

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Machiné Electrique

**Thème**

**Contribution à la Commande d'un  
Système éolien**

**Dirigé par:**

LEJDEL THELEB ABDELOUAHED

LEJDEL ALI YAHIA

TRIKI HAMROUNI

KHALIL TAMMA

**Réalisé :**

Dr: TRIA FATMA ZAHRA

Année Universitaire : 2021/2022

A decorative scroll with a light blue background and a dark blue outline. The scroll is unrolled at the top and bottom, with two tassels hanging from the sides. The tassels are made of blue and orange threads. The word "REMERCIEMENTS" is written in a dark blue, serif font across the top of the scroll. The text of the thank-you message is centered on the scroll in a dark blue, serif font.

# REMERCIEMENTS

**NOUS TENONS A REMERCIER DIEU  
LE TOUT PUISANT POUR LA  
VOLONTE, LA SANTE, LA  
PATIENCE, QU'IL NOUS ADONNE  
DURANT TOUTES CES LONGUES  
ANNEES D'ETUDES.**

**NOUS REMERCIE EN PARTICULIERS  
NOTRE ENCADREUR TRIA  
FATMA ZAHRA, QUI NOUS  
INSPIRE LE SUJET ET GUIDE A  
CE TRAVAIL.**

**NOS REMERCIEMENTS VONT AUX MEMBRES DE  
JURY QUI ONT ACCEPTE DE JUGER NOTRE TRAVAIL  
ET POUR L'INTERET QU'ILS ONT PORTE A CE  
DERNIER**

## ملخص :

يتمثل البديل في استغلال الطاقات المتجددة التي توفر إمكانية إنتاج الكهرباء وخاصة في تقليل الاعتماد على الموارد بشرط قبول تقلباتها الطبيعية. تعمل توربينات الرياح متغيرة السرعة على زيادة كفاءة الطاقة وتحسين جودة الطاقة المنتجة مقارنة بتلك التي تعمل بسرعة ثابتة لزيادة الطاقة الملتقطة إلى أقصى حد ، يتم تطبيق تقنية استخراج الطاقة القصوى (MPPT). يتم توصيل الجزء الثابت من MADA مباشرة بالشبكة ، من ناحية أخرى ، يتم توصيل الدوار الخاص بها بالأخير عبر سلسلة (مقوم \_ DC link\_inverter).

## Résumé :

Une alternative ,consiste à exploiter les énergies renouvelables qui offrent la possibilité de produire de l'électricité et surtout dans une moindre dépendance des ressource à condition d'accepter leurs fluctuation naturelles. L'éolienne à vitesse variable permet d'augmenter le rendement énergétique et d'améliorer la qualité de l'énergie produit par rapport à celle qui fonctionnant à vitesse fixe pour maximiser la puissance captée ,la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) est appliquée .le stator de la MADA est directement relié au réseau par contre son rotor est connecté à ce dernier via une cascade (redresseur \_DC link\_onduleur).

**Mot clés :** énergie éolienne , génératrice , MPPT , régulateur PI , régulateur à structure variable , logique flou .

## Liste des symboles

$C_{Turbine}$	Couple de la turbine.
$C_{mec}$	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne.
$C_e ; C_r ; C_f$	Couple électromagnétique, couple résistant et couple de frottement.
$\omega$	Vitesse de rotation électrique ( $\omega = p\Omega$ ).
$\omega_s ; \omega_r$	Pulsation électrique statorique et rotorique.
$R_s ; R_r$	Résistance d'une phase statorique et rotorique.
$L_s ; L_r$	Inductances cycliques statorique et rotorique.
$L_m$	Inductance mutuelle cyclique stator-rotor (magnétisante).
$M_s ; M_r$	Inductances mutuelles stator-stator et rotor-rotor.
V	Tension
I	Courant.
$\Phi$	Flux.
$Q_s ; Q_r$	La puissance réactive au stator et au rotor.
$P_s ; P_r$	La puissance active au stator et rotor.
$P_{mes} ; Q_{mesq}$	Puissances électriques mesurées à la sortie du MADA.
$P_{ref} ; Q_{ref}$	Puissances électriques de références de la MADA.
P	Nombre de paires de pôles de la MADA.
$V_s$	Module du vecteur tension statorique.
$U_f$	Tension aux bornes du capacité du filtre.
$U_d$	Tension redressé.
$\Omega_s$	Vitesse de rotation de la machine.
$L_f$	Inductance du filtre LC.
$C_f$	Capacité du filtre LC.
$\Phi_{sd} ; \Phi_{sq}$	Flux statorique selon l'axe d,q
$\Phi_{rd} ; \Phi_{rq}$	Flux rotorique selon l'axe d,q
$V_{sd} ; V_{rq}$	Tension statorique selon l'axe d,q
$V_{rd} ; V_{rq}$	Tension rotorique selon l'axe d,q
$I_{sd} ; I_{sq}$	Courant statorique selon l'axe d,q
$I_{rd} ; I_{rq}$	Courant rotorique selon l'axe d,q
$\theta$	Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.
$\theta_s$	Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe d
$\theta_r$	Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d.
g	Glissement
$T_r$	Temps de réponse du système
$F_r$	Fréquence de rotor
$F_s$	Fréquence de stator
$k_p ; k_i$	Constantes du régulateur PI

## **SOMMAIRE**

Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE 1 Généralités sur les systèmes éoliens.....</b>	<b>3</b>
1. Introduction.....	4
2. Historique de l'éolien .....	4
3. Etat de l'art sur l'énergie éolienne .....	5
3.1 Définition de l'énergie éolienne .....	5
3..2. Définition de l'aérogénérateur.....	6
3.3. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	6
3.3.1 Avantages.....	6
3.3.2 Inconvénients .....	7
3.4 Différents types d'éoliennes .....	7
3.4.1 Eoliennes à axe vertical.....	7
3.4.2 Aérogénérateur à axe horizontal.....	9
3.5 Principales composantes d'éolienne.....	10
3.6 Synthèse des différentes éoliennes.....	12
3.7 Zone de fonctionnement d'une éolienne .....	15
4 Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens.....	15
4.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone à cage (MAS).....	16
4.2 Systèmes utilisant la machine synchrone.....	16
4.3 Machines asynchrones à double stator.....	17
4.4 Machine asynchrone à double alimentation.....	18
4.4.1 Structure de la machine .....	19
4.4.2 Modes de fonctionnement de la MADA.....	19
4.4.2.a Cas du fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone .....	20
4.4.2.b Cas du fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.....	20
4.4.2.c Cas du fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone .....	20
4.4.2.d Cas du fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone .....	20
4.4.3 Avantages et Inconvénients de la MADA.....	21
5 Domaines d'application de la MADA .....	22
6 Conclusion .....	23
<b>CHAPITRE 2 Modélisation de la chaîne de conversion à base d'une MADA....</b>	<b>24</b>
1 Introduction.....	25
2 Modélisation de la partie mécanique.....	25

2.1	Modèle du vent.....	25
2.2	Modélisation de la turbine éolienne.....	26
2.3	Modèle de multiplicateur.....	27
2.4	Hypothèses simplificatrices.....	28
2.5	Equation dynamique de l'arbre.....	28
3	Représentation de la machine asynchrone à double alimentation .....	29
3.1	Equations de la MADA.....	29
3.2	Equations électriques .....	30
3.3	Les équations magnétiques.....	31
3.3.1	Les transformations usuelles .....	33
3.3.1.a	La transformation de Park .....	33
3.3.1.b	La transformation de Concordia.....	34
3.3.1.c	La transformation inverse est définie par .....	34
3.4	Représentation de Park de la MADA dans un repère ( $d-q$ ).....	35
3.5	Expression du couple électromagnétique.....	36
3.6	Expression des puissances actives et réactive .....	37
3.7	Equation mécanique.....	37
4	Modélisation de l'onduleur de tension.....	37
5	Commande MLI .....	39
6	Conclusion.....	40

### CHAPITRE 3 Commande vectorielle d'un générateur asynchrone à double alimentation.41

1.	Introduction.....	42
2.	Principe de la commande vectorielle.....	42
3.	Stratégie de commande en puissance active et réactive de la MADA.....	44
3.1	Relations entre courants statoriques et courants rotoriques.....	45
3.2	Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	47
3.3	Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	48
4	Contrôle indépendant de la puissance active et réactive.....	50
4.2	Commande directe.....	50
4.2	Mise en place de la régulation.....	50
4.3	Etude de la régulation pour la commande.....	51
5	Types de la commande vectorielle:.....	52
5.1	Commande vectorielle directe:.....	52
5.2	Commande vectorielle indirecte.....	52
6	Calcul des paramètres du régulateur PI.....	53

7	Résultats de simulation .....	55
7.1	Essai fonctionnement à vitesse fixe.....	55
7.2	Interprétation des résultats.....	58
8	Résultats de simulation.....	59
8.1	Interprétation des résultats .....	62
9	teste de robustes.....	62
9.1	Variation de la résistance rotorique .....	63
9.2	Variation de la vitesse du vent .....	64
10	CONCLUSION .....	65
	CONCLUSION GENERALE.....	66

## *Liste des figures*

### **CHAPITRE 1 Généralités sur les systèmes éoliens.....**

**Figure I. 1** Conversion de l'énergie cinétique du vent

**Figure I.2** Principaux organes du système de conversion éolien

**Figure I.3** Eoliennes à axe vertical

**Figure I.4** Aérogénérateur à axe horizontal

**Figure I.5:** Caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne

**Figure I.6** Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)

**Figure I.7** Système éolien basée sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.

**Figure I.8** Machine synchrone reliée au réseau par interface d'électronique de puissance.

**Figure I.9** Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator

**Figure I.10** Chaîne de conversion à base d'une GADA

**Figure I-11**– Bilan de puissance de la MADA dans les différents modes de fonctionnement

### **CHAPITRE 2 Modélisation de la chaîne de conversion à base d'une MADA.....**

**Figure II-1:** Simulation du profil de la vitesse du vent appliqué à la turbine.

**Figure II-2 :** Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

**Figure II-3:** Représentation de la machine asynchrone à double alimentation

**Figure II-4:** Représentation de la transformation  $abc \Rightarrow dq$

**Figure II-5 :** Le schéma de l'onduleur triphasé et de sa charge.

**Figure II-6:** schéma de la commande MLI sinus réalisé avec SMULINK

### **CHAPITRE 3 Commande vectorielle d'un générateur asynchrone à double alimentation.....**

**Figure III.1 :** Principe de commande découplée pour la machine à MCC à excitation séparée et la machine asynchrone à double alimentation

**Figure III.2 :** Orientation du flux statorique sur l'axe d

**Figure III.3:** Schéma bloc de la MADA.

**Figure. III.4:** Schéma bloc de la commande directe.

**Figure. III.5:** Schéma bloc du système de régulation

**Figure. III.6** Vitesse de rotation et courant de la phase a du stator

**Figure. III.7** : Puissance active de stator avec un zoom.

**Figure. III.8** : Puissance réactive de stator avec un zoom.

**Figure. III.9** : Courant statorique selon l'axe d et l'axe q

**Figure. III.10** : Puissance active et réactive du rotor

**Figure. III.11** : Tensions et courants rotoriques

**Figure. III.12** : Schéma-bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent

**Figure. III.13** : Vitesse du vent et coefficient de puissance  $C_p$

**Figure. III.14** ; Couple de la turbine  $C_t$  et couple électromagnétique

**Figure. III.15** : Puissance active et réactive du stator avec un zoom

**Figure. III.16** : Courant d'une phase du stator et glissement  $g$

**Figure. III.17** : Puissance active et réactive du rotor

**Figure. III.18** : Tensions ( $V_{ar}$ ,  $V_{br}$ ,  $V_{cr}$ ) et courants rotoriques ( $I_{ar}$ ,  $I_{br}$ ,  $I_{cr}$ )

**Figure. III.19** : Puissance active et réactive du stator obtenues par régulateur PI

**Figure. III.20**: Puissance active et réactive du stator obtenues par le régulateur PI avec une augmentation de 30% de la résistance rotorique

**Figure. III.21**: Puissance active et réactive du stator obtenues par régulateur PI

## *Liste des Tableau*

### **CHAPITRE 1 Généralités sur les systèmes éoliens**

**Tableau I -1 : Avantages et inconvénients des différentes éoliennes**

**Tableau I -2 : Capacité de réglage des différentes éoliennes**

# *Introduction générale*

## Introduction générale

L'énergie éolienne semble être la réponse au réchauffement climatique. Pour atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050 requise par l'Accord de Paris, il convient de diminuer drastiquement nos émissions de gaz à effet de serre. Les domaines les plus énergivores sont principalement concernés, notamment le secteur de l'électricité qui a un lourd impact sur l'environnement (à l'origine de 90 % des émissions de CO<sub>2</sub> dans le monde). [19].

Des premiers efforts ont déjà été fait grâce à la mise en place d'éoliennes qui n'émettent aucun GES. Malgré ces imposantes structures qui habillent les paysages, cette énergie protège l'environnement en profitant de la force du vent pour produire de l'électricité. Greenly fait le point de cette énergie renouvelable prometteuse.. [19].

La littérature atteste l'importance grandissante accordée aujourd'hui à la machine doublement alimentée (MADA) pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies éoliennes ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime, [07].

La multiplication des éoliennes dans le monde a conduit les recherches de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et à optimiser la qualité d'énergie produite. Les premières machines électriques qui furent utilisées dans le domaine éolien étaient des machines asynchrones. En effet, ces machines présentent plusieurs avantages tels que leur moindre coût, leur robustesse et leur entretien réduit. L'éolienne à vitesse variable permet d'augmenter le rendement énergétique et d'améliorer la qualité de l'énergie produite par rapport à celle fonctionnant à vitesse fixe .pour maximiser la puissance captée, la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) est appliquée[02].

C'est dans ce contexte général que vient s'inscrire notre étude qui porte sur l'une des énergies renouvelables en développement actuellement qui est l'énergie éolienne avec une chaîne de conversion à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Pour mener à bien ce travail, nous l'avons scindé en trois chapitres :

Le premier chapitre est un état de l'art des énergies éoliennes. Aussi une description sommaire des différents éléments d'un aérogénérateur sera présentée. L'accent a été mis sur la chaîne de conversion utilisant une MADA.

Le second chapitre est consacré à la modélisation mathématique de l'ensemble des éléments qui constituent une chaîne de conversion éolienne à base d'une MADA. En effet, nous avons développé le modèle mathématique de la MADA au sens de Park (très utilisé pour les problèmes de réglage des machines alternatives) et de l'onduleur de tension et de sa commande par modulation d'impulsion[07].

Le dernier chapitre,

# *Chapitre 1*

*Généralités sur les systèmes éoliens*

## 1 Introduction :

L'énergie éolienne est une des formes d'énergie renouvelable, elle est directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent.

A travers le développement des éoliennes, celles des dernières générations fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

Dans ce présent chapitre, nous allons définir l'énergie éolienne ainsi que les différents constituants d'un dispositif éolien, avec une classification de ces dernières selon leurs aspect physique et mécanique ajoutant un passage sur des avantages et inconvénients de l'énergie éolienne, par la suite une autre classification selon le type de générateur utilisés.

Enfin, une présentation de différentes structures de la MADA, ainsi que ses types de fonctionnement et de connexion au réseau et ses avantages[09]

## 2 Historique de l'éolien

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2000 ans avant J-C environ [25].

Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant

J-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Âge. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés.

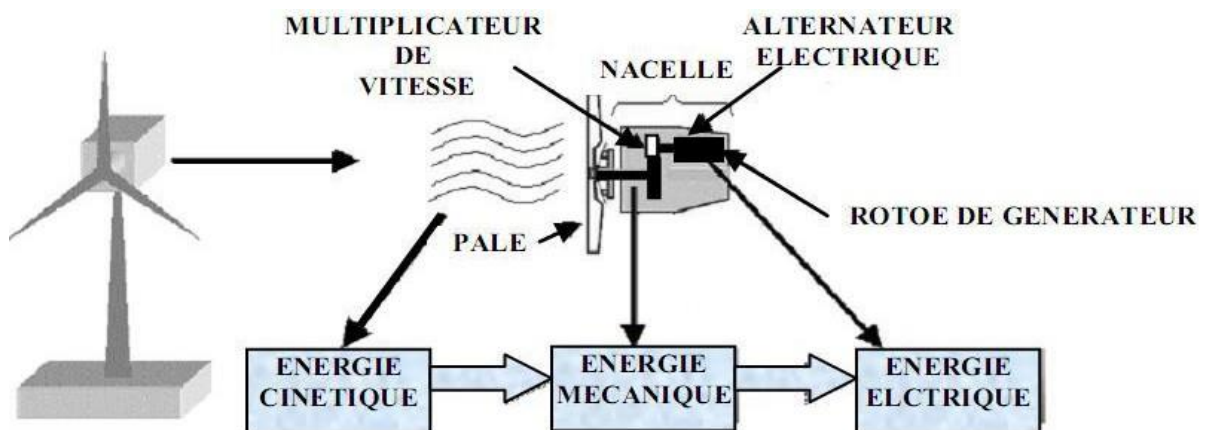
Dès le XIV<sup>e</sup> siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et au Danemark, vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, le nombre des moulins est estimé à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. L'arrivée de la machine à vapeur a marqué le début de disparition progressive des moulins à vent [05].

L'arrivée de l'électricité a inspiré Poul La Cour en 1891, d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisée, au point que, dans les années 40 on peut compter jusqu'à 1300 éoliennes au Danemark. Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive, 6 millions de pièces fabriquées, aux États-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnaient dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde [05].

### 3 Etat de l'art sur l'énergie éolienne :

#### 3.1 Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est l'énergie extraite de l'énergie cinétique du vent par l'utilisation de turbines dédiées pour la production d'énergie électrique. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui existe dans toutes les régions, mais sa disponibilité varie d'un endroit à l'autre. C'est une énergie propre renouvelable et qui ne produit pas de pollution lors de son fonctionnement, [07].



## 1. Figure I. 1 Conversion de l'énergie cinétique du vent [07].

### 3.2 Définition de l'aérogénérateur :

Un aérogénérateur est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice, appelée Système de Conversion Eolien (SCE). Le SCE est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique et d'un transformateur, comme le montre la figure suivante 1.2 [07].

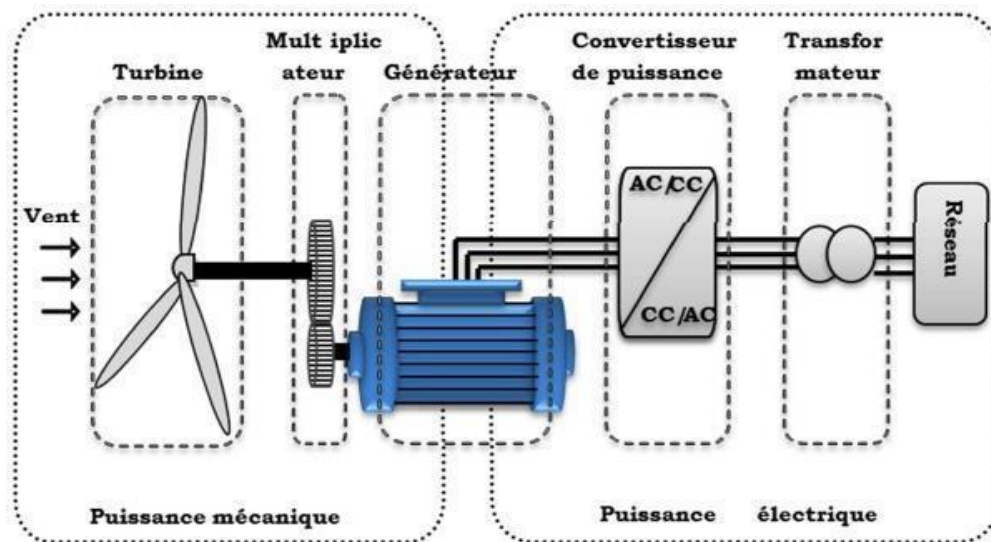


Figure I.2 Principaux organes du système de conversion éolien [01].

### 3.3 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

#### 3.3.1 Avantages :

- Renouvelable.
- Ne produit pas d'émission de CO<sub>2</sub>
- Son prix diminue petit à petit et devient concurrentiel par rapport aux autres énergies renouvelables
- Sa grande capacité est en hiver où la consommation d'électricité est en

grande quantité [07].

➤ Durée de vie entre 20 et 25 ans.

➤ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées[12].

### 3.3.2 Inconvénients :

➤ Nature intermittente (vent aléatoire).

➤ Selon des études, les turbines géantes tuent parfois certains oiseaux, notamment lors de leur migration,

➤ Le bruit diminue considérablement grâce aux progrès continus dans ce domaine. [07].

### 3.4 Différents types d'éoliennes :

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux grandes familles : celle à axe vertical et celles à axe horizontal.

#### 3.4.1 Eoliennes à axe vertical :

ces types d'éoliennes a fait l'objet de nombreuses recherches .Dans ce type l'arbre est perpendiculaire au sol ; il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice ) au niveau du sol donc pas besoin de munir la machine d'une tour, facilitant ainsi les interventions de maintenance ; mais elle présente certaines caractéristiques pénalisantes : elle ne peut pas démarrer seule(nécessité d'un dispositif de lancement), les pales sont plus chères à construire et engendre un niveau de bruit important; faible rendement aérodynamique, et grand sensibilité de à la vitesse et provoque des fluctuations importantes de puissance [15].



*Rotor de Darrieus*

*Darrieus type H*

*Rotor de Savonius*

**Figure I.3 Eoliennes à axe vertical[05].**

❖ **Avantages et inconvénients de l'éolienne à axe vertical :**

• *Avantages:*

- Fonctionnent indépendamment du sens du vent.
- Le générateur et le convertisseur de puissance se trouvent dans la base.

• *Inconvénients :*

- Le rendement faible comparé à l'éolienne à axe horizontal.
- Nécessite des tirants occupent une surface plus importante que l'éolienne à tour, [07].

### 3.4.2 Aérogénérateur à axe horizontal :

Ce type de turbine est le plus utilisé dans le monde notamment pour les moyennes et les grandes puissances en raison de son bon rendement. Les éoliennes à trois pales sont les plus utilisées [07].



Figure I.4 Aérogénérateur à axe horizontal [05].

#### ❖ Avantages et inconvénients d'Aérogénérateur à axe horizontal

- *Avantage :*

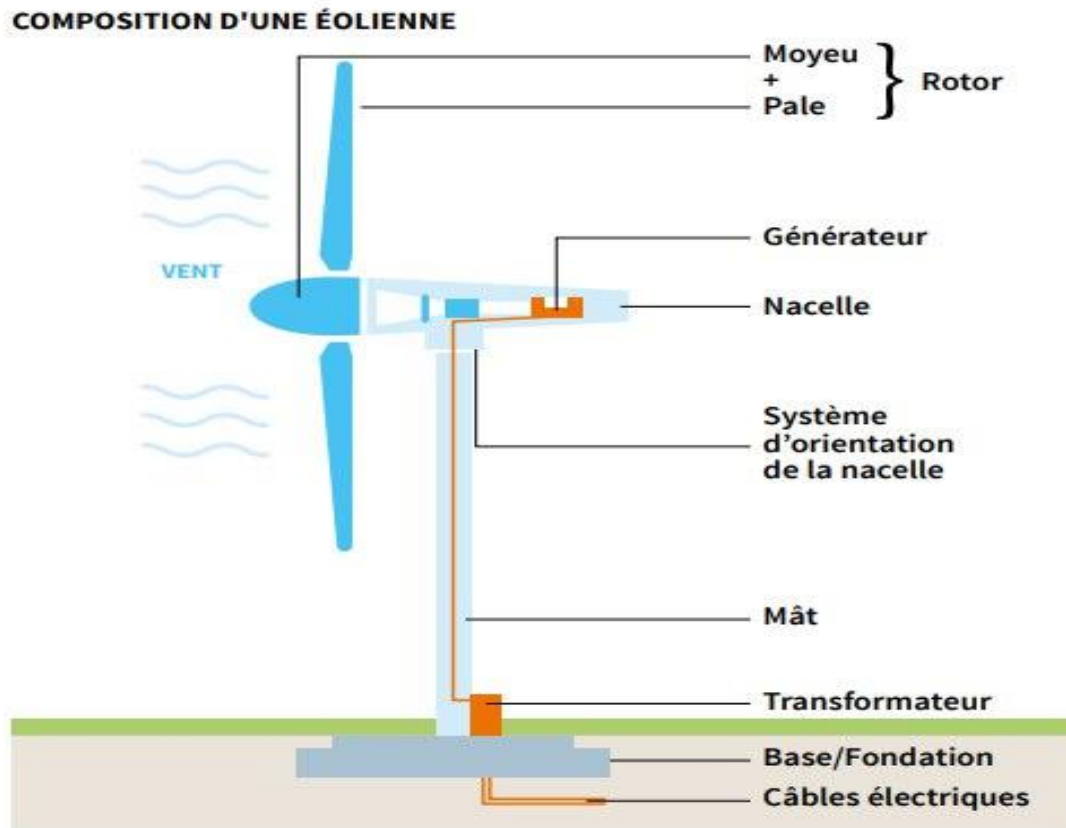
- Peu de contraintes mécaniques, [07].
- Coût faible.
- Bon rendement.

- *Inconvénients :*

- Poids de la nacelle qui contient le multiplicateur et la génératrice.
- Vibrations vibrantes.
- Sensible aux changements de vitesse et de variabilité du vent

### 3.5 Principales composantes d'éolienne :

Les principaux composants d'une éolienne sont, [07].



**Figure I.4** Illustration des composants des éoliennes [22]

- *Le mât :*

Il peut avoir plusieurs formes (pylône en treillis métalliques, mât haubané, etc), la plupart des éoliennes de forte puissance sont conçues avec une tour en acier solidement fixée à une fondation en béton ferrailé, [07].

- *La nacelle :*

Elle regroupe toutes les pièces nécessaires au fonctionnement des éoliennes. Elle est située en haut du mât et est automatiquement dirigée vers le vent. Elle comprend les éléments suivants, :

- Arbre.
- Multiplicateur.
- Roulements.
- Générateur.
- Freins mécanique à disque.

    Systèmes d'orientation de la nacelle pour que les pales soit en face du vent. [07].

- *Le rotor :*

Les pales de rotor d'une éolienne fonctionnent selon le même principe que les ailes d'avion. L'un côté de la pale est arrondi tandis que l'autre est plat. Le vent circule plus rapidement le long du bord arrondi, créant une différence de pression de chaque côté de la pale. Les pales sont « poussées » par l'air pour égaliser la différence de pression, ce qui les fait tourner.[24].

### 3.6 Synthèse des différentes éoliennes

Le Tableau 2-1 et le Tableau 2-2 rappellent les différentes caractéristiques des différentes éoliennes. [13].

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
<b>MAS</b> Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Machine robuste</li> <li>- Faible coût</li> <li>- Pas d'électronique de puissance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puissance extraite non optimisée</li> <li>- Maintenance boîte de vitesse</li> <li>- Pas de contrôle de l'énergie réactive</li> <li>- Magnétisation de la machine imposée par le réseau.</li> </ul>
<b>MADA</b> Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fonctionnement à vitesse variable</li> <li>- Puissance extraite optimisée</li> <li>- Électronique de puissance dimensionnée à 30 % de la puissance nominale</li> <li>- Machine standard</li> <li>- Connexion de la machine plus facile à gérer</li> <li>- Une magnétisation de la machine en cas de défaut sur le réseau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maintenance de boîte de vitesse</li> <li>- Prix de l'électronique de puissance</li> <li>- Contrôle-commande complexe</li> <li>- Contacte glissant bagues-balais</li> </ul>
<b>MSAP</b> Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse</li> <li>- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles</li> <li>- Connexion de la machine facile à gérer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prix de l'électronique de puissance</li> <li>- Machine spécifique</li> <li>- Électronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice</li> </ul>

**Tableau I -1** : Avantages et inconvénients des différentes éoliennes

Type d'éolienne	Interface réseau	Moyen de contrôle	Fonctionnement possible	Services système
MAS Vitesse fixe	- (Facultatif) - Gradateur - Bancs de condensateurs	- Pitch control	- Contrôle de P approximatif - Contrôle de Q approximatif si condensateur	NON
MADA Vitesse variable	- Convertisseur électronique	- Pitch control - Couple génératrice	- Contrôle de P - Contrôle de Q	- Participation limitée au : - Réglage de la fréquence - Réglage de la tension tant qu'il y'a de vent
MSAP Vitesse variable	- Convertisseur électronique	- Pitch control (ou stall) - Couple génératrice	- Contrôle de P - Contrôle de Q - Fonctionnement en isolé	- Réglage de la fréquence - Réglage de la tension - Ilotage tant qu'il y'a de vent

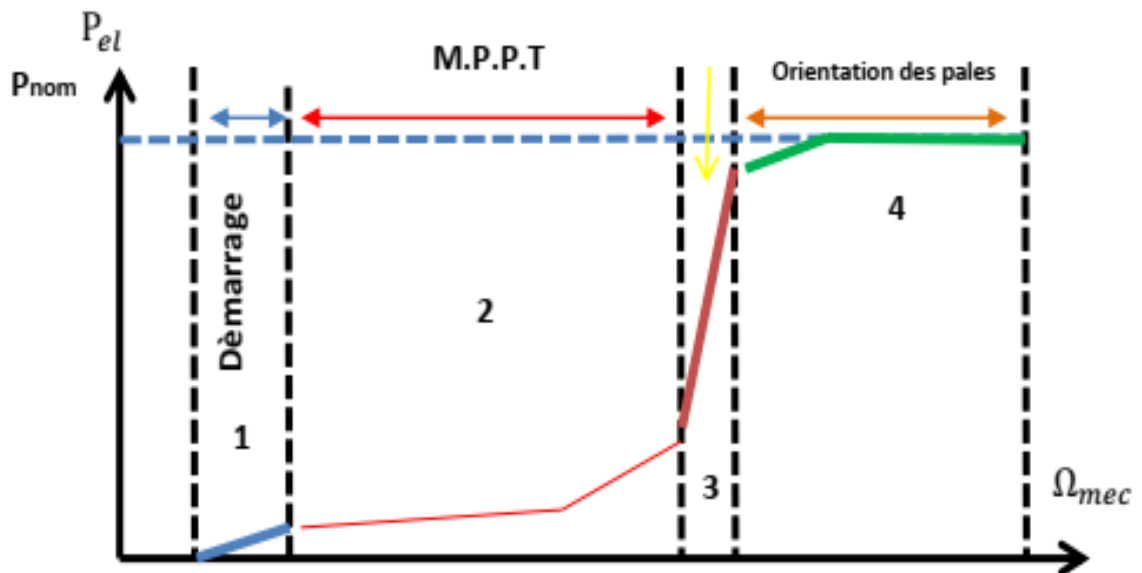
**Tableau I -2** : Capacité de réglage des différentes éoliennes

### 3.7 Zone de fonctionnement d'une éolienne :

Les objectifs de la commande de l'aérogénérateur sont : l'extraction de la puissance

maximale disponible tout en assurant la sécurité du système contre les vents forts.

La figure suivante illustre les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne, [07].



**Figure I.5:** Caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne, [02]

Avec :

- $V_d$  : la vitesse de démarrage qui varie autour de 5 m/s en fonction de l'éolienne.
- $V_{max}$  : la vitesse maximale du vent, pour laquelle la turbine doit s'arrêter, pour des raisons de sécurité.
- $V_n$  : la vitesse nominale à partir de laquelle l'éolienne est en pleine production.

Les vitesses  $V_d$ ;  $V_m$ ;  $V_n$  définissent quatre zones en fonction de la vitesse du vent :

- ✓ **Zone I :** la turbine ne fonctionne pas.
- ✓ **Zone II :** la puissance générée dépend de la vitesse du vent  $V$  (on utilise une technique MPPT pour extraire le maximum de puissance).
- ✓ **Zone III :** La vitesse de rotation de l'éolienne est maintenue constante pour fournir une puissance nominale constante.
- ✓ **Zone IV :** dans laquelle l'éolienne est freinée (position drapeau + un frein mécanique).

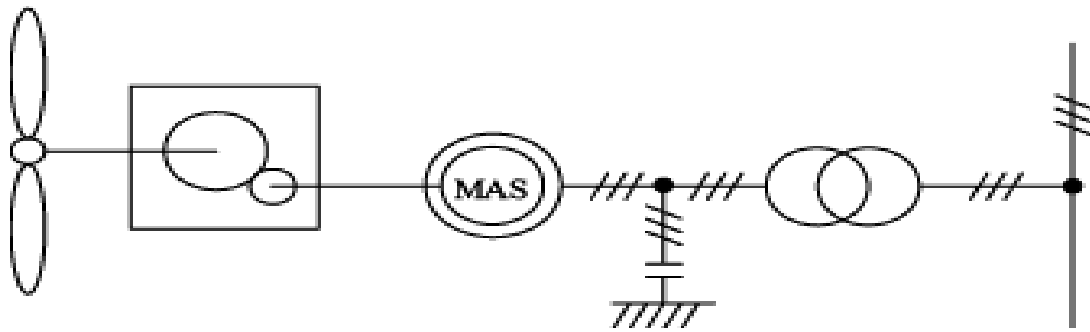
## 4 Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens :

Les structures des chaînes de conversion utilisées dans les éoliennes sont liées au type de la génératrice utilisée. Différents types de machines électriques peuvent être utilisées pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir[07]. :

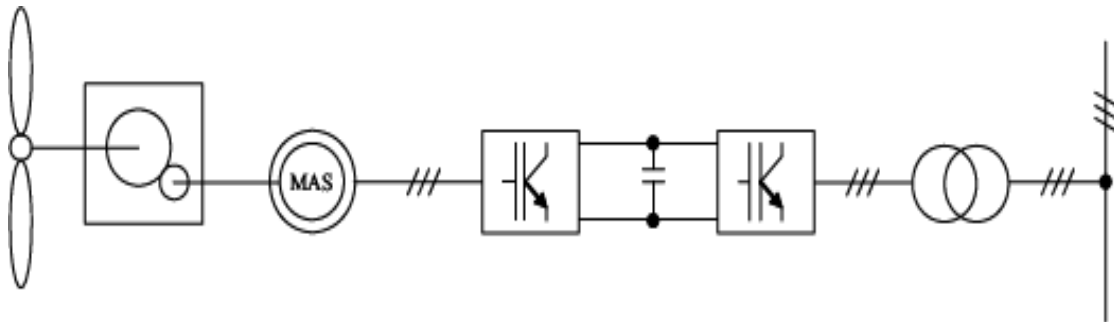
- Le niveau de puissance produite.
- Eolienne sur terre ferme (Onshore) ou en mer (Offshore).
- Eolienne isolée ou connectée au réseau électrique.

### 4.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone à cage (MAS) :

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les plus fiables et nécessitent peu d'entretien. Dans les aérogénérateurs de moyenne et grande puissance (rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Cependant, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire de faire recours à un multiplicateur de vitesse à rapport variable entre l'arbre lent (coté turbine) et l'arbre rapide (coté génératrice) pour avoir une tension et une fréquence fixe, figure 1.6. Ce multiplicateur complexe peut être supprimé, et la génératrice fournit de l'électricité à travers un convertisseur de puissance électronique pour adapter la tension au réseau, figure 1.7. Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible, [07].



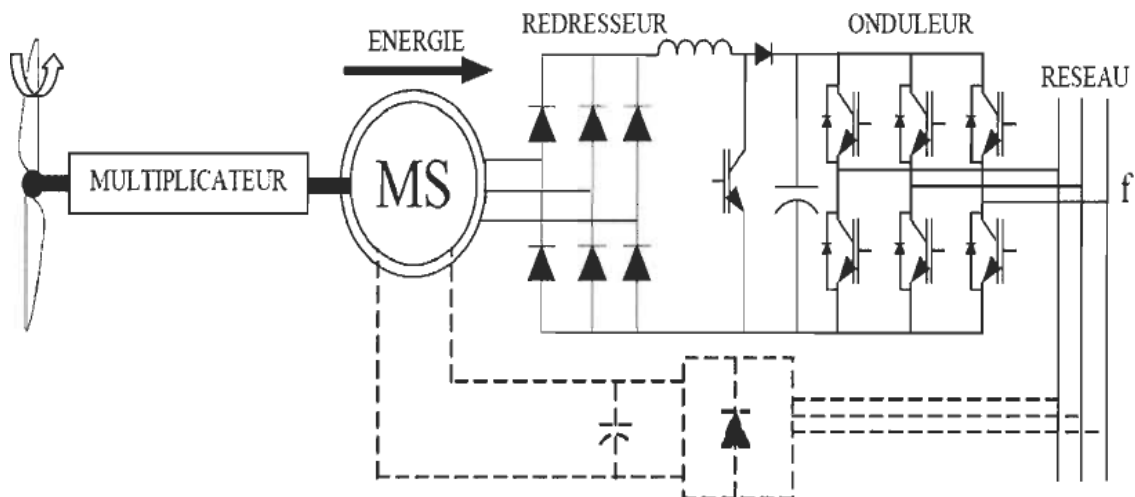
**Figure I.6** Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe) [27]



**Figure I.7** Système éolien basée sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable. [27]

#### 4.2 Systèmes utilisant la machine synchrone :

Cette machine, appelée généralement alternateur, est pratiquement la seule solution utilisée dans les procédés traditionnels de production d'électricité (centrales thermiques, hydroélectriques ou nucléaires). Cependant, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de impose l'utilisation d'une interface d'électronique de puissance entre le stator et le réseau, car il est difficile de maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe afin de synchroniser celle-ci avec le réseau pendant la connexion (Figure 1.18) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [07].



**Figure I.8** Machine synchrone reliée au réseau par interface d'électronique de puissance.

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la Machine sont découplées. Cela permet d'avoir une tension et une fréquence constante à la sortie du convertisseur quelle que soit la vitesse de l'éolienne. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotation en raison de leur nombre de pôle très élevé, et donc elles peuvent être directement couplées à la turbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur mécanique de vitesse.

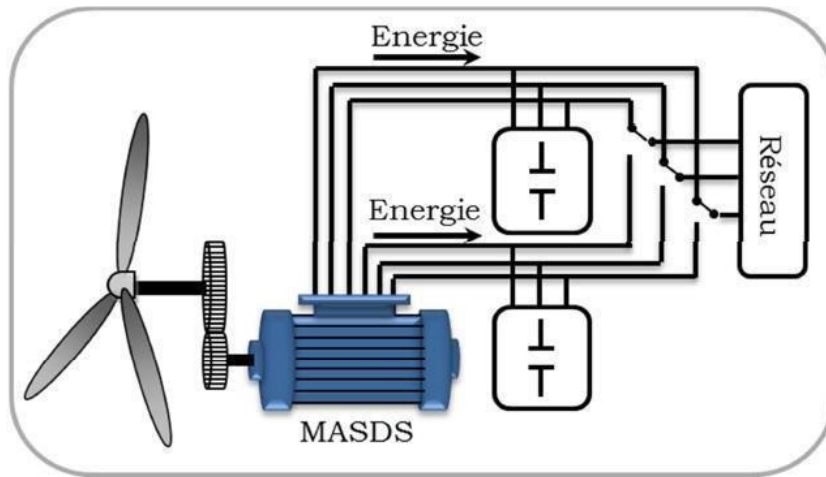
#### 4.3 Machines asynchrones à double stator :

Une nouvelle génération d'éoliennes est proposée par certains constructeurs, elle utilise un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure 1.9). Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.

Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées [07].

Le fonctionnement de ce système reste à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Cependant, La présence d'un deuxième stator rend la

conception de cette machine délicate et augmente le coût et le diamètre de façon importante, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble,



**Figure I.9** Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator [01].

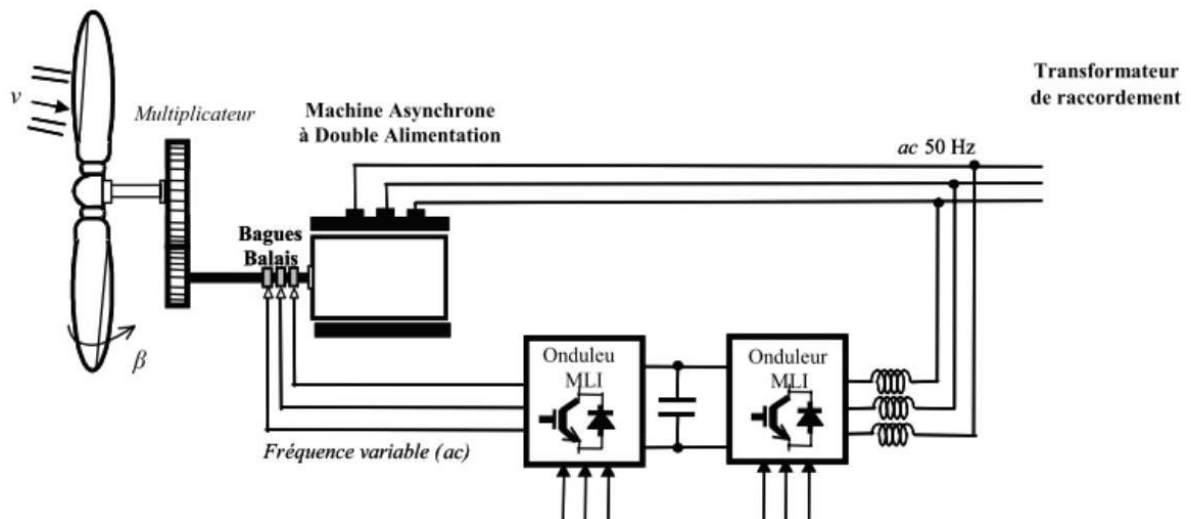
#### 4.4 Machine asynchrone à double alimentation :

Avec les générateurs synchrones à aimants permanents, la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) est actuellement l'une des solutions adoptées par les fabricants des éoliennes à travers le monde. Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau sans aucune interface électronique. Cependant, le rotor bobiné est relié à un convertisseur de puissance pour assurer le réglage de la puissance fournie par le stator. Ce convertisseur de puissance est dimensionné pour une faible puissance qui ne dépasse pas habituellement 30 %

de la puissance nominale de la GADA. Pour cette raison, le coût du convertisseur et du système diminue significativement en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice [07]

#### 4.4.1 Structure de la Machine :

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans les quelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.[07].



**Figure I.10** Chaîne de conversion à base d'une GADA [07],

#### 4-4-2 Modes de fonctionnement de la MADA

La MADA permet de fonctionner en mode moteur ou en mode génératrice. Mais ces modes de fonctionnement ne dépendent pas de signe du glissement comme pour le cas de la machine asynchrone à cage ( $g > 0$  moteur,  $g < 0$  générateur). En effet, pour la MADA, c'est la commande des courants rotoriques qui permet de générer le champ magnétique à l'intérieur de

la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo- synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons

présenter successivement ces différents modes de fonctionnement, [07] :

*a) Cas du fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone :*

Dans ce mode de fonctionnement la puissance de glissement est réinjecter au réseau par les convertisseurs connectés au rotor[08].

*b) Cas du fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone :*

Durant ce mode de fonctionnement, la puissance de glissement est fournie par le réseau au rotor de la machine via les convertisseurs pour la convertir en puissance mécanique entraînant ainsi le moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme[08].

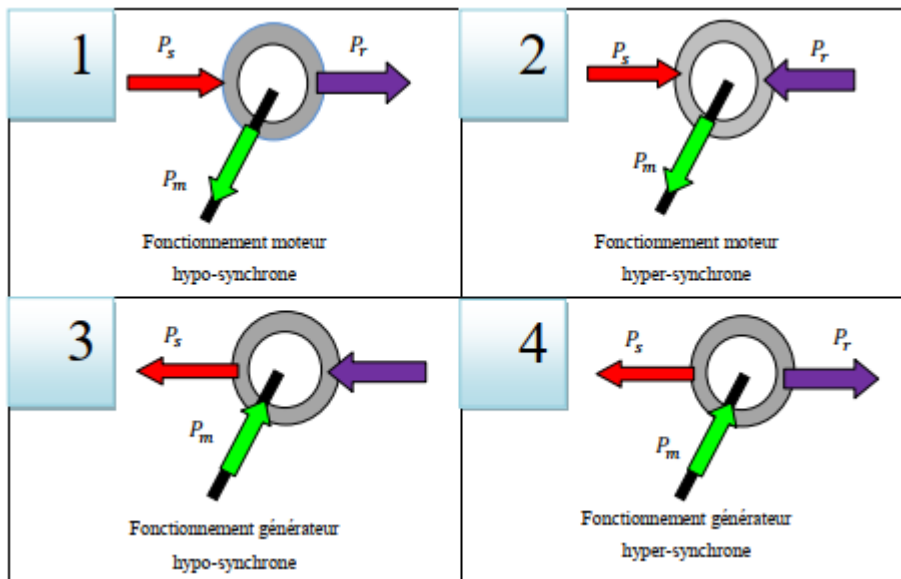
*c) Cas du fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone :*

Dans ce cas, la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réabsorbée par le rotor pour régler le niveau et la fréquence de la tension du stator.

Nous avons dans ce cas un fonctionnement en mode générateur en dessous de la vitesse de synchronisme (glissement positif), [07].

*d) Cas du fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone :*

Dans ce régime de fonctionnement, la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a ainsi un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme (glissement négatif), [07].



**Figure I-11**– Bilan de puissance de la MADA dans les différents modes de fonctionnement[02]

#### 4-4-3 Avantages et Inconvénients de la MADA

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs, sa structure, sa stratégie de commande et ses applications.

##### ❖ *Avantages de la MADA :*

Parmi ses nombreux avantages de la MADA, nous citons [08]:

- Possibilité de mesurer les courants du rotor, ce qui donne une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Possibilité de fonctionner sur une large plage de vitesse.
- Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale.
- Possibilité de consommer ou fournir de la puissance réactive (important pour régler le facteur de puissance).
- Bon rendement à cause de la faible taille du convertisseur

##### ❖ *Inconvénients de la MADA :*

- Présence obligatoire de bagues et balais qui augmentent le poids et le volume de la nacelle.
- Problème d'usure et de maintenance des systèmes bagues balais.
- Présence d'un multiplicateur mécanique.

## 5 Domaines d'application de la MADA :

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens. De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée tel que,

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variables ;
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, tel que

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.

La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime

- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc... .

On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage [10].

## 6-Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une présentation des éoliennes, leurs types et leurs méthodes de fonctionnement. Ensuite, nous avons essayé de faire une présentation non exhaustive des différentes chaînes de conversion utilisées dans les éoliennes. L'accent a été mis sur les éoliennes utilisant la machine asynchrone à double alimentation qui sera utilisée dans les chapitres restants.

# *Chapitre 2*

*Modélisation de la chaîne de conversion à base d'une  
MADA*

## 1 Introduction :

Avant d'étudier la chaîne éolienne, nous devons d'abord modéliser les différentes parties de cette chaîne. La modélisation permet d'une part de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement et d'autre part de prévoir les comportements plus variés que celle de l'observation expérimentale.

Alors, ce chapitre sera consacré à la modélisation de la chaîne de conversion élément par élément, qui nous servira par la suite à la mise en œuvre de tous ces derniers sous MATLAB/ Simulink.

## 2-Modélisation de la partie mécanique

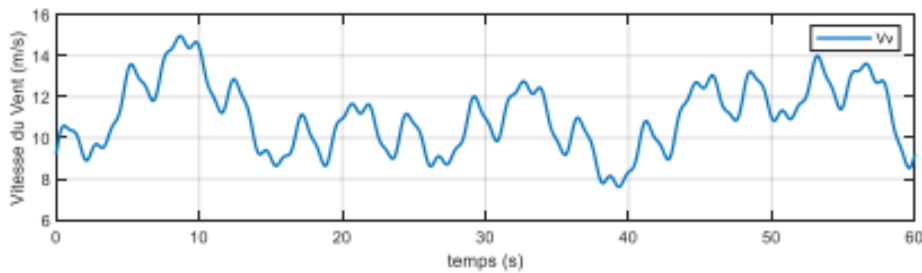
### 2-1 Modèle du vent

Afin que la chaîne éolienne fonctionne et produit des puissances utilisables, elle avait besoin d'une source primaire et fondamentale c'est l'énergie cinétique du vent. Le vent joue un rôle primordial pour l'étude du système de conversion d'énergie éolienne car la puissance éolienne est en fonction de sa vitesse.

Dans cette étude, afin que notre MADA fonctionne en hypo et hyper synchrone et qu'on puisse aussi valider le contrôle d'orientation des pales (pitch control) nous avons choisi un profil de la vitesse du vent représenté par une fonction scalaire qui évolue dans le temps, modélisée par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme:

$$V(t) = 9.2 + 2\sin(\omega t) - 1.75\sin(3\omega t) + 1.5\sin(5\omega t) - 1.25\sin(10\omega t) + \sin(30\omega t) + 0.5\sin(50\omega t) + 0.25\sin(100\omega t) \quad (2.1)$$

Avec :  $\omega = \pi/20$



**Figure II-1: Simulation du profil de la vitesse du vent appliqué à la turbine.**

## 2-2 Modélisation de la turbine éolienne

Le système éolienne classique est composé d'une turbine qui transforme une énergie mécanique, d'un multiplicateur de vitesse  $G$  qui permet d'augmenter la vitesse de rotation et de diminuer le couple et comprenant des pales entraînées par le vent.

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

$$P_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (2.2)$$

$\rho$ : La masse volumique de l'air.

$S$  : la surface circulaire balayée par les pales de la turbine ( $m^2$ ).  $R$  : la longueur de la pale (m).

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

Toute l'énergie ne peut pas être captée, on ne peut pas extraire la totalité de la puissance car la vitesse du vent n'est pas nulle après l'éolienne. On introduit un coefficient  $C_p$ , qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales. Ce coefficient correspond au rendement du rotor de l'éolienne.

La puissance aérodynamique apparaissant au rotor s'écrit alors :

$$P_{aero} = C_p P_V = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (2.3)$$

$C_p$  : Coefficient de puissance.

$\lambda$  : Angle d'orientation des pales.

$\beta$  : est la ration de vitesse défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire

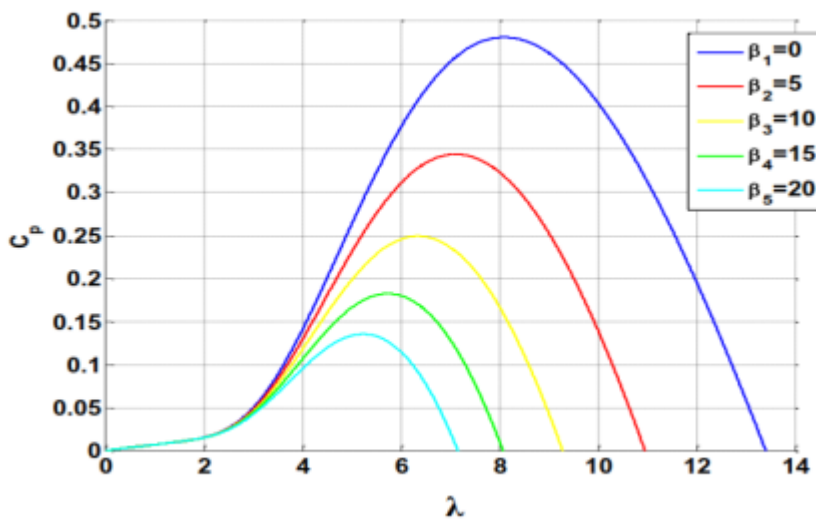
des pales

$\Omega_{turbine} \cdot R$  et la vitesse du vent.

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V} \quad (2.4)$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique, son couple aérodynamique  $C_{aero}$  est donné par l'expression suivante :

$$C_{aero} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{mec}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine} \cdot G} \quad (2.5)$$



**Figure II-2** : Courbe de coefficient de puissance  $c_p$  ( $\lambda$   $\beta$ ) [25]

### 2-3 Modèle de multiplicateur

La vitesse mécanique de la turbine et celle de la génératrice sont liées par la relation suivante [25 -16] :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.6)$$

Le Couple sur l'arbre lent et sur l'arbre rapide est exprimé par la relation suivante :

$$c_g = \frac{C_{aero}}{G} \quad (2.7)$$

$C_g$  : le Couple issu du multiplicateur  $C_{aero}$  : couple aérodynamique.

$G$  :  $G_{in}$  du multiplicateur

## 2-4 Hypothèses simplificatrices

- L'entrefer constant.
  - L'effet des encoches négligé.
  - Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
  - Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
  - Les pertes ferromagnétiques négligeables.
  - De ce fait tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'Inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements
- [16]**

La figure (II-3) rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique, où l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre (P) de paires de pôles par phase

## 2-5 Equation dynamique de l'arbre

La modélisation de la transmission mécanique se résume comme suit :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{couple} = C_{mec} \quad (2.8)$$

J : le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne.

On aura

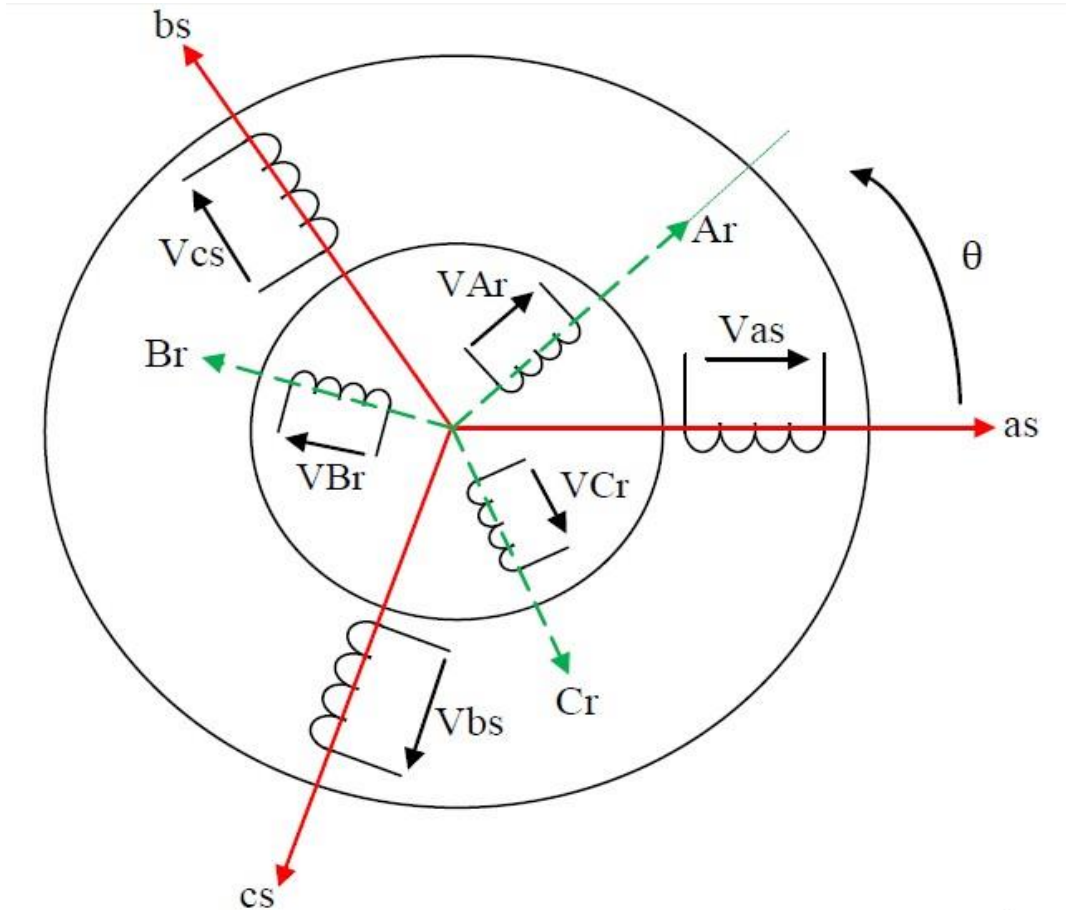
$$C_{em} = C_g + C_{vis} - C_{mec} \quad (2.9)$$

$C_{mec}$  : le couple mécanique.

$C_g$  : le couple issu de multiplicateur.  $C_{vis}$  : le couple de frottement visqueux.  $C_{em}$  : le couple électromagnétique.

### 3 Représentation de la machine asynchrone à double alimentation :

Les hypothèses précédentes nous permettent de représenter la machine asynchrone par la figure 2.1.



**Figure II-3:** Représentation de la machine asynchrone à double alimentation

#### 3.1 Equations de la MADA :

Soit une machine asynchrone triphasé au stator et au rotor représenté

schématiquement par la figure II-3 et dont les phases sont repères respectivement  $as$ ,  $bs$ ,  $cs$  et  $Ar$ ,  $Br$ ,  $Cr$  et l'angle électrique  $\theta$  variable en fonction du temps définit la position du rotor .[07].

### 3.2 Equations électriques :

L'application des lois de Kirchhoff sur les enroulements statoriques et rotoriques donne.[04]. :

pour les enroulements statoriques :

- 

$$\begin{aligned}
 V_{as} &= R_s I_{as} + \frac{d\phi_{as}}{dt} \\
 \bullet V_{bs} &= R_s I_{bs} + \frac{d\phi_{bs}}{dt} \\
 V_{cs} &= R_s I_{cs} + \frac{d\phi_{cs}}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

pour les enroulements rotoriques :

$$\begin{aligned}
 V_{ar} &= R_r I_t + \frac{d\phi_{ar}}{dt} \\
 V_{br} &= R_r I_{Br} + \frac{d\phi_{br}}{dt} \\
 V_{cr} &= R_r I_{rr} + \frac{d\phi_{cr}}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

Ou sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

D'où les formes matricielles condensées

$$\begin{aligned} [V_s] &= [R_s][I_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \\ [V_r] &= [R_r][I_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Avec :

[Vs] : Tensions aux bornes des enroulements statoriques.

[Is] : Courants de phases des enroulements statoriques. [Vr] : Tensions aux bornes des enroulements rotoriques. [Ir] : Courants de phases des enroulements rotoriques.

### 3.3 Les équations magnétiques :

Les expressions des flux en fonction des courants statoriques et rotoriques sont données par[16]

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Phi_{asc} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Ou sous forme .[20]. condensée :

Avec :

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \quad (2.13)$$

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (2.14)$$

$L_{,r}$  : Inductances propres statoriques et rotoriques,

$M$ : Inductance mutuelle entre phases statoriques,

$M$ : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

$M_s$ : Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques,

$\Phi_s$  : Flux totalisés traversant les enroulements statoriques.

$\Phi_r$  : Flux totalisés traversant les enroulements rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire  $\theta$  entre l'axe du stator et celui du rotor [25] :

$$[M_{sr}] = M_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{2}{3} \right) \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

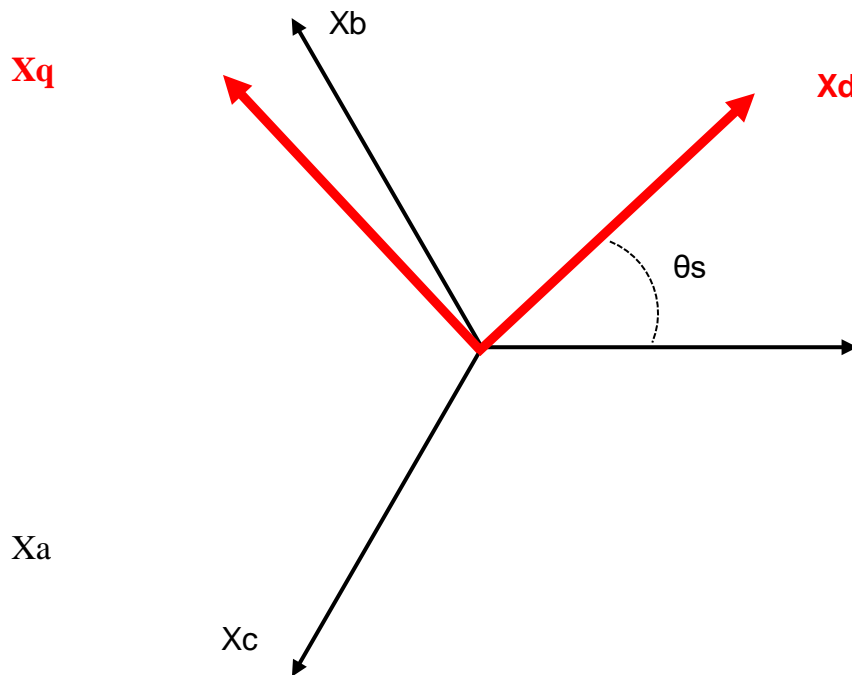
$M_0$  : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor (cas où leurs axes magnétiques sont alignés).

Les équations modélisant la MADA dans les repères ABC sont fortement non linéaire et leur manipulation est très difficile d'où la nécessité d'utiliser un changement de variable pour rendre ce modèle exploitable.

### 3-3-1 Les transformations usuelles :

#### a. La transformation de Park :

La transformation de PARK permet le passage d'un repère triphasé à un modèle biphasé [1-4]. Elle consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents fictifs, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système. .[13].



**Figure II-4:** Représentation de la transformation abc dqo .[07].

Le passage du système **abc** au système **dqo** s'obtient par la matrice suivante[25-07] :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [P(\theta_s)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

L'angle  $\theta_s$  est au choix de l'utilisateur et peut dépendre du temps.

La transformation inverse de Park qui permet le passage du système **dqo** au système **abc** est donnée par la matrice suivante.

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P^{-1}(\theta_s)] \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Ce repère de Park (**dq**), peut être choisi :

- Repère général (mobile):  $\theta_s = w_g t$
- Repère lié au champ tournant (mobile):  $\theta_s = w_s t$
- Repère lié au rotor (mobile):  $\theta_s = w_r t$
- Repère lié au stator (fixe):  $\theta_s = 0$

### b. La transformation de Concordia:

C'est une modification de la transformation de Clarke (cas du repère de Park lié au stator), en effet, la transformation de Concordia est basée sur l'égalité des puissances. Elle est définie de la manière suivante : [07].

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

### C. La transformation inverse est définie par

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_o \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

#### 4-5 Représentation de Park de la MADA dans un repère ( $d-q$ ) :

L'application de la transformation de Park (basée sur l'égalité des puissances) sur les équations de la MADA écrites dans les repères ABC donne le modèle suivant.[13].

:

$$\begin{cases} u_{sd}(t) = R_s i_{sd}(t) + \frac{d\Phi_{sd}(t)}{dt} - w_s \Phi_{sq}(t) \\ u_{sq}(t) = R_s i_{sq}(t) + \frac{d\Phi_{sq}(t)}{dt} + w_s \Phi_{sd}(t) \\ V_{dr} = R_r i_{rd}(t) + \frac{d\Phi_{rd}(t)}{dt} - (w_s - w_r) \Phi_{rq}(t) \\ V_{qr} = R_r i_{rq}(t) + \frac{d\Phi_{rq}(t)}{dt} + (w_s - w_r) \Phi_{rd}(t) \end{cases} \quad (2.22)$$

Avec :

$$\begin{aligned} w_s &= \frac{d\theta_s}{dt} \\ w_r &= \frac{d\theta_r}{dt} \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\theta_s = p\Omega + \theta_r \quad (2.24)$$

$\Omega$  est la vitesse mécanique du rotor.

$p$  est le nombre de pair de pôles.

Les relations entre les flux et les courants sont données par:

$$\Phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \quad (2.25)$$

$$\Phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \quad (2.26)$$

$$\Phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \quad (2.27)$$

$$\Phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \quad (2.28)$$

tel que :

$L_r = l_r - M_r$ : Inductance cyclique rotorique.

$L_s = l_s - M$ : Inductance cyclique statorique.

$M = \frac{3}{2}M_{sr} = \frac{3}{2}M_{rs}$ : Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

### 3-5-Expression du couple électromagnétique :

La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques est donnée par, [20].:

$$P_e = u_{sa}i_{sa} + u_{sb}i_{sb} + u_{sc}i_{sc} + u_{ra}i_{ra} + u_{rb}i_{rb} + u_{rc}i_{rc} \quad (2.29)$$

$$= (u_{sd}i_{sd} + u_{sq}i_{sq} + u_{rd}i_{rd} + u_{rq}i_{rq})$$

En développant cette expression, nous trouvons que  $P_e$  se décompose en trois termes : puissance dissipée en pertes Joule, puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source, et puissance mécanique:

$$P_e = \left[ R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + R_r(i_{rd}^2 + i_{rq}^2) + i_{sd} \frac{d\Phi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + i_{rd} \frac{d\Phi_{rd}}{dt} + i_{rq} \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + w_r(\Phi_{rd}i_{rq} - \Phi_{rq}i_{rd}) \right] = P_J + P_{em} + P_{mec} \quad (2.30)$$

Or la puissance mécanique est reliée au couple électromagnétique par:

$$P_{mec} = C_m \Omega = C_m \frac{w_r}{p} = w_r(\Phi_{rd}i_{rq} - \Phi_{rq}i_{rd}) \quad (2.31)$$

Donc le couple électromagnétique est donné par :

$$C_m = p(\Phi_{rd}i_{rq} - \Phi_{rq}i_{rd}) \quad (2.32)$$

On peut aussi établir d'autres expressions pour le couple

$$C_{em} = P \cdot M_{sr}(I_{qs} \cdot I_{dr} - I_{ds} \cdot I_{qs})$$

$$C_{em} = P \cdot \frac{M_{sr}}{L_r} (\Phi_{qs} \cdot I_{dr} - \Phi_{ds} \cdot I_{qr})$$

$$C_{em} = P \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} (\Phi_{dr} \cdot I_{qs} - \Phi_{qr} \cdot I_{qs})$$

### 3-6- Expression des puissances actives et réactive :

La puissance active et réactive au stator est définie comme .[03].:

$$\begin{cases} P_s = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \\ Q_s = V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq} \end{cases} \quad (2.34)$$

Le même pour les puissances active et réactive rotorique

$$\begin{cases} P_r = V_{rd}I_{rd} + V_{rq}I_{rq} \\ Q_r = V_{rq}I_{rd} - V_{rd}I_{rq} \end{cases} \quad (2.35)$$

### 3-7Equation mécanique :

D'après la loi fondamentale de la dynamique nous pouvons écrire.[20]. :

$$C_{em} = C_m + F_v\Omega_m + J_m \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (2.36)$$

Où :

$C_m$  : Couple moteur appliqué sur la MADA [N.m].

$J_m$  : Moment d'inertie total de la MADA [Kg.m<sup>2</sup>].

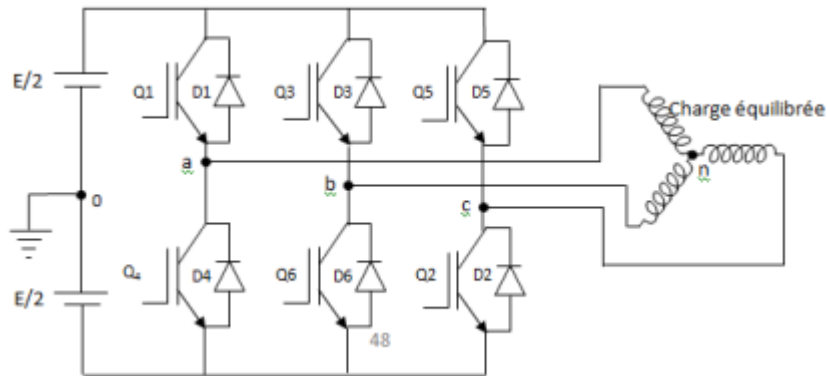
$f_v$  : Coefficient de frottement visqueux de la MADA [N.m/rad/s].

$\Omega$  : Vitesse de rotation du rotor de la MADA.

### 4-Modélisation de l'onduleur de tension :

Pour un onduleur triphasé (fig. II. 3), les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Dans chaque bras il ya deux états indépendants. Ces états peuvent être considérer comme une grandeur booléenne [Had 02]

- $S_{a,b,c}=1$  : interrupteur du demi-bras haut (a, b ou c) fermé.
- $S_{a,b,c}=0$  : interrupteur du demi-bras haut(a, b ou c) ouvert.



**Figure II-5 :** Leschéma de l'onduleur triphasé et de sa charge. .[16].

Poursimplifier la modélisation de l'onduleur on supposera que :

- Lescommutations des interrupteurs sont instantanées.
- La chute de tension auxbornes des interrupteurs est négligeable.

La charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec neutre isolé

D'après le schéma simplifié de l'onduleur, on peut écrire :

$$\begin{aligned}
 \text{Aussi:} \quad & U_{an} + U_{bn} + U_{cn} = 0 \\
 \text{Donc:} \quad & U_{an} + U_{ba} + U_{an} + U_{ca} + U_{an} = 0 \\
 \Rightarrow & 3U_{an} = U_{ab} + U_{ac} = (2 * s_a - s_b - s_c) \quad (2.37)
 \end{aligned}$$

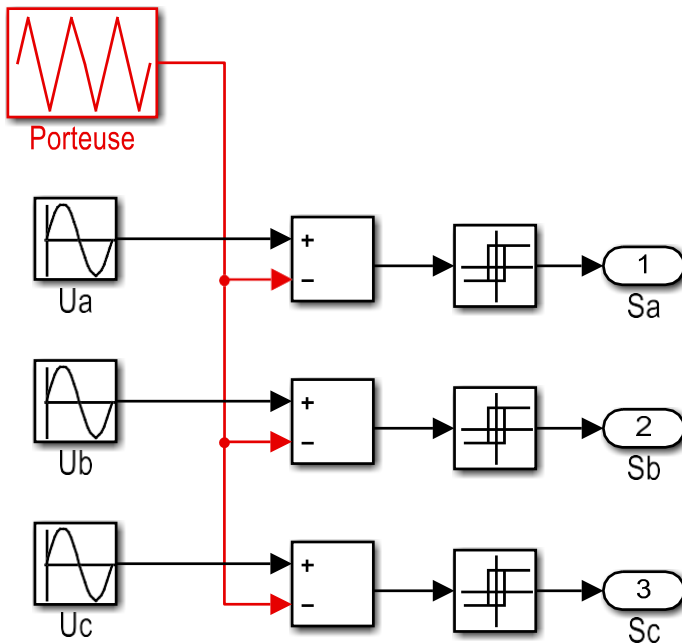
Au final, on aura :

$$\begin{bmatrix} U_{an} \\ U_{bn} \\ U_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Cette équation matricielle donne les tensions triphasées simples en fonction des signaux de commande des bras de l'onduleur. .[07].

### 5-Commande MLI sinus :

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture. Son schéma de base est donné par la **figure 2.6[23]**.



**Figure II-6:** schéma de la commande MLI sinus réalisé avec SMULINK

La technique MLI permet de fournir à la sortie de l'onduleur une tension variable en fréquence et en amplitude. .[07].

## 6-Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique de la MADA dans le repère naturel (a, b, c). Ce modèle est non linéaire et fortement couplé.

Pour contourner cette difficulté, on a fait appel à la transformation de Park. Cette transformation nous a permis de trouver un modèle plus simple à manipuler pour faire des simulations ou pour développer des lois de commande par la suite.

Ensuite, un modèle idéal de l'onduleur a été présenté. Ce modèle exprime les tensions triphasées en fonction de l'état des interrupteurs.

En fin, la technique de commande MLI sinus a été présentée brièvement.

Ces modèles seront utilisés par la suite pour faire la simulation du système complet sur MATLAB/SIMULINK.[07].

# *Chapitre 3*

*Commande vectorielle d'un machine asynchrone à double  
alimentation*

## 1- Introduction

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants [et Dans l'hypothèse où le flux est maintenu constant, le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active dépendent uniquement du courant rotorique d'axe  $q$ .

Au travers de ce chapitre, nous allons présenter la stratégie de la commande vectorielle à flux orienté appliqué à une MADA à rotor bobiné alimenté par un convertisseur Back to Back[13].

## 2- Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle a été proposée en 1971 par Blashke. Elle consiste à séparer la commande du flux de celle du couple en orientant le flux selon l'axe direct du repère choisi. Cette méthode fait deux choix, le premier concerne les variables d'états, le second le choix du repère. Cela permet d'avoir une structure de commande découplée.

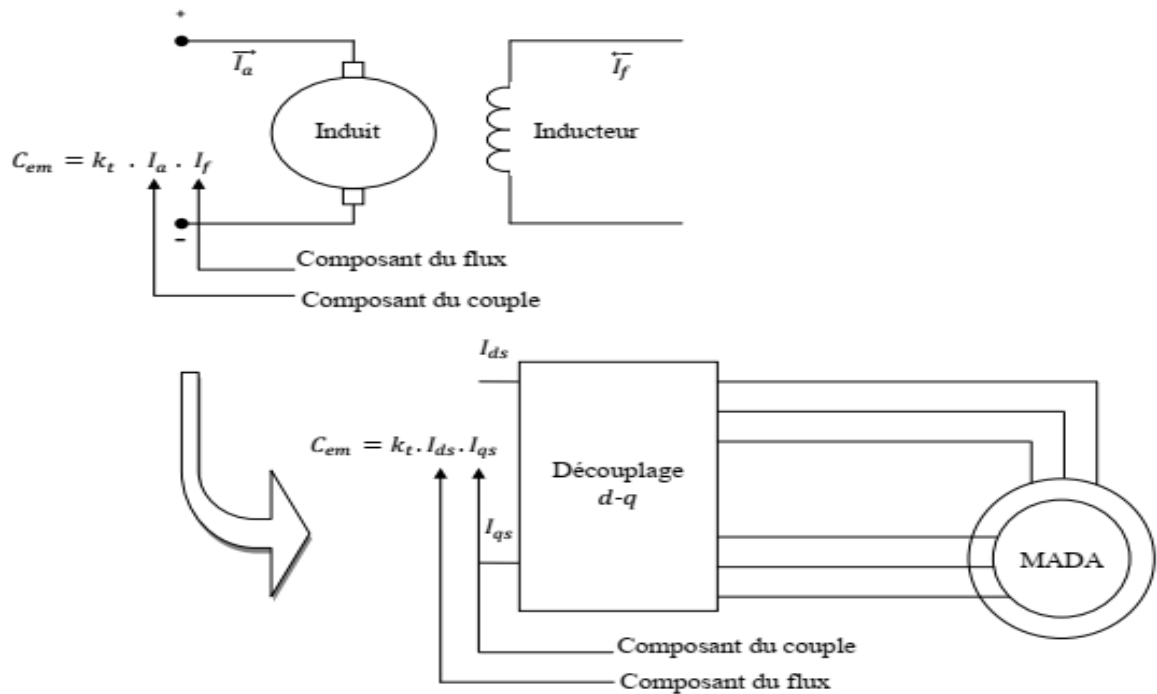
Cette dernière est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Ou bien, elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui de la machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit [15].

De nombreuses variétés de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer suivant la source d'énergie [15] :

- Commande en tension.
- Commande en courant. Suivant l'orientation du repère :
- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement.



**Figure III.1 :** Principe de commande découplée pour la machine à MCC à excitation séparée et la machine asynchrone à double alimentation[15]

L'examen de l'expression du couple de la machine montre qu'elle résulte d'une différence de deux composantes en quadrature du courant statorique et de flux rotorique qui présente un couplage complexe entre les grandeurs de la machine. Le référentiel de travail pour la commande est celui lié au champ tournant afin que l'axe (d) coïncide avec la direction désiré du flux, qui peut être rotorique, statorique, ou d'entrefer. Ainsi il est possible d'orienter les différents flux de la machine. [16]

Le flux résultant  $\varphi$  peut être soit :

➤ Le flux statorique avec les conditions :

$$\varphi = \varphi_{sd} = \varphi_s \quad \text{et} \quad \varphi_{sq} = 0 \quad (3.1)$$

➤ Le flux rotorique avec les conditions :

$$\varphi = \varphi_{rd} = \varphi_r \quad \text{et} \quad \varphi_{rq} = 0 \quad (3.2)$$

➤ Le flux d'entrefer avec les conditions :

$$\varphi = \varphi_{gd} = \varphi_g \quad \text{et} \quad \varphi_{gq} = 0 \quad (3.3)$$

### 3. Stratégie de commande en puissance active et réactive de la MADA

Nous avons vu dans les chapitres précédents que l'intérêt de l'utilisation de la MADA, outre la taille du convertisseur, était de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique de puissance optimale de l'éolienne. Cette caractéristique montre que pour chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de rotation optimale (correspondant à la valeur maximale du coefficient de puissance) permettant à l'éolienne d'avoir le meilleur rendement possible. Pour pouvoir tourner à cette vitesse optimale; à vitesse de vent donné, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné, c'est à dire une puissance active débitée par la MADA. C'est en utilisant cette référence de puissance que la machine peut alors être commandée. [16]

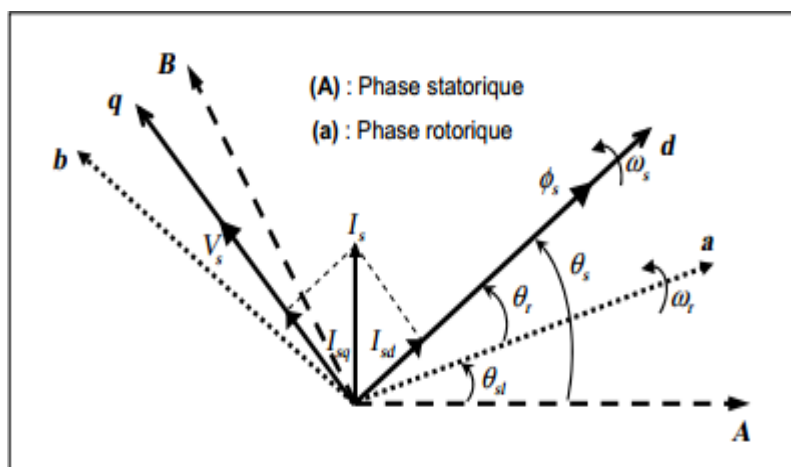
### 3-1 Relations entre courants statoriques et courants rotoriques

Dans ce paragraphe, nous considérons que la MADA fonctionne en mode hyper-synchrone, ce qui permet un transfert optimal de puissance en utilisant la commande vectorielle directe avec orientation du flux statorique. A cet effet nous allons, donc déterminer les équations qui lient les puissances actives et réactives statoriques aux grandeurs rotoriques sur lesquelles nous agissons pour commander la machine.

Il s'agit d'obtenir un certain découplage entre le stator et le rotor afin que l'expression du couple soit similaire à celle du couple de la machine à courant continu. Le principe consiste à orienter le flux statorique suivant l'axe  $d$  du référentiel tournant (Figure 3.2)

On a donc :  $\varphi_{sq} = 0$  et par suite  $\varphi_{sd} = \varphi_s$ .

Dans l'hypothèse où le flux  $\varphi_{sd}$  est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator), le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendants du courant rotorique d'axe  $q$ . [16]



**Figure 3.2** : Orientation du flux statorique sur l'axe  $d$ . [16]

Nous allons donc nous contenter de rappeler le modèle diphasé de la machine asynchrone dans le référentiel  $(q, d)$  lié au champ tournant que nous comptons utiliser par la suite pour la commande de la MADA :

### Equations des tensions

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (3.4)$$

### Equations des flux :

$$\begin{cases} \varphi_{sdq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rdq} \\ \varphi_{sdq} = L_r I_{sdq} + L_m I_{sdq} \end{cases} \quad (3.5)$$

Le couple mécanique est donné par la relation suivante :

$$C_{mec} = -\frac{3}{2} P (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) = -\frac{3}{2} P (\varphi_{rq} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{rd}) = C_r + \frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega \quad (3.6)$$

En explicitant les flux statoriques et rotoriques on vérifie que :

$$C_{mec} = C_e = -\frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{rd} I_{sq} - \varphi_{rq} I_{sd}) = -\frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{sd} I_{rq} - \varphi_{sq} I_{rd}) \quad (3.7)$$

On appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine les équations (3.4), (3.5) et (3.7) deviennent:

$$C_e = -\frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{sd} I_{rq}) \quad (3.8)$$

Rappelons que ce couple représente une perturbation pour la turbine éolienne et prend une valeur négative

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ \varphi_s = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \end{cases} \quad (3.9)$$

A partir de l'équation (3.10), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \\ I_{sa} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (3.10)$$

### 3-2 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} + V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (3.11)$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ( $V_{sd} = 0$ ) donne :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \quad (3.12)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (3.11) dans l'équation (3.13) nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = V_s \frac{\varphi_s}{L_s} - V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (3.13)$$

En tirant  $Q_s = \frac{V_s}{\omega_s}$  l'équation (3.9), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{V_s L_m}{L_s} I_{rd} \quad (3.14)$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante  $L_m$  comme constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante  $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$  près imposée par le réseau.

### 3-3 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

On pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, en remplaçant dans l'équation (3.5) les valeurs des courants statoriques de l'équation (3.11) et en remplaçant le résultat ainsi obtenu dans l'équation (3.4). Ainsi, nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_s I_{rd} \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{rd} - g \omega_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{sq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{rq} + g \omega_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rd} + g_s \frac{V_s L_m}{L_s} \end{cases} \quad (3.15)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \omega_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{V_s L_m}{L_s} \end{cases} \quad (3.16)$$

Où  $g$  correspond au glissement de la machine asynchrone.

$V_{rd}$  et  $V_{rq}$  sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en  $L_r - \frac{L_m^2}{L_s}$  est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

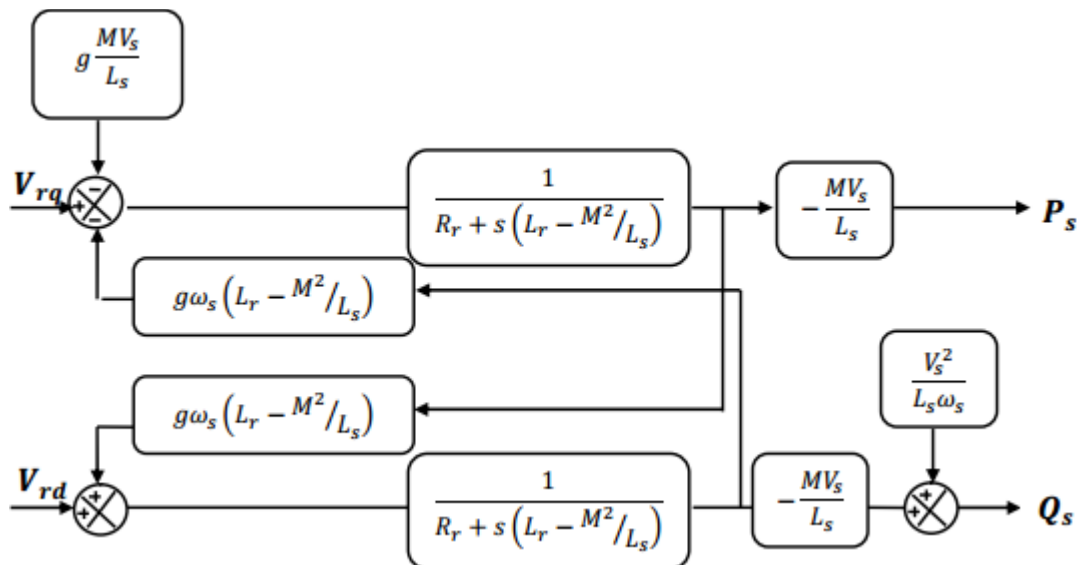
En revanche le terme  $g \frac{V_s L_m}{L_s}$  représente une force électromotrice

dépendante de la  $L_s$  vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur. [15]

Les équations (3.13), (3.14) et (3.16) nous permettent d'établir le schéma bloc du système électrique de la MADA à réguler (Figure 3.3).

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement, il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes  $d$  et  $q$  pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

Ainsi, il apparaît une solution pour effectuer la commande en puissance de cette machine. [16]



**Figure III.3:** Schéma bloc de la MADA.

La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de

puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée méthode indirecte découle directement des équations 3.14 et 3.16 [16]

#### 4- Contrôle indépendant de la puissance active et réactive

##### 4-1-Commande directe

Dans cette section, nous présentons la régulation indépendante des puissances actives et réactives de la machine en utilisant les remarques faites au paragraphe précédent. Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension  $V_{rq}$  et d'autre part la puissance réactive et la tension  $V_{dr}$ .

##### 4-2 Mise en place de la régulation

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la (figure 3.3) afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. Si l'on regarde la

relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme

$$\frac{V_s L_m}{L_s}$$

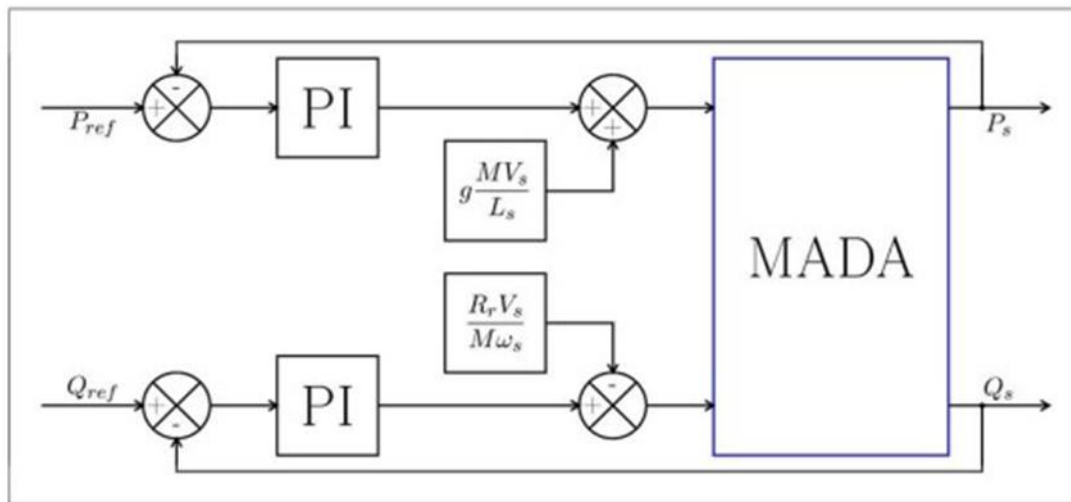
$$L_s$$

Dans notre étude, nous avons considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte puissance et stable, donc ce terme est constant. Nous ne placerons donc pas de régulateur entre les courants rotoriques et les puissances.

Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de

perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la (figure 3.3)

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la (figure 3.4) [16]



**Figure. III.4:** Schéma bloc de la commande directe. [2]

#### 4-3- Etude de la régulation pour la commande

Nous avons utilisé des régulateurs de type Proportionnel-Intégral (PI) en raison de leur performance et de leur rapidité de calcul. Leur tâche est non seulement de comparer les valeurs réelles mesurées avec les valeurs de référence, mais aussi de stabiliser le système

à réguler. Ainsi, au cours de la synthèse de ces régulateurs, nous ferons en sorte d'obtenir une dynamique électrique du système aussi rapide que l'autorise la fréquence de la MLI du convertisseur rotorique, ceci dans l'optique de l'insertion du dispositif dans un système éolien à vitesse variable ou dans un autre système utilisant la MADA en génératrice. [16].

## 5 -Types de la commande vectorielle:

Tous les travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux principales méthodes, la première appelée méthode directe qui a été développée par F.Blaschke, la seconde connue par la méthode indirecte développée par k.Hasse

### 5-1 Commande vectorielle directe:

Pour déterminer la position et la norme du flux (contrôler par contre réaction) il faut utiliser les capteurs à effet HALL placés sur les dents de stator (ceci nécessite des moteurs spéciaux), ils sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans les conditions sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs, et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables. L'application de cette méthode impose plusieurs inconvénients de natures différentes:

- La non fiabilité de la mesure du flux
- problème de filtrage du signal mesuré.
- précision médiocre de la mesure qui varie en fonction de la température (échauffement de la machine) et de la saturation.
- Le coût de production élevé (capteurs+filtre) [17].

Afin de pouvoir utiliser une machine standard les capteurs de flux doivent être remplacés par estimateur de flux. (ANNEX B).

### 5-2 Commande vectorielle indirecte:

Cette méthode n'exige pas l'utilisation d'un capteur de flux rotorique mais nécessite l'utilisation d'un capteur ou un estimateur de position (vitesse) du rotor. Cette dernière peut être développée par deux groupes principaux :

-Le vecteur du flux rotorique est obtenu indirectement à partir des courants et des tensions statoriques mesurées.

- Dans le deuxième groupe, le vecteur de flux rotorique est estimé à partir de la mesure des courants statoriques et de la vitesse du rotor, en se basant sur les équations du circuit rotorique du moteur asynchrone dans un système de référence tournant en synchronisme avec le vecteur de flux rotorique.

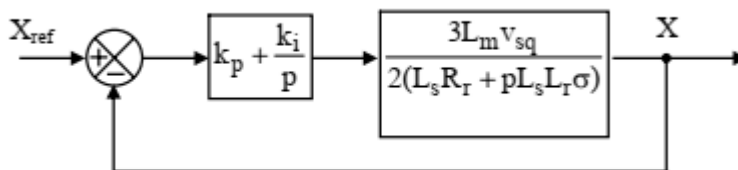
L'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité de l'estimation en vers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de température, surtout la constante de temps rotorique  $T_r$ . En plus, c'est qu'elle utilise un circuit de commande considérablement compliqué [17].

Dans ce qui suit, nous appliquons la commande vectorielle directe à la machine asynchrone alimenté en tension avec convertisseur.

### 6- Calcul des paramètres du régulateur PI

Le régulateur PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive, offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en oeuvre, ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de la conception des régulateurs PI. Dans notre travail, nous nous intéressons à la méthode de conception qui est basée sur la compensation de la constante de temps du régulateur avec celle du processus de la grandeur à réguler [18]



**Figure. III.5:** Schéma bloc du système de régulation

La figure (5.3) montre un système de réglage de chaque puissance au niveau du stator de la DFIM en boucle fermée par un régulateur PI. Dans ce cas, la fonction de transfert de chaque puissance est déduite à partir du modèle de la DFIM en tenant compte de l'équation (5.15).

La fonction de transfert en boucle ouverte (FBO) du système de régulation de la figure (5.3) s'écrit comme suit :

$$F_{BO} = \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \cdot \frac{\frac{3L_m v_{sq}}{2L_s L_r \sigma}}{\frac{R_r}{L_r \sigma} + p} \quad (3.17)$$

La méthode de compensation des pôles consiste à éliminer le zéro de la fonction de transfert

et ceci nous conduit à l'égalité suivante:

$$F_{BO} = \frac{3k_p L_m v_{sq}}{2L_s L_r \sigma p} \quad (3.18)$$

Notons toutefois ici 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 régulateurs dépendent de ces paramètres. Si ce n'est pas le cas, la compensation est moins performante [18].

Après la compensation, on obtient la fonction FBO suivante

$$F_{BO} = \frac{3k_p L_m v_{sq}}{2L_s L_r \sigma p} \quad (3.19)$$

Ce qui nous donne la fonction de transfert en boucle fermée suivante:

$$F_{BF} = \frac{1}{1 + tp} \quad (3.20)$$

**Avec :**

$$t = \frac{2L_s L_r \sigma}{3k_p L_m v_{sq}} \quad (3.21)$$

$\tau$  est le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms. Dans ce cas, les gains des régulateurs PI sont exprimés en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse comme suit:

$$\begin{cases} k_p = \frac{2L_s L_r \sigma}{3\tau L_m V_{sq}} \\ k_i = \frac{2R_r L_s}{3\tau L_m V_{sq}} \end{cases} \quad (3.22)$$

## 7-Résultats de simulation :

### 7-1 Essai fonctionnement à vitesse fixe

Le premier essai consiste à appliquer aux entrées de commande des échelons de puissance active et réactive, alors que la machine est entraînée à vitesse fixe de 1600 *tr/min*.

- Pour la puissance active :
  - De  $t=0s$  à  $t=1s$  : un échelon négatif de -500 W,
  - De  $t=1s$  à  $t=3s$  : un échelon négatif de -3000 W,
  - De  $t=3s$  à  $t=5s$  : un échelon négatif de -2000 W.
- Pour la puissance réactive :
  - De  $t=0s$  à  $t=1s$  : un échelon négatif de -400 VAR,
  - De  $t=1s$  à  $t=3s$  : un échelon positif de 400VAR,
  - De  $t=3s$  à  $t=5s$  : un échelon nul de 0 VAR.

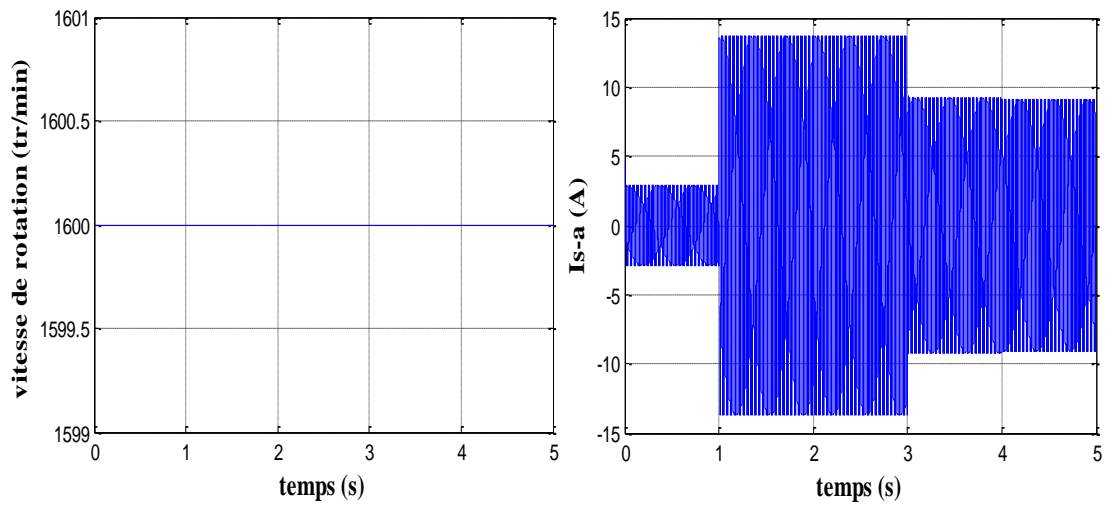


Figure. III.6 Vitesse de rotation et courant de la phase a du stator.

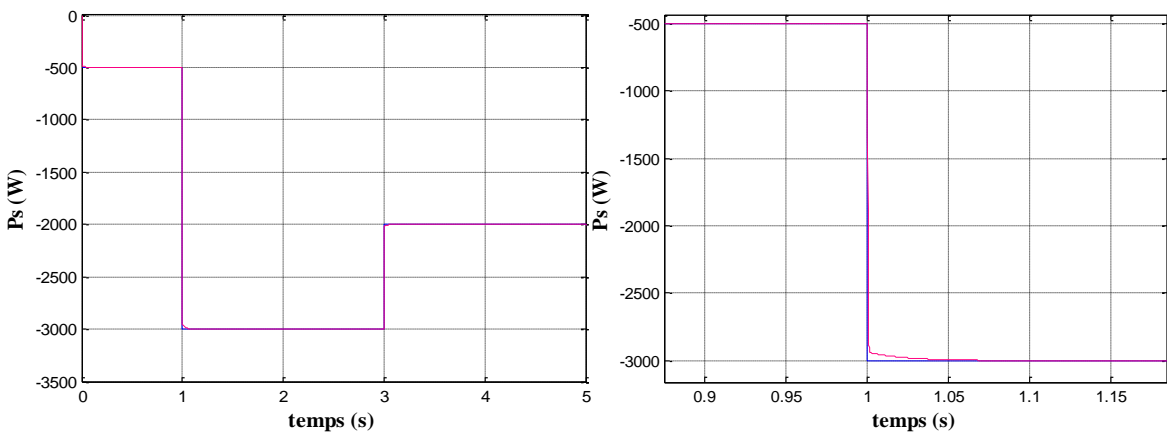


Figure. III.7 : Puissance active de stator avec un zoom.

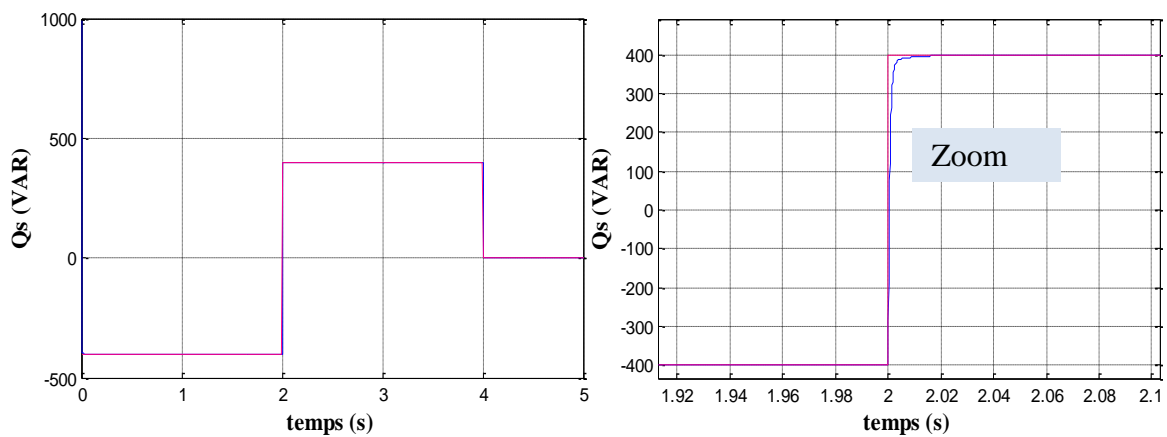


Figure. III.8 : Puissance réactive de stator avec un zoom.

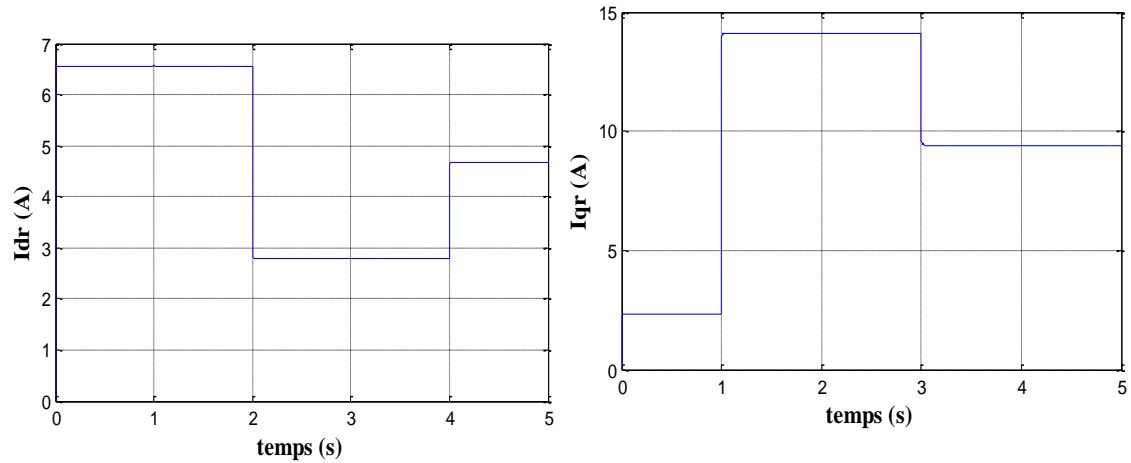


Figure. III.9 : Courant statorique selon l'axe d et l'axe q

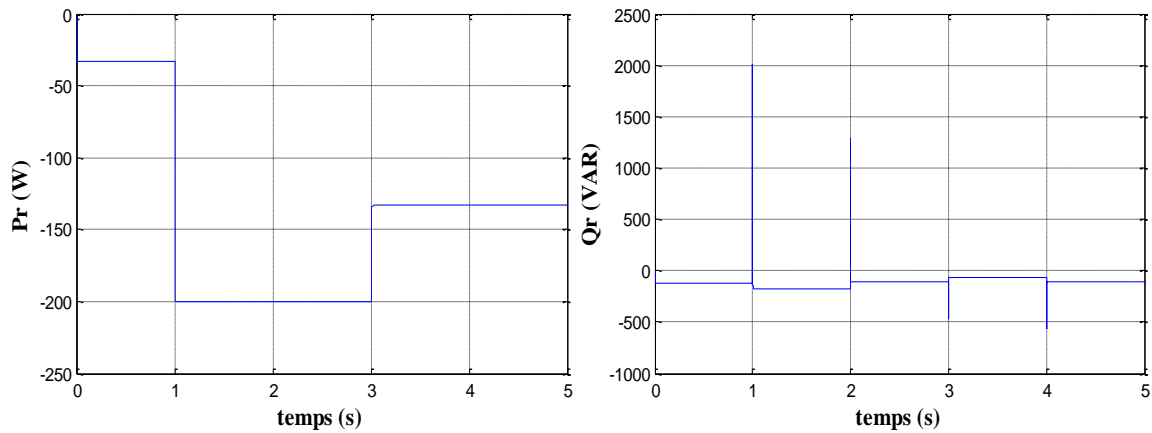


Figure. III.10 : Puissance active et réactive du rotor

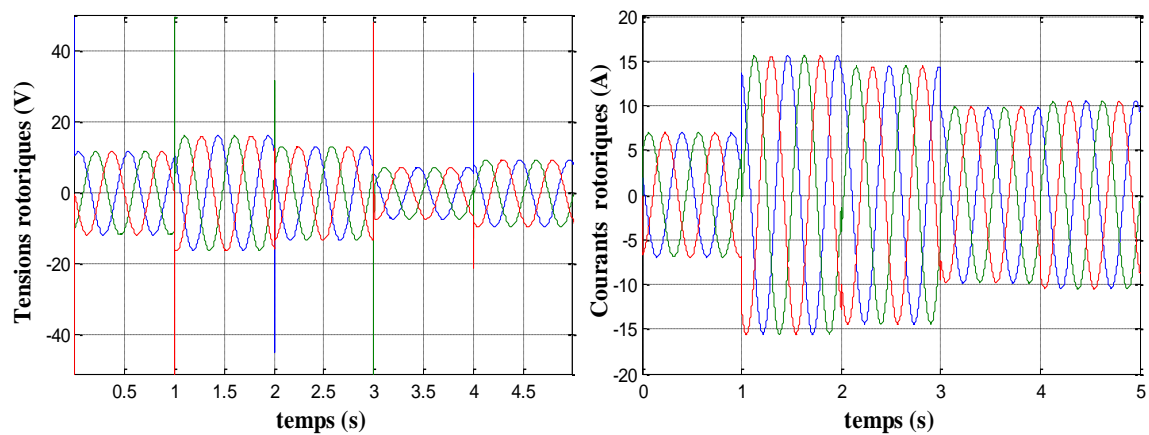


Figure. III.11 : Tensions et courants rotoriques

### 7-2 Interprétation des résultats :

On observe une dynamique qui réagit rapidement pour la puissance réactive et celle de la puissance active du stator avec un temps de réponse de 0.01s.

La puissance active du côté statorique est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA, La puissance réactive est réglable selon les besoins du réseau (ajustement sur le  $\cos(\varphi)$ ), et les deux sont découplées entre eux (la puissance active est commandée par la composante  $I_{qr}$  et la puissance réactive par le composante  $I_{dr}$ ).

On observe aussi sur la courbe de puissance active rotorique que cette dernière est négative et sa valeur est justifiée par le régime de fonctionnement hypersynchrone de la machine. Dans ce cas la génératrice fournit la puissance de glissement au réseau à travers le rotor de la machine, ce qui donne un avantage à la MADA en régime hypersynchrone (3.23)

Alors, le couple électromagnétique de référence est obtenu par [4]:

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2\lambda_{opt} G^3} C_{p-max} \rho \pi R^2 \Omega^2 \quad (3.24)$$

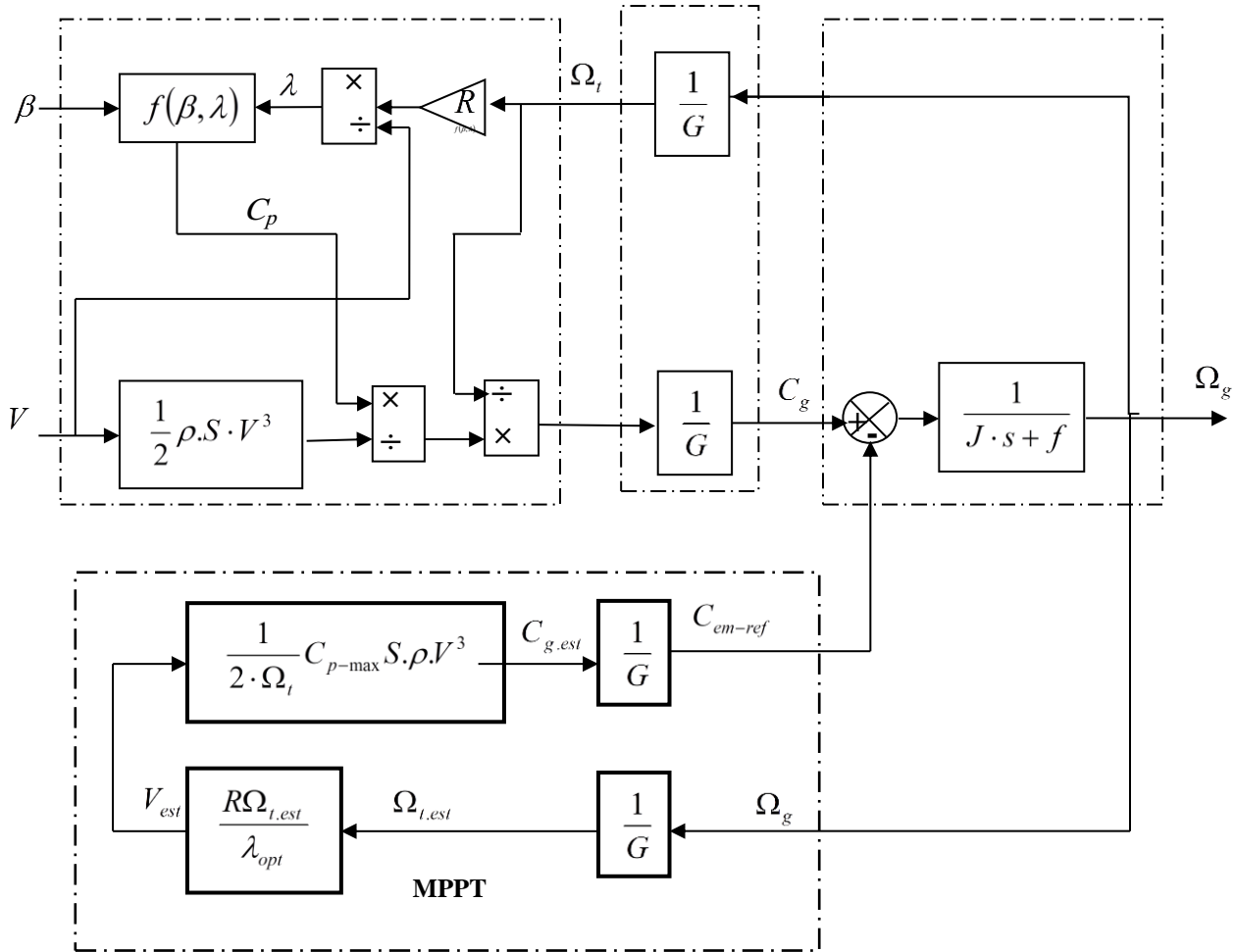


Figure. III.12 :Schéma-bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent

### 8 Résultats de simulation :

Vitesse de vent variable avec l'implémentation de l'algorithme MPPT

- L'angle de calage  $\beta$  est fixé à  $1^\circ$ .
- La référence de puissance est choisie selon l'MMPT.
- Un échelon de la puissance réactive de 0 pour maintenir le facteur de puissance à l'unité.

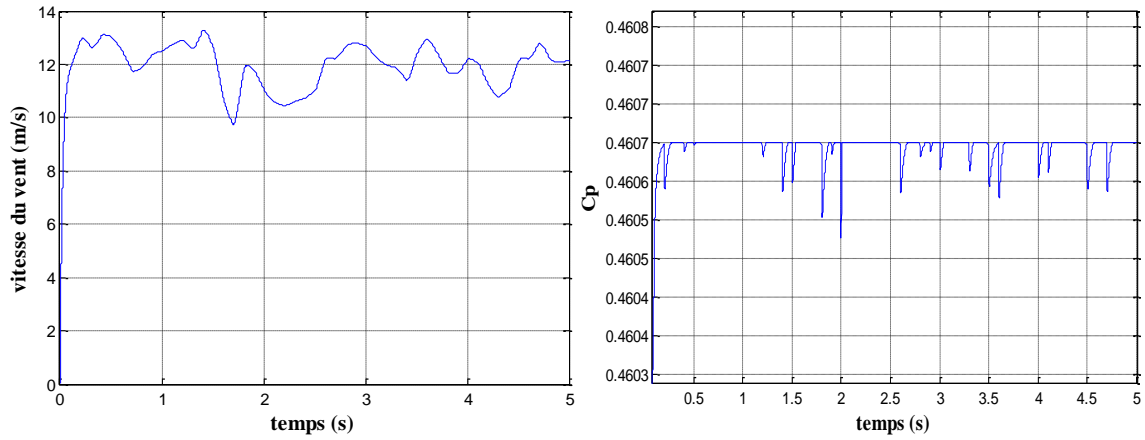


Figure. III.13 :Vitesse du vent et coefficient de puissance  $C_p$

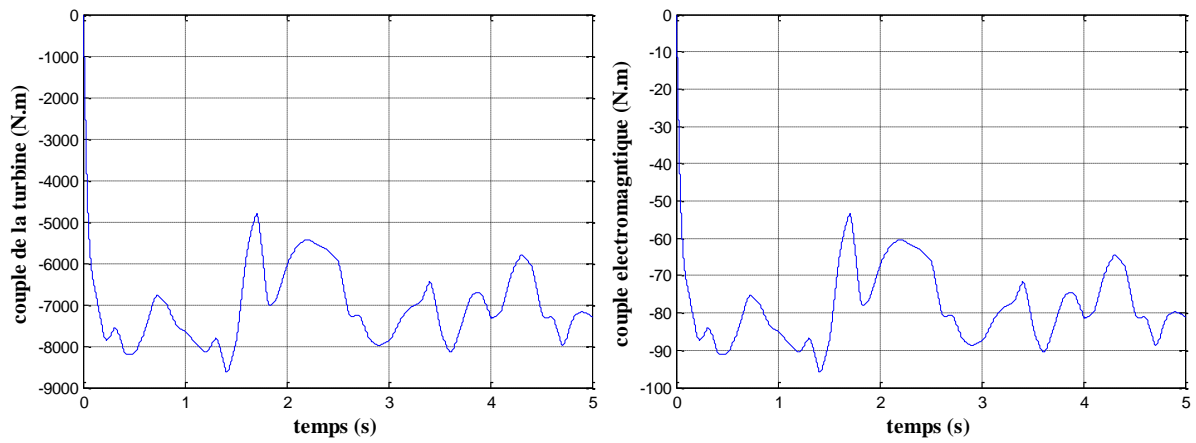


Figure. III.14 ;Couple de la turbine  $C_t$  et couple électromagnétique  $C_{em}$

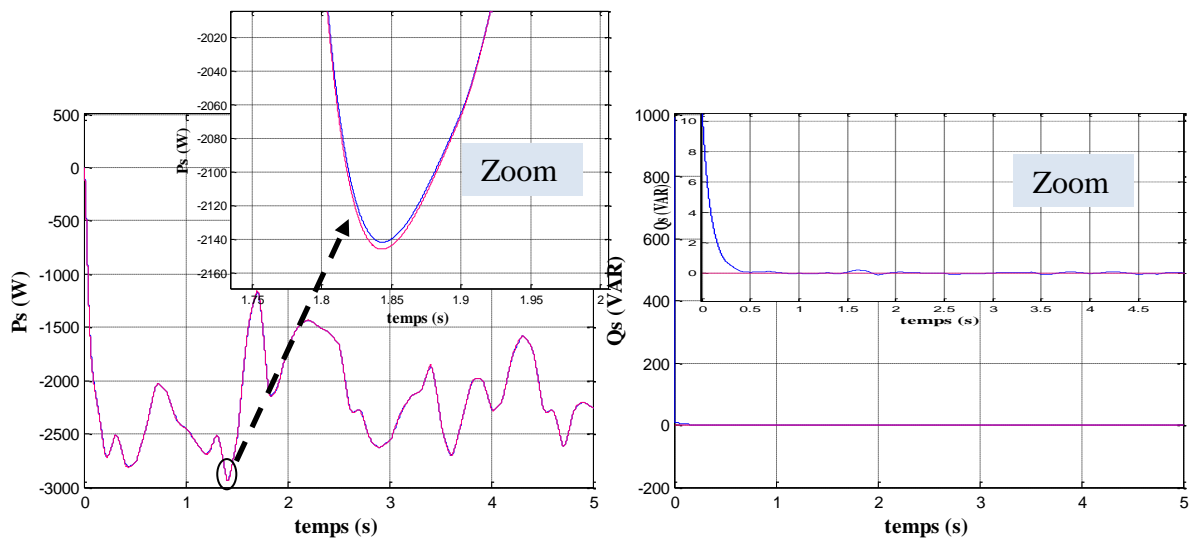


Figure. III.15 :Puissance active et réactive du stator avec un zoom

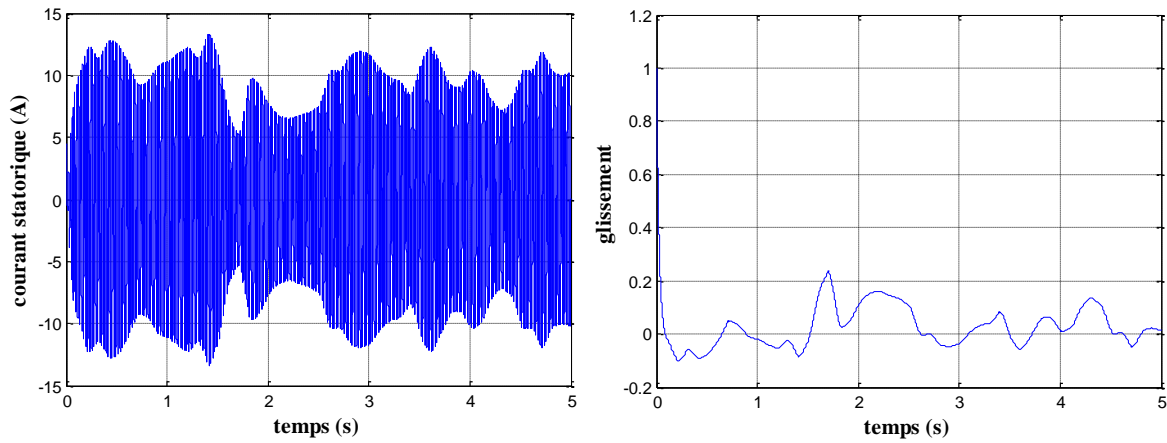


Figure. III.16 : Courant d'une phase du stator et glissement  $g$

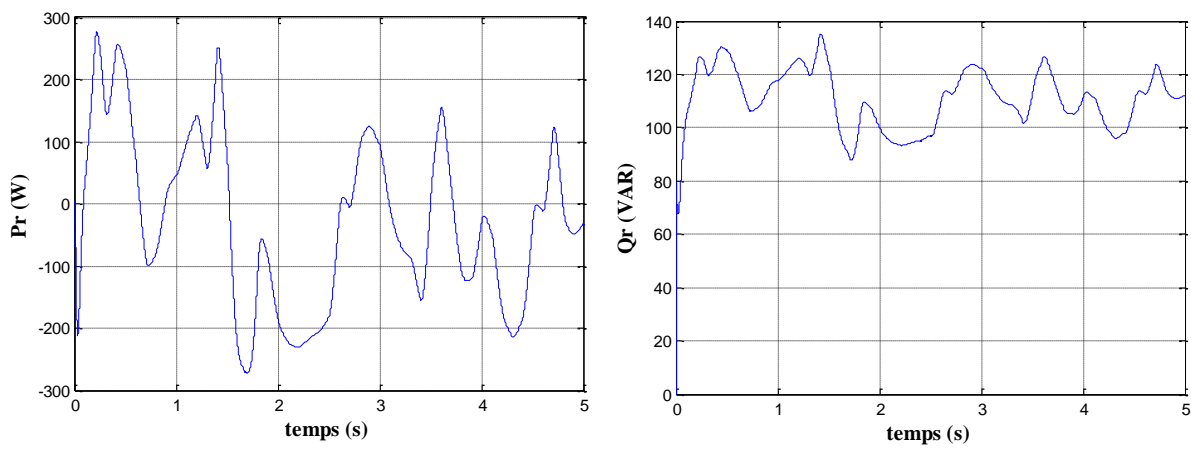


Figure. III.17 : Puissance active et réactive du rotor

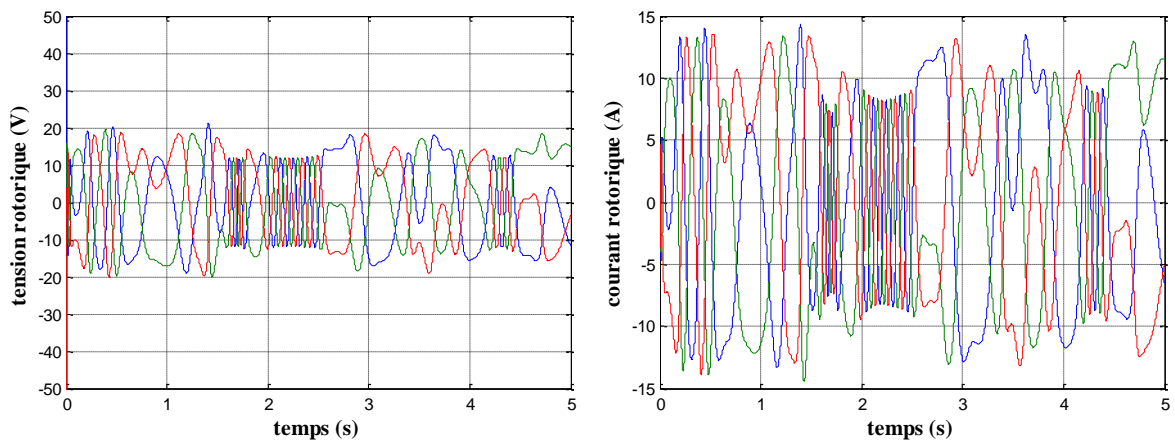


Figure. III.18 : Tensions ( $V_{ar}$ ,  $V_{br}$ ,  $V_{cr}$ ) et courants rotoriques ( $I_{ar}$ ,  $I_{br}$ ,  $I_{cr}$ )

### 8-1 Interprétation des résultats :

Nous avons appliqué à notre éolienne un profil de vent qui est présenté dans la figure (3.13). Les courbes des caractéristiques mécaniques (coefficient de puissance  $C_p$ , couple de la turbine  $C_t$  et celle de la génératrice  $C_{em}$ ) sont présentés dans les figures (3.13) et (3.14). Nous avons ensuite présenté la puissance active et réactive du stator, figure (3.15), le courant du stator et le glissement dans la figure (3.16), la puissance active et réactive du rotor la figure (3.17), la tension et le courant rotoriques dans la figure la figure (3.18).

Une petite variation de la vitesse du vent introduit une grande variation de la puissance extraite car elle est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Cette puissance est appliquée au système de réglage pour que la puissance active du rotor suit cette puissance, et la puissance

réactive du stator est réglée suivant les besoins du réseau (correction du facteur de puissance) figure (3.13).

La puissance active du stator suit donc sa référence pour permettre à l'éolienne à fonctionner dans les conditions optimales. Cette manière de fonctionnement est justifiée par la valeur maximale du coefficient de puissance ( $C_p=0.43$ ).

Comme le montre la courbe de la puissance active rotorique, cette puissance évolue en fonction de la puissance active du stator et la valeur de glissement  $g$ ; ce qui vérifie l'expression  $P_r = -g * P_s$ .

Nous avons également présenté les variations des tensions et des courants rotoriques afin de mettre en évidence le changement du fonctionnement.

### 9 teste de robustes:

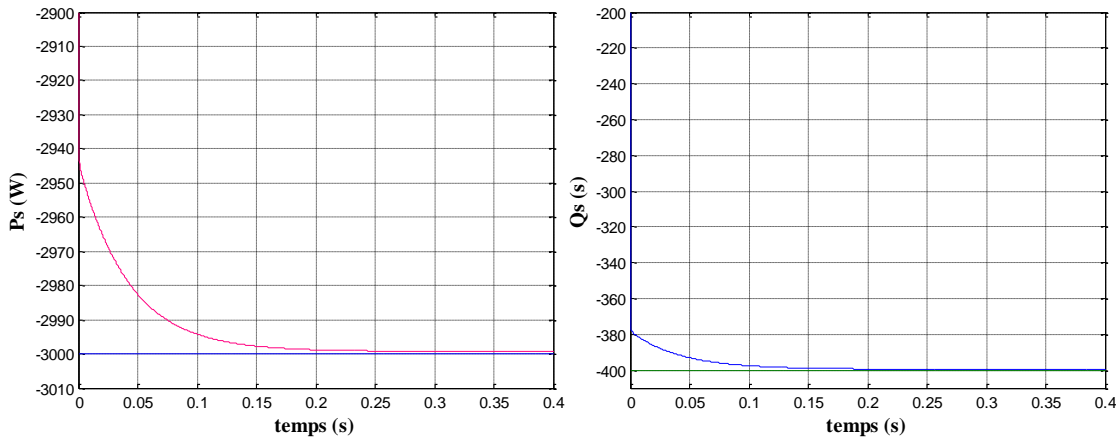
En effet, on fait des simulation de la commande vectorielle dans des condition dure:

- Le système est soumis à des variations de consigne dans les différentes plages de fonctionnement (ce que traduit les **Figure. III.21:**),

- Le système est soumis à des variations des paramètres du modèle (ce que traduit les **Figure. III.20**).

La figure (**. III.19**) montre la réponse en puissance du système avec un régulateur PI

On remarque que les performances sont très satisfaisantes, du point de vue poursuite de la consigne de la consigne

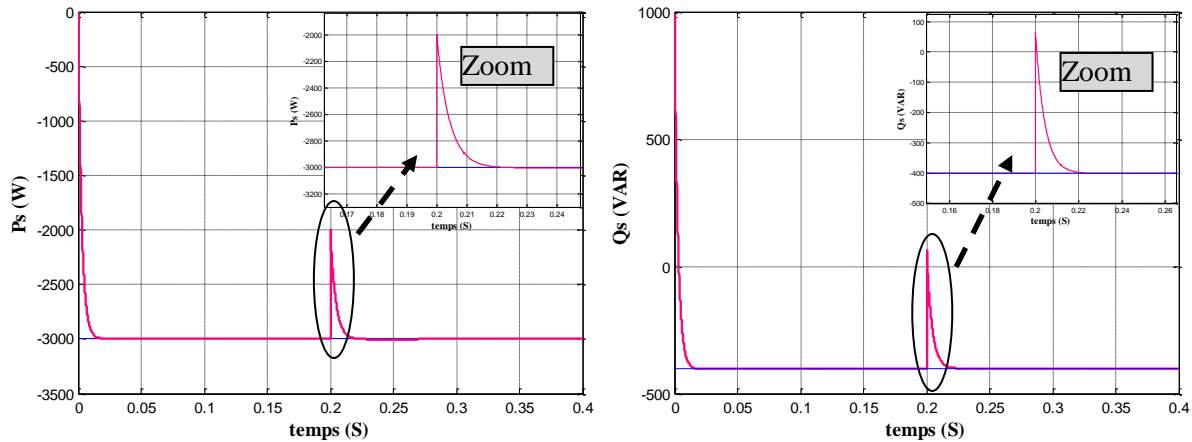


**Figure. III.19** :: Puissance active et réactive du stator obtenues par régulateur

### 9 -1 Variation de la résistance rotorique :

La figure (**Figure. III.20**) représente l'évolution de la puissance active et réactive du stator en utilisant le régulateur PI et pour une augmentation de 30% de la résistance rotorique .On constate :

- Une performance très satisfaisante, de point de vue poursuite de la consigne
- Une augmentation légère de temps de convergence.

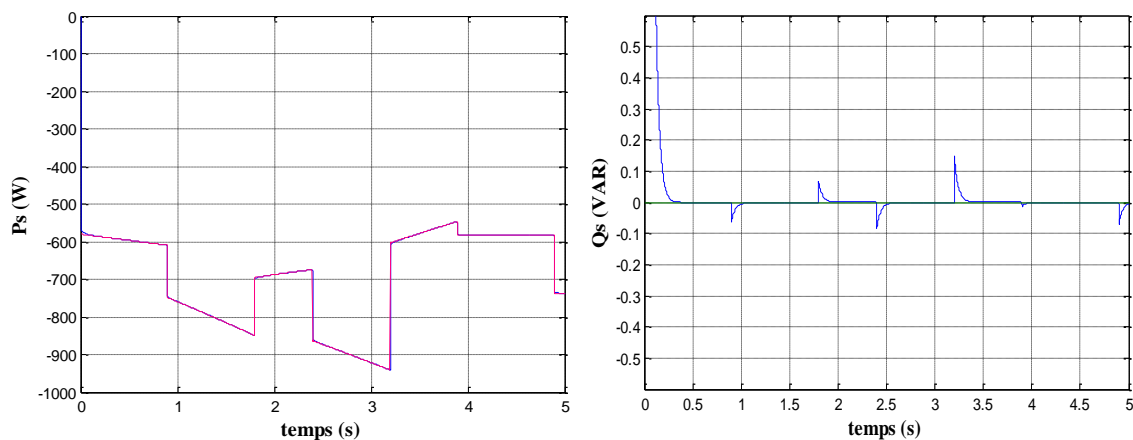


**Figure. III.20:** Puissance active et réactive du stator obtenues par le régulateur PI avec une augmentation de 30% de la résistance rotorique

### 9-2 Variation de la vitesse du vent :

Afin de mettre en évidence la robustesse de la commande par ce régulateur par rapport aux différentes variations de la consigne et de la perturbation, nous avons utilisé un profil du vent qui est caractérisé par des variations brusques de sa valeur (**Figure. III.21**). On constate que:

Le régulateurs présentent des performances satisfaisantes, de point de vue poursuite de la référence..



**Figure. III.21:** Puissance active et réactive du stator obtenues par régulateur PI

### 10-Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté les concepts de base de la commande vectorielle et plus

particulièrement la commande vectorielle par orientation du flux rotorique, cette commande assure le

découplage nécessaire, permettant de séparer la commande du flux et celle du couple

On a commencé par montrer comment calculer les différents régulateurs, puis on a effectué le test

de robustesse pour la variation de vitesse, la charge et la variation .

Les résultats montrent que la commande vectorielle est sensible à la variation .

# *CONCLUSION GENERALE*

### CONCLUSION GENERALE

Le travail réalisé dans ce mémoire présente une étude sur l'approche de la commande vectorielle indirect des machines électriques. Le but de commander la machine asynchrone avec le maximum de dynamique selon un modèle bien spécifique, au régime transitoire, avec un découplage entre le flux et le couple qui est basé sur des termes de compensations. Ces derniers sont calculés à partir du flux consigne ou de du flux estimé.

➤ Dans Le premier chapitre, on a abordé la modélisation de la machine à induction commandée en tension. Le principe de la transformation de Park est appliqué sur le modèle de la machine à induction, où on a pu avoir un modèle représentant le modèle triphasé. Ce modèle est testé par simulation dont les différents résultats ont prouvé la justesse du modèle utilisé.

➤ Le second chapitre est consacré pour la modélisation du convertisseur de fréquence, qui est représenté par l'onduleur de tension, commandé par une MLI naturelle. L'association machine- convertisseur est simulée avec alimentation en tension pour mettre en exergue les impacts de ce convertisseur sur la machine, avec l'utilisation des différentes fréquences dans le cadre de la MLI naturelle.

➤ Le troisième chapitre, Les principes de la commande vectorielle avec orientation du flux rotorique ont été résumés, avec un calcul des différents gains des régulateurs classiques (PI) utilisés dans la commande. Différentes applications numériques sont mises en œuvre afin de visualiser la robustesse de cette commande. On a vu que la connaissance de la constante de temps rotorique est très importante car elle intervient directement dans la relation de l'autopilotage. Or, la dérive de cette dernière altère la commande et provoque la perte du découplage. La recherche bibliographique, nous a permis de voir que plusieurs études sont portées dans ce contexte.

# *RéféRences bibliogRaphiques*

*Références bibliographiques*

[01] **LATRECHE Mohammed Tahar** «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien», Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012.

[02] **TRIA Fatma Zahra**"Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA

Par différentes techniques", Mémoire de Magister, Université d'El- oued, 2013.

[03] **L. ALI** et **K. ABDEL FETTAH** et **B.ANOUAR**" Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à double Alimentation", Mémoire de Magister, Université d'El- oued, 2021.

[04] **ZOUGGAR El Oualid**" Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'un système éolien basé sur les génératrices asynchrones", Thèse de Doctorat Université Batna 2, 2021.

[05] **BOUSLIMANI Samir** " Commande et Diagnostic d'un Système Non-linéaire Application à la Génératrice Synchrone Dans une Production Eolienne en Présence de Défauts ", Thèse de Doctorat Université Batna 2,2018.

[06] **KHECHAB Bachir** " Etude et modélisation d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation GADA dans la région d'Adrar ", Mémoire de Magister, Université AFRICAINE AHMED DRAIA ADRAR,2015.

[07] **Messaoud ABANA** " Commande d'une génératrice à double alimentation par la logique floue", Mémoire de MASTER Académique, Université 8 Mai 1945 – Guelma,2019.

[08] **Oussama MALAOUI**" Commande d'une éolienne à base de la MADA pour éliminer le déséquilibre dans les réseaux électriques", Mémoire du diplôme d'Ingénieur

d'État, ÉCOLE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES- ANNABA -,  
October 2020

[09] **AMAROUCHE Takfarinas** et **BENHADDAD Mohand**" CONTRIBUTION A LA COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR", Mémoire de Magister, Université A/Mira de Béjaia , Promotion 2014

[10] **Tifour Samy Imed**" Commande Vectorielle d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation Couplée au Réseau", Mémoire de Magister, Université Constantine 1, Promotion 2014

[11] **M. Jourieh** "Développement d'un Modèle Représentatif d'une Eolienne Afin d'Etudier l'Implantation de Plusieurs Machines sur un Parc Eolien " Thèse de Doctorat, ENSAM de France, 2007.

[12] **DOUADI Tarek** "Modélisation et stratégie de Commande de la Génératrice Asynchrone intégrée à un Système Eolien" Thèse de Doctorat, Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, 2018 / 2019.

[13] **MOKRANE SMAILI** "MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION EN VUE DE SIMULATION DES PROBLÈMES DE COGÉNÉRATION" Mémoire MAÎTRISE EN INGÉNIERIE, Université QUEBEC EN ABITIBI-TEMISCAMINGUE, Août 2013

[14] **RABAH SADAOUI**" ANALYSE ET COMMANDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION " DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE, Université DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES, AVRIL 2017

[15] **AMOUCAS Nabil** et **BOUTALEB Amine**" Commande vectorielle d'une machine asynchrone à double alimentation par régulateur PI " MASTER en Machines Électriques , Université M'Hamed Bougara, Boumerdes -2016

[16] **BERBOUCHI Khalil** et **BOURAGAA Slimane**" Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation intégrer dans un système éolien" MEMOIRE MASTER ACADEMIQUE.Université Ahmed Draïa Adrar, 05/06/2018

[17] **TIR Zoheir**" Commande d'un Moteur Asynchrone par Logique Floue

" Mémoire MASTER ACADEMIQUE .Université d'El Oued, 23-24 Juin 2014

[18] **DENDOUGA Abdelhakim** " Contrôle des Puissances Active et Réactive de la Machine à Double Alimentation (DFIM) " Thèse de Doctorat .Université de Batna . 10/02/2010

[19] <https://www.greenly.earth/blog-fr/lenergie-eolienne-fonctionnement-et-interets-environnementaux>

[20] **BenAmor Afaf**" Commande Directe des Puissances d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Intégré dans un Système Éolien Connecté au Réseau" Magister en Électrotechnique.Université d'El Oued. 8 / 10 /2013

[21] <https://www.researchgate.net>

[22] <http://www.mtaterre.fr>

[23] **F. Kendouli\***, **K. Nabti**, **K. Abed** et **H. Benalla**" Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation" Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine, 'LEC' Département d'électrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur Université Mentouri, Route Ain El Bey, Constantine, Algérie (reçu le 30 Janvier 2011 – accepté le 25 Mars 2011)

[https://energyeducation.ca/Encyclopedie\\_Energie/index.php/%C3%89olienne](https://energyeducation.ca/Encyclopedie_Energie/index.php/%C3%89olienne)

[25] **AIT KACI Djedjiga , BOUBOUZAL Naïma** " Etude et simulation d'un aérogénérateur Etude et simulation d'un aérogénérateur" DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR D'ÉTAT EN ÉLECTROTECHNIQUE 2009

[26] **KADDOUR MEHDI, BOUSTER IMED** " Etude d'un système de conversion éolienne connecté au réseau " Thèse de Master .Université **BADJI-MOKHTAR –ANNABA2018//2019**

[27] [https://www.researchgate.net/figure/Systeme-eolien-a-base-de-MADA-avec-cyclo-convertisseur\\_fig6\\_338007588](https://www.researchgate.net/figure/Systeme-eolien-a-base-de-MADA-avec-cyclo-convertisseur_fig6_338007588)

# *Annexe*

## Annexe

### A.1 paramètres de la machine asynchrone à double alimentation :

➤ Puissance nominale :	$P_n=7,5 \text{ kW}$
➤ Nombre de paire de pôles :	$P=3$
➤ Résistance statorique :	$R_s=1.02 \Omega$
➤ Résistance rotorique :	$R_r=0.8\Omega$
➤ Inductance cyclique rotorique :	$L_s=0.0930\text{mH}$
➤ Inductance cyclique statorique :	$L_r=0.08 \text{ mH}$
➤ Inductance mutuelle :	$M=0.664 \text{ mH}$
➤ Moment d'inertie :	$J=0,075 \text{ kg.m}^2$
➤ Coefficient de frottement :	$f=0\text{N.m/rad.s}^{-1}$

### A.2 paramètres de la turbine :

➤ Gain de multiplicateur :	$G=5,065$
➤ Rayon de la turbine :	$R=3,24 \text{ m}$

### A.3 paramètres de simulation

- Les paramètres du bus continu : 880V
- Pas de simulation : 0,00001