

Faculté des Sciences de L'Ingénieur
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : électromécanique

Spécialité : électromécanique

THEME

**Commande par mode glissant de la machine
asynchrone à double alimentation dédiée aux
éoliennes**

Présenté par :

ALLOUDA Mohamed Hamed

TARZOUT Aymen

Promoteur : Mr.

HADDAR Mabrouk

Promotion 2023- 2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein du département d'Génie mécanique de l'Université Mohamed Bouguerra de Boumerdès. Nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir permis de mener à bien ce mémoire et exprimons notre profonde gratitude à Monsieur Hadar Mabrouk pour sa supervision, ses conseils précieux et son soutien constant. Nous le remercions également pour la confiance qu'il a placée en nous.

Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger notre mémoire. Nos remerciements vont également à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué par leurs conseils, leur soutien et leur aide à la réalisation de ce travail. Nous remercions nos parents pour leur soutien et leurs encouragements, ainsi que tous nos enseignants de l'école primaire à l'université.

Dédicace

J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail à :

*A mon cher père pour qui je dois mon éducation et mon
instruction, sa présence en toute circonstance m'a maintes fois
rappelé le sens de la responsabilité*

*A ma chère mère pour sa sollicitude à mon égard, et qui m'a
entouré avec sa tendresse, toujours prête à se sacrifier pour
ses enfants*

Et tous mes Proches.

A mon binôme de mémoire de fin d'étude.

A tous mes Amis(es)

A tous mes collègues de la promo électrotechnique option

Electrotechnique industrielle année 2023_2024

Et à tous qui me connaît et compte sur moi...

Allouda mohamed hamed

Dedicace

J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail à :

Mes parents

*En témoignage de ma reconnaissance envers le soutien, les
sacrifices et tous les efforts qu'ils ont fait pour mon éducation
ainsi que ma formation*

A toute ma

Famille Et tous

mes Proches.

A mon binôme de mémoire de fin

d'étude A tous mes Amis(es)

A tous mes collègues de la promo électrotechnique option

Electrotechnique industrielle année 2023_2024

Et à tous qui me connaît et compte sur moi...

Tarzout aymen

ملخص: هذه المذكرة دراسة مقارنة للتحكم في الطاقة لنظام تحويل طاقة الرياح (WECS) باستخدام مولد تحريضي مزدوج التغذية (DFIG) متصل بشبكة الطاقة الكهربائية. الهدف الأساسي هو تقييم أداء وحدة إنتاج الطاقة باستخدام استراتيجيتين تحكم متميزتين: التحكم في المتجهات وأجهزة التحكم في وضع الانزلاق (SM). وتركز الدراسة على مقارنة فعالية هذه المتحكمات من حيث تتبع التعليمات، ومثابرتها ضد تقلبات الرياح، وتأثيرها على جودة الطاقة المولدة. تقدم المذكرة أسلوب التحكم في المتجهات مع اتجاه تدفق الجزء الثابت لـ DFIG، مما يتيح التحكم الدقيق في تبادل الطاقة النشط والمتفاعل بين الجزء الثابت والشبكة. لإثبات فعالية كلتا طريقتي التحكم، يتم إجراء تحليلات شاملة للأداء من خلال عمليات المحاكاة، مع تضمين النتائج في المذكرة لإجراء تقييم مقارن.

Abstract: This thesis delves into a comparative power control study of a wind energy conversion system (WECS) employing a doubly fed induction generator (DFIG) connected to the electric power grid. The primary objective is to assess the performance of the energy production unit using two distinct control strategies: vector control and Sliding Mode controllers (SMC). The study focuses on comparing the effectiveness of these controllers in terms of instruction tracking, robustness against wind fluctuations, and their impact on the quality of the generated energy. The thesis presents a vector control approach with the stator flux orientation for the DFIG, enabling precise control of active and reactive power exchange between the stator and the grid. To demonstrate the effectiveness of both control methods, comprehensive performance analyses are conducted through simulations, with the results included in the thesis for a comparative evaluation.

Résumé: Ce mémoire propose se penche sur une étude comparative du commande de puissance d'un système de conversion d'énergie éolienne employant un générateur à double alimentation (GADA) connecté au réseau électrique. L'objectif principal est d'évaluer les performances de l'unité de production d'énergie à l'aide de deux stratégies de contrôle distinctes : la commande vectorielle et la commande par mode glissant. L'étude se concentre sur la comparaison de l'efficacité de ces contrôleurs en termes de suivi des instructions, de robustesse face aux fluctuations du vent et de leur impact sur la qualité de l'énergie générée. Le mémoire présente aussi une approche de contrôle vectoriel avec orientation du flux statorique pour le GADA, permettant un contrôle précis des échanges de puissance active et réactive entre le stator et le réseau. Pour démontrer l'efficacité des deux méthodes de contrôle, des analyses complètes des performances sont effectuées au moyen de simulations, les résultats étant inclus dans la mémoire pour une évaluation comparative.

NOMCLUTURE

MADA	Machine asynchrone à double alimentation.
MAS	Machine Asynchrone.
$f.é.m$	Force électroomotrice.
AC	Alternating current (Courant alternatif).
DC	Direct current (Courant continu).
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions.
THD	Taux de distorsion harmonique.
(t)	La vitesse de perturbation du vent.
V_0	La moyenne de la vitesse du vent.
ρ	La densité de l'air égale à 1,225 kg/m ³ .
S	La surface du capteur éolien (surface balayée) en m ² .
λ	Rapport de vitesse (vitesse de l'extrémité des pales sur la vitesse du vent).
Ω_1	Vitesse de rotation avant le multiplicateur.
R	Rayon des pales de l'aérogénérateur.
Ω_t	La vitesse de rotation de la turbine.
G	Rapport de multiplication.
C_g	Couple du multiplicateur de vitesse.
Ω_{mec}	Vitesse du générateur [rad/s].
(λ)	Le coefficient de puissance.
λ	La vitesse relative.
β	L'angle de calage des pales.

Ω_s	La pulsation du réseau d'alimentation triphasé.
P	Le nombre de pair de pôles du champ magnétique qui apparaît au niveau d'ustator.
N_s, N_r	Le nombre de spires des bobinages statoriques et rotoriques.
ω_s, ω_{mec}	Les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine.
R_s, R_r	Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.
l_s, l_r	Inductances de fuites des statoriques et rotoriques.
M_s, M_r	Inductances mutuelles.
J	Moment d'inertie.
C_r	Couple résistant.
f_r	Coefficient de frottement.
(I_f)	Le flux imposé par le courant d'excitation I_f .
I_a	Le courant d'induit.
P	Puissance active.
Q	Puissance réactive.
C_{mec}	Couple mécanique.
Φ_{sdq}, Φ_{rdq}	Flux statorique et rotorique dans les axes d et q.
φ_{abc_s}	Les flux des trois phases statoriques.
φ_{abc_r}	Les flux des trois phases rotoriques.
C_{em}	Couple électromagnétique.
C_r	Couple résistant.
Ω_r	Vitesse mécanique rotorique.
θ_r	Angle électrique entre l'axe direct et le rotor.
θ_s	Angle électrique entre l'axe direct et stator.
θ_{sr}	Angle électrique entre stator et rotor.
σ	Coefficient de dispersion magnétique.

V_{abc_s}	Les trois tensions statoriques.
V_{abc_r}	Les trois tensions rotoriques.
i_{abc_s}	Les trois courants statoriques.
i_{abc_r}	Les trois courants rotoriques.
φ_{abc_s}	Les flux des trois phases statoriques.
φ_{abc_r}	Les flux des trois phases rotoriques.

Sommaire

Introduction Générale.....	2
Chapitre I : Etat de l’art sur l’énergie éolienne	
I.1. Introduction	5
I.2. Situation actuelle d’énergie éolienne dans le monde.....	5
I.3. Situation actuelle d’énergie éolienne dans l’Algérie	7
I.4. Constitution d'une éolienne	7
I.4.1.Mât	7
I.4.2.Pâle:	8
I.4.3.Moyeu :	8
I.4.4.Rotor :	8
I.4.5.Nacelle :	
I.4.6.Arbre de la génératrice ou arbre secondaire :	9
I.4.7.Arbre primaire ou arbre lent :	9
I.5. Principe de fonctionnement d’une éolienne	10
I.6. avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :	11
I.6.1 avantages	11
I.6.2 inconvénients	12
I.7. Types d’éoliennes et utilisations :	12
I.7.1Eolienne à axe vertical :	12
I.7.1.1. Rotor Savonius	12
I.7.1.2Rotor Darrieus	13
I.7.2.Eoliennes à axe horizontal	14
I.8.Principe de conversion de l'énergie éolienne :	14
I.8.1. Fonctionnement à vitesse fixe :	15

8.1.2.Fonctionnement à vitesse variable :	16
I.9. Transferts de puissance dans la MADA	17
I.9.1. Cas moteur	18
I.9.2. Cas générateur	18
I.10. problématique, objectifs	19
I.10.1. Problématique	19
I.10.2. Objectifs :	20
Conclusion	21
Chapitre II : Modélisation De La Chaîne De Conversion Eolienne	
I.1. Introduction	23
II.1.2. Modélisation de la machine à double alimentation :	23
II.1.3. Hypothèses simplificatrices de la modélisation :	23
II.1.4. Modèle naturel triphasé de la MADA : :	24
II.1.5. Equations électriques : :	25
II.1.5.1 Equations des Tensions : :	25
II.1.5.2 Equations des Flux : :	25
II.1.5.3. Equation du Couple Electromagnétique :	26
II.1.5.4. Equation mécanique: :	26
II.1.6.Modèle de la MADA dans le repère de park :	26
II.1.6.1.Application de la transformation de park a la MADA :	27
II.1.6.2. Les équations électriques des tensions : :	27
II.1.6.3.Les équations des flux : :	28
II.1.6.4.L'équation mécanique : :	29
II.1.7.Choix du Référentiel : :	29
II.1.8. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	29
II.1.8.1. Equations des tensions statoriques et rotoriques	29
II.1.8.2. Equations des flux : :	30
II.1.8.3. Expression des puissances active et réactive statoriques : :	30

II.1.8.4. Expression des tensions rotoriques ...	31
II.2. Modélisation du système éolien	32
II.2.1.La théorie de Betz	32
II.2.2Modèle de la turbine éolienne .	33
II.2.3 Modèle du multiplicateur	35
II.2.4 Modèle de l'Arbre Mécanique	36
II.3. Modélisation des Convertisseurs statiques	38
II.3.1. Modélisation Onduleur de tension	38
Conclusion	40
CHAPITER III: Synthèse et Simulation Des Lois De Commande	
III.1.Introduction	42
III.2Synthèse des régulateurs	42
III.2.1.Régulateurs PI	44
III.3.Commande par modes glissants d'ordre 1	45
III.3.1.Synthèse de la loi de commande	46
III.3.1.1 Choix de la surface de glissement	46
III.3.1.2.Condition d'existence du mode de glissement	47
III.3.1.3 calculs de la commande	47
III.4. La Simulation :.....	47
III.4.1 Le schéma de simulation	48
III. 4.2 Les résultats	48
III.4.2.1 Suive de consigne	49
III.5.Conclusion :	52
Bibliographié	

Liste des Figures

Figure I.1 : Evolution de la puissance éolienne installée dans le monde	5
Table I.2 : La puissance éolienne totale installée les 10 premiers pays en 2013.....	6
Figure I. 3 Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).....	7
Figure I.4: Constitution d'une éolienne.....	9
Figure I-4 : Principaux organes du système de conversion éolien.....	10
Figure I.5: Eolienne à rotor Savonius.....	13
Figure I.6 : Eolienne à rotor Darrieus.....	13
Figure I.7 :Eolienne à axe horizontal.....	14
Figure I.9 : Fonctionnement à vitesse fixe	15
Figure I.9: Fonctionnement à vitesse variable	16
Figure I.10 : Fonctionnement dans les quatre quadrants d'une MADA.....	17
Figure I.11: Fonctionnement hypo synchrone de la MADA.....	18
Figure I-12 : Fonctionnement hyper synchrone de la MADA	18
Figure I.13: Fonctionnement hypo synchrone de la GADA.....	19
Figure I.14 : Fonctionnement hyper synchrone de la GADA.....	19
Figure II.1 : Représentation schématique du modèle d'une MADA	23
Figure II.2 :Disposition des enroulements de la MADA selon les axes réels et park.....	27
Figure II.3: Orientation de l'axe d sur le flux statorique	29
Figure II.4 : Schéma bloc d'une MADA	31
Figure II.2.1 Traversée d'un capteur de surface S par un fluide.....	32
Figure II.2.2 Coefficient de puissance (λ) pour différents types des turbines éoliennes..	33

Figure II.2.3. Schéma de conception d'une turbine éolienne	34
Figure II.2.4. Modèle de transmission mécanique à une masse ramené sur l'arbre rapide..	36
Figure II.2.5 Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne	37
Figure II.3.1 : Structure de la cascade du redresseur du courant à MLI à deux niveaux- Onduleurs de tension à deux niveaux –MADA.....	38
Figure II.3.2 : Onduleur de tension	38
Figure III.3.1. Schéma bloc de la commande direct	43
Figure III.3.2 . Schéma bloc de la commande indirecte.....	43
Figure III.3.3. Système régulé par un régulateur PI	44
Figure III. 3.4. la convergence vers la surface et ensuite le glissement le long.....	46
Figure III.3.5: Principe de la commande en mode glissant avec commande équivalent....	48
Figure III.3.6. Schéma de simulation	48

Introduction

Générale

Introduction

L'énergie éolienne a connu un essor remarquable ces dernières années, suscitant un intérêt de recherche intense. De nombreux groupes d'experts se sont penchés sur cette technologie prometteuse, menant à des avancées significatives dans le domaine. Les systèmes de conversion d'énergie éolienne se déclinent généralement en deux catégories principales : les turbines à vitesse fixe et les turbines à vitesse variable. Chacune de ces catégories présente des avantages et des inconvénients spécifiques, offrant ainsi une variété d'options pour répondre aux besoins et aux conditions d'exploitation.

La recherche présentée dans ce travail s'intéresse à une configuration de système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable, utilisant un Générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA). Ce choix de générateur, caractérisé par sa robustesse et son efficacité, permet d'offrir une grande flexibilité de fonctionnement et une meilleure adaptation aux fluctuations du vent.

En effet, la structure la plus typique de système de conversion d'énergie éolienne à base GADA consiste à lier le stator directement au réseau, alors que le rotor est alimenté à travers deux convertisseurs statiques en mode back-to-back (un côté rotor et l'autre côté réseau). Cette configuration permet un fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable ce qui donne la possibilité de récolter le maximum de puissance possible sur une large plage de variation de la vitesse ($\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme). Par ailleurs, plusieurs méthodes ont été proposées pour contrôler la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), telles que la commande vectorielle à base de régulateur Proportionnel-Intégral (PI) et la commande par mode glissant qui ont fait l'objet de notre étude.

La commande vectorielle (plus spécifiquement celle avec orientation du flux statorique) va nous permettre de réaliser une commande indépendante de la puissance active et réactive de la GADA, en utilisant des régulateurs classiques de type (PI).

Une autre méthode de commande développée pour la GADA dans notre travail est la commande par mode glissant (CMG). En général, cette loi consiste à forcer la trajectoire d'état de glisser vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre. D'où le phénomène de glissement. La commande par mode glissant permettant de limiter largement les effets de perturbation et d'atteindre d'excellentes performances de compensation avec une très bonne robustesse.

Introduction Générale

Pour démontrer les bonnes performances de la loi de commande proposées (PI, CMG). Plusieurs simulations sont effectuées par une comparaison entre ces commandes en terme: de suivi des consignes, de sensibilité aux perturbations et de robustesse vis-à-vis les variations paramétriques de la GADA. Toutes les structures de contrôle ont été testées avec l'outil de simulation MATLAB/Simulink.

A la lumière de ce constat, le mémoire sera divisé en trois chapitres pour décrire le travail envisagé.

Dans le premier chapitre, une étude sur l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne à base de GADA est présentée. Nous exposerons la capacité mondiale et nationale de production de l'énergie éolienne au cours des dernières années. Ensuite, les différentes structures utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées.

Le deuxième chapitre s'intéresse à la modélisation de différents éléments constituant le système de conversion d'énergie éolienne à base de GADA à partir de laquelle est reposé le travail de ce mémoire. On a donné le modèle aérodynamique de turbine. Après, On décrit le modèle mathématique de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA) et de son convertisseur statique qui alimente le rotor.

Dans le troisième chapitre, Nous avons présenté la théorie et l'application de la technique de commande par mode glissant pour la commande en puissance active et réactive de la GADA. Les résultats de la simulation numérique obtenus lors de l'application les commandes (commande vectorielle PI et commande par mode glissant) en puissance active et réactive de la GADA en terme : de suivi des consignes, de sensibilité aux perturbations et de robustesse vis-à-vis les variations paramétriques de la GADA.

Dans la dernière partie, une conclusion résume l'ensemble des travaux présentés et des perspectives pour de futurs travaux sont suggérés.

Chapitre I :
Etat de l'art sur l'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. Situation actuelle d'énergie éolienne dans le monde

L'énergie éolienne pourrait fournir le un cinquième de l'électricité mondiale dans les vingt ans. Le marché mondial pour cette énergie a connu une croissance de 41.7% en 2009 et une hausse moyenne de 28.6% par ans au cours des treize dernières années

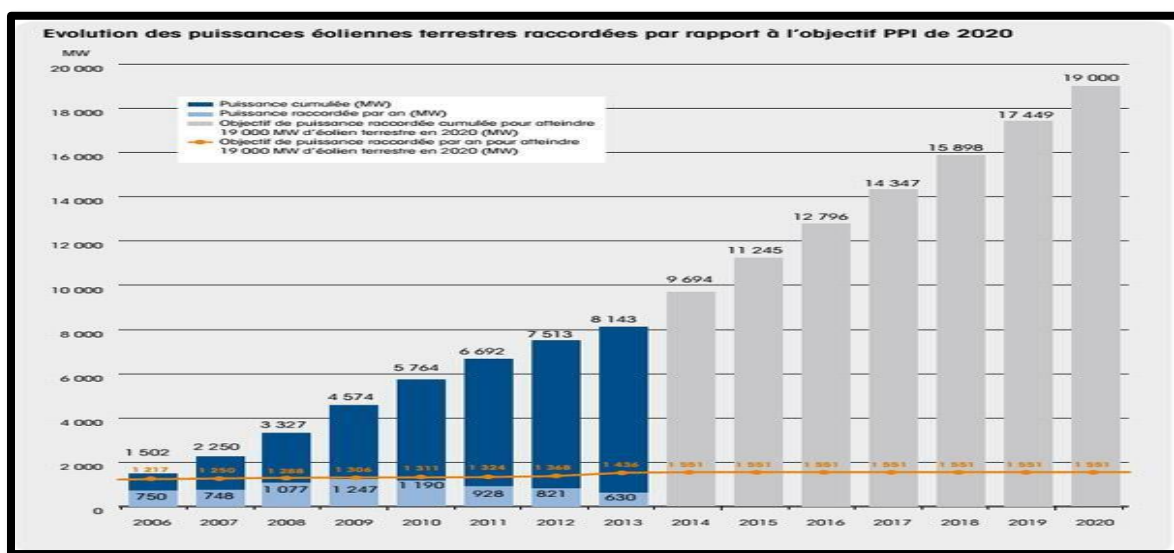


Figure I.1 : Evolution de la puissance éolienne installée dans le monde

La puissance éolienne installée dans le monde devrait être multipliée par 3 pour atteindre 910 GW en 2025 et le marché mondial de l'éolien devrait, pour sa part, plus que doubler au cours de cette période, passant de 21 à 47 milliards d'euros. Les pays qui

s'intéressent au développement de l'éolien sont encore en phase de premier investissement (mise en service dans le champ éolien qui n'existaient pas auparavant). De fait, les capacités installées croissent en permanence mais à des rythmes différents selon les pays, et classer les états par puissance installée donne un résultat mouvant d'une année à l'autre. Néanmoins, il ressort des chiffres actuels que les plus gros pays investisseurs sont les pays occidentaux (USA et Europe), mais l'Asie, avec la Chine commence à tenir un rang important Tableau I.1.

Country	MW	SHARE
PR China	16.100	45.4
Germany	3,238	9.1
UK	1,883	5.3
India	1,729	4.9
Canada	1,599	4.5
USA	1,084	3.1
Barzil	948	2.7
Poland	894	2.5
Sweden	724	2.0
Romania	695	2.0
Rest of the world	6,573	18.5
Total TOP 10	28,894	81
World Total	35,467	100

Figure I.2 : La puissance éolienne totale installée les 10 premiers pays en 2013.

En 2013, la région Europe –Moyen–Orient domine le marché éolien en détenant 40% du marché mondial. Mais alors que la Chine investit des milliards d'euros dans l'énergie éolienne, plusieurs gouvernements européens ont décidé de réduire les subventions accordées à l'électricité éolienne. Ces décisions pourraient ralentir le marché de l'éolien sur le Vieux Continent, qui ne devrait plus représenter que 34% du marché mondial en 2030

En Afrique du Nord, le développement de la puissance éolienne continue en Egypte, Maroc et Tunisie avec respectivement 55 MW, 10 MW et 34 MW de nouvelles capacités installées.

I.3. Situation actuelle d'énergie éolienne dans l'Algérie

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m /s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie, [1]

Ceci a permis l'identification de huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes,

- deux zones sur le littoral
- trois zones sur les hauts plateaux
- et quatre zones en sites sahariens

En termes de ressources énergétiques éoliennes de l'Algérie celles-ci ont déjà été estimées par le CDER (Centre de Développement des Energies Renouvelables) depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien à travers le territoire national (Figure I.3).

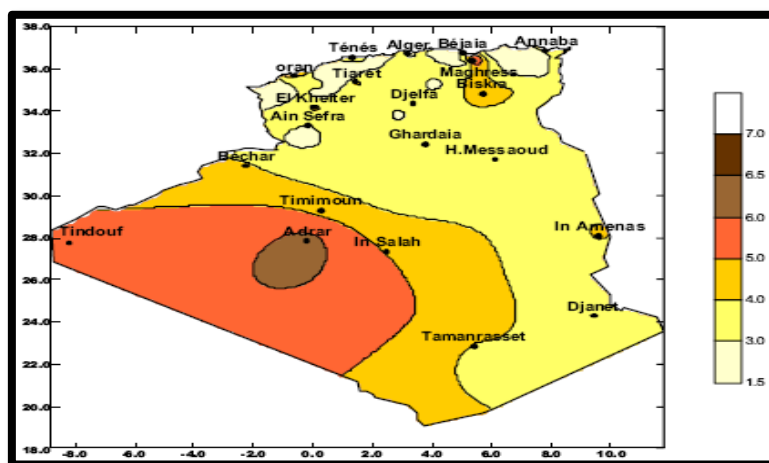


Figure I. 3 Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).

I.4. Constitution d'une éolienne :

En général, une éolienne se compose essentiellement de :

I.4.1.Mât :

Le mât peut être conçu en béton armé. Son rôle est de permettre le placement du rotor à une hauteur suffisante afin de permettre sa rotation, en présence du vent et sa vitesse doit être assez suffisante pour la rotation du rotor. La hauteur du mât varie selon le type d'éolienne de 10 m et 100 m.

I.4.2.Pâle:

Elle permet de capter l'énergie aérodynamique du vent et la transférer au rotor sous forme d'énergie mécanique (de rotation). Le nombre de pâles est fixe au rotor, plus le nombre de pâles est grand plus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Pour des raisons d'optimisation et de stabilité de l'éolienne, les constructeurs utilisent trois pâles.

I.4.3.Moyeu :

Appelé aussi nez. Il est fixé à l'arbre lent de l'éolienne et il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'éolien

I.4.4.Rotor :

C'est la partie tournante de l'éolienne. Lorsque le vent percute les pâles, le rotor tourne et permet la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui sera transmise à la génératrice.

I.4.5.Nacelle :

Elle est montée au sommet du mât et est conçue pour regrouper les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle est constituée des éléments suivants :

- Un multiplicateur de vitesse : qui permet d'augmenter la vitesse de rotation de l'arbre relié au moyeu (arbre lent) pour l'adapter à celle du générateur. Il agit comme une boîte à vitesses du rotor.
- Un système de contrôle : Il s'agit d'un ordinateur de bord servant au pilotage de la machine comme le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5m/s), le freinage de la machine lorsque la vitesse du vent est trop élevée et l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la

récupération d'énergie [3]. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent et une girouette pour indiquer sa direction. Ceux-ci sont habituellement logés à l'arrière de la nacelle.

- Le système de refroidissement : Le refroidissement des composantes situées à l'intérieur de la nacelle est assuré par la circulation forcée d'air, d'eau voire même d'huile.
- Génératrice : Elle convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. La puissance fournie dépend de la puissance mécanique apportée à son rotor. Pour estimer la puissance électrique réelle, il faut connaître la puissance mécanique fournie par le vent à l'hélice.

I.4.6. Arbre de la génératrice ou arbre secondaire :

L'arbre secondaire est celui de la génératrice. Il est équipé d'un frein mécanique de sécurité pour ralentir ou maintenir l'arrêt du rotor

I.4.7. Arbre primaire ou arbre lent :

C'est l'arbre du rotor de la turbine éolienne. Il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire d'un multiplicateur mécanique de vitesse [1].

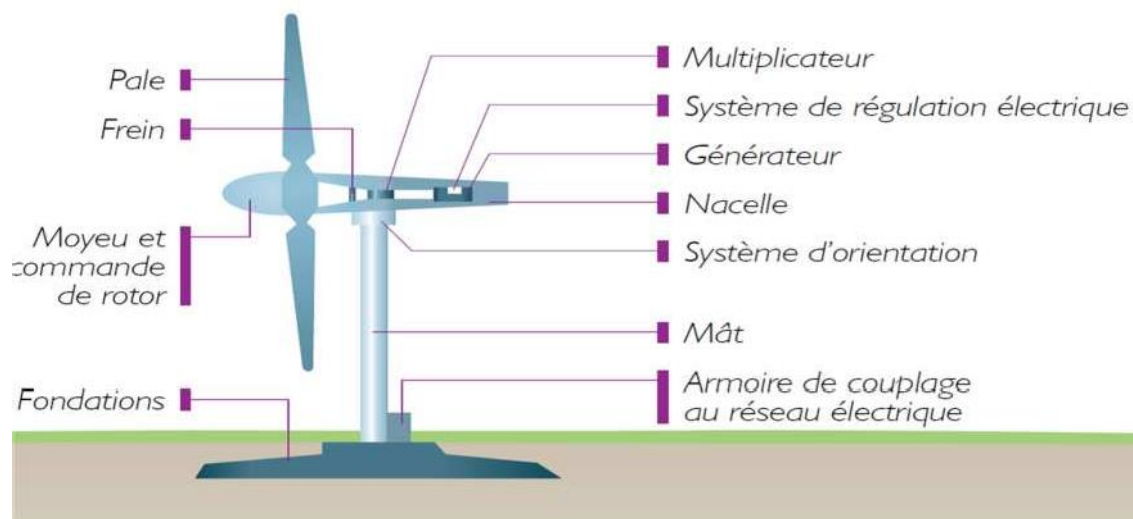


Figure I.4: Constitution d'une éolienne.

I.5. Principe de fonctionnement d'une éolienne

- Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tr/min) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/min, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur.
- Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent.

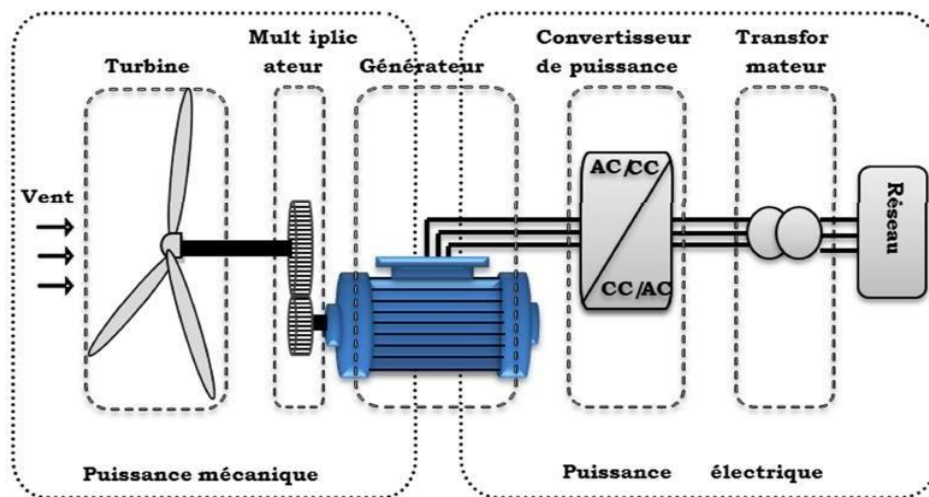


Figure. I-4 : Principaux organes du système de conversion éolien.

- La tension produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public. La tension produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public.
- Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (< 1%), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements.

- Compte tenu du fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants.
- La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs [2].

I.6. avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.6.1. Avantages :

- l'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [3].
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO₂ [4].
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire [5].

L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [6].

- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [6].
- 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 moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales [3].
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle

source d'énergie traditionnelle [3].

I.6.2. Inconvénients :

- la nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux [3].
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés [4].
- Le bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs (6)
- Lorsque la production dépasse la consommation, le stockage est encore onéreux, mais en cas de raccordement de l'éolienne au réseau électrique, le stockage n'est pas nécessaire [6].

I.7. Types d'éoliennes et utilisations :

Les éoliennes sont classées en deux grandes familles selon la disposition de la turbine par rapport au sol.

I.7.1Eolienne à axe vertical :

Les turbines à axe vertical sont très peu répandues et assez mal connues car elles sont moins performantes. Leur conception offre l'avantage de poser le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol, d'être simple, robuste et nécessite peu d'entretien. Deux types de rotors se présentent :

I.7.1.1.Rotor Savonius : Il est composé de deux demi-cylindres désaxés. L'écoulement d'air qui aborde la pale face à lui est dévié par le profil semi cylindrique et envoyé vers la seconde pôle. Grâce à cette technique, une éolienne Savonius démarre à une vitesse de vent moindre que les autres.

Le prototype crée par Savonius ne produit jamais d'électricité car la vitesse de rotation du rotor est trop faible. Les éoliennes Savonius ont l'avantage de fonctionner avec toutes les directions du vent ce qui est très adapté aux vents puissants.



FigureI.5: Eolienne à rotor Savonius.

I.7.1.2Rotor Darrieus :

Il est surtout connu pour son éolienne à axe vertical qui ressemble à un gros batteur à œufs. Cette disposition évite d'orienter la machine dans la direction du vent. Elle a deux avantages : un fonctionnement particulièrement silencieux et une puissance 50% supérieure à celle d'une éolienne à axe horizontal de même taille.

Ce type d'éolienne peut fonctionner en tant que génératrice et peut être placé au sol, par son démarrage est difficile par rapport à l' éolienne de type Savonius et a un faible rendement.



FigureI.6 : Eolienne à rotor Darrieus.

I.7.2.Eoliennes à axe horizontal :

Ce type d'éoliennes présente généralement un nombre de pâles compris entre 1 et 3 et peut développer des puissances élevées. Sa structure capte le vent en hauteur mieux

Qu'à voisinage du sol ce qui permet d'obtenir une plus grande vitesse de rotation. Le générateur et le système de commande sont logés dans la nacelle au sommet du mât. Ce type d'éolienne nécessite un système d'orientation des pâles.

Deux configurations sont possibles : les éoliennes « amont » et les éoliennes « aval » selon que les pâles sont situées ou non du côté du mât exposé au vent [1] (figure I.7).

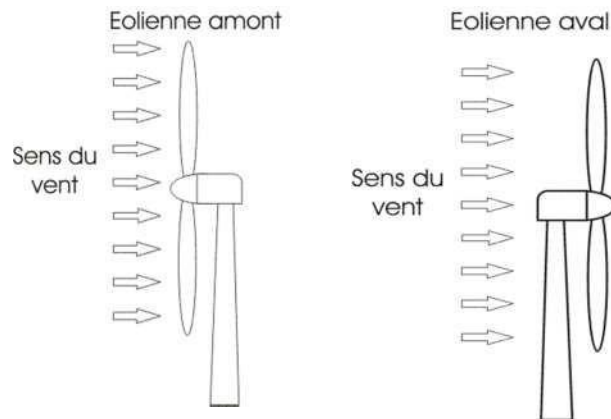


Figure I.7: Eolienne à axe horizontal.

I.8.1.Principe de conversion de l'énergie éolienne :

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple :

Le vent fait tourner des pales qui font elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne.

I.8.1.1. Fonctionnement à vitesse fixe :

Dans cette technologie, la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance (Figure I.8), sa vitesse mécanique est fixe et imposée par la fréquence de travail du réseau et/ou par le nombre de paire de pôles de la génératrice. Il nous faut alors un système d'orientation des pales de l'aérogénérateur pour avoir un fonctionnement au voisinage de synchronisme et aussi un multiplicateur de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice. (7)

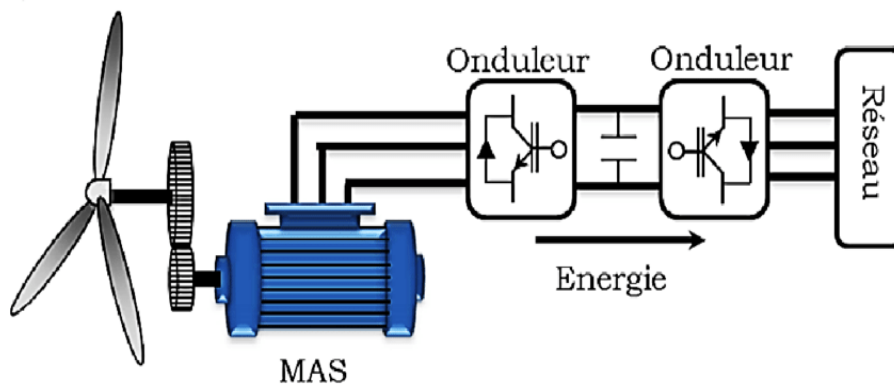


Figure I.9 : Fonctionnement à vitesse fixe

➤ **Avantage du fonctionnement à vitesse fixe :**

Les principaux avantages de ce mode de fonctionnement sont :

- Structure simple.
- Absence des convertisseurs de puissance.
- Moins cher.

➤ **Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe :**

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

- Puissance extraite non optimisée (On rate les maxima théoriques).
- Rendement très faible pour les moyens et faibles vents.
- Nécessité de la maintenance périodique de la boîte de vitesse.
- Perte de control de la puissance réactive.
- Magnétisation de la génératrice non contrôlée.

8.1.2.Fonctionnement à vitesse variable :

Vu les problèmes causés par un fonctionnement à vitesse variable (Systèmes d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre,), on a cherché l'exploitation

optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent. Pour cela, il faut ajuster en permanence la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent. Cette optimisation de la production voulue peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) (figure I.9) [7].

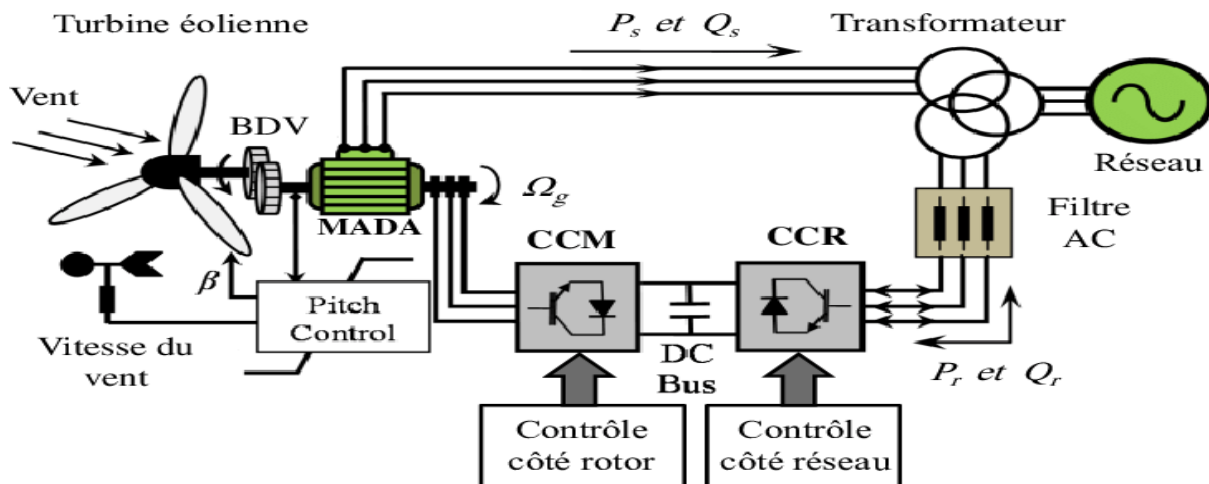


Figure I.9: Fonctionnement à vitesse variable

➤ **Avantage du fonctionnement à vitesse variable :**

- Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.
- Réduction des contraintes mécaniques subites par le train de puissance. Les turbulences et rafales de vent peuvent être absorbées, l'énergie absorbée du vent est donc emmagasinée dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant ainsi les oscillations de couple.
- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- Ce type de machines offre une constante de temps plus grande du système de contrôle de l'angle de calage, ce qui réduit sa complexité.
- Réduction des bruits acoustique.

➤ **Inconvénients du fonctionnement à vitesse variable :**

- Utilisation de machines spéciales.
- Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande,...).
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.
- Gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne.

I.9. Transferts de puissance dans la MADA

En général, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

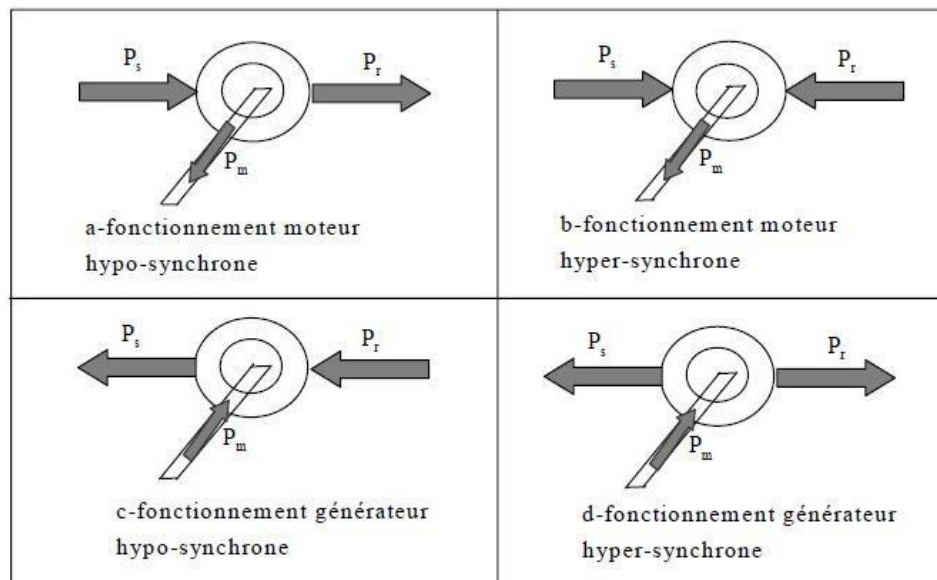


Figure I.10 : Fonctionnement dans les quatre quadrants d'une MADA.

En effet, nous savons qu'une machine à cage doit tourner au-dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper

ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

I.9.1. Cas moteur

a) Fonctionnement hypo synchrone $g > 0$

Pour ce cas la machine tourne à une vitesse faible inférieure à la vitesse de synchronisme. La puissance P_s est fournie par réseau au stator, La puissance P_r est fournie par rotor au réseau.

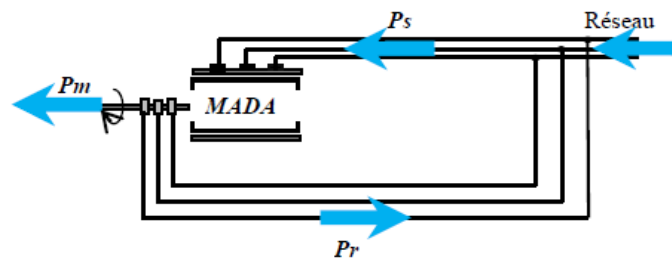


Fig. I.11: Fonctionnement hypo synchrone de la MADA.

B) Fonctionnement hyper synchrone $g < 0$

La puissance est fournie par le réseau au stator et rotor, on a donc un fonctionnement à vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme.

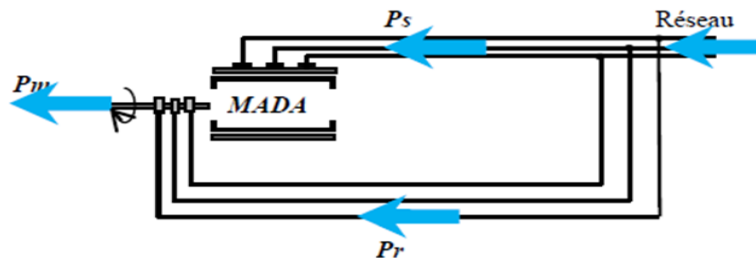


Fig. I-12 : Fonctionnement hyper synchrone de la MADA.

I.9.2. Cas générateur

Le comportement est similaire à celui du fonctionnement en mode moteur avec deux cas

a) Fonctionnement hypo synchrone $g > 0$:

En mode de fonctionnement hypo synchrone, la vitesse mécanique est faible alors le réseau reçoit une puissance statorique P_s et envoie une puissance rotorique vers la machine.

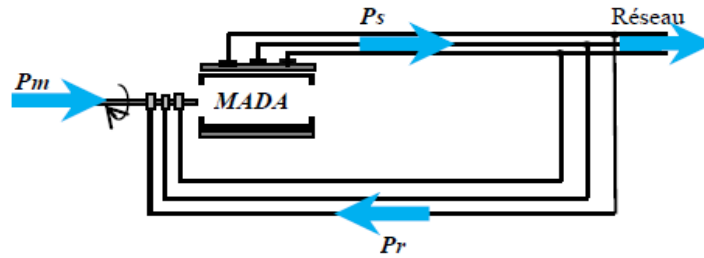


Fig. I.13: Fonctionnement hypo synchrone de la GADA.

b) Fonctionnement hyper synchrone $g < 0$

En mode de fonctionnement hyper synchrone la vitesse mécanique augmente jusqu'à une vitesse supérieure à celle du synchronisme, dans ce cas les deux puissances sont envoyées de la machine vers le réseau.

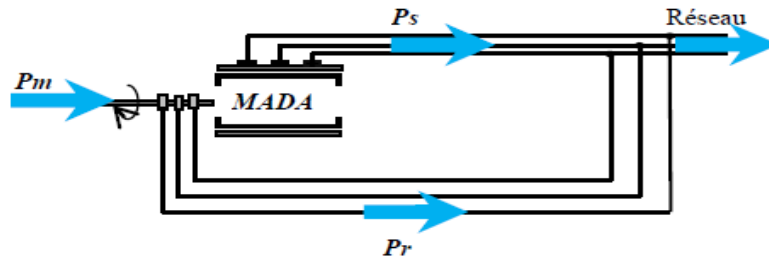


Fig. I.14 : Fonctionnement hyper synchrone de la GADA.

I.10. problématique ,objectifs

I.10.1. Problématique

- Le système de conversion de l'énergie éolienne à base de GADA présentes les inconvénients majeurs suivantes :
- Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système multidisciplinaire qui demande une connaissance approfondie de plusieurs spécialités.
- Le système de conversion de l'énergie éolienne à base GADA est un système sensible aux variations des paramètres externes (défauts électriques et des vitesses du vent très élevées...) ou paramètres internes (saturation des inductances, échauffement des résistances...). En absence des paramètres certains, le comportement dynamique du système se dégrade.

I.10.2. Objectifs :

Nos travaux ont pour objectifs :

- Etablir un modèle mathématique précis et simple de système de conversion de l'énergie éolienne à base GADA.
- Etablir une loi de commande robuste et permanente pour système de conversion de l'énergie éolienne à base GADA.
- Implanter et vérifier la performance du système en termes de suivi des consignes, de sensibilité aux perturbations et de robustesse vis-à-vis les variations paramétriques de la MADA via Matlab/Simulink.

Conclusion :

Dans ce premier chapitre nous avons donné un aperçu sur l'énergie éolienne dans le monde et spécialement en Algérie. Nous avons également présenté les constitutions d'une éolienne et le principe de fonctionnement, et présenté quelques avantages et quelques inconvénients sur l'énergie éolienne. Nous avons également la chaîne de conversion de l'énergie éolienne et comment ça fonctionnait (vitesse :fixe ,variable).enfin , nous avons mentionné la transfère de puissance dans le MADA.

Chapitre II :
Modélisation De La Chaîne De Conversion
Eolienne

II.1. Introduction :

Ce chapitre se concentre sur la description et la modélisation de notre système de conversion d'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Nous présentons une méthode pour développer un modèle simplifié et facile à mettre en œuvre.

La turbine éolienne actionne la MADA via un multiplicateur de vitesse. Le stator de la MADA est directement connecté au réseau électrique, tandis que le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs statiques triphasés régulés : un convertisseur côté rotor situé du côté rotor de la MADA et un convertisseur côté réseau connecté au réseau électrique.

II.1.2. Modélisation de la machine à double alimentation :

La machine asynchrone est représentée sur la figure (II.1) par ces six enroulements Dans l'espace électrique. L'angle θ repère le décalage de l'axe de la phase rotorique (OAR) par rapport à l'axe fixe de la phase statorique (OAS).

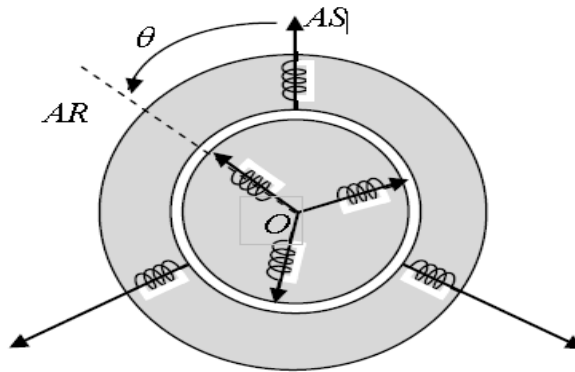


Figure II.1 : Représentation schématique du modèle d'une MADA

II.1.3. Hypothèses simplificatrices de la modélisation :

A cause de la répartition des enroulements de la MADA et la géométrie propre complexe et afin de faciliter les difficultés, on prend quelques hypothèses simplificatrices :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et d'encochage est négligeable,
- La machine a une constriction symétrique,
- La force magnétomotrice a une répartition spatiale sinusoïdale,
- La résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau,

II.1.4. Modèle naturel triphasé de la MADA :

Comme toutes les autres machines, la machine asynchrone double alimentée (MADA) est une machine réversible qui peut fonctionner en mode génératrice. En cas où on inverse son couple en injectant un couple moteur au lieu d'un couple résistant au niveau de son arbre, elle garde toujours son propre modèle. En prenant en compte les hypothèses simplificatrices citées précédemment, on peut exprimer le modèle de cette machine en se basant sur les relations suivantes :

Grandeurs statoriques :

$$\begin{cases} V_s = [v_{as} & v_{bs} & v_{cs}] \\ I_s = [i_{as} & i_{bs} & i_{cs}] \\ \varphi_s = [\varphi_{as} & \varphi_{bs} & \varphi_{cs}] \end{cases} \quad (II.1)$$

Grandeurs rotoriques :

$$\begin{cases} V_r = [v_{ar} & v_{br} & v_{cr}] \\ I_r = [i_{ar} & i_{br} & i_{cr}] \\ \varphi_r = [\varphi_{ar} & \varphi_{br} & \varphi_{cr}] \end{cases} \quad (II.2)$$

Voici alors les équations des tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (II.3)$$

Les flux statoriques et rotoriques en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (II.4)$$

Où :

R : sont respectivement les résistances statorique et rotorique

M_s : inductances mutuelles entre le stator et le rotor

M : inductances mutuelles entre les phases statoriques

M : inductances mutuelles entre les phases rotoriques

II.1.5. Equations électriques :

En appliquant les équations de maxwell à notre machine on obtient les équations suivantes.

II.1.5.1 Equations des Tensions :

$$\begin{cases} [V_s] = -[R_s][I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \end{cases} \quad (II.5)$$

Avec Tous les paramètres portant l'indice s sont liés au stator et l'indice r représente les paramètres du rotor

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (II.6)$$

II.1.5.2 Equations des Flux :

Les flux sont donnés par :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{sr}][I_s] \end{cases} \quad (II.7)$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

l_s, l_r : inductances de fuites

M_s, M_r : inductances mutuelles

La matrice des inductances mutuelles entre stator et le rotor est:

$$[M_{sr}] = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (II.9)$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$$

II.1.5.3. Equation du Couple Electromagnétique :

$$C_{em} = p[I_s]^t \frac{d}{dt}([M_{sr}][I_r]) \quad (II.9)$$

II.1.5.4. Equation mécanique :

Avec :

$$C_{em} = J \frac{d\Omega_r}{dt} + F_c \Omega_r + C_r \quad (I.10)$$

C_{em} : le couple électromagnétique de la machine

J : le moment d'inertie total sur l'arbre de la machine

F_c : le coefficient de frottement, visqueux de la MADA

Ω_r : la vitesse de rotation de l'axe de la MADA

C_r : le couple résistant de la machine

II.1.6.Modèle de la MADA dans le repère de park :

Le modèle de park est basé sur la transformation d'un système triphasé d'axe $[a,b;c]$ a un système équivalent biphasé d'axe $(d;q)$ créant la même force magnétomotrice .Une seconde transformation de park modifiée permet de conserver la puissance lors de passage du système triphasé a celui du biphasé ou inversement

Dans la transformation algébrique ,on utilise la(II.1) pour le passage du système triphasé au système biphasé et pour le passage inverse on utilise la matrice (II.2)

$$[A(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & -\sin(\theta + 2\frac{\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.11)$$

$$[A(\theta)]^{(-1)} = [A(\theta)]^T \quad (II.12)$$

La transformation de park des tensions et du flux (II.5)et (II.7) sont présentées par les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} [X_{dqs}] = [A(\theta)][X_{abc}] \\ [X_{dqs}] = [A(\theta)]^{(-1)}[X_{abc}] \end{cases} \quad (II.13)$$

II.1.6.1.Application de la transformation de park a la MADA :

La figure (II.1)représente la disposition des enroulements triphasés statoriques et rotoriques $[a,b,c]$ repérés dans système a axes réels ainsi que celle d'axes fictifs $[d,q]$ la MADA.

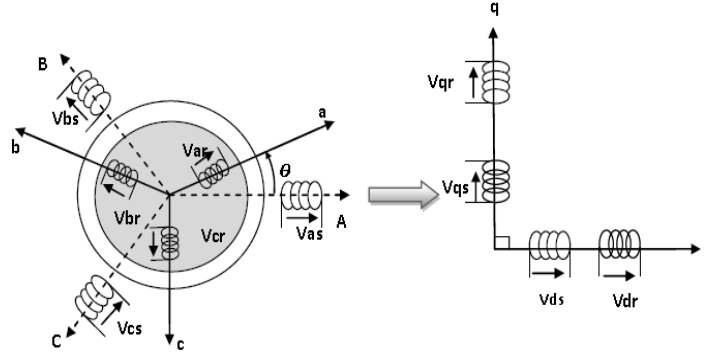


Figure II.2 :Disposition des enroulements de la MADA selon les axes réels et park

II.1.6.2. Les équations électriques des tensions :

Au stator :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{os} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{os} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Q_{ds} \\ Q_{qs} \\ Q_{os} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{ds} \\ Q_{qs} \\ Q_{os} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Au rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \\ V_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_{or} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Q_{dr} \\ Q_{qr} \\ Q_{or} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{dr} \\ Q_{qr} \\ Q_{or} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

ω_s, ω_r : la pulsation électrique statorique

$d\theta_s/dt = \omega_s$: la vitesse de rotation du repère $[d, q]$ par rapport au stator ,

$d\theta_r/dt = \omega_r$: la vitesse de rotation du repère $[d, q]$ par rapport au stator

$V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$: les tensions statoriques directs en quadrature du système biphasé.

$I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}, I_{qr}$: les courants statoriques directs et en quadrature du système biphasé

$Q_{ds}, Q_{qs}, Q_{dr}, Q_{qr}$: les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système biphasé

Sous forme d'un système d'équations :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

II.1.6.3. Les équations des flux :

Comme pour l'application de transformation de park sur les équations des tensions, on applique cette transformations des flux , on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (II.17)$$

Avec :

$$\begin{cases} L_s = I_s - M_s \\ L_r = I_r - M_r \\ M = \frac{3}{2} M' \end{cases} \quad (II.18)$$

Avec respectivement :

L_r, L_s : les inductances cycliques et rotoriques de la machine.

M : L'inductance magnétisante ,ou l'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

M_s : L'inductance mutuelle phase stator stator

M_r : L'inductance mutuelle phase rotor_rotor.

II.1.6.4. L'équation mécanique :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (i_{qr} \varphi_{ds} - i_{dr} \varphi_{qs}) \quad (II.19)$$

II.1.7. Choix du Référentiel :

Pour étudier la théorie des régimes transitoires de la génératrices asynchrone a double alimentation en choisissant un référentiel diphasé (d, q) lié au champ tournant statorique et en alignant le vecteur flux statorique(φ_s) avec l'axe d .

II.1.8. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraine un flux constant au stator de la machine [8]. Le système d'équations décrivant la machine asynchrone à double alimentation est donné par :

II.1.8.1. Equations des tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \varphi_{qs} \omega_s \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \varphi_{ds} \omega_s \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \varphi_{qr} (\omega_s - \omega) \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \varphi_{dr} (\omega_s - \omega) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

En choisissant le référentiel diphasé (d, q) lié au champ tournant, et en alignant le vecteur flux.

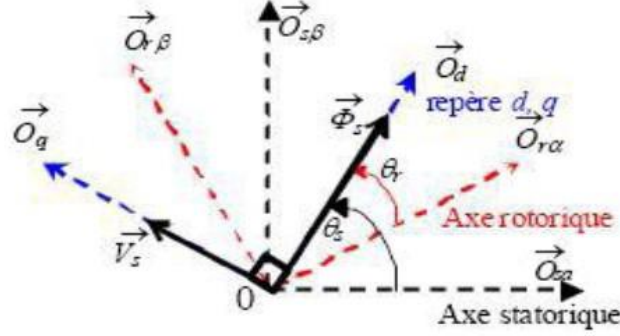


Figure II.3: Orientation de l'axe d sur le flux statorique

Les équations (II.20) peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \varphi_{ds} \omega_s \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \varphi_{qr} (\omega_s - \omega) \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \varphi_{dr} (\omega_s - \omega) \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

II.1.8.2. Equations des flux :

Les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s = L_s I_{ds} + M_{sr} I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M_{sr} I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M_{sr} I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M_{sr} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{I.22})$$

II.1.8.3. Expression des puissances active et réactive statoriques :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{I.23})$$

Avec un flux statorique orienté, ce système d'équation peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P_s = V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Les puissances actives P_s et réactives Q_s sont donc en fonction des courants statoriques sur lesquels nous n'avons aucune action directe. Nous devons chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques. A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_{ds}}{L_s} - \frac{M_{sr}}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = \frac{\varphi_{qs}}{L_s} - \frac{M_{sr}}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Remplaçant l'équation (I.24) dans (I.25) on obtient :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

II.1.8.4. Expression des tensions rotoriques :

A partir du système d'équation (I.25) les expressions des flux rotorique s'écrivent

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) i_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques on aboutit au système suivant :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) i_{dr} + g \frac{M_{sr} V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

En tenant compte des équations (I.26) et (I.28), on peut établir le schéma fonctionnel de la figure

(II.4) qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives satoriques , on remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre .

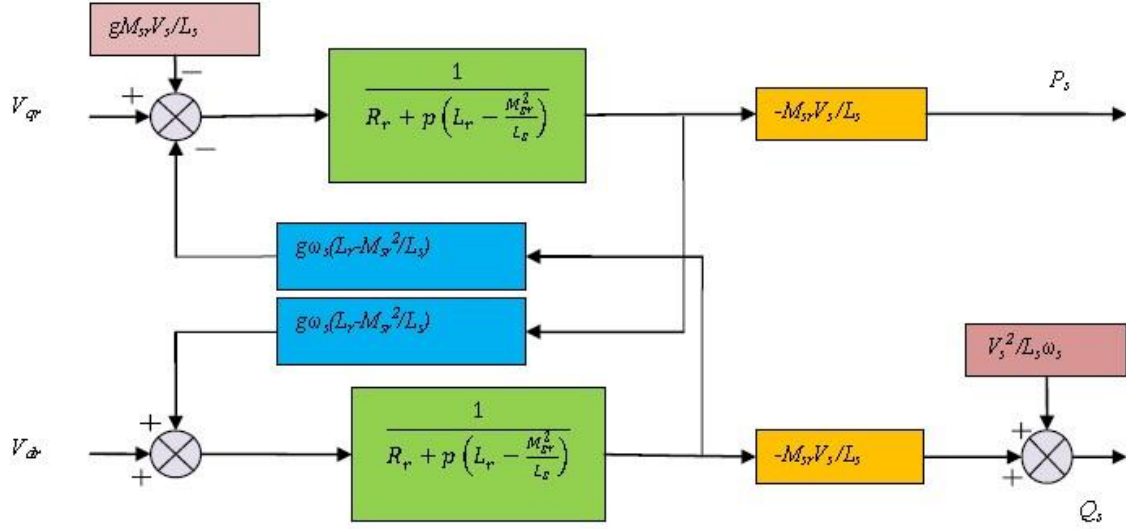


Figure II.4 : Schéma bloc d'une MADA

II.2.Modélisation du système éolien

II.2.1.La théorie de Betz

La quantité d'énergie générée par la masse d'air traversant la surface active équivalente de l'éolienne est exprimée par la puissance P_v et dépend de la surface S de l'éolienne, elle est donnée par:

$$P_v = \frac{1}{2} S V_v^3 \quad (II.1)$$

Ou

- ρ : La densité de l'aire égale à 1,225 kg/m³.
- S : La surface du capteur éolien (surface balayée) en m².
- V_v^3 : La vitesse du vent en m/s.

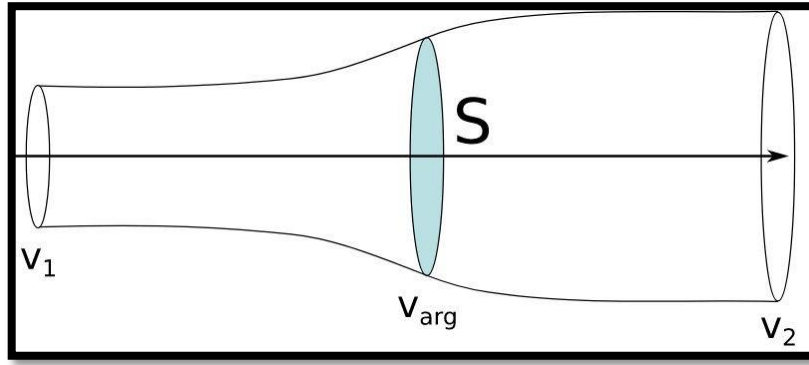


Figure II.2.1 Traversée d'un capteur de surface S par un fluide.

En 1920, le physicien allemand **Albert Betz** a développé la théorie de **Betz**, une méthode simplifiée qui permet de calculer la quantité maximale d'énergie cinétique qu'une éolienne peut collecter. Cette quantité est définie par la limite de **Betz** :

$$P_m = P_{max} = \frac{16}{27} P_v = 0.59 P_v \quad (\text{II.2})$$

La formule de **Betz** énonce que la quantité maximale d'énergie cinétique qui peut être collectée par une éolienne ne peut jamais dépasser 59% de l'énergie cinétique totale du vent traversant la turbine par seconde. Ainsi, le coefficient de puissance théorique maximal est défini comme :

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

Pour exprimer la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise une grandeur particulière :

$$\lambda = \frac{R \Omega_1}{V_v} \quad (\text{II.4})$$

Où

λ : Rapport de vitesse (vitesse de l'extrémité des pales sur la vitesse du vent).

Ω : Vitesse de rotation avant le multiplicateur.

R : Rayon des pales de l'aérogénérateur

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ est une mesure de l'efficacité aérodynamique de la turbine éolienne, et il dépend à la fois des propriétés de la turbine et de la vitesse du

vent. On peut illustrer graphiquement les variations de ce coefficient en examinant la relation entre le rapport de vitesse λ et l'angle d'orientation des pales β .

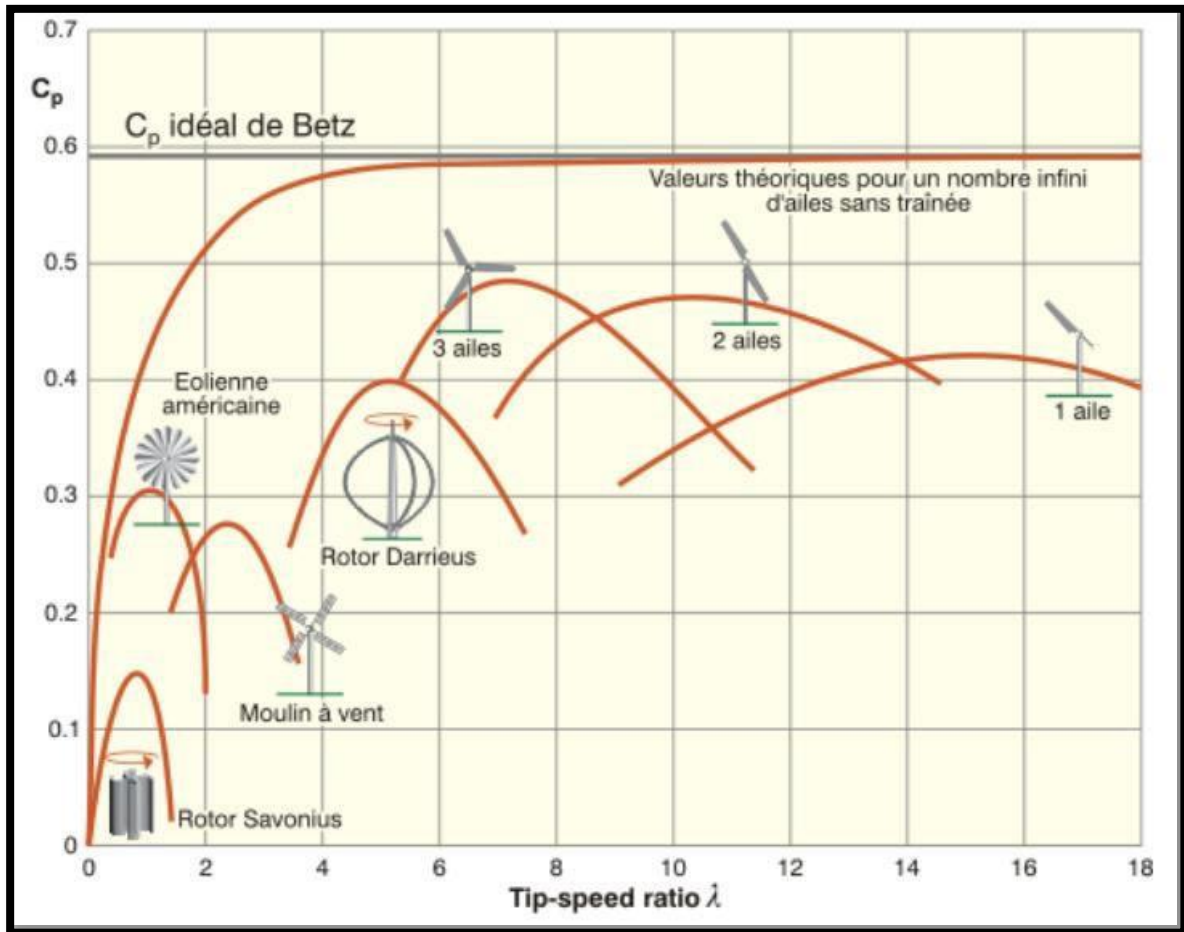


Figure II.2.2 Coefficient de puissance (λ) pour différents types des turbines éoliennes.

II.2.2 Modèle de la turbine éolienne :

Une turbine éolienne est une machine qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le mécanisme qui est étudié ici, est composé d'une turbine éolienne d'une puissance nominale comprenant des pales de longueur R entraînant un générateur à travers un multiplicateur de vitesse de gain G . Le coefficient de puissance C_p indique le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il est en fonction de la vitesse spécifique λ et de l'angle de calage des pales β . [9]

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5156 \left(\left(\frac{116}{\lambda_i} \right) - 0.4Q - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (\text{II.1})$$

Où

λ est un coefficient défini par :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08Q} - \frac{0.035}{Q^3 + 1} \quad (\text{II.2})$$

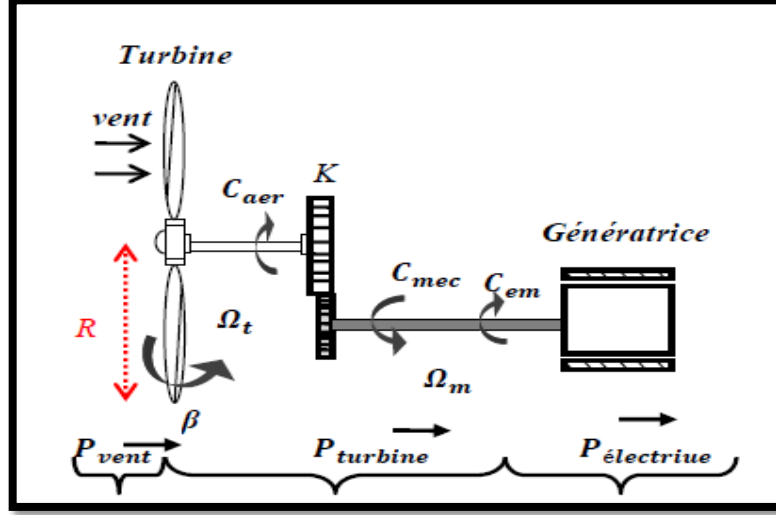


Figure II.2.3. Schéma de conception d'une turbine éolienne

La puissance aérodynamique, qui est convertie par une turbine du vent, $P_{turbine}$ dépend du coefficient de puissance C_p .

Elle est donnée par

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

$$S = \pi \cdot R^2$$

Avec :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V} \quad (\text{II.4})$$

- λ : La vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.
- Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine.
- V : Vitesse moyen du vent

Le couple aérodynamique apparaissant au niveau de la turbine est donc en fonction de cette puissance est donnée par :

$$C_{aero} = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = C_p(\lambda, Q) \frac{1}{2 \Omega_t} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot \pi \cdot R^2 \quad (\text{II.5})$$

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie par l'équation mathématique suivante :

$$P_{ven} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (II.6)$$

Où :

- $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$: La densité d'air ou masse volumique de l'air dans les conditions normales de température et de pression.
- V : La vitesse du vent.
- R : La longueur de la pale.

II.2.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur représente la boîte de vitesse de la turbine, donc est l'intermédiaire entre la turbine et le générateur. Il est adapté la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse (rapide) de la génératrice. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. Cet élément définit le couple mécanique et la vitesse de rotation de la machine comme suit [10]:

$$C_g = \frac{C_{aero}}{G} \quad (II.7)$$

$$\Omega_{mea} = G \cdot \Omega_{aero} \quad (II.8)$$

- G : Rapport de multiplication.
- C_g : couple du multiplicateur de vitesse.
- Ω_{mec} : vitesse du générateur [rad/s].

II.2.4 Modèle de l'Arbre Mécanique

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le moyeu et une petite inertie représentant le rotor du générateur (Figure II.2.4).

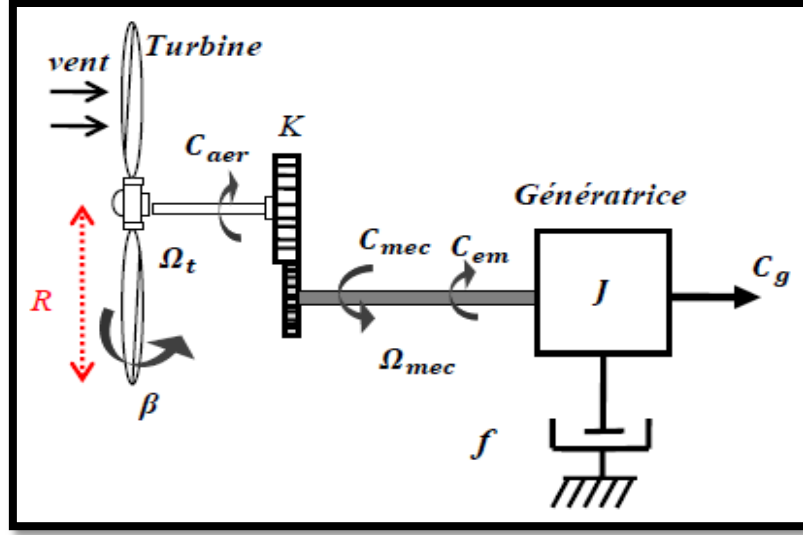


Figure II.2.4. Modèle de transmission mécanique à une masse ramenée sur l'arbre rapide

Dans le modèle mécanique proposé, l'inertie totale J est celle du générateur J_g et l'inertie de la turbine J_t ramenée sur l'arbre rapide (au rotor du générateur) [11] [12].

Où:

$$J = J_g + G^2 J_t \quad (\text{II.9})$$

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

$$C_{mec} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \quad (\text{II.10})$$

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit:

$$C_{mec} = C_g - C_{mec} - C_{vis} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \quad (\text{II.11})$$

Le couple visqueux étant proportionnel à la vitesse, nous aurons:

$$C_{vis} = \Omega_{mea} \cdot f \quad (\text{II.12})$$

En remplaçant (II.11) et (II.12) dans (II.10), nous aurons:

$$C_g - C_{mec} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + \Omega_{mec} \cdot f \quad (II.13)$$

Où :

C_{em} est le couple électromagnétique de la MADA.

Le schéma bloc illustré sur la (Figure II.6) représente le modèle de l'ensemble de la chaîne cinématique de la turbine, est obtenu en modélisant et en regroupant sous *MATLAB/SIMULINK* les équations mathématiques présentées précédemment :

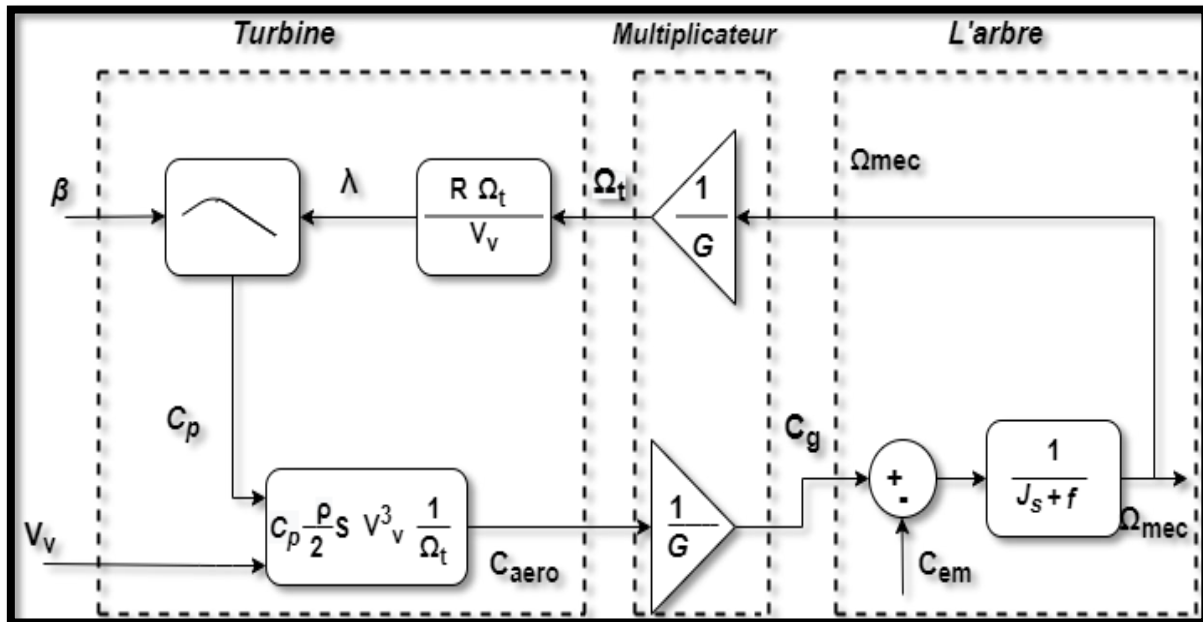


Figure II.2.5 Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne

La (figure II.2.5) correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de l'éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation Ω_{mec} de la génératrice, donc de la turbine, peut être commandée par action soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique C_{em} de la MADA. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice au système.

II.3.Modélisation des Convertisseurs statiques :

La commande de la MADA nécessite un onduleur qui règle l'amplitude et la fréquence des tensions envoyées à son rotor. Ce convertisseur a besoin à son tour d'une alimentation continue régulée obtenue grâce à un redresseur à MLI. Cette partie vise à modéliser ces convertisseurs à part.

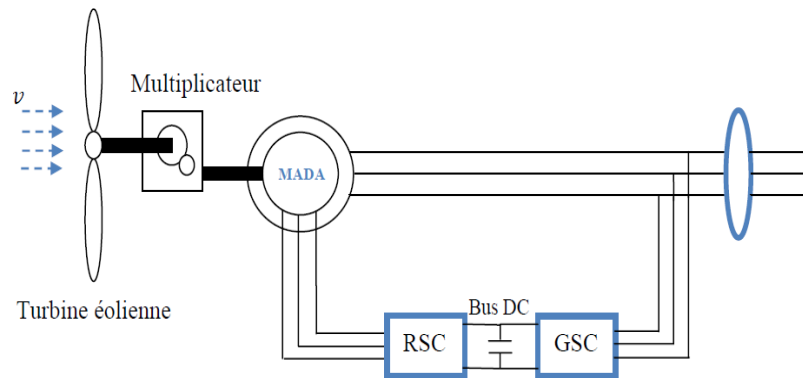


Figure II.3.1 : Structure de la cascade du redresseur du courant à MLI à deux niveaux- Onduleurs de tension à deux niveaux –MADA.

II.3.1.Modélisation Onduleur de tension :

L'onduleur utilisé est un simple onduleur triphasé à deux niveaux (six interrupteurs). En définissant la fonction de connexion d'un interrupteur Fks , où k représente le numéro du bras ($k=1,2$ ou 3) et s le numéro de l'interrupteur considéré ($s=1$ pour l'interrupteur du haut et $s=0$ pour l'interrupteur du bas). Et sachant que les interrupteurs d'un même bras sont complémentaires, on peut écrire :

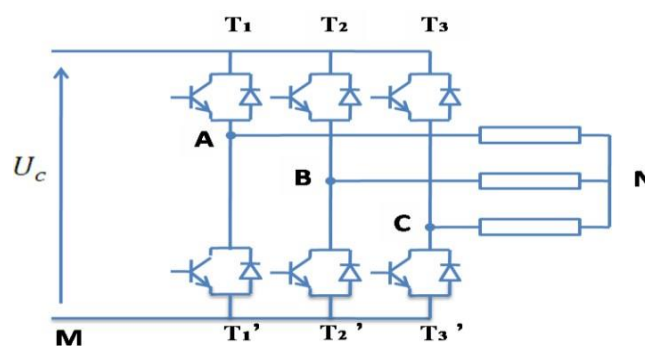


Figure II.3.2 : Onduleur de tension

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- la commutation des interrupteurs est instantanée.
 - la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
 - le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système triphasé équilibré
- entension ne contenant que les harmoniques impairs différents de trois.

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases sont:

$$\begin{aligned} V_A &= V_{AO} + V_{ON} \\ V_B &= V_{BO} + V_{ON} \\ V_C &= V_{CO} + V_{ON} \end{aligned} \quad (II.1)$$

Avec :

$$V_A + V_B + V_C = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON}$$

Sachant que le système des tensions triphasées statoriques est symétrique.

$$V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON} = 0 \Rightarrow \frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (II.2)$$

$$\begin{aligned} V_A &= \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B &= \frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C &= \frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{aligned} \quad (II.3)$$

On peut écrire le système (II.3) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (II.4)$$

$$\text{et : } \begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2} S_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2} S_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2} S_3 \end{cases} \quad (II.5)$$

On remplace (II.4) dans (II.5). Les équations précédentes permettent d'exprimer les tensions simples de l'onduleur au moyen des fonctions de

connexion comme suite :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Le système (II.6) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI.

$$VAO = E/2S1 \quad S1 = 1 \quad \text{si } K1 \text{ fermé}(vr1 \geq vp) \quad \text{si non} \quad S1 = -1$$

$$VBO = E/2S2 \quad S2 = 1 \quad \text{si } K2 \text{ fermé}(vr2 \geq vp) \quad \text{si non} \quad S2 = -1$$

ou

$$VCO = E/2S3 \quad S3 = 1 \quad \text{si } K3 \text{ fermé}(vr3 \geq vp) \quad \text{si non} \quad S3 = -1$$

Conclusion :

Ce chapitre détaille la modélisation d'un système de conversion d'énergie éolienne composé d'une turbine à vent reliée à une machine asynchrone à double alimentation (MADA). La MADA est pilotée par le rotor grâce à deux convertisseurs contrôlés, séparés par un bus continu.

CHAPTER III: Synthèse et Simulation

Des Lois De Commande

III.1.Introduction

Dans le chapitre précédent, il a été établi un modèle simplifié de la MADA. Celui-ci se réfère au principe d'orientation du flux statorique à partir de la commande des tensions rotoriques. En se basant sur le modèle précédent, une commande adaptée a été réalisée. Celle-ci contrôle les puissances actives et réactives statoriques en imposant des références aux onduleurs de tension alimentant le rotor. Dans cette optique nous allons procéder à la synthèse des régulateurs nécessaires au bon fonctionnement des commandes précédentes régissant la MADA.

Une simulation des différentes combinaisons liant les modes de contrôle et les régulateurs étudiés sera effectuée. Ainsi il sera aisé de les comparer en terme de poursuite de trajectoire, de sensibilité aux perturbations et de robustesse.

En plus de sa nous faire un comparions enter la commande **PI** et la commande **SMC**.

III.2Synthèse des régulateurs

Tel qu'il a été expliqué dans le chapitre précédent, la synthèse des régulateurs est la même pour chaque type de structures (directe et indirecte) (Figures III.3.1 et III.3.2). Pour éviter toute répétition une même étude sera effectuée. Celle-ci est valable pour chaque commande utilisée dans cet exposé. Ainsi trois types de régulateurs (PI, SMC) seront étudiés, cela sera la base théorique de la simulation dont les résultats seront exposés dans une section ultérieure. Dans le cas de la boucle externe de la commande indirecte, celle-ci est réalisée grâce à un régulateur PI. Sa synthèse suivra la même démarche que celle de la boucle interne.

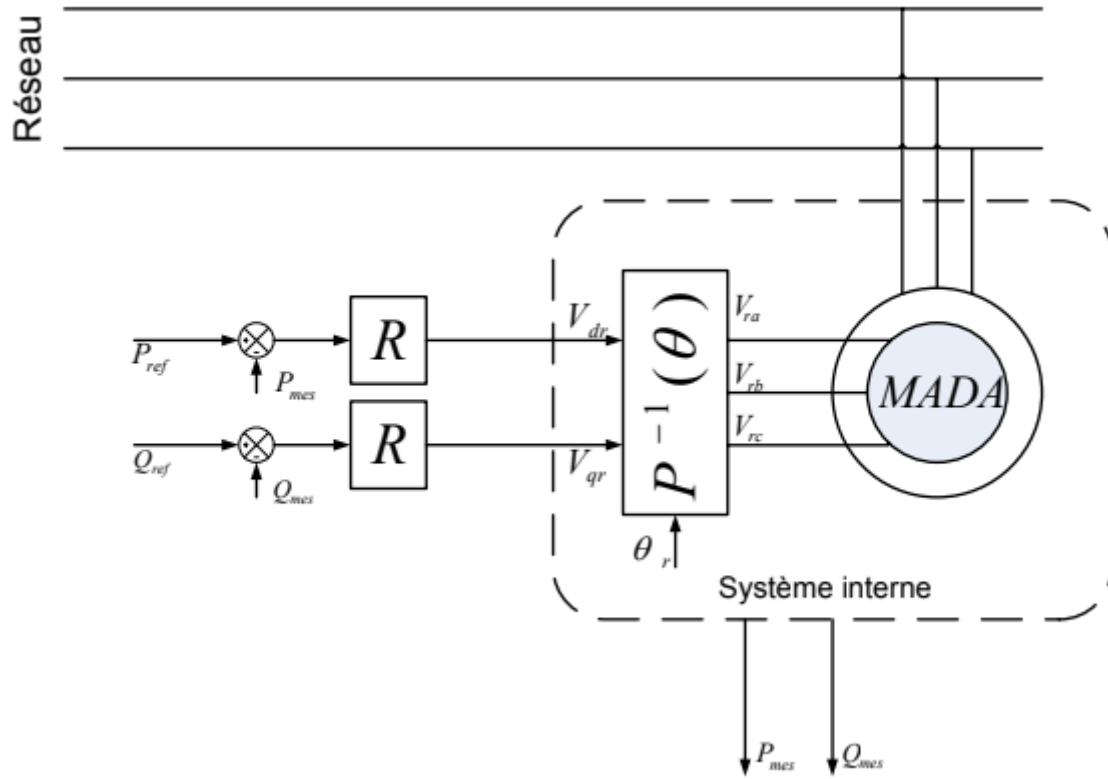


Figure III.3.1. Schéma bloc de la commande direct

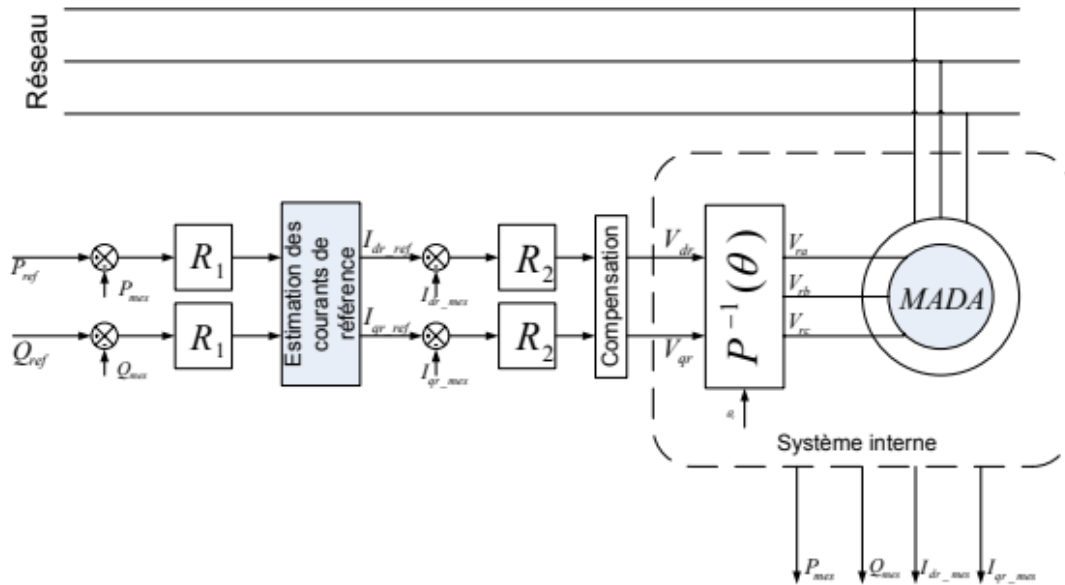


Figure III.3.2 . Schéma bloc de la commande indirecte.

III.2.1.Régulateurs PI

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

Comme il a été illustré dans les paragraphes précédents, chaque axe comprend un régulateur

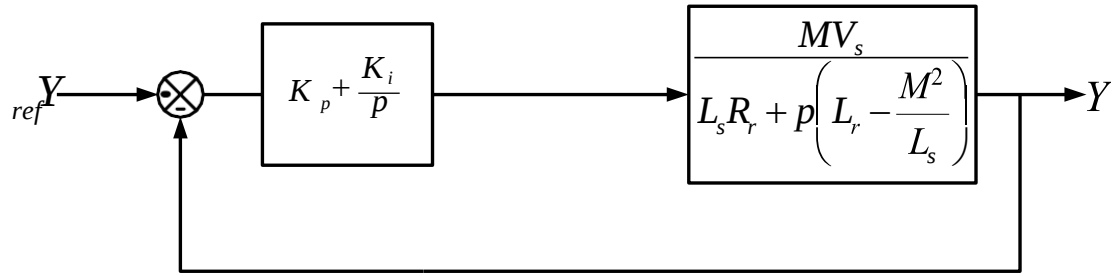


Figure III.3.3. Système régulé par un régulateur PI

La Fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec le régulateur PI s'écrit alors :

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{M \cdot V_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p + \frac{L_s \cdot R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad (III.1)$$

La méthode de compensation des pôles est celle choisie pour la synthèse des régulateurs [14]. Ainsi nous aurons l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s \cdot R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (III.2)$$

Il est à noter que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs en dépendent directement. Dans le cas contraire la régulation sera défailante.

En effectuant la compensation de la fonction de transfert en boucle ouverte, celle-ci devient :

$$FTBO = \frac{K_p \cdot \frac{M.V_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p} \quad (III.3)$$

En boucle fermée nous aurons :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \text{ avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{M.V_s} \quad (III.4)$$

Le temps de réponse T_r sera choisi lors de la simulation afin d'offrir le meilleur compromis entre performances et rapidité. D'autant plus qu'une valeur non adaptée causerait des perturbations lors des régimes transitoires et provoquerait des dépassements et des instabilités indésirables [13].

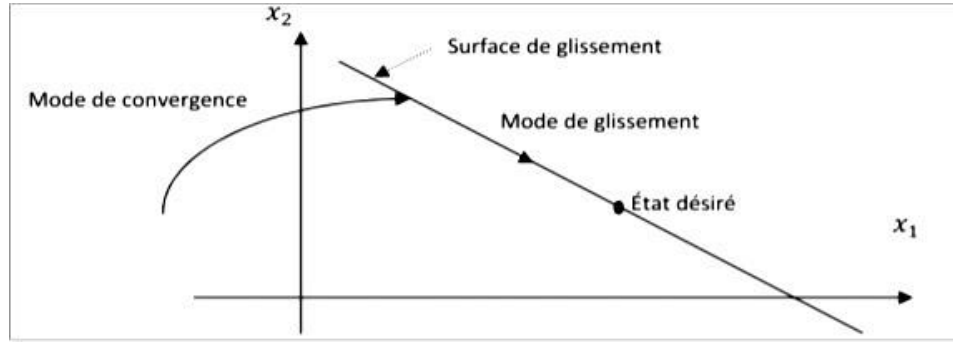
Ainsi, les gains des correcteurs seront exprimés en fonction des paramètres de la machine comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{M.V_s} \\ K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s.R_r}{M.V_s} \end{array} \right\} \quad (III.5)$$

Il est clair que la méthode de la compensation des pôles n'est pas la seule alternative permettant la synthèse des régulateurs PI. Toutefois cette méthode procure l'avantage d'être rapide à mettre en œuvre sur une fonction de premier ordre [14].

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.3.4**)



FigureIII. 3.4. la convergence vers la surface et ensuite le glissement le long

III.3.1.Synthèse de la loi de commande :

La synthèse de la commande par modes glissants représente complén ois tapes

III.3.1.1 Choix de la surface de glissement :

Soit le système décrit par l'équation différentielle suivante :

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

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 :

$$e = x - x_d \quad (III.2)$$

La formule générale de la surface de glissement est définie en fonction de l'ordre du système comme suit : [5]

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

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 :

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 :

$$\dot{s} \cdot s < 0 \quad (III.3)$$

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 : [5]

$$\dot{s} \cdot s \leq -\eta |s|, \eta > 0 \quad (III.4)$$

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 :

$$S=0 \quad \dot{s}=0 \quad (III.5)$$

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 (**figureIII.3.5**) assurant une convergence et un régime glissant.

$$u = u_{eq} + u_d \text{ avec } u_d = -\alpha \sin(s) \quad (\text{III.6})$$

- α est une constante positive.
- $\sin$ est la fonction signe .
- u_d est la commande discontinue.

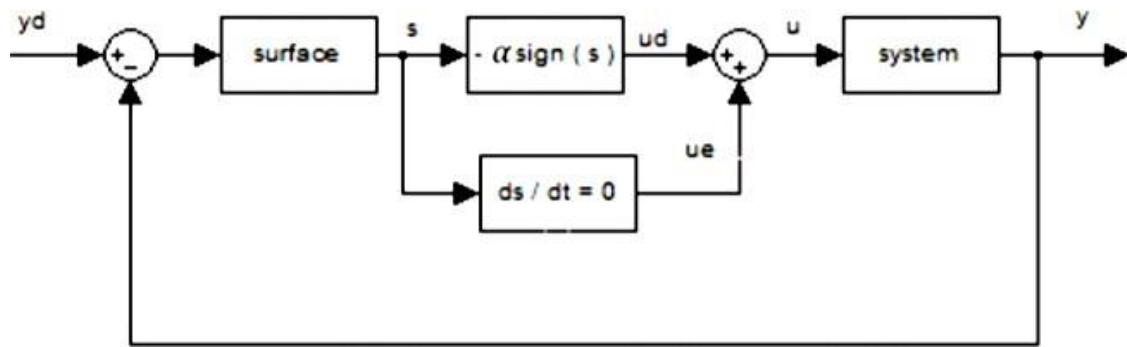


Figure III.3.5: Principe de la commande en mode glissant avec commande équivalent

III.4. La Simulation :

III.4.1 Le schéma de simulation :

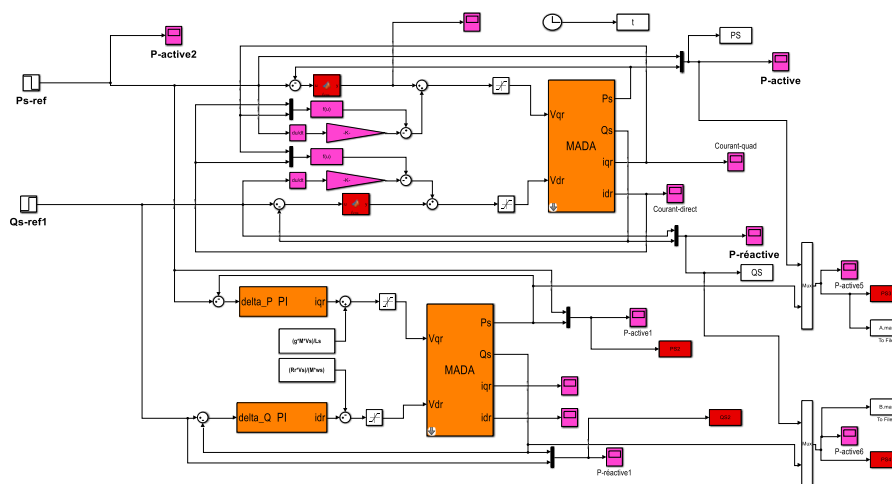


Figure III.3.6. Schéma de simulation

III. 4.2 Les résultats :

III.4.2.1 Suive de consigne :

La machine est d'abord testée en mode conditions idéales et mise en rotation à 1500 tr/min. Différentes entrées en échelon pour une puissance active et une puissance réactive sont appliquées, et les réponses dynamiques des deux contrôleurs PI et SMC sont illustrées dans la Figure «37. D'après les résultats de la simulation de la dynamique de la puissance active ou réactive, on constate une réponse plus rapide pour le contrôleur SMC, les échelons sont correctement suivis et il n'y a plus d'erreur sur les puissances. Le découplage entre les deux puissances est parfaitement respecté.

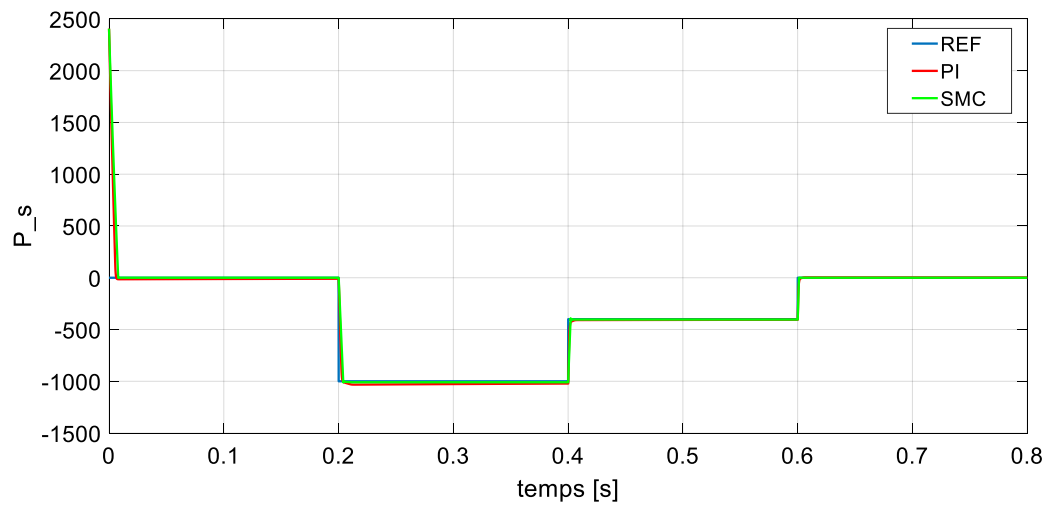


Figure (III.3.7) puissance active

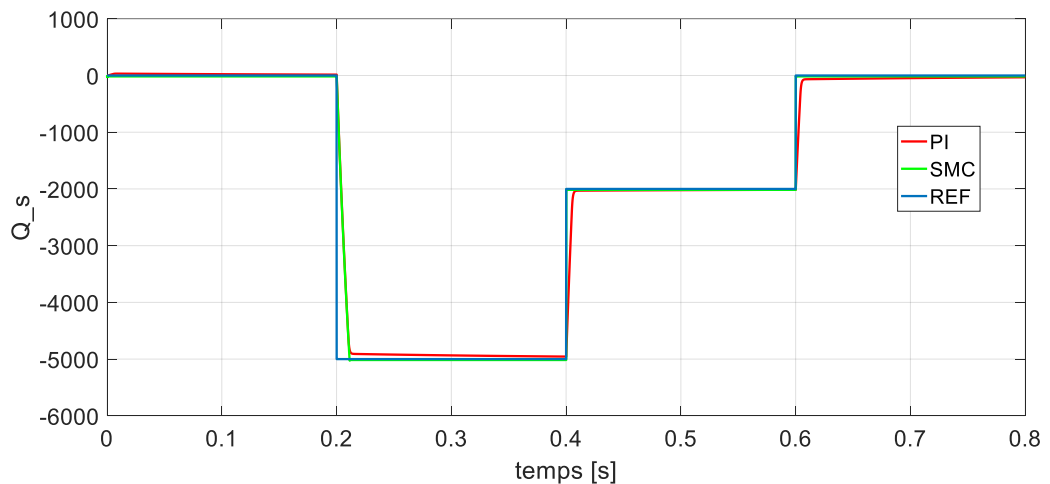


Figure (III.3.8) puissance réactive

Afin de tester la robustesse du SMC, la valeur de la résistance du rotor est doublée par rapport à sa valeur nominale, la valeur de l'inductance du rotor est augmentée de 50% de leurs valeurs nominales et la valeur de l'inductance mutuelle est diminuée de 10% de sa valeur nominale. Les Figures 8 et 9 montrent l'effet de la variation des paramètres sur les réponses de la puissance active et réactive pour les contrôleurs PI et SM. Ce test de robustesse montre que dans le cas d'un contrôleur PI, la réponse temporelle est fortement modifiée tandis qu'elle est presque inchangée lorsque le contrôleur SMC est utilisé.

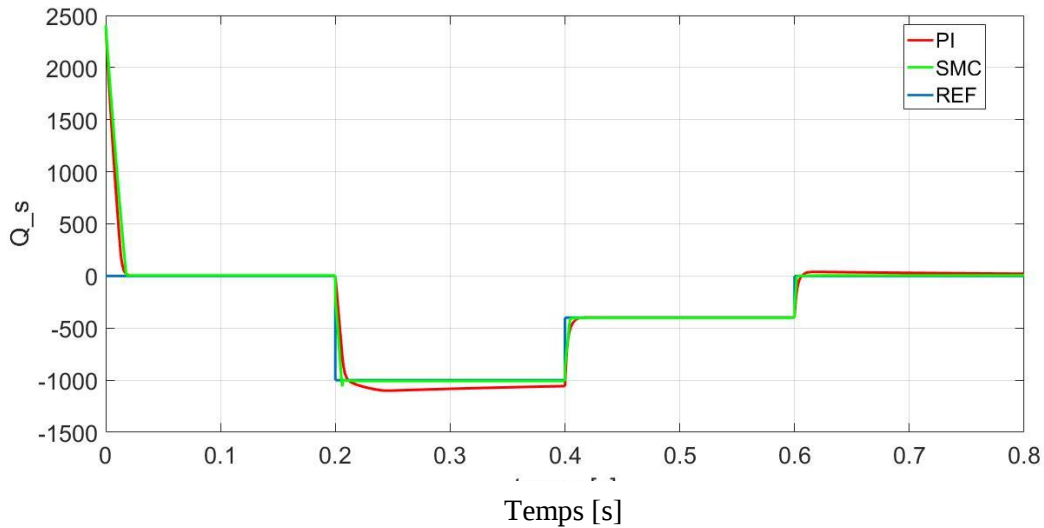


Figure (III.3.9) puissance réactive

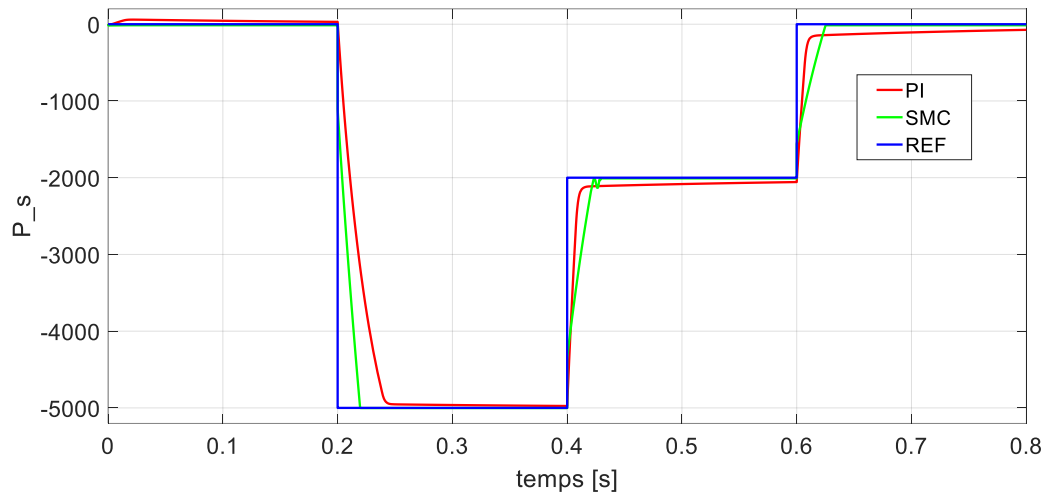


Figure (III.3.10) puissance active

La Figure 12 est incluse pour montrer la réponse comportementale des deux contrôleurs à un changement en échelon de la puissance active et réactive.

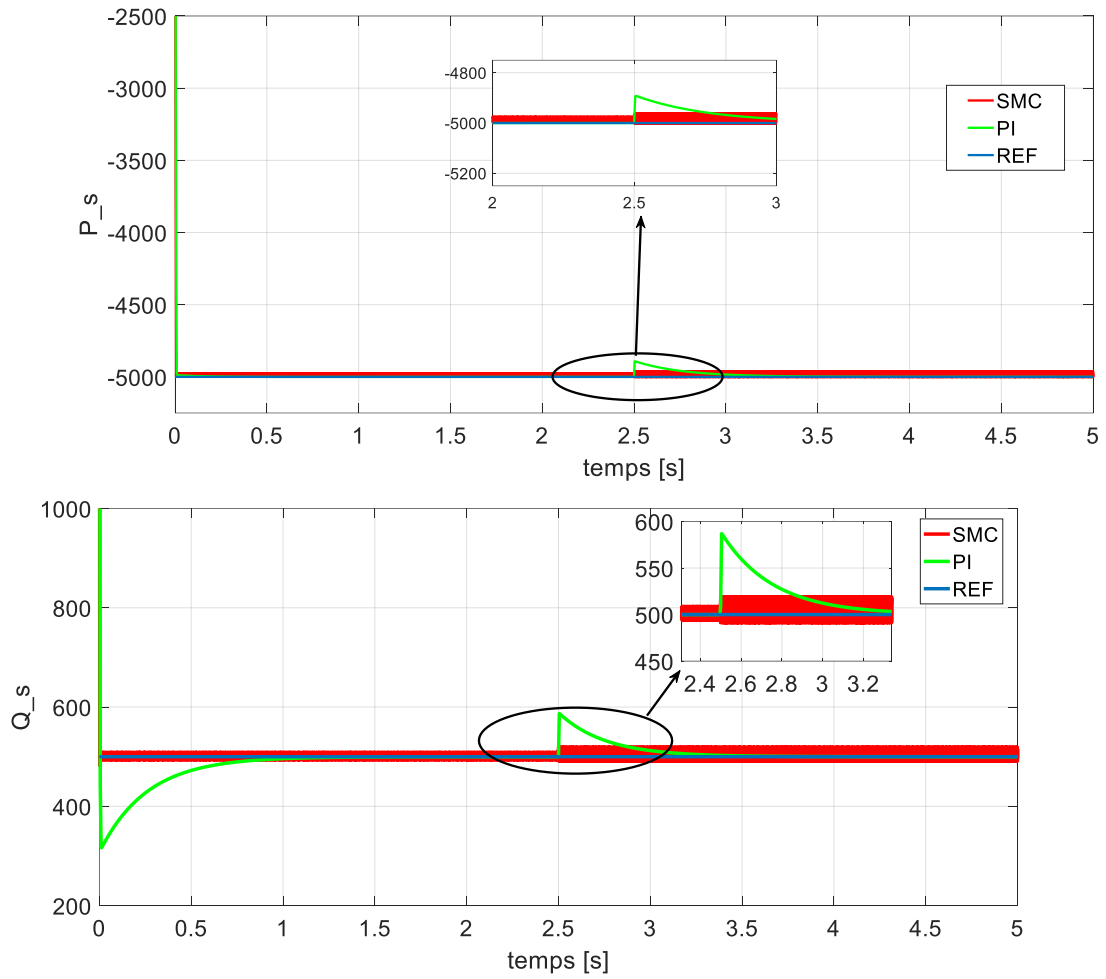


Figure (III.3.11)(puissance active) Figure (III.3.12)(puissance réactive)

A partir des résultats de simulation de la puissance active ou réactive dynamique, on note une réponse plus rapide pour le SMC contrôleur, les étapes sont correctement suivies et il n'y a pas plus d'erreur sur les puissances. Le découplage entre les deux les pouvoirs sont parfaitement respectés. Le signe négatif du la puissance réactive montre que le générateur fonctionne enmode capacitif ; pour le mode inductif, la puissance devient automatiquement positif.

III.5.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons développé un contrôle de découplage méthode des puissances actives et réactives pour un DFIG. De plus, deux types de contrôleurs utilisant respectivement, des contrôleurs PI et SMC sont synthétisés pour effectuer un suivi de référence de puissance et efficace rejet des perturbations. Les résultats montrent qu'avec SMC, le temps de stabilisation est considérablement réduit, dépassement de pointe des valeurs sont limitées et les oscillations sont amorties plus rapidement par rapport au contrôleur PI conventionnel. La réponse transitoire fournie par le SMC a été la meilleure par rapport au contrôleur PI conventionnel.

Note :

Les figures a 8 vers 12 sont des graphes de résultat.

Conclusion générale

Conclusion

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de la commande en puissance active et réactive pour l'entraînement de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Dans ce but, deux stratégies de contrôle ont été proposées: la commande vectorielle à base de régulateur PI et la commande par mode glissant. Le présent travail contribue à la conception de stratégies de commande classique et robuste de la machine asynchrone à double alimentation en terme : de suivi des consignes, de sensibilité aux perturbations et de robustesse vis-à-vis les variations paramétriques de la GADA. Nous pouvons noter alors

- que la GADA fonctionnait d'une façon efficace dans les conditions auxquelles nous l'avons soumise.
- que les résultats obtenus dans cette thèse démontrent également les bonnes performances de la loi de commande proposées les variations paramétriques de la GADA.
- que les lois de commande proposées sont simples et efficaces, aussi avec une preuve de stabilité complète.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la GADA sont envisageables :

- L'étude des perturbations du fonctionnement de la GADA vis à vis des déséquilibres du réseau.
- L'utilisation des différentes commandes proposées dans ce mémoire associés aux autres commandes, tels que, le réseau neuronal, intelligence artificielle et le régulateur par méthode floue.

Bibliographié

Bibliographié

- [1] :**M. Kassa IDJDARENE**, « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes », thèse de Doctourat, Université Abderrahmane MIRA – Béjaia, 23 /5/ 2010.
- [2] **R. Ramakumar, P. Chiradeja**, « Distributed generation and renewable energy systems 3 », 37th intersociety energy conversion engineering conference, IECEC 2002 paper N°7, pp. 716-724.
- [3] **MAYOUF MESSAOUD** « contribution a la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents » magister, université de Batna ,13/02/2008.
- [4] **HARITZA CAMBLONG** « minimisation de l'impact des perturbation d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » doctorat, école nationale supérieure d'arts et métiers centre de bordeaux ,2003.
- [5] **FARID MERRAHI** « alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) » diplôme de magister, école nationale polytechnique, 30/06/2007
- [6] **KHETTACHE LAID** « étude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée » diplôme de magister, université de Batna ,2007.
- (7)**M.A. HASSAD**, « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques », thèse de magistère, Université SETIF 1, 2012.
- (8)**BENNOUR CHERIF** « simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » magister, université Mohamed khider – Biskra, 19/11/2012.
- [9]**lam Jar Allah Boulegroune** Etude et réalisation 'une turbine éolienneUniversité Mohamed Khider Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie2019 / 2020
- [10] **A. Guettaf**, Optimisation floue-génétique d'un système de pompage éolien, Thèse
- [11] **W. A. HILL, R. A. TURTON, R. J. DUNGAN and C. L. SCHWALM**, « A Vector Controlled Cycloconverter Drive for an Icebreaker », IEEE Trans, On Industry Applications, Vol. IA-23, N°6,pp.1036-1042, November/December 1987.
- [12] **Sim Power Systems User's Guide**, The Mathworks Inc,2011
- [13] **A .BOYETTE**, "Contrôle - commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", thèse de doctorat, Université Henri, Nancy 1, 11 décembre 2006.
- [14] **F.POITIER**, "Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003.

