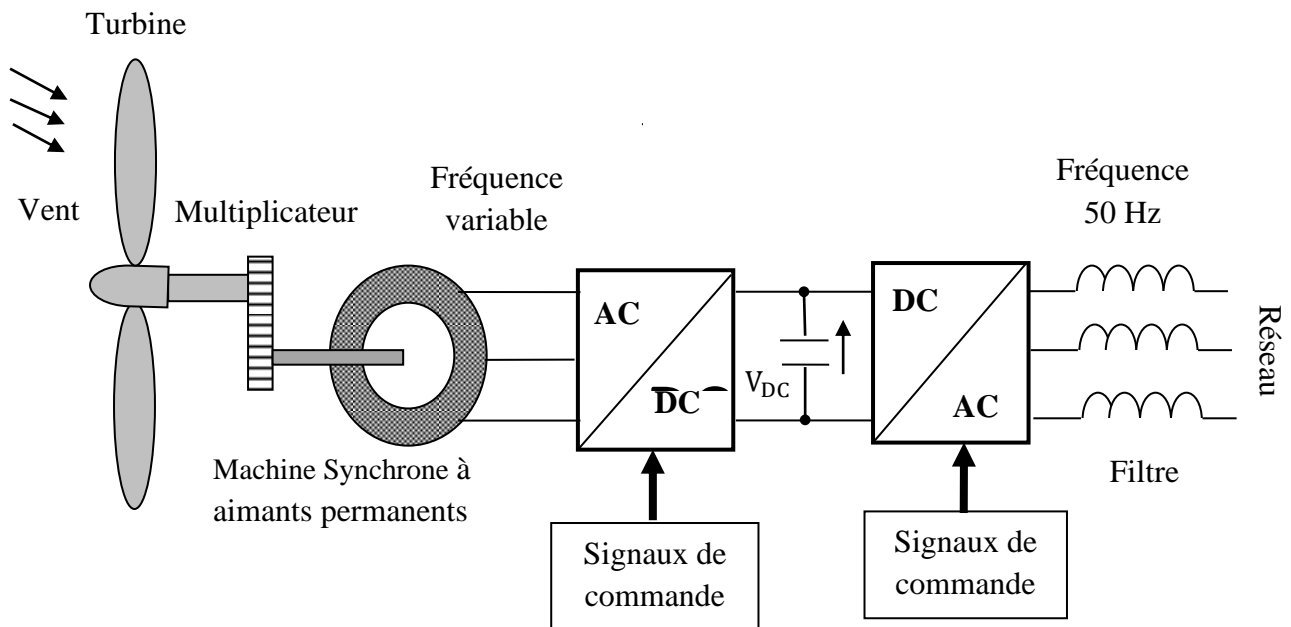


Figure II.1 : Schéma représentatif du système de conversion d'énergie éolien.

Le système de conversion d'énergie éolien se présente comme suit:

- Un générateur éolien de 2.2 KW composé d'une turbine éolienne entraînant une machine synchrone à aimant permanent fonctionnant en mode générateur. L'accouplement est assuré par le biais d'un multiplicateur qui a pour rôle l'augmentation de la vitesse de la GSAP.
- Un convertisseur à MLI (redresseur) formé de six interrupteurs permettant de redresser la tension à la sortie de la GSAP au bus continu.
- Un convertisseur MLI (onduleur) formé de six interrupteurs reliés à l'autre côté du bus continu. Il a pour fonction de maintenir la tension au bus continu et assurer le fonctionnement de la machine à induction à la puissance maximale que peut fournir la turbine éolienne. [19]

II.3. Modélisation de la turbine éolienne :

La fonction d'une turbine éolienne est de convertir le mouvement du vent en énergie de rotation qui peut être employée pour entraîner un générateur. Les turbines éoliennes capturent la puissance du vent au moyen des pales aérodynamiquement conçues et le convertissent en puissance mécanique rotative. Actuellement, les turbines éoliennes les plus populaires sont les turbines à axe horizontale, où le nombre de pales est typiquement égal à trois. [20][21]

L'énergie cinétique du vent est donnée par l'équation suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} m V_V^2 \quad (II.1)$$

E_c : Énergie cinétique de l'air (J).

m : la masse totale du volume d'air contenu dans le tube (Kg).

V_V : Vitesse de l'air (m/s).

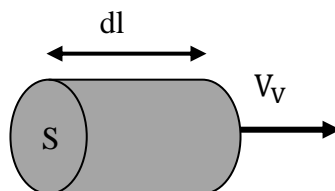


Figure II.2 Tube d'air en mouvement.

La masse d'air défini par l'équation (II.2), dépend de la longueur du volume considéré et de la section traversée. [20][21]

$$dm = \rho S dl \quad (II.2)$$

Avec $dl = V_V dt$ (II.3)

ρ : masse volumique ou densité de l'air (Kg/m³).

S : la surface couverte par la turbine. et a pour expression suivant :

$$S = \pi R_t^2 \quad (II.4)$$

R_t : représente le rayon de la pale (m).

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante :

$$P_V = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S V_V^3 \quad (II.5)$$

La puissance mécanique que la turbine extrait à partir du vent P_{aer} est inférieure à P_V . C'est dû au fait que la vitesse de vent après la turbine ne soit pas zéro (l'air doit être porté après la turbine). Ainsi, le coefficient de puissance de la turbine C_p peut être défini par : [20] [21]

$$C_p = \frac{P_{aer}}{P_V} \quad (II.6)$$

La puissance mécanique $P_{aéro}$ disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi:

$$P_{aéro} = C_p \cdot P_V = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho S V_V^3 \quad (II.7)$$

Le coefficient de puissance représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Le coefficient C_p ne peut théoriquement pas dépasser la limite dite de Betz. [20] [21]

C_p limite = 0.59.

L'équation analytique de C_p en fonction de λ pour une éolienne de petite puissance choisie pour notre application est la suivante :

$$C_p(\lambda) = \frac{C_0 \lambda (\lambda_0 - \lambda)}{a_0^2 + (\lambda_0 - \lambda)^2} \quad (II.8)$$

La figure II.3 représente le tracé de la caractéristique $C_p(\lambda)$ où apparaît un maximum de 0.4061 pour une vitesse réduite de 6.8.

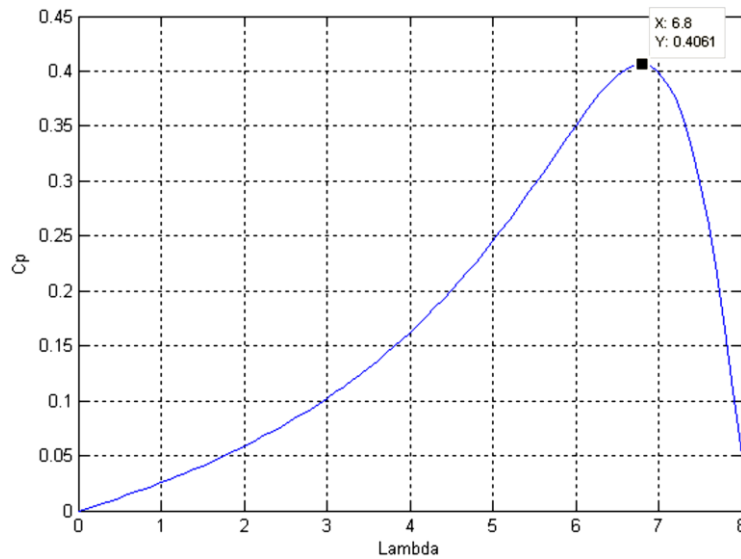


Figure II.3 : Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse de la turbine.

Le coefficient C_p est une fonction du rapport λ , aussi bien que l'angle d'inclinaison de pale (β). Dans une turbine de vent commandée par pitch contrôle, le coefficient λ est défini comme le rapport de la vitesse de bout des pales de la turbine à la vitesse du vent, il est donné par : [20] [21]

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V_V} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

Ω_t : vitesse mécanique de la turbine (rad/s).

Le couple sur l'axe de la turbine éolienne $T_{aéro}$ peut être calculé à partir de la puissance :

$$T_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R_t^2 C_p(\lambda) V_V^3}{\Omega_t} \quad (\text{II.10})$$

On utilise généralement le coefficient du couple C_T défini par:

$$C_T(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad (\text{II.11})$$

Ce ci donne :

$$T_{aéro} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_T(\lambda) V_V^2 \quad (\text{II.12})$$

II.4. Modèle du multiplicateur :

La turbine est normalement couplée à l'axe du générateur par un multiplicateur dont le gain de vitesse G est choisi afin de placer la vitesse d'axe du générateur dans une marge de vitesse désirée. En négligeant les pertes de transmission, le couple et la vitesse de la turbine se sont rapportés au côté du générateur par : [22]

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \tag{II.13}$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \tag{II.14}$$

C_g : est couple appliqué au rotor du générateur synchrone.

C_{aer} : est le couple aérodynamique.

Ω_t : est la vitesse de rotation de l'arbre de la turbine.

Ω_{mec} : est la vitesse de rotation de l'arbre du générateur synchrone.

G : Gain du multiplicateur de vitesse.

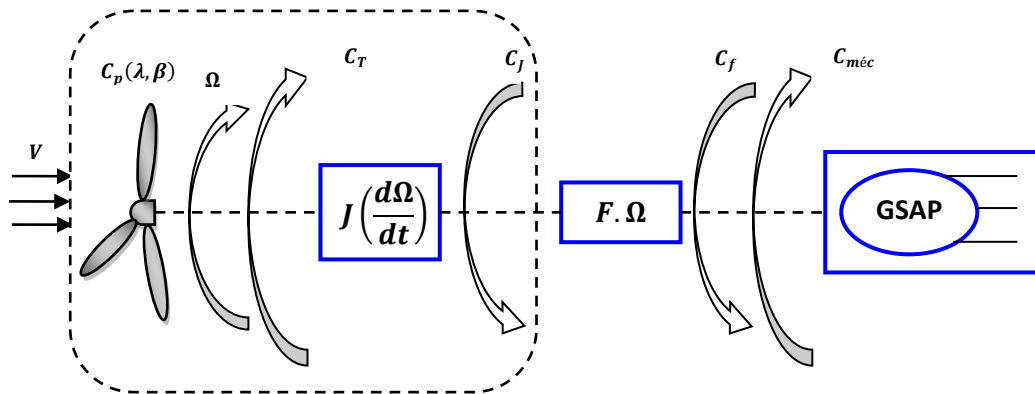


Figure II.4 : Schéma bloc d'une turbine éolienne.

II.5. Equation dynamique de l'arbre :

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. [12]

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \tag{II.15}$$

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 : [12]

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{II.16}$$

Où :

J : est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple C_g . [12]

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{II.17}$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f : $C_{vis} = f\Omega_{mec}$ (II.18)

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté sur la

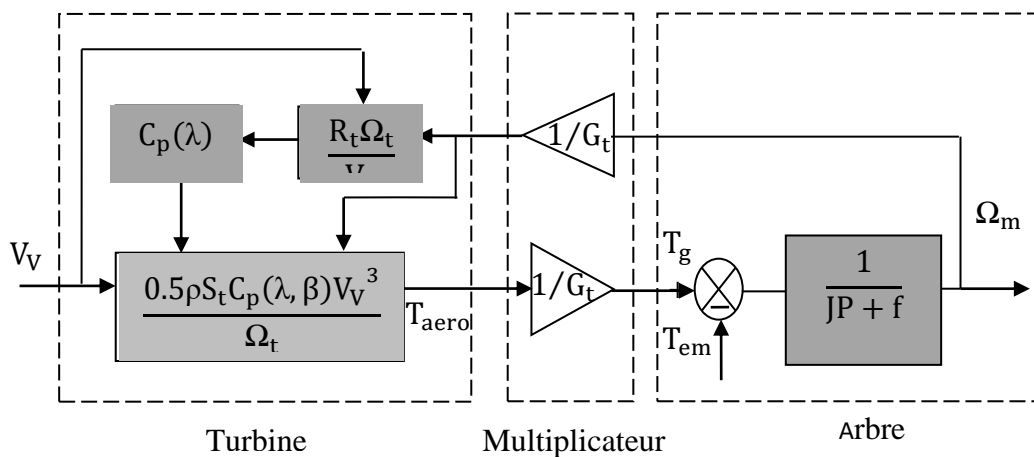


Figure II.5 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

II.6. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :

La modélisation de machine est essentielle pour le concepteur et l'opérateur. Ils sont couramment utilisés pour analyser le comportement du système. Les machines AC sont généralement modélisées par des équations non linéaires (équation différentielle). Cette non-linéarité est due aux équations dynamiques inductives et aux coefficients qui dépendent de la position et du temps. Conversion en trois étapes - nécessite deux étapes pour simplifier le modèle (réduire le nombre d'équations). [23]

II.6.1. Description :

L'alternateur est formé d'un stator fixe, et d'un rotor tournant. Le stator ou induit se compose d'un noyau feuilleté ayant la forme d'un cylindre vide et comportant des encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs d'un enroulement triphasé à $2p$ pôles. Les bobines constituant cet enroulement sont décalées de $\frac{2\pi}{2}$ et toujours raccordées en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre. Le rotor ou inducteur comporte p pôles nord et p pôles sud intercalés. Ces pôles sont créés par des bobines alimentées en courant continu ou par des aimants permanents. Le rotor est soit à pôles saillants ou à pôles lisses.

Le nombre de pôles d'un alternateur est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence du courant à produire. Ainsi, considérons un conducteur de l'induit devant lequel se déplacent les pôles nord et les pôles sud du rotor. Si la tension induite dans ce conducteur rend une série de valeurs positives pendant le passage d'un pôle nord, elle prendra une série de valeurs égales, mais négatives, pendant le passage d'un pôle sud. Chaque fois qu'une paire de pôles se déplace devant un conducteur, la tension induite décrit donc un cycle complet. On en déduit que la fréquence est donnée par l'équation : $f = \frac{pn}{120}$ [23]

Il existe quatre catégories de machines synchrones à aimants permanents du point de vue

Construction mécanique :

- Les Machines synchrones à aimants permanents montés en surface.
- Les machines synchrones à aimants permanents insérés.
- Les machines synchrones à aimants permanents chapeautés.
- Les machines synchrones à aimants permanents enterrés.

II.6.2. Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone :

L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les f.e.m induites dans ces bobinages provoquent la circulation de courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer, qui tourne à la même vitesse que celle du champ inducteur.

II.6.3. Hypothèses simplificatrices :

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé a,b,c au stator. Les aimants permanents sont représentés par un inducteur au rotor alimenté par une source de courant continu.

La (figure II.6) montre la représentation des enroulements pour une machine synchrone triphasée à aimant permanent

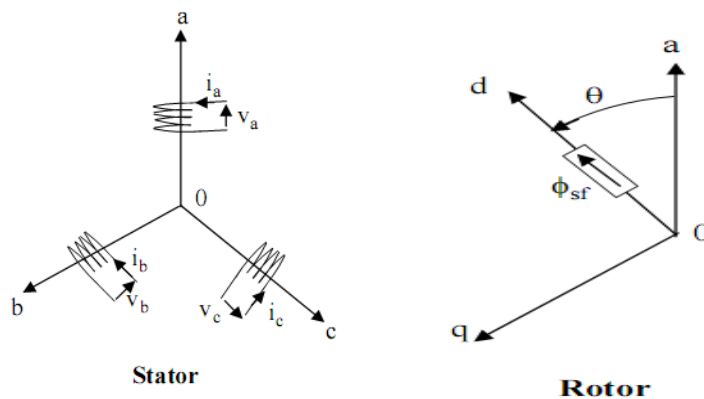


Figure II.6: Représentation d'une MSAP dans le plan (a,b,c).

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices : [12] [24]

- Le stator connecté en étoile, neutre en l'air pour éliminer la composante homopolaire des courants.
- La saturation du circuit magnétique est négligée ce qui mène à exprimer les flux magnétiques comme des fonctions linéaires des courants des phases.
- La distribution de la FMM dans l'entrefer est sinusoïdale, les harmoniques d'espace sont alors négligés.
- Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont négligées.
- L'effet de la température est négligé.

D'après le schéma de la figure ci-dessus, on écrit les équations de la machine synchrone à aimant permanent relatives au rotor et au stator.

II.6.4. Equations de la machine électrique généralisée triphasée :

II.6.4.1. Equations des tensions statoriques et rotoriques :

- Au stator :

$$\begin{cases} V_a = R_s I_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_b = R_s I_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_c = R_s I_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (II.19)$$

$V I \varphi$: tensions , courants et flux au stator.

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

➤ Au rotor :

$$V_f = R_f I_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \quad (\text{II.21})$$

$$[I_f] = \begin{bmatrix} I_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [R_f] = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [V_f] = \begin{bmatrix} V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

II.6.4.2. Equations des flux :

$$\begin{cases} \varphi_a = L_s I_a + M_{ab} I_b + M_{ac} I_c + M_{af} I_f \\ \varphi_b = L_s I_b + M_{ba} I_a + M_{bc} I_c + M_{bf} I_f \\ \varphi_c = L_s I_c + M_{ca} I_a + M_{cb} I_b + M_{cf} I_f \\ \varphi_f = L_f I_f + M_{fa} I_a + M_{fb} I_b + M_{fc} I_c \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Les coefficients des équations différentielles sont variables (en fonction de θ) et la résolution analytique du système se heurte à des difficultés pratiquement insurmontables.

Pour simplifier ce système on introduit la transformée de PARK qui fait correspondre aux variables réelles leurs composantes : [25]

$$\begin{cases} V_d, V_q, V_0 \\ I_{ds}, I_{qs}, I_0 \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Sachant que le passage triphasé-biphasé est donné comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Où $[P(\theta)]$ est la matrice de PARK normalisée, elle est définie par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

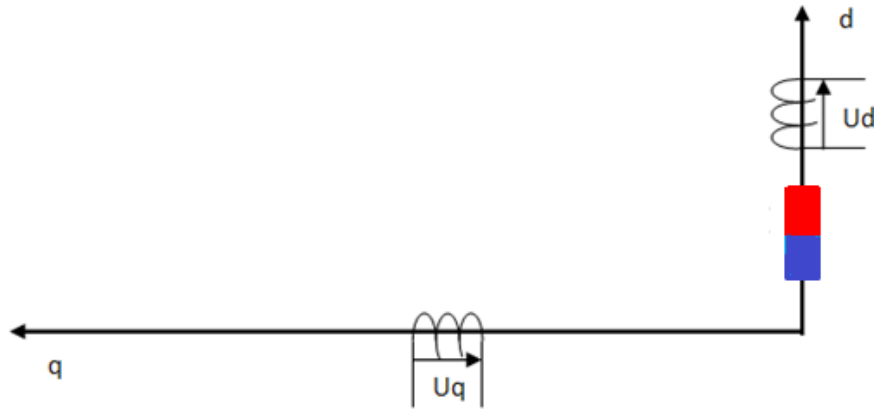


Figure II.7 : Représentation de la génératrice à aimants permanents sur l'axe (d,q).

II.6.5. Mise en équations :

II.6.5.1. Equations des tensions :

La machine triphasée est équilibrée et symétrique avec neutre isolé alors la composante homopolaire est nulle. Les équations électriques sont les suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + L_d \frac{dI_{ds}}{dt} - L_q \omega \cdot I_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + L_q \frac{dI_{qs}}{dt} - L_d \omega \cdot I_{ds} + \omega \cdot \varphi_f \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

En utilisant la convention du générateur, on inverse le sens des courants I_{ds} et I_{qs} dans les repères de Park, et le modèle du générateur synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme : [26]

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s I_{ds} - \frac{d\varphi_d}{dt} + \omega \cdot \varphi_q \\ V_{qs} = -R_s I_{qs} - \frac{d\varphi_q}{dt} - \omega \cdot \varphi_d \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

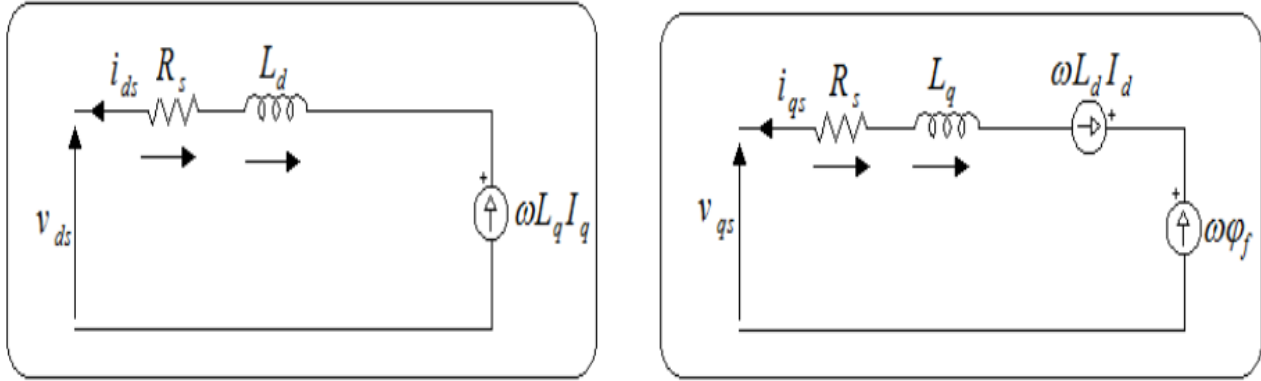
II.6.5.2. Equations des flux :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_{ds} I_{ds} - \varphi_f \\ \varphi_q = L_q I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Si on remplace les équations des flux (II.28) dans le système (II.27) on obtient le système suivant:

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s I_{ds} - L_d \frac{dI_{ds}}{dt} + \omega \cdot L_q I_{qs} \\ V_{qs} = -R_s I_{qs} - L_q \frac{dI_{qs}}{dt} - \omega \cdot (L_d I_{ds} - \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

À partir de l'équation (II.29), on peut déduire le schéma équivalent du GSAP selon les deux axes d et q, (Fig. II.8) : [27]



(a) : Selon l'axe d :

(b) : Selon l'axe q

Figure II.8 : Schémas équivalents du GSAP selon les deux axes d et q.

II.6.6. Expression de la puissance :

La puissance électrique de la machine dans le repère (abc) est exprimée par :

$$P(t) = V_a \cdot I_a + V_b \cdot I_b + V_c \cdot I_c \quad (II.30)$$

L'expression de la puissance transmise dans le repère de Park est donnée par :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \quad (II.31)$$

En remplaçant V_{ds} , V_{qs} par leurs expressions, on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[-R_s (I_{ds}^2 - I_{qs}^2) - \left(I_{ds} \frac{d\varphi_d}{dt} + I_{qs} \frac{d\varphi_q}{dt} \right) + \omega (\varphi_d I_{qs} - \varphi_q I_{ds}) \right] \quad (II.32)$$

Telle que : [28]

Le terme $\frac{3}{2} [-R_s (I_{ds}^2 - I_{qs}^2)]$: Représente la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du stator (P_j).

Le terme $\frac{3}{2} [\omega (\varphi_d I_{qs} - \varphi_q I_{ds})]$: Représente la puissance électromagnétique (P_{em}).

Le terme $\frac{3}{2} \left[I_{ds} \frac{d\varphi_d}{dt} + I_{qs} \frac{d\varphi_q}{dt} \right]$: Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator (P_v).

II.6.7. Equation de couple :

Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé par la dérivée de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de la rotation du rotor. [28]

$$\left\{ C_{em} = \frac{dw_e}{d\theta_{geo}} = P \frac{dw_e}{d\theta_e} \right. \quad (II.33)$$

Où :

w_e : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

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

θ_e : Angle électrique.

P : Nombre de paires de pôles.

C_{em} : Couple électromagnétique.

Sachant que :

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega \quad (II.34)$$

$$P_{em} = \frac{3}{2} [\omega (\varphi_d I_q - \varphi_q I_d)] \quad (II.35)$$

L'expression du couple électromagnétique peut être exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(\varphi_d I_q - \varphi_q I_d)] \quad (II.36)$$

Après affectation des opérations nécessaire, on peut écrire :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_q - L_d) I_d I_q + \varphi_f I_q] \quad (II.37)$$

II.6.8. Equation mécanique :

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

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - C_f \quad (II.38)$$

Où:

$$C_f = f \Omega \quad (II.39)$$

C_m : Couple moteur appliqué sur le générateur.

C_f : Couple de frottement.

J : Moment d'inertie total de la machine.

f : Coefficient de frottement visqueux.

II.7. Modélisation des convertisseurs statiques :

La configuration de deux convertisseurs dos à dos à commande MLI est populaire dans les systèmes éoliens, placée soit au niveau du stator ou du rotor de la génératrice. L'un des deux convertisseurs est lié à la machine (CCM) et l'autre est lié au réseau électrique ou à une charge autonome via un filtre inductif de courant (CCR), les deux convertisseurs sont interconnectés par un bus continu qui autorise ainsi un transfert de puissance bidirectionnel entre une source à fréquence variable et l'autre à fréquence fixe.

Supposons qu'on travaille en régime hyper-synchrone de la génératrice, cela veut dire que le CCM fonctionne en onduleur et le CCR prend la fonction d'un redresseur. [29]

II.7.1. Modélisation du redresseur cote réseau (CCR) :

Le redresseur triphasé à deux niveaux de courant possédant six cellules de commutation constitué chacune transistors IGBT ou thyristor GTO pour les fortes puissances, en anti parallèle avec des diodes. Pour la commande on utilise la technique de la modulation de largeur d'impulsion. La figure 2 montrée le schéma de principe d'un redresseur MLI.

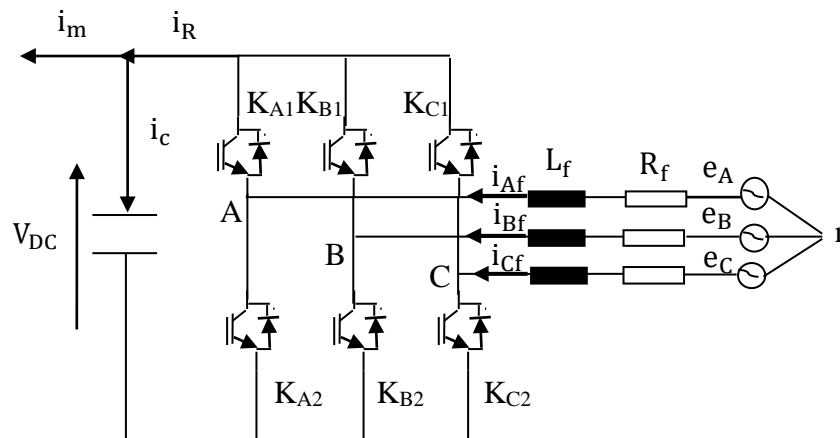


Figure II.9 : Schéma de principe d'un redresseur MLI

II.7.1.1. Principe de fonctionnement en redresseur MLI :

La réversibilité en courant de l'onduleur MLI de tension autorise son fonctionnement en redresseur MLI de courant. Il s'agit alors d'alimenter une charge (passive ou active) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant prélevé sur ce réseau étant sinusoïdale et éventuellement, en phase avec la tension. On peut donc, avec un redresseur MLI, obtenir un facteur de puissance très proche de l'unité.

On peut aussi régler, par le contrôle, l'énergie réactive absorbée ou fournie. Toutefois, ce redresseur peut être à structure courant ou à structure tension.

Le courant de ligne est commandé par la chute de tension de la ligne produite par l'inductance L , et la résistance R de la ligne et la tension d'entrée du redresseur $abcV$. Le pont redresseur est constitué de trois bras chaque bras comporte deux transistors bipolaires (thyristors) en antiparallèles avec des diodes comme il est représenté dans la figure (2.9), chaque interrupteur peut être commandé en ouverture et en fermeture. La tension d'entrée $abcV$ est en fonction des états de ces interrupteurs. Le tableau suivant donne les huit états possibles de ces interrupteurs: [30]

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	$-U_{dc}$	U	
3	0	1	1	$-U_{dc}$	0	U_{dc}
4	0	0	1	0	$-U_{dc}$	U_{dc}
5	1	0	1		$-U_{dc}$	0

Tableau II.1 : états possibles des interrupteurs et tensions d'entrée associées.

S_a, S_b, S_c sont les états des interrupteurs K_{a1}, k_{b1}, k_{c1} .

- De cette table, on peut écrire les tensions d'entrée du redresseur d'une manière générale comme suit :

$$\begin{cases} V_{ab}=(S_a-S_b).U_{dc} \\ V_{bc}=(S_b-S_c).U_{dc} \\ V_{ca}=(S_c-S_a).U_{dc} \end{cases} \quad (II.40)$$

- D'où on peut déduire les tensions simples :

$$\begin{cases} V_a=f_a.U_{dc} \\ V_b=f_b.U_{dc} \\ V_c = f_c.U_{dc} \end{cases} \quad (II.41)$$

Avec :

$$\begin{cases} f_a = \frac{2.S_a - (S_b + S_c)}{3} \\ f_b = \frac{2.S_b - (S_c + S_a)}{3} \\ f_c = \frac{2.S_c - (S_a + S_b)}{3} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

II.7.1. 2. Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé :

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

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + L \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

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

$$V_n = U_{dc} \cdot (S_n - \frac{1}{3} \sum_{n-1}^c S_n) \quad (\text{II.44})$$

$n=a$ ou b ou c .

➤ Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme :

$$C \cdot \frac{dU_{dc}}{dt} = i_c \quad (\text{II.45})$$

Le courant dans la capacité peut s'écrire aussi:

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \quad (\text{II.46})$$

$$C \cdot \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c - i_{ch} \quad (\text{II.47})$$

Donc, pour le coté alternatif du redresseur on peut écrire:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = e_a - U_{dc} \left(S_a - \frac{1}{3} \sum_{n-a}^c S_n \right) = e_a - U_{dc} \left(S_a - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = e_b - U_{dc} \left(S_b - \frac{1}{3} \sum_{n-a}^c S_n \right) = e_b - U_{dc} \left(S_b - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = e_c - U_{dc} \left(S_c - \frac{1}{3} \sum_{n-a}^c S_n \right) = e_c - U_{dc} \left(S_c - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

La combinaison des équations (II.46), (II.47) nous permet de tracer le schéma fonctionnel triphasé représenté dans la figure (II.10).

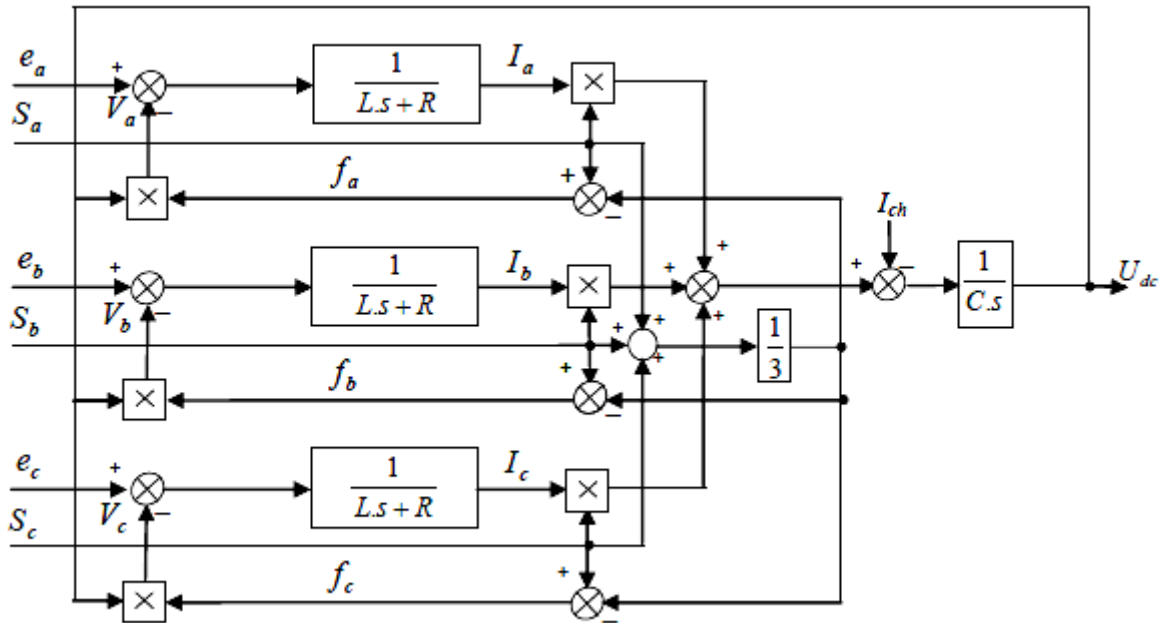


Figure II.10 : Schéma fonctionnel d'un redresseur MLI.

2.7.2 Modélisation de l'onduleur (CCM)

L'onduleur triphasé à deux niveaux de tension possédant six cellules de commutation constitué chacune d'un IGBT et une diode antiparallèle est montré sur la (figure II.11).

On considère que la source continue (V_{DC}) est parfaite et les tensions simples alimentant, le bobinage triphasé couplé en étoile, présentent un système triphasé équilibré. [29]

$$V_{raN} + V_{rbN} + V_{rcN} = 0 \tag{II.49}$$

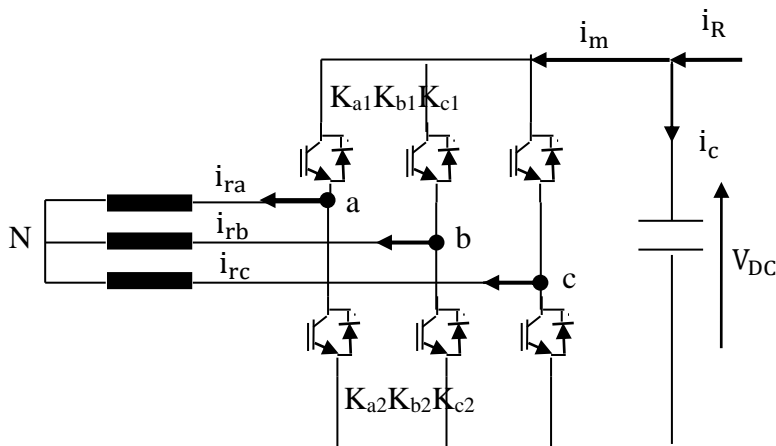


Figure II.11: Configuration du convertisseur côté rotor (CCM).

Les tensions composées obtenues à partir des tensions d'entrée de l'onduleur, référenciées au point milieu fictif de la source continu, sont définis par:

$$\begin{cases} u_{rab} = v_{ao} - v_{bo} \\ u_{rbc} = v_{bo} - v_{co} \\ u_{rca} = v_{co} - v_{ao} \end{cases} \quad (II.50)$$

Le système d'équations (3.49) permet de déduire les tensions simples du rotor:

$$\begin{cases} v_{ao} = v_{raN} + v_{No} \\ v_{bo} = v_{rbN} + v_{No} \\ v_{co} = v_{rcN} + v_{No} \\ v_{No} = \frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \end{cases} \quad (II.51)$$

Une manipulation adéquate du système (II.51) permet de déduire l'écriture matricielle des tensions simples : [29]

$$\begin{bmatrix} v_{raN} \\ v_{rbN} \\ v_{rcN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (II.52)$$

Les ordres de commande ON/OFF notés S_i sont définis par :

$$S_i = \begin{cases} 1 & ; K_{i1} = \text{ON} \text{ et } K_{i2} = \text{OFF} \\ 0 & ; K_{i1} = \text{OFF} \text{ et } K_{i2} = \text{ON} \end{cases} ; i = a, b, c \quad (II.53)$$

D'après le principe de la technique sinusoïdale MLI (SPWM), l'état des interrupteurs supposés parfaits sera identifié comme suit :

$$S_i = \begin{cases} 1 & ; \text{si la modulante} > \text{la porteuse} \\ 0 & ; \text{si la modulante} < \text{la porteuse} \end{cases} ; i = a, b, c$$

A tout instant, la tension modulée est liée aux fonctions de conversion S_i du bras i par

$$V_{io} = \frac{V_{DC}}{2} (2S_i - 1) \quad (II.54)$$

En remplaçant (3.54) dans (3.52), le système (3.55) élabore le modèle matriciel de l'onduleur en modulation MLI:

$$\begin{bmatrix} v_{raN} \\ v_{rbN} \\ v_{rcN} \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II.55)$$

II.7.2.1 Modèle du bus continu :

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif : [19]

$$\frac{dV_{PV}}{dt} = \frac{1}{C} i_C \tag{II.56}$$

Le courant du condensateur de filtrage est issu d'un nœud où circulent le courant du GPV et le courant modulé par le convertisseur :

$$i_C = I_R - i_m \tag{II.57}$$

II.7.2.2 La commande MLI d'onduleur :

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

$$U_i(t) = \omega(t) \tag{II.58}$$

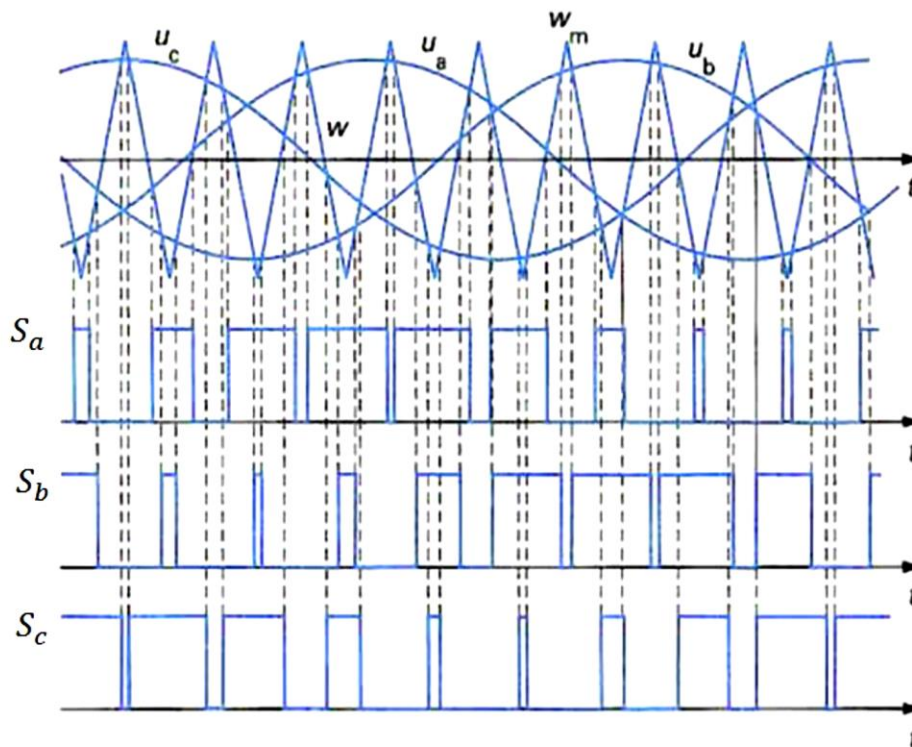


Figure II.12 : Principe de la MLI triangulosinususoïdale.

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

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

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II.58})$$

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

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{II.59})$$

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

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les trois parties principales du système de conversion éolienne, à savoir :

- la partie mécanique qui contient la turbine et l'arbre de la génératrice.
- La deuxième partie décrit l'étude de la modélisation de la machine à aimant permanent, fonctionnant en génératrice, en se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, nous avons constaté que le modèle de la machine synchrone à aimant permanent est un système à équations différentielles, dont les Coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle.
- La troisième partie décrit le modèle du convertisseur statique qui est composé du redresseur de courant commandé et onduleur de tension, son principe de fonctionnement est la technique de commande MLI.

III.1. Introduction :

La technique des modes glissants est basée sur le phénomène de glissement qui consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement en le faisant commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriés pour atteindre le point d'équilibre, d'où.

La réussite de cette commande est dû à sa simplicité de mise en œuvre et à sa robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations externes. Il faut d'abord définir une surface dite de glissement qui représente la dynamique désirée, ensuite synthétiser une loi de commande qui doit agir sur le système en deux phases.

En phase 1, on force le système à rejoindre cette surface, et en phase 2, on doit assurer le maintien de glissement le long de cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase.

Dans le présent chapitre nous présentons les fondements scientifiques de cette méthode puis les résultats de simulation de l'aérogénérateur en comparant la performance de la commande par mode glissant d'ordre deux à celle des Régulateurs PI. Notre choix pour la commande par mode glissant d'ordre est dû au phénomène de broutement (chattering) causé par le Mode glissant d'ordre 1.

III.2. Principe de la commande mode glissant :

L'idée de base de cette commande est définir une surface appelée surface de Glissement $s(x, t)$ pour forcer et d'attirer la dynamique (l'état) du système vers une région convenablement sélectionnée, puis une loi de commande u pour garder le système dans la même région (toutes les trajectoires sur cette surface).

Ainsi, la conception de contrôleur à mode glissant passe par deux étapes essentielles :

- Déterminer le choix et le nombre des surfaces.
- Déterminer la loi de commande.
- Choix des gains assurant la convergence.

III.3. Commande par modes glissants d'ordre 1 :

La commande par mode glissant d'ordre 1 (SMC) est une commande à structure variable qui peut changer de structure et commutant entre deux valeurs suivant une logique de commutation bien spécifique $s(x)$. Le principe de la commande par cette méthode est de contraindre le système à atteindre une surface donnée appelée surface de glissement et d'y demeurer jusqu'à l'équilibre. Cette commande se fait en deux étapes : la convergence vers la surface et ensuite le glissement le long de celle-ci (**Figure III.1**)

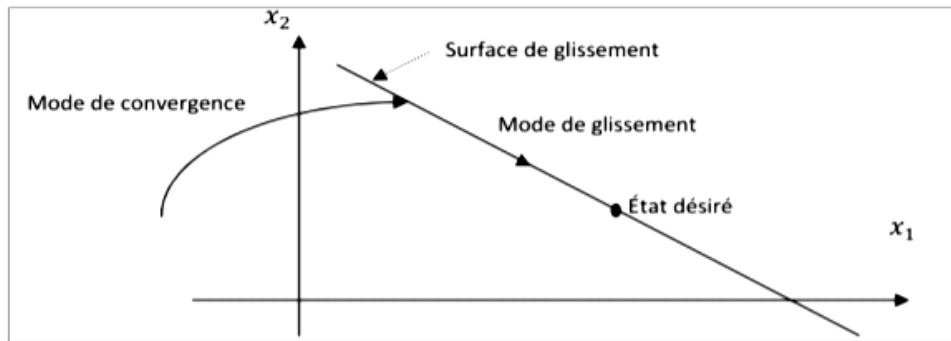


Figure (III.1) : différents modes de convergence pour la trajectoire d'état

III.3.1. Synthèse de la loi de commande :

La synthèse de la commande par modes glissants représente par trois étapes complémentaires :

III.3.1.1 Choix de la surface de glissement :

Soit le système décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{x}^n = f(x,t) + g(x,t)u \quad (\text{III.1})$$

Où

- f et g sont des fonctions non linéaires est supposée inversible.
- u : L'entrée du système.
- x :état du système.

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

$$e = X - X_d \quad (\text{III.2})$$

La formule générale de la surface de glissement est définie en fonction de l'ordre du système comme suit : [31]

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{n-1} e(x) \quad (\text{III.3})$$

Où

n : le degré relatif du système par rapport à la sortie $y(t)$. Il représente le nombre minimum de fois qu'il faut dériver la sortie $y(t)$ par rapport au temps, pour y voir apparaître l'entrée.

III.3.1.2. Condition d'existence du mode de glissement :

Après avoir choisi la fonction de glissement étant fait, il faut en seconde étape consiste à concevoir une loi de commande qui puisse amener le vecteur d'état à converger vers la surface et y demeurer ($S=0$). Pour cela, il faut que la loi de commande soit conçue de telle manière à ce que S soit attractif. Pour déterminer la condition d'attractivité, Cela peut être atteint en, considérant la fonction de Lyapounov suivante :

$$v(s) = \frac{1}{2}s^2 \quad (\text{III.4})$$

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 de v soit définie négative :

$$\dot{s} \cdot s < 0 \quad (\text{III.5})$$

Si la condition (III.4) 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 .

Le temps de convergence, ou le temps d'atteinte « reaching time » t_r dépend directement du choix de S .

Pour une convergence en temps fini, la condition (I.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 : [31]

$$\dot{s} \cdot s \leq -\eta|s|, \eta > 0 \quad (\text{III.6})$$

III.3.1.3 calculs de la commande :

Dans notre cas, la méthode choisie est celle de la commande équivalente, schématisée sur la figure (III.2).

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

$$S=0 \quad \dot{s}=0 \quad (\text{III.7})$$

Où u_{ed} est déduite de la relation $\dot{s}=0$

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. Ainsi, la commande u est la somme de la commande équivalente et d'une composante discontinue (**figure III.2**) assurant une convergence et un régime glissant.

$$u = u_{eq} + u_d \text{ avec } u_d = -\alpha \text{ sign}(s) \quad (\text{III.8})$$

- α est une constante positive.
- sign est la fonction signe .
- u_d est la commande discontinue.

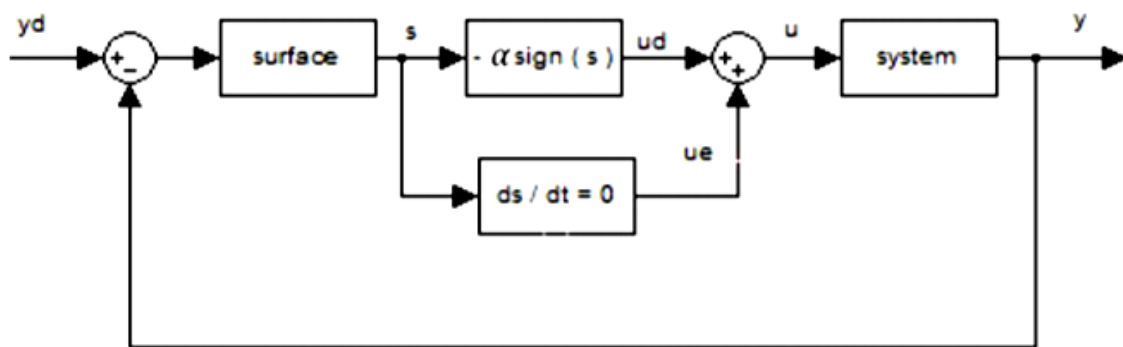


Figure (III.2) : Principe de la commande en mode glissant avec commande équivalente

III.3.2. Le broutement (chattering) :

Durant le régime glissant, à cause des discontinuités appliquées à la commande un phénomène de broutement, appelé réticence ou "chattering" en anglais apparaît. Ainsi, Celui-ci se caractérise par de fortes oscillations des trajectoires du système autour de la surface de glissement **figure (III.3)**. Les limitations des actionneurs sont Les principales raisons à l'origine de ce phénomène ainsi que les retards de commutation au niveau de la commande. Leur impact sur le système sont :

- Détérioration de la précision de la commande
- Une détérioration prématurée des systèmes mécaniques
- Une élévation de température dans les systèmes électriques (perte d'énergie non négligeable)

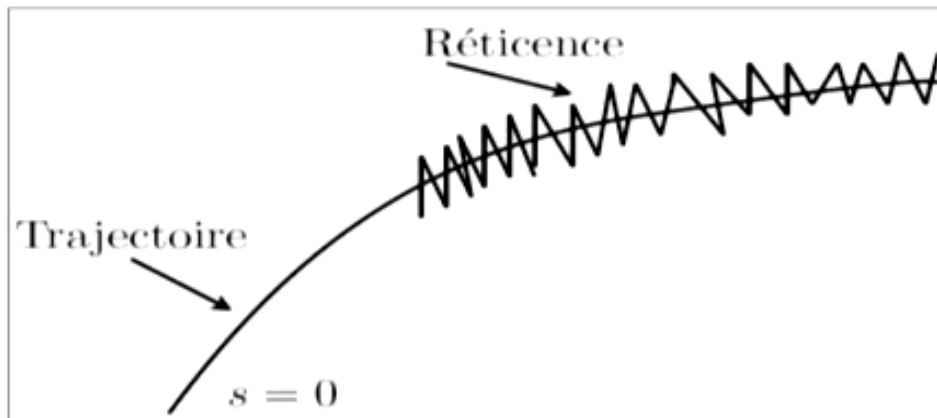


Figure (III.3) : Le phénomène de broutement

III.3.3. Solutions pour atténuer le phénomène de réticence :

Afin de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions sont proposées dans la littérature, comme la solution fuzzysliding mode, mode glissant d'ordre supérieur, approachlaw, etc.....

III.3.3.1. Solution par des modes glissants d'ordre supérieur :

L'introduction des modes glissants d'ordre supérieur vient pour pallier au problème du chattering tout en gardant les propriétés de convergence en temps fini et de robustesse des commandes par modes glissants classiques. Dans cette approche, le terme discontinu n'apparaît plus directement dans l'expression de la commande synthétisée mais dans une de ses dérivées supérieures ce qui a le mérite de réduire le Chattering. [31] [32] [33]

III.4 Commande par mode de glissement d'ordre supérieur de la MSAP :

III.4.1. Description :

Le mode glissant 2 améliore le phénomène de chattering puisqu'il est repoussé sur les dérivées d'ordres supérieurs, il cesse alors de présenter les inconvénients suscités. Les principaux avantages de cette commande sont: [34]

- Garder les avantages du régime glissant d'ordre un.
- Suppression du phénomène de Chattering dans la plupart des systèmes.
- Amélioration des performances de la commande en termes de précision.

Dans la suite du chapitre. Nous donnons quelques définitions formelles des 'MGOS', ainsi que la relation entre le degré relatif et les régimes glissants d'ordres supérieurs. On s'intéresse ici aux modes glissants d'ordres deux, qui constitue le principal but de ce travail.

III.4.2. Position du problème :

On va considérer un système non linéaire avec la dynamique suivante : [34]

$$\begin{cases} \dot{x} = f(t, x, u) \\ u = U(t, x) \\ S = S(t, x) \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Où

- $x = [x_1, \dots, x_n]^T \in X$ représente le vecteur état $X \subset \mathbb{R}^n$.
- $u \in U \subset \mathbb{R}$: représente la commande.
- f : est une fonction supposée suffisamment différentiable, mais connue de façon incertaine
- t : est le temps.
- S : est une fonction différentiable telle que ses $(r-1)$ premières dérivées par rapport au temps ne sont fonction que de l'état x (ce qui signifie qu'elles ne contiennent aucune discontinuité).

III.4.3. Principe :

Le régime glissant standard est basé sur l'annulation de la dérivée première par rapport au temps de la surface de glissement soit en S . Un régime glissant d'ordre r (noté r -glissant) agit sur les $r-1$ premières dérivées successives de la variable de glissement S $r-1$. On aura ainsi une précision d'ordre r sur la convergence du système. [34] Le calcul des dérivées successives de la variable de glissement S le long d'une trajectoire d'un système discontinu, aboutit pour un ordre donné, à une discontinuité. Il est alors possible de classifier les régimes glissants d'ordre supérieur par le numéro de r dérivées successives de la surface. r S Ce numéro est appelé l'ordre de glissement, et il fixe le degré de douceur du système. Le r ordre du système est déterminé par l'équation :

$$s = \dot{s} = \dots = s^{(r-1)} \quad (\text{III.10})$$

La précédente équation impose une condition " r -dimensionnel " sur les états du système. L'un des problèmes majeurs pour l'implantation des algorithmes r -glissant est que le nombre d'informations nécessaires augmente avec l'ordre du régime glissant. Une bonne solution à ce

problème sont les modes glissants du second ordre, Twisting et Super Twisting, qui n'ont besoin que de S comme information d'entrée.

Dans ce mémoire nous donnons plus en détail les algorithmes d'ordre deux (Super Twisting), qui est une techniques utilisée par les chercheurs et implémentée en temps réel sans trop de difficultés.

III.4.4. Commande par mode glissant d'ordre deux :

Le principal avantage de la commande par modes glissants d'ordre deux est l'annulation du phénomène de chattering. Son objectif est de générer un régime glissant d'ordre deux sur la surface de glissement sélectionnée $S = 0$ et d'obtenir en temps fini.

$$s = \dot{s} = 0 \quad (\text{III.11})$$

Dans ce qui suit, nous allons décrire ces lois de commande de second ordre ($r=2$), telles que les techniques de Twisting et Super Twisting. Ces algorithmes sont les plus utilisés dans la littérature, du fait qu'ils ont uniquement besoin de la connaissance de la surface S . [36] La Figure III.4 fait apparaître la trajectoire de convergence du système vers la surface S .

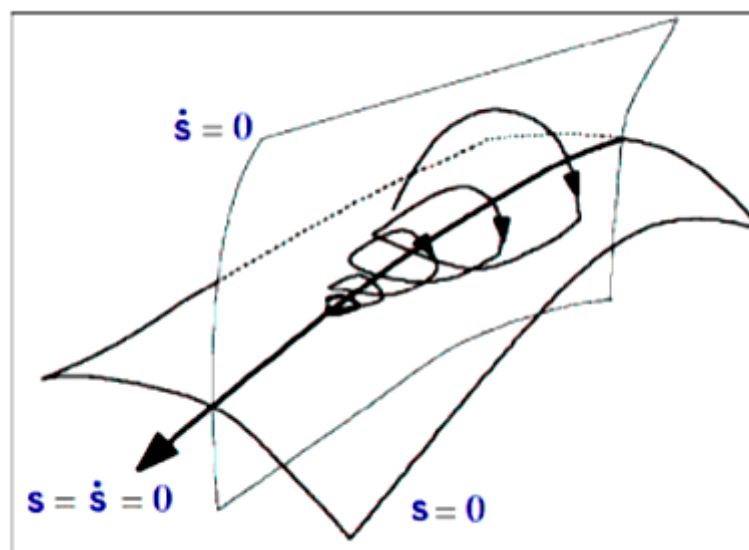


Figure III.4: Trajectoire du mode glissant d'ordre 2.

Afin de détailler les algorithmes en régime glissant du second ordre, les fonctions f et S de l'expression (III.9) que les seules informations disponibles à l'instant t sont, la commande $u(t)$, la surface $S(t,x)$ et le signe de la dérivée par rapport au temps de S .

La dérivée de S :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} s(t, x) = \frac{\partial}{\partial t} s(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} s(t, x) \frac{dx}{dt} \\ \dot{s} = \frac{\partial}{\partial t} s(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} s(t, x) f(t, s, u) \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

La dérivée seconde de S :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \dot{s}(t, x, u) = \frac{\partial}{\partial t} \dot{s}(t, x, u) + \frac{\partial}{\partial x} \dot{s}(t, x, u) \frac{dx}{dt} + \frac{\partial}{\partial u} \dot{s}(t, x, u) \frac{du}{dt} \\ \ddot{s} = \frac{\partial}{\partial t} \dot{s}(t, x, u) + \frac{\partial}{\partial x} \dot{s}(t, x, u) f(t, x, u) + \frac{\partial}{\partial u} \dot{s}(t, x, u) \dot{u} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

On pose :

$$\begin{cases} \psi(t, x) = \frac{\partial}{\partial t} \dot{s}(t, x, u) + \frac{\partial}{\partial u} \dot{s}(t, x, u) f(t, x, u) \\ \zeta(t, x) = \frac{\partial}{\partial t} \dot{s}(t, x, u) \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Le système est maintenant constitué des surfaces de glissement s et \dot{s} .

$$\begin{cases} y_1 = s \\ y_2 = \dot{s} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Si le degré relatif est DR = 1 : Le système est décrit par le modèle (III.9) et par l'expression :

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = \psi(t, x) + \zeta(t, x)u \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Si le degré relatif est DR = 2 : le problème de la commande peut être dérivé du cas précédent, en considérant la variable x comme une variable d'état, et u comme la commande effective.

Le système à commander est défini par :

$$f(t, x, u) = a(t, x) + b(t, x) u(t) \quad (\text{III.17})$$

Où, $a : R^{n+1} \rightarrow R^n$ et $b : R^{n+1} \rightarrow R^n$ sont des fonctions incertaines et continûment dérivables.

Finalement le système est représenté par le modèle et par l'équation :

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = \tilde{\psi}(t, x) + \tilde{\zeta}(t, x)u \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

En utilisant la stratégie précédente la commande u est régie par un système dynamique du premier ordre. Les algorithmes discontinus sont appliqués en fait à la dérivée par rapport au temps de la commande u , qui devient la nouvelle variable de commande du système considéré et conduit à l'obtention d'un régime glissant d'ordre deux sur la surface S. De cette façon, l'entrée u du système est maintenant continue et permet d'éliminer le chattering.

III.5. Algorithmes glissants d'ordre supérieur :

III.5.1 Algorithme de Twisting :

Cet algorithme a été défini comme le premier contrôleur par mode glissant d'ordre supérieur. Il twiste autour de l'origine du plan de glissement d'ordre deux. L'appellation Twisting en raison de sa convergence en temps fini vers l'origine du plan de phase (s, \dot{s}) , avec un nombre infini de rotation. Son principe de fonctionnement est la commutation de l'amplitude de la commande entre deux valeurs, V_m et V_M de telle façon que l'abscisse et l'ordonnée soient croisées de plus en plus vers l'origine. [35] [36]

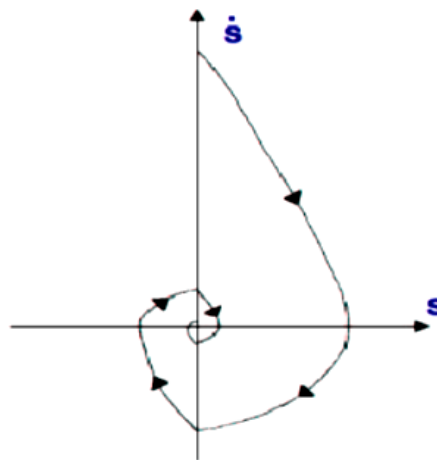


Figure III.5: Convergence en temps fini de l'algorithme Twisting.

Nous allons reprendre le système $y_1 = S$ et $y_2 = \dot{S}$. Maintenant le problème de la commande est de stabiliser en temps fini le système du deuxième ordre suivant :

$$\begin{cases} y_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = \psi(t, x) + \zeta(t, x)u \end{cases} \quad (III.19)$$

Où : $\psi(t, x)$ et $\zeta(t, x)$ sont des fonctions mal connues mais bornées.

$$\phi > 0, |\psi| \leq \phi, 0 < \Gamma_m \leq \zeta \leq \Gamma_M \quad (III.20)$$

L'algorithme du Twisting pour un degré relatif 1 est défini par la loi de commande suivante :

$$\dot{u} = \begin{cases} -u & \text{si } |u| > 1 \\ -v_m \sin(s) & \text{si } s\dot{s} \leq 0, |u| \leq 1 \\ -v_M \sin(s) & \text{si } s\dot{s} \leq 0, |u| \leq 1 \end{cases} \quad (III.21)$$

Où u est une valeur bornée de commande, donné pour $u \leq 1$.

L'équation de commande pour un degré relatif 2 est :

$$u = \begin{cases} -V_m \sin(s), & \text{si } s \dot{s} \leq 0, \\ -V_M \sin(s), & \text{si } s \dot{s} > 0. \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

Avec les conditions suffisantes assurant la convergence en temps fini sur la variété S sont : [35]

$$\begin{cases} V_M > V_m, \\ V_m > \frac{4\Gamma_M}{s_0}, \\ V_m > \frac{\phi}{\Gamma_m}, \\ \Gamma_m V_m - \phi > \Gamma_M V_m + \phi \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

Si dans la pratique la dérivée de la surface S n'est pas mesurable, son signe peut être estimé par le signe de la dérivée de la surface s dans un intervalle de temps Δ_t . Lesgn ($S^*(t)$) est calculé par l'expression $\text{sgn}(S^*(t) - S(t - \Delta_t))$.

En considérant les incertitudes du système et les intervalles de temps entre les croisements Successifs de l'axe des abscisses, il est possible de définir la borne supérieure du temps de Convergence du système. [37]

$$t_{tw} \leq t_{M_1} + \frac{1}{1 - \theta_{tw}} \sqrt{|y_1 M_1|} \quad (\text{III.24})$$

Où y_{1mi} est la valeur de la surface S quand l'axe des abscisses est traversé pour la première fois, t_{M_1} est les valeurs de temps à cet instant. Les expressions Θ_{tw} et θ_{tw} sont données par les formules suivantes : [38]

$$\begin{cases} \Theta_{tw} = \sqrt{2} \frac{\Gamma_m V_M + \Gamma_M V_m}{(\Gamma_m V_M - \phi) \sqrt{\Gamma_M V_m + \phi}} \\ \theta_{tw} = \sqrt{\frac{\Gamma_m V_M + \phi}{\Gamma_M V_m - \phi}} \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

III.5.2. L'algorithme du super-twisting :

L'algorithme du super-twisting parmi les algorithmes de mode glissant d'ordre 2 les plus utilisés. Cet algorithme ne s'applique qu'aux systèmes de degré relatif 1. Son intérêt réside dans la réduction du chattering, dû à la continuité du signal de commande.

Cette commande se décompose en un terme algébrique et un terme intégral. On peut donc considérer cet algorithme comme une généralisation non linéaire d'un PI. [39]

L'algorithme du Super-Twisting, à l'instar des autres algorithmes de la même catégorie, nécessite uniquement l'information sur S et entraîne l'annulation de celle-ci et S & en un temps fini. Il permet aussi de construire un dérivateur appelé généralement différenciateur exact. [40]

La loi de commande du Super-twisting est formée de deux parties. La première u_1 est définie par sa dérivée par rapport au temps, tandis que la deuxième u_2 est continue et en fonction de la variable de glissement. Pour un mode glissant réel, la loi de commande sera donnée par

$$u_{dis} = -u_1 - u_2 \quad (\text{III.26})$$

$$\dot{u}_1 = \alpha \cdot \sin(s), u_2 = \beta |s|^{(0.5)} \cdot \sin(s) \quad (\text{III.27})$$

III.6. Application sur la commande de la turbine éolienne :

Le schéma de la commande par mode glissant d'ordre 2 (MGO2) est représenté sur la Figure (III.6). En utilisant le principe de la méthode de réglage en cascade (structure de trois surfaces), la boucle interne permet de contrôler les courants, tandis que la boucle externe permet de contrôler la vitesse.

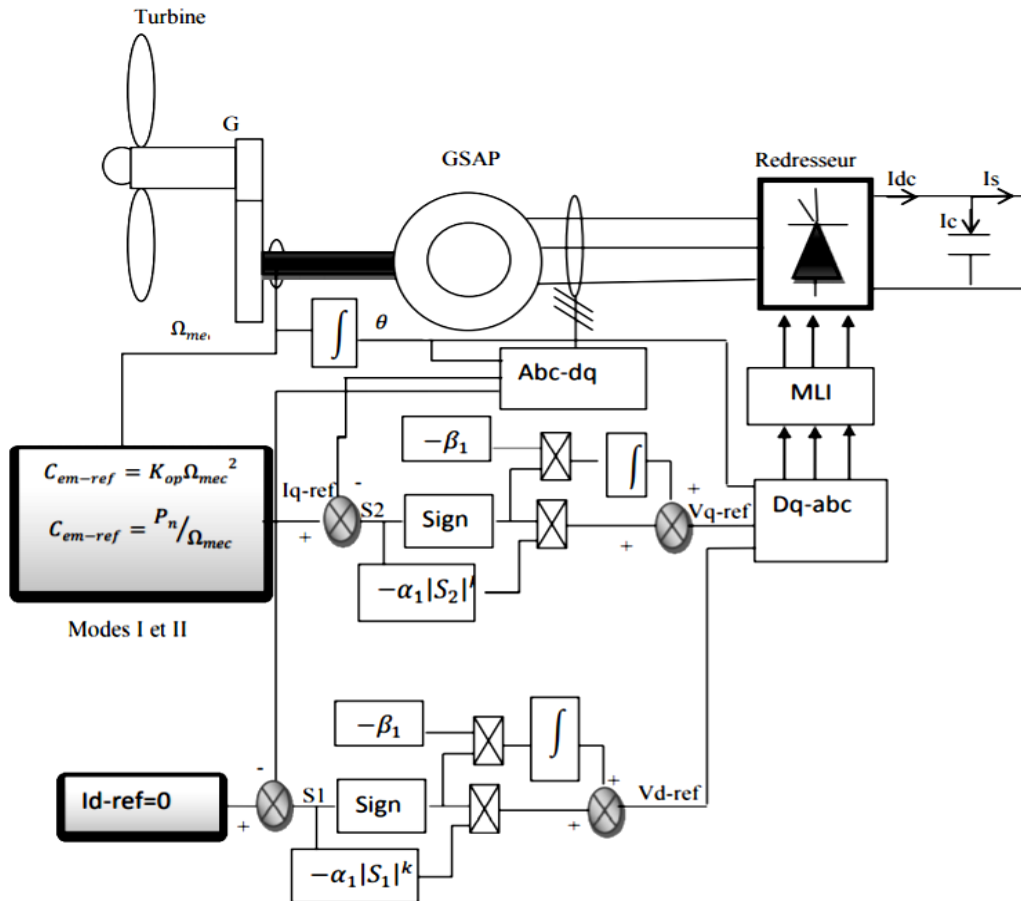


Figure III.6 : Schéma bloc de réglage par mode glissement d'ordre 2 de la GSAP.

Considérant la surface de glissement donnée par l'équation (III.28), l'expression suivante peut être écrite. Où $Y(t,x)$ et $\Lambda(t,x)$ sont des fonctions incertaines qui satisfont:

$$Y > 0, |Y| > \lambda, 0 < K_m < A < K_M \tag{III.28}$$

En se basant sur l'algorithme de Super-Twisting introduit par Levant dans (III.28), la commande par mode glissant d'ordre 2 proposée contient deux parties. [41]

$$u = \dot{u}_1 + u_2 \tag{III.29}$$

Avec

$$\dot{u}_1 = -k \cdot \sin(S), u_2 = 1 \cdot |S|^\gamma \cdot \sin(S) \tag{III.30}$$

Afin d'assurer la convergence des surfaces glissantes vers zéro dans un temps fini, les gains de la commande proposée peuvent être choisis comme suit. [42]

$$\begin{cases} k > \lambda / K_m \\ l^2 \geq \frac{4\lambda}{K_m^2} \frac{K_M \cdot (k + \lambda)}{K_m \cdot (k - \lambda)} \\ 0 < \gamma \leq 0.5 \end{cases} \tag{III.31}$$

Le schéma de la commande par mode glissant d'ordre 2 est représenté sur la Figure III.7 :

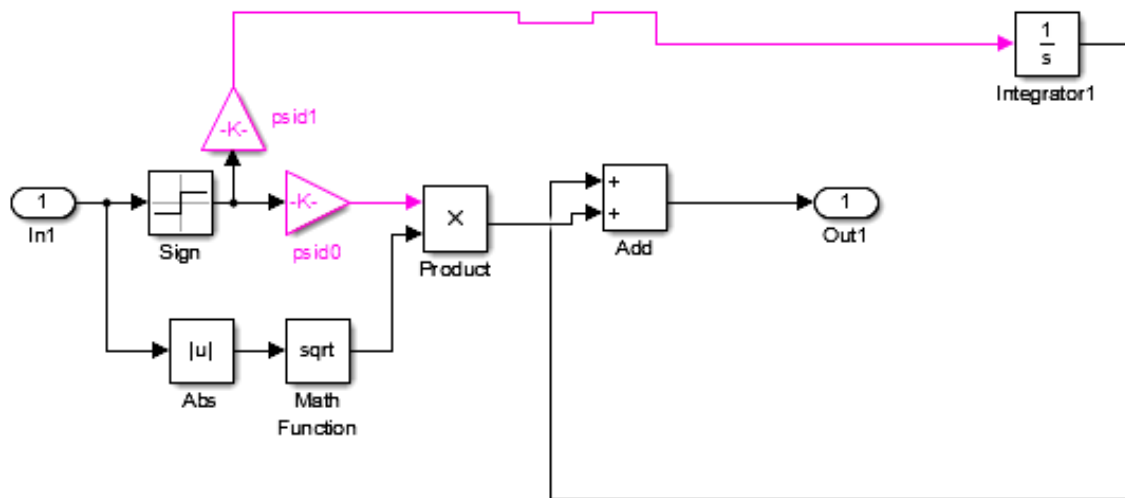


Figure III.7 : Schéma bloc de mode glissement d'ordre 2 sous Simulink.

III.7. Résultats de simulation et discussions :

Dans cette section, nous allons présenter les résultats de simulation par le logiciel Matlab/Simulink de la commande par mode glissant d'ordre 2 de la turbine éolienne. Une comparaison de cette dernière avec la commande par mode glissant d'ordre 1 est élaborée dans cette section.

III.7.1. Résultats de simulation du système pour un vent moyen :

La figure III.8 représente le profil d'un vent moyen pris comme grandeur d'entrée du système et dont la vitesse moyenne est de 8m/s

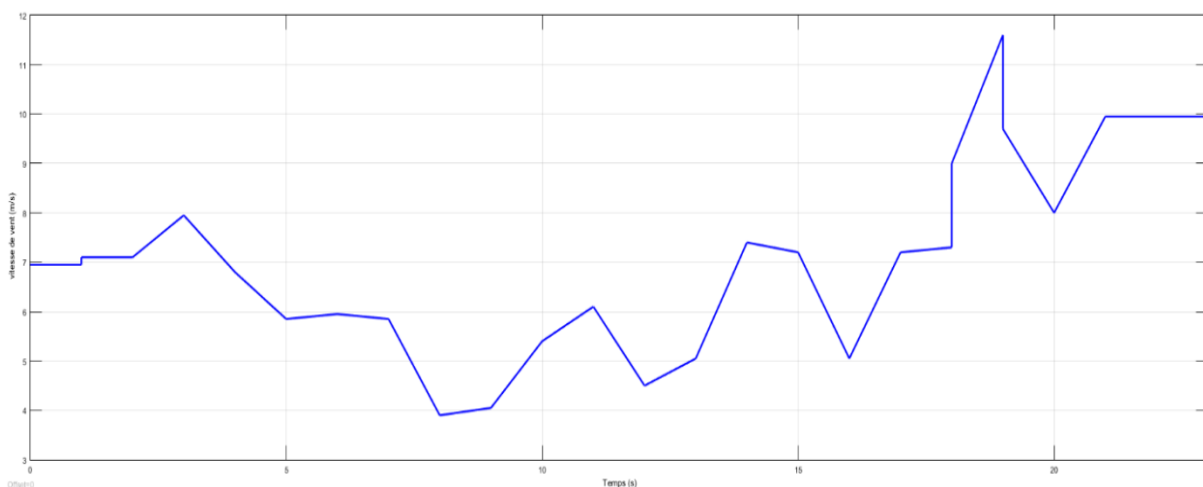


Figure III.8 : Profil du vent moyen.

III.7.2. Résultats de simulation de l'aérogénérateur :

La figure III.9 montre l'allure du coefficient de puissance C_p qui durant le mode de fonctionnement I se maintient en permanence à sa valeur maximale qui est de l'ordre de 0.4237 par le contrôle du courant I_q de la GSAP. Cela conduit à conclure que la GSAP fonctionne au mode MPPT.

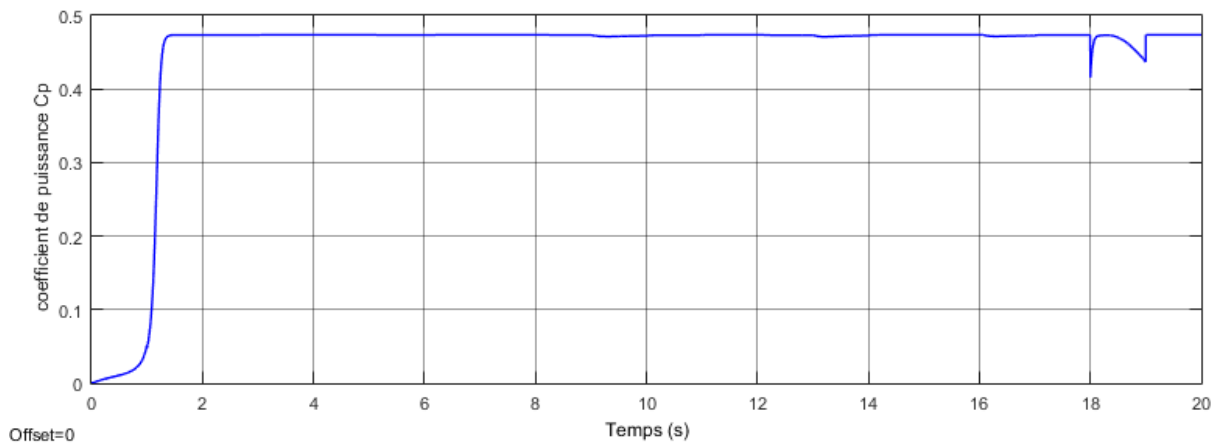
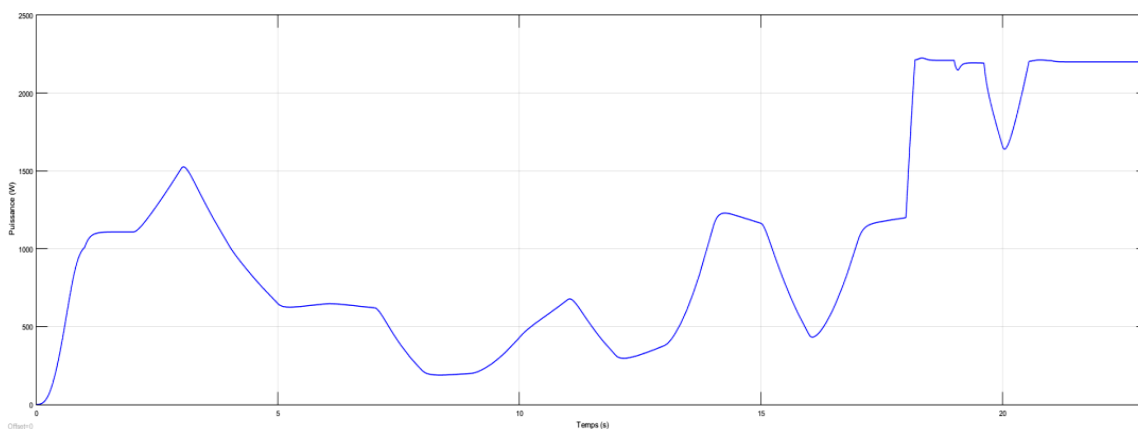
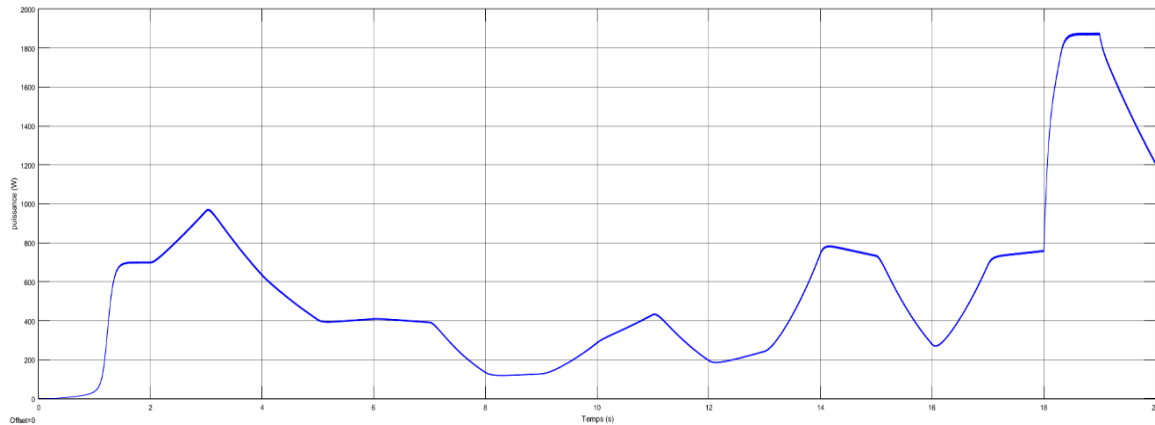


Figure III.9 : Allure du coefficient de puissance C_p .

La figure III.10 montre la puissance générée par la GSAP qui montre clairement les deux modes de fonctionnement de l'aérogénérateur. Alors qu'en mode I, la puissance suit l'allure du vent, elle se maintient à sa valeur nominale aux pertes près en Mode II avoisinant les 2.2 kW quand la vitesse du vent dépasse la valeur de 10 m/s. En comparant les deux approches de régulation, on remarque que la régulation par supertwisting est sans dépassements en mode de fonctionnement II alors que pour la régulation par PI, des petits dépassements sont remarquables sur l'allure de la puissance.



Régulation par PI



Régulation par CMG 2

Figure III.10 : Allure de la Puissance fournie par la GSAP

La figure III.11 montre l'allure de la tension au bus continu. Il est remarquable qu'elle se maintient à sa valeur de référence constante pour assurer le transit de la puissance à l'entrée du bus continu vers le GSAP .

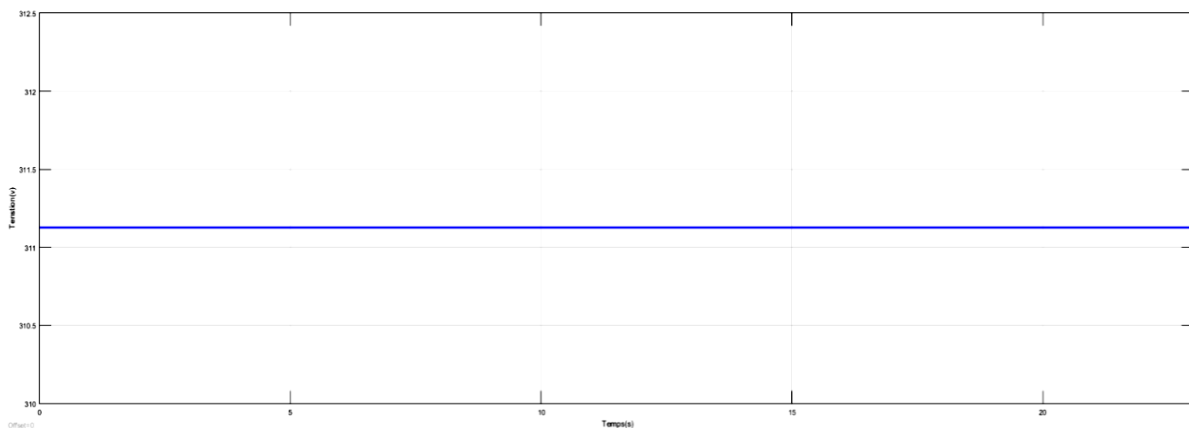
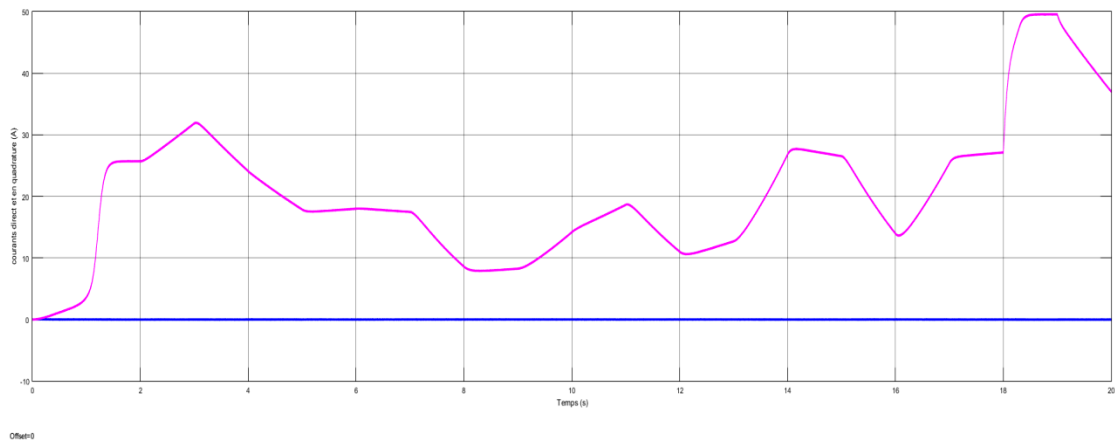
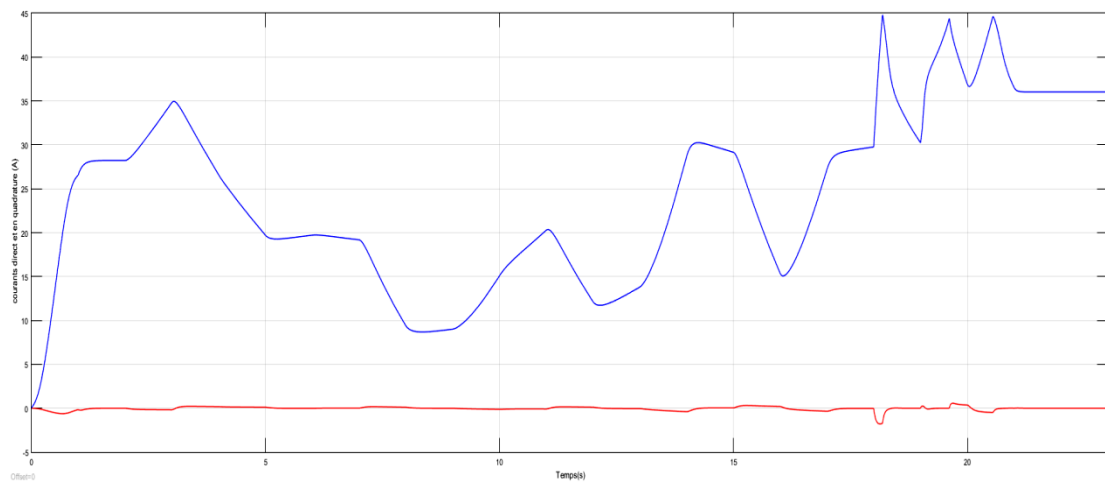


Figure III.11 : Tension au bus continu

la figure 12, l'allure des courants I_d et I_q met en évidence l'orientation du flux de la GSAP. Le courant direct I_d est maintenu à sa valeur nulle et le courant en quadrature prend l'allure du profil du vent. Une comparaison entre les deux approches de régulation permet de constater des erreurs statiques sur l'allure du courant I_d dans la régulation par PI. Cela est un inconvénient de ces régulateurs qui suivent mal les transitions rapides. Ces erreurs sont éliminées par la commande par mode glissant d'ordre deux (supertwisting), le courant I_q suit parfaitement sa référence.



Régulation le courant par CMGO2



Régulation le courant par PI

Figure III.12 : Allure du Le courant direct et en quadrature i_d et i_q .

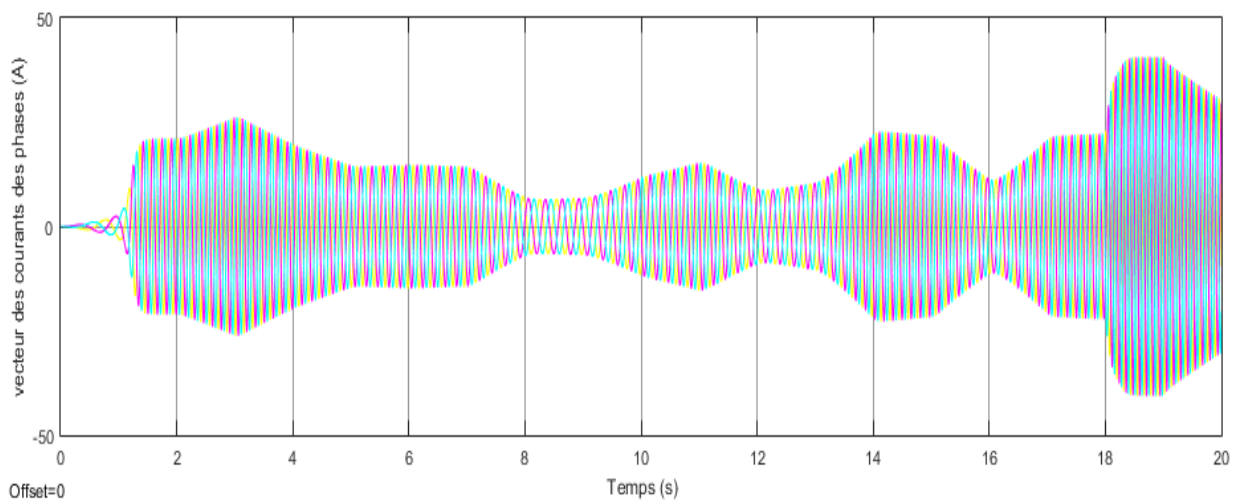
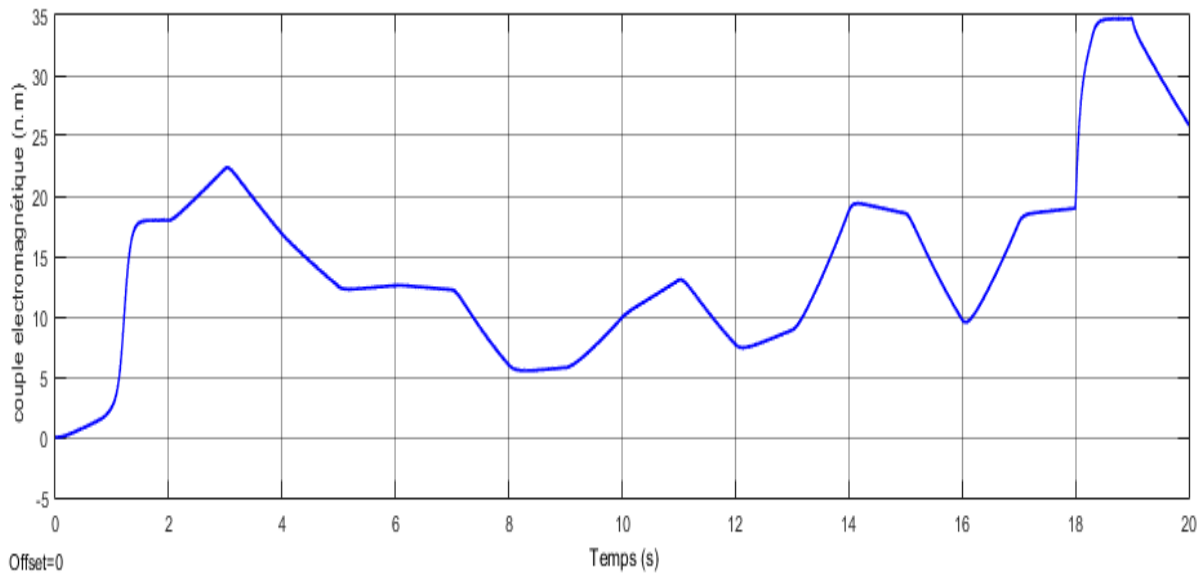
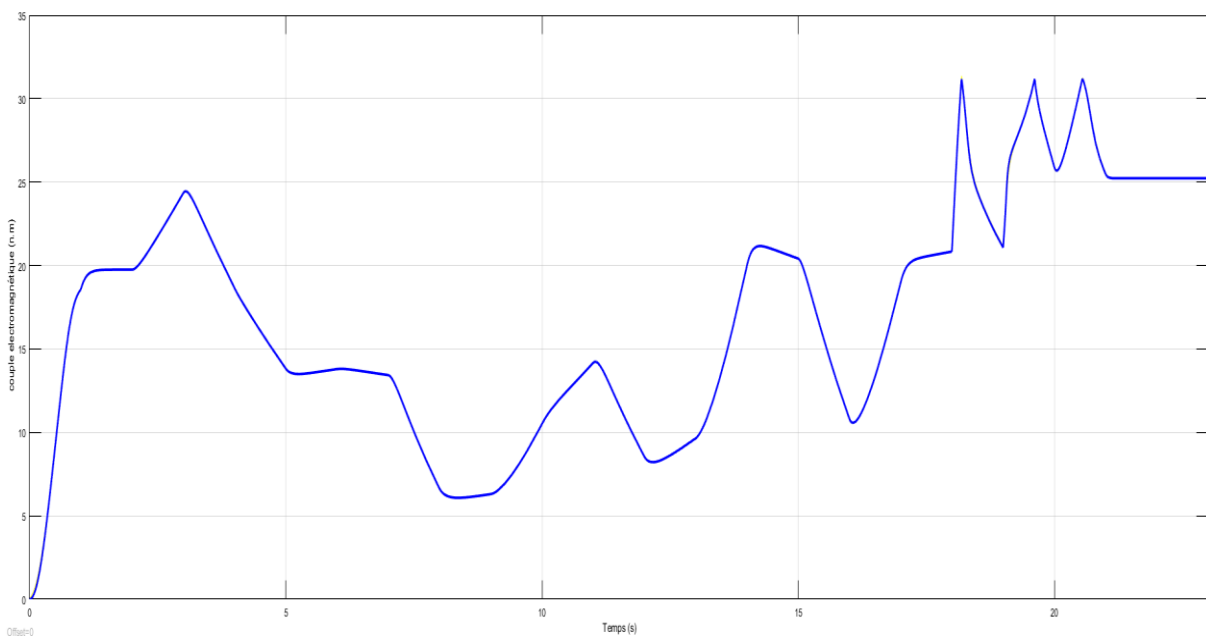


Figure III.13 : Allure du vecteur des courants des phases.

La figure 14 montrent l'évolution du couple électromagnétique du générateur synchrone à aimants permanent poursuivant le couple de référence qui imposent le fonctionnement en Mode MPPT. Alors que le couple électromagnétique régulé par mode glissant supérieur suit parfaitement sa référence. Cela prouve la robustesse de de cette commande dans les entrainements à vitesse variables parrapport aux régulateurs PI.



Couple électromagnétique régulation par CMGO2



Couple électromagnétique régulation par PI

Figure III.14 : Allure du couple électromagnétique

III.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'application de la technique de commande par mode glissant. Premièrement, nous avons parlé des bases de commande par mode glissant d'ordre 1. Comme la synthèse de la commande et apporté quelques solutions pour réduire le phénomène chattering. Dans un deuxième lieu nous avons donné en détail les principaux algorithmes de commande glissant d'ordre deux, tels que les Algorithmes de Twisting et Super Twisting qui sont les plus utilisés dans la littérature. Finalement, Ce travail nous a permis d'établir la synthèse de contrôleur super twisting pour commander le système de conversion d'énergie éolienne. Les simulations numériques qui ont déjà été visualisées et que les nouvelles méthodes utilisées dans le but de l'amélioration des performances de la commande par CMG 2 ont réussi à donner des résultats souhaités représentés par la minimisation du phénomène de chattering dans les grandeurs commandées tout en gardant les qualités et les performances désirées du système.

Conclusion générale

Conclusion général :

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur la commande mode glissant d'ordre supérieur.

Le but étant l'optimisation énergétique, nous avons pour cet effet adopté des stratégies de commande pour le contrôle des machines des différents étages de conversion. La commande de la source éolienne est basée sur maximiser la puissance extraite du vent (MPPT) en contrôlant le couple de la machine synchrone à aimants permanents. Une approche par mode glissant d'ordre supérieur a été développée pour cette fin et un algorithme de super twisting a fait l'objet de notre stratégie de contrôle. L'outil utilisé pour arriver à ce but est le logiciel "MATLAB"

C'est dans ce contexte qu'a été réalisé ce travail. En effet, l'objectif principal de ce Mémoire est la réalisation d'une nouvelle commande robuste par mode glissant. Cette commande a été utilisée pour la régulation des courants statoriques de la machine Synchrone à aimants permanents. notre contribution est de proposer une méthodologie de commande robuste liée aux systèmes à structures variables, dont le but est de palier les inconvénients des commandes classiques donc conclure que la technique de commande par mode glissant utilisée pour la commande le désirées du système a conduit à des bonnes performances, dans beaucoup de cas, cette dernière offre certains avantages :

- Une robustesse par rapport aux variations des paramètres du système.
- Une dynamique très performante (temps de réponse acceptable et erreur stationnaire pratiquement nulle).
- Une simplicité de la mise en œuvre de la loi de commutation.

Les performances de cette technique dépendent d'un choix convenable des coefficients de la surface du glissement.

Annexe

A- Les paramètres des constituants du système éolien

Tab.1 : Paramètres de GSAP :

Paramètres	Valeur
Puissance nominale	$P_n = 2.2 \text{ kw}$
Résistance statorique	$R_s = 0.895 \text{ } [\Omega]$
Inductance direct statorique	$L_d = 0.0085 \text{ [H]}$
Inductance quadrature statorique	$L_q = 0.0085 \text{ [H]}$
Flux d'aimant	$\varphi_f = 0.175 \text{ [Wb]}$
Nombre de pair de pole	$2p=8$
Inertie Totale	$J = 0.0089 \text{ [Kg.m}^2\text{]}$
Force de frottement	$f = 0.005 \text{ Nm/rad.s}$
multiplicateur	$G = 7/3$

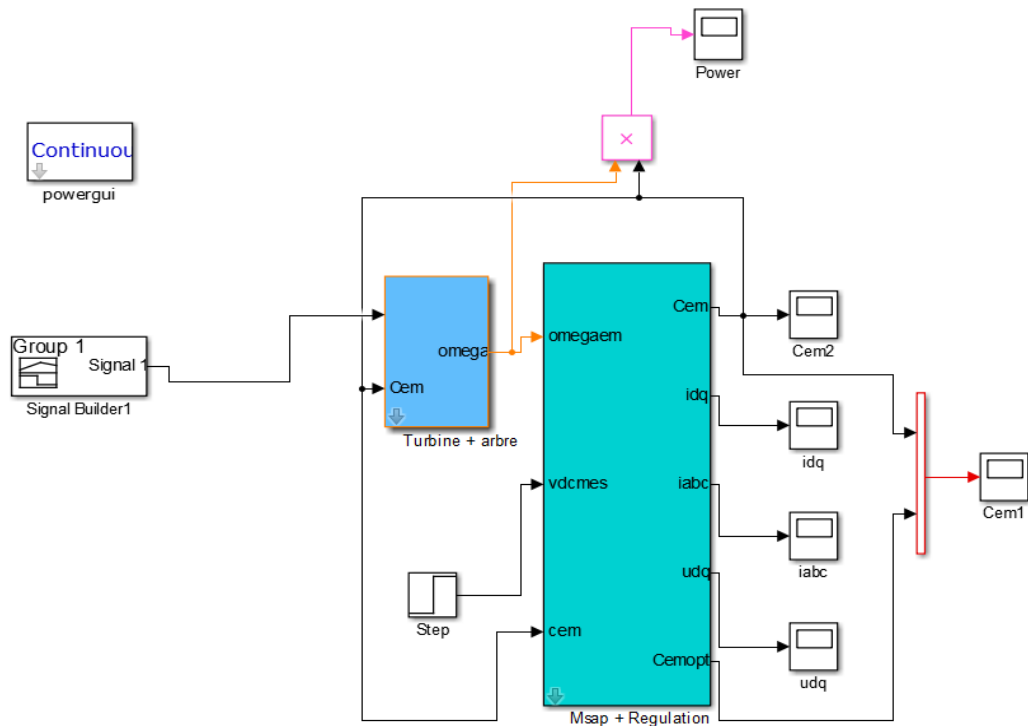
Tab.2 : Paramètres de la turbine éolienne :

Paramètres	Valeur
Coefficient de puissance maximale	0.4061
Rayon de la turbine	1.47 m
Air densité	$\rho = 1.22 \text{ kg/m}^2$
Inertie	$J_t = 0.089$
Le ratio de vitesse max	$\lambda = 8.08$
Ratio de vitesse optimal	$\lambda_{op} = 6.08$

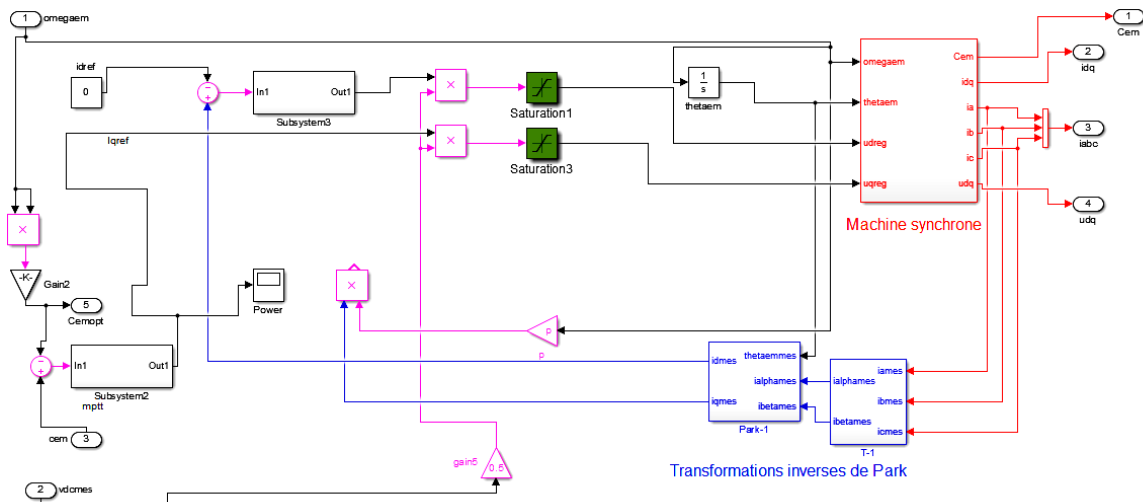
Tab.3 : Paramètres électriques du Bus continu:

Paramètres	Valeur
C : capacité de filtrage	1000 [uF]
V_{dc} : Tension continue de référence	220 – 260 [V]

B- Bloc de simulation globale de système éolien :



C- Bloc de simulation globale (sous système) :



D- Coefficients d'inégalité de l'algorithme du mode glissant d'ordre deux

$$\Phi_1 = \Phi_2 = 2, \quad \alpha_1 = 0.02, \quad \alpha_2 = 0.02, \quad \beta_1 = 0.02, \quad \beta_2 = 0.02 \quad k = 0.4$$

$$\Gamma_m = 110, \quad \Gamma_M = 130$$

Références

bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **J. Martin**, «Energies éoliennes», Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [2]**B. Multon**, « Aérogénérateurs électriques », Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, vol. 7, no D3960, 2010.
- [3] **P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi**, «Eoliennes», Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [4] **F. Poitiers**, « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne-Machine asynchrone à cage autonome Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », thèse de doctorat, Université de Nantes, France 2003.
- [5]**A. Boyette**, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », thèse de doctorat. Université Henri Poincaré Nancy 1, France, 2006.
- [6]**B. Meghni** « Contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne énergétique éolienne », Thèse Doctorat en Génie Electrique, Université Badji Mokhtar Annaba, 2015.
- [7] **O. De Vries**, «On the theory of the horizontal axis wind turbine», Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96.
- [8] **BOYETTE, Armand**. « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne». 2006. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy I.
- [9] **HAMECHA Samira, Ep. BOUREKACHE** «Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents». 2013. Mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [10] **Frédéric Poitiers**, « étude 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.
- [11] **M. Kassa IDJARENE**, «Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes», N° d'ordre : 40283/2010.
- [12] **S. ElAimani**, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, France, 2004.

- [13] **Z. Salah Eddine**, «Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau», 2017. Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar- Annaba.
- [14] **Hamrouni N. and all**, « New Control Strategy for 2-Stage Grid-Connected Photovoltaic System», Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 33, pp. 2212-2221, 2008.
- [15] **T.LATRECHE Mohammed**, « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien » Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas De Setif –ALGERIE, 24 /06 /2012.
- [16] **A. Boyette**, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », thèse de doctorat. Université Henri Poincaré Nancy 1, France, 2006.
- [17] **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 , soutenue le 18 /12/2003.
- [18] **K. Lotfi, M. Lakhdar**, «Étude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée», Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2017.
- [19] **Ch. Omar** «Optimisation d'Un Système De Dessalement Renouvelable», Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [20] **Nesmat Abu-Tabak**, «Stabilité dynamique des systèmes électriques multi-machines : modélisation, commande, observation et simulation », thèse de doctorat soutenue à l'école centrale de Lyon, France, 2008.
- [21] **Y. El Tous**, «Pitch Angle Control of Variable Speed Wind Turbine», american journal of engineering and applied sciences, vol. 1(2), pp. 118-120, 2008.
- [22] **D. Aouzellag, K. Ghedamsi, E.M. Berkouk**, «Network power flux control of a wind generator», Renewable Energy, Vol. 34, pp. 615-622, 2009.
- [23] **Dione Fatou**, «Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne A base de machine synchrone à aimants permanents», Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2017.
- [24] **B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse**, « Impacte de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité d'énergie », J3EA, Vol.5-Hors série I, 2006.

- [25] **R. Khadidja, R. Oum elhana**, « Etude des différents types de convertisseurs utilisés dans la production des énergies renouvelables Application dans l'éolienne à base de GSAP », mémoire de master Académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.
- [26] **M. Mayouf**, « Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone a aimant permanent », mémoire de magister, Université de Batna, 2008.
- [27] **I. Schiemenz, M. Stiebler**, « Control of a permanent magnet synchronous generator used in a variable speed wind energy system », article, IEEE Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), pp_872–877, 2001.
- [28] **D. Abdeldjalil**, « Étude des performances et commande d'une machine synchrone à aimants permanents utilisée dans les éoliennes », mémoire de magister en Electrotechnique, Université Ferhat Abbas, Setif ,2012.
- [29]: **Abdeddaim Sabrina**, «Optimisation d'un système de génération renouvelable (Photovoltaïque et éolienne) connecté au réseau». Mémoire de doctorat, université Mohamed Khider – Biskra ; 2013.
- [30] **Guy Séguier**, « électronique de puissance : les fonctions de base et leurs principales applications», 7eme édition, Dunod, paris, 1999.
- [31] **Slotine, J.-J. E., & Li, W.** «AppliedNonlinear Control». London:Prentice-Hall, Inc. 1991.
- [32] **H. Bühler**, «Réglage par mode de glissement », traité d'électricité, 1ère édition, presses, 1991.
- [33] **A. Isidori**, «Nonlinear Control Systems», Springer-Verlag Communication and Control Engineering, ISBN 3-540-19916-0 3rd edition, 1995.
- [34] **S. Benahdouga**, «Commande par mode glissant d'ordre supérieur application à un réseau électrique», Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
- [35] **V. Bregeault**, «Quelques contributions à la théorie de la commande par modes glissants», Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes, 2010.
- [36] **I. Deghboudj**, «Commande des systemes non lineaires par mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de Magister, Université de Constantine 1, 2013.
- [37] **W. Perruquetti and J. P. Barbot**, «Sliding mode control in engineering», Marcel Dekker, Inc, New York, 2002.
- [38] **A. Levant** «Arbitrary-order sliding modes with finite-time convergence», in Proc. of the 6th IEEE Mediterranean Conference on Control and Systems, Alghero, Italy, 1998.

- [39] **A. Bouyekni, R. Taleb, Z. Boudjema and H. Kahal**, «A New Direct Power Control Applied to Doubly Fed Induction Generator for Wind Power Applications», The 2nd 26 et al. International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics, ICAAID-17), Djelfa on 16-17 September 2017, Algeria,
- [40] **A. Hemdani, M.W.** «Dagbagi, M. Naouar, L. Idkhajine, I.S. Belkhodja and E. Monmasson, 'Indirect Sliding Mode Power Control for Three Phase Grid Connected Power Converter», IET Power Electronics, Vol. 8, N°6, pp. 977 - 985, 2015.
- [41] **A. Levant and I. Alelishvili**, «Integral High-Order Sliding Modes», IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 52, N°7, pp. 1278 - 1282, 2007.
- [42] **S. Benelghali, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, T. Ahmed-Ali and I. Munteanu**, «Experimental Validation of a Marine Current Turbine Simulator: Application to a PMSG-Based System Second-Order Sliding Mode Control», IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, N°1, pp. 118 - 126, 2011.