

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

# Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Machines électriques

*Présenté par*  
**MAACHA SYLIA**  
**SELILA LYNDA**

Thème

## Commande par des contrôleurs fractionnaire d'une éolienne utilisant une génératrice asynchrone

Mémoire soutenu publiquement le 03 /07/2017 devant le jury composé de :

**Mr Salah HADDAD**

Professeur, UMMTO, Président

**Mr Rachid MANSOURI**

Professeur, UMMTO, Encadreur

**Mme Malika IMADOUCHENE**

Maitre assistante (A), UMMTO, Examineur

**Mr Madjid SI BRAHIM**

Maitre de conférences, UMMTO, Examineur

Nous tenons à remercier Monsieur MANSOURI Rachid, professeur à l'UMMTO d'avoir accepté de prendre la charge de diriger ce travail et pour son aide et ses conseils inestimables, mais surtout pour la confiance qui nous a accordé.

Nos remerciements vont également à Monsieur HADDAD Salah, professeur à l'UMMTO non seulement de nous avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de ce mémoire mais aussi pour son aide et pour le temps qui nous a consacré et les documents qu'il a mit à notre disposition.

Que Madame IMADOUCHE Malika, maitre de conférences classe A à l'UMMTO soit remerciée pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de participer à ce jury.

Que Monsieur SI BRAHIME Madjid, maitre de conférences classe B à l'UMMTO soit remercié pour nous avoir fait l'honneur de participer à ce jury.

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à mes chers parents, mon frère, mes sœurs, et mes  
amis*

*Syria...*

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, à toute ma famille  
et à tous ce qui me sont chères.*

*Lynda.....*

**Abréviations**

MADA	Machine asynchrone à double alimentation
DFIM	Doubly Fed induction machine
IGBT	Insulated Gate Bipolar transistor
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
FTBF	Fonction de transfert en boucle fermé
FTBO	Fonction de transfert en boucle ouvert
PI	Proportionnel-intégral
PID	Proportionnel-intégral-dérivé
$I^\alpha - PI$	Intégral fractionnelle- Proportionnel-intégral

**Notations**

$P_{mec}$	Puissance mécanique
$C_p$	Coefficient de puissance
$\lambda$	Rapport de vitesse
$\beta$	L'angle de calage
$\rho$	Densité de la masse d'air
R	Rayon de l'aérogénérateur
$V_v$	Vitesse de vent
$C_t$	Couple mécanique
$\Omega_t$	Vitesse de rotation de la turbine
$V_{v moy}$	Vitesse moyenne de vent
$f_t$	Coefficient de frottement par rapport à l'air
$f_g$	Coefficient de frottement par rapport à génératrice
G	Gain de vitesse
$J_t$	Moment d'inertie de la turbine
$J_g$	Moment d'inertie de la génératrice
$J_k$	Moment d'inertie du multiplicateur
$J_m$	Moment d'inertie de la MADA
$f_m$	Coefficient du aux frottements visqueux de la MADA
$\Omega_m$	La vitesse mécanique
J	Moment d'inertie de la partie tournant

$f$	Coefficient du aux frottements visqueux total
$C_{em}$	Couple électromagnétique
$P_r, P_r$	La puissance rotorique et statorique
$V_R$	Tension rotorique
$V_S$	Tension statorique
$i_R$	Courant rotarique
$i_S$	Courant statorique
$C_r$	Couple résistante
$[V_S]$	Vecteur tension statorique
$[V_r]$	Vecteur tension rotorique
$[i_S]$	Vecteur courant statorique
$[i_r]$	Vecteur courant rotorique
$[\varphi_S]$	Vecteur flux statorique
$[\varphi_r]$	Vecteur flux rotorique
$[R_r]$	Matrice de résistance rotorique
$[R_S]$	Matrice de résistance statorique
$[L_{SS}]$	Matrice d'inductance statorique
$[L_{rr}]$	Matrice d'inductance rotorique
$[M_{sr}]$	Matrice d'inductance stator-rotor
$[M_{rs}]$	Matrice d'inductance rotor-stator
$L_{as}$	L'inductance propre d'une phase statorique
$L_{ar}$	L'inductance propre cyclique du rotor
$M_{as}$	L'inductance mutuelle entre deux phases du stator
$M_{ar}$	L'inductance mutuelle entre deux phases du rotor
$M_{rs}$	L'inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une autre du rotor
$M$	Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor
$L_S$	Inductance propre cyclique du stator
$L_r$	Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor ???????
$\theta_S$	L'angle électrique de la transformation de Park pour la grandeur statorique
$\theta_r$	L'angle électrique de la transformation de Park pour la grandeur rotorique
$\omega_S$	Pulsation des courants statoriques
$\omega_r$	Vitesse électrique du rotor

## Glossaires

---

$g$	Le glissement
$p$	le nombre de paire de pôles rotorique.
$P(\theta_s)$	Transformation de Park
$P(\theta_s)^{-1}$	Transformation inverse de Park
$V_{sdq0}$	Composantes de la tension statorique dans le plan $(d, q, 0)$
$V_{sabc}$	Composantes de la tension statorique dans le plan $(a, b, c)$
$i_{sdq0}$	Composantes du courant statorique dans le plan $(d, q, 0)$
$i_{sabc}$	Composantes du courant statorique dans le plan $(a, b, c)$
$\varphi_{sdq0}$	Composantes du flux statorique dans le plan $(d, q, 0)$
$\varphi_{sabc}$	Composantes du flux statorique dans le plan $(a, b, c)$
$G(p)$	La fonction de transfert du système
$C(p)$	Le contrôleur de la fonction de transfert du système
$G_m(p)$	Modèle interne
$C_{IMC}(p)$	Contrôle de commande par modèle interne
$u(p)$	Grandeur de command
$y(p)$	Grandeur de sortie à contrôler
$y_{ref}(p)$	Grandeur de référence
$H(p)$	Modèle de référence
$k_i$	Gain du régulateur intégral
$k_p$	Gain du régulateur proportionnel
$k_d$	Gain du régulateur dérivé
$S_a, S_b, S_c$	Bobines statoriques
$R_a, R_b, R_c$	Bobines rotoriques
$P(\theta_s)$	Transformation de Park
$P(\theta_s)^{-1}$	Transformation inverse de Park

### Figures du chapitre 1

<b>Figure (1.1)</b> : la croissance de la production de l'énergie éolienne dans le monde.	5
<b>Figure (1.2)</b> : l'énergie éolienne dans le monde.	5
<b>Figure (1.3)</b> : KENYA : Le projet du lac TURKANA bientôt plus grand parc éolien d'Afrique.	7
<b>Figure (1.4)</b> : Principe de la convention d'énergie.	9
<b>Figure (1.5)</b> : Type de montage de la voile.	10
<b>Figure (1.6)</b> : les différents types de l'éolienne à axe vertical.	11
<b>Figure (1.7)</b> : Schéma symbolique d'une éolienne.	12
<b>Figure (1.8)</b> : Bilan des forces sur une pale.	14
<b>Figure (1.9)</b> : Système à vitesse fixe.	15
<b>Figure (1.10)</b> : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.	17
<b>Figure (1.11)</b> : fonctionnement hypo et hyper synchrone.	18

### Figures du chapitre 2

<b>Figure (2.1)</b> : Synoptique d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA.	21
<b>Figure (2.2)</b> : Profil de la vitesse du vent.	23
<b>Figure (2.3)</b> : Modèle de la turbine.	24
<b>Figure (2.4)</b> : Modèle simplifié à deux masses de la turbine éolienne.	25
<b>Figure (2.5)</b> : Modèle de transmission mécanique à une masse ramené sur l'arbre rapide.	26
<b>Figure (2.6)</b> : Structure du stator et des contacts rotoriques de la machine asynchrone.	27
<b>Figure (2.7)</b> : schéma de l'alimentation de la MADA pour une application de production d'énergie éolienne.	28
<b>Figure (2.8)</b> : Quadrants de fonctionnement de la MADA.	29
<b>Figure (2.9)</b> : Représentation simplifiée de la MADA.	31

### Figures du chapitre 3

<b>Figure (3.1)</b> : schéma d'un système de commande en boucle fermée.	37
<b>Figure (3.2)</b> : Structure de commande par modèle interne.	38
<b>Figure (3.3)</b> : Tracé de la réponse du système réel et du système approximé.	42
<b>Figure (3.4)</b> : Schéma du contrôleur C(p).	44

<b>Figure (3.5) :</b> Tracé des réponses des sorties du système réel et du système approximé du premier ordre et du modèle de référence.	<b>44</b>
<b>Figure (3.6) :</b> Tracé des réponses des sorties du système réel et du système approximé du premier ordre et du modèle de référence.	<b>45</b>
<b>Figure (3.7) :</b> Tracé des réponses indicielles du système réel et du modèle approximé du second ordre.	<b>47</b>
<b>Figure (3.8) :</b> Tracé des réponses des sorties du système approximé du premier ordre et le modèle de référence.	<b>48</b>
<b>Figure (3.9) :</b> Diagramme de Bode de la fonction idéale de Bode pour $\alpha = 0.5$ et différentes valeur de $T_f$ .	<b>50</b>
<b>Figure (3.10) :</b> Réponse indicielle de la FTBT pour différentes valeur de $T_f$ .	<b>50</b>
<b>Figure (3.11) :</b> Diagramme de Bode en variant $\alpha$ .	<b>51</b>
<b>Figure (3.12) :</b> Réponse indicielle de FTBF en variant $\alpha$ .	<b>51</b>
<b>Figure (3.13) :</b> Tracé des réponses des sorties du système approximé du premier ordre et du système réel et le modèle de référence fractionnaire.	<b>53</b>
<b>Figure (3.14) :</b> Tracé des réponses des sorties du système approximé du second ordre et du système réel et le modèle de référence fractionnaire.	<b>54</b>

#### Figures du chapitre 4

<b>Figure (4.1) :</b> schéma bloc avec asservissement de la vitesse mécanique.	<b>58</b>
<b>Figure (4.2) :</b> schéma de commande utilisant la structure $I^\alpha - PI$ .	<b>58</b>
<b>Figure (4.3) :</b> Profil du vent $V_v$ .	<b>60</b>
<b>Figure (4.4) :</b> Allure du coefficient de puissance.	<b>60</b>
<b>Figure (4.5) :</b> Allure du TSR.	<b>61</b>
<b>Figure (4.6) :</b> Couple électromagnétique, et Couple mécanique.	<b>61</b>
<b>Figure (4.7) :</b> Vitesse de rotation de l'arbre lent.	<b>62</b>
<b>Figure (4.8) :</b> Vitesse de rotation de l'arbre rapide.	<b>62</b>
<b>Figure (4.9) :</b> schéma synoptique de la commande de la MADA.	<b>63</b>
<b>Figure (4.10) :</b> Orientation de l'axe d sur le flux statorique.	<b>64</b>
<b>Figure (4.11) :</b> schéma bloc de la commande de la MADA.	<b>67</b>

<b>Figure (4.12) :</b> bloc détaillé de la commande vectorielle.	<b>68</b>
<b>Figure (4.13) :</b> schéma bloqué de la commande indirecte.	<b>69</b>
<b>Figure (4.14) :</b> schéma de commande utilisant la structure fractionnaire.	<b>70</b>
<b>Figure (4.15) :</b> Puissance active avec régulateurs PI fractionnaire et PI entier.	<b>72</b>
<b>Figure (4.16) :</b> Puissances réactives avec régulateur PI fractionnaire et PI entier.	<b>72</b>
<b>Figure (4.17) :</b> effet de variation de $\alpha$ sur le courant $i_{dr}$ .	<b>73</b>
<b>Figure (4.18) :</b> effet de variation de $\alpha$ sur le courant $i_{qr}$ .	<b>73</b>
<b>Figure (4.19) :</b> Effet de la variation de la résistance rotorique sur la puissance active.	<b>74</b>
<b>Figure (4.20) :</b> Effet de la variation de l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor sur la puissance active.	<b>75</b>
<b>Figure (4.21) :</b> Tensions rotoriques.	<b>76</b>
<b>Figure (4.22) :</b> Courants rotoriques.	<b>76</b>

### **Commande par des contrôleurs fractionnaire d'une éolienne utilisant une génératrice asynchrone**

#### **Résumé**

Dans ce mémoire notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui désigne l'énergie cinétique véhiculée par les masses d'air, c'est-à-dire par les vents Il s'agit d'une énergie renouvelable de plus en plus utilisée pour produire une électricité verte à grande échelle. Notre objectif est la commande par des contrôleurs fractionnaires d'une éolienne utilisant une génératrice asynchrone une MADA en particulier.

#### **Mots-clés**

Génératrice asynchrone, MADA, Turbine, Energie éolienne, Vent, Commande IMC, Régulateurs, Contrôleurs, Entiers, Fractionnaires, Simulation.

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
------------------------------	----------

## **Chapitre 1 : généralités sur l'éoliennes**

<b>1. Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2. Généralités sur l'éolienne</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Historique</b>	<b>3</b>
<b>2.2. L'énergie éolienne en quelques chiffres [GWE 10], [BAR 09]</b>	<b>4</b>
<b>2.3. L'énergie éolienne dans le monde</b>	<b>4</b>
<b>2.4. L'énergie éolienne en Afrique</b>	<b>5</b>
<b>2.5. L'énergie éolienne en Algérie</b>	<b>6</b>
<b>3. D'où vient le vent ?</b>	<b>7</b>
<b>4. Définition de l'énergie éolienne</b>	<b>8</b>
<b>5. Principe de l'énergie éolienne</b>	<b>8</b>
<b>6. Types d'éoliennes</b>	<b>9</b>
<b>6.1. Eoliennes à axe horizontal</b>	<b>9</b>
<b>6.1.1. Avantages et inconvénients de l'éolienne à axe horizontal</b>	<b>9</b>
<b>6.2. Eoliennes à axe vertical (VAWT)</b>	<b>10</b>
<b>6.2.1. Avantages et inconvénients de l'éolienne à axe vertical</b>	<b>10</b>
<b>7. Fonctionnement de l'éolienne</b>	<b>11</b>
<b>7.1. Pourquoi les éoliennes s'arrêtent-elles par le vent ?</b>	<b>12</b>
<b>7.2. Avantages et inconvénients</b>	<b>13</b>
<b>8. Fonctionnement d'une centrale éolienne</b>	<b>13</b>
<b>8.1. Principe</b>	<b>13</b>
<b>8.2. Bilan des forces sur une pale</b>	<b>14</b>
<b>8.3. Différents types des machines utilisées dans l'éolienne</b>	<b>15</b>
<b>8.4. Le choix de la MADA dans la conversion électromécanique</b>	<b>16</b>
<b>9. Génératrice asynchrones</b>	<b>16</b>
<b>9.1. Principe et structure de la machine à double alimentation</b>	<b>16</b>
<b>9.1.1. Structure de la machine à double alimentation</b>	<b>17</b>
<b>9.1.2. Principe</b>	<b>17</b>

<b>9.2.</b>	<b>Les convertisseurs de puissance de la MADA</b>	<b>17</b>
<b>9.3.</b>	<b>Les phases de fonctionnement de la MADA</b>	<b>18</b>
<b>9.4.</b>	<b>les avantages et les inconvénients de la MADA</b>	<b>19</b>
<b>9.4.1.</b>	<b>Les avantages de la MADA</b>	<b>19</b>
<b>9.4.2.</b>	<b>Les inconvénients de la MADA</b>	<b>20</b>
<b>10.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>20</b>

## **Chapitre 2 : modélisation de la chaine éolienne**

<b>1.</b>	<b>Introduction.</b>	<b>21</b>
<b>2.</b>	<b>Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.</b>	<b>22</b>
<b>2.1.</b>	<b>Modèle du vent.</b>	<b>22</b>
<b>2.2.</b>	<b>Modélisation du couplage mécanique entre la turbine et la MADA.</b>	<b>23</b>
<b>3.</b>	<b>Modélisation de la machine à double alimentation.</b>	<b>27</b>
<b>3.1.</b>	<b>Description et structure de la MADA.</b>	<b>27</b>
<b>3.2.</b>	<b>Mode de fonctionnement de la MADA.</b>	<b>28</b>
<b>3.2.1.</b>	<b>Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.</b>	<b>28</b>
<b>3.2.2.</b>	<b>Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.</b>	<b>29</b>
<b>3.2.3.</b>	<b>Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.</b>	<b>29</b>
<b>3.2.4.</b>	<b>Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.</b>	<b>29</b>
<b>3.3.</b>	<b>Modélisation de la MADA.</b>	<b>30</b>
<b>3.2.1.</b>	<b>Modélisation de la MADA dans le plan (a, b, c).</b>	<b>31</b>
<b>3.2.2.</b>	<b>Modélisation de la MADA dans le plan (d, q).</b>	<b>34</b>
<b>4.</b>	<b>Conclusion.</b>	<b>36</b>

## **Chapitre 3 : Commande par modèle interne**

<b>1.</b>	<b>Introduction.</b>	<b>37</b>
<b>2.</b>	<b>Structure de la commande par modèle interne CIM.</b>	<b>37</b>
<b>2.1.</b>	<b>Structure de base de la méthode par modèle interne.</b>	<b>38</b>
<b>3.</b>	<b>Relation entre le contrôleur de la structure de commande par modèle interne et celui de la structure de commande standard.</b>	<b>39</b>

4.	Synthèse de $C(p)$ en utilisant la méthode de la commande par modèle interne.	40
5.	Exemple d'Application.	41
5.1.	Synthèse du régulateur $C(p)$ avec une fonction approximé du premier ordre.	42
5.2.	Synthèse du régulateur $C(p)$ avec une fonction approximé du second ordre.	46
6.	Synthèse des régulateurs fractionnaires.	48
6.1.	Fonction idéale de Bode.	49
6.2.	Synthèse du régulateur fractionnaire $C(p)$ avec une fonction approximé du premier ordre.	52
6.3.	Synthèse du régulateur fractionnaire $C(p)$ avec une fonction approximé du second.	54
7.	Conclusion.	56

## Chapitre 4 : stratégie de commande et résultats de simulation sur le système éolien

1.	Introduction.	57
2.	Stratégie de commande de la turbine éolienne.	57
2.1.	Extraction du maximum de la puissance éolienne.	57
2.2.	Synthèse du régulateur $I^\alpha - PI$ .	58
2.3.	Résultats de simulation de la turbine seule.	59
3.	Commande vectorielle de la <i>MADA</i> .	63
3.1.	Principe de fonctionnement de la <i>MADA</i> .	63
3.1.1.	Choix du référentiel du modèle de Park.	64
3.1.2.	Relation entre les puissances statoriques et les courants rotoriques.	66
3.1.3.	Relation entre les tensions rotoriques et les courants rotoriques.	66
3.1.4.	Commande directe.	68
3.1.5.	Commande indirecte.	68
3.1.6.	Synthèse du régulateur fractionnaire.	69
3.2.	Résultats de simulations de la <i>MADA</i> seule.	71
3.2.1.	Comparaison entre les régulateurs $PI$ entier et $I^\alpha - PI$ .	71
3.2.2.	Résultats de simulations des courants rotoriques.	72
3.2.3.	Essai de robustesse sur la puissance active.	73

<b>3.2.4. Résultats de simulations du système global.</b>	<b>75</b>
<b>4. Conclusion.</b>	<b>76</b>
<b>Conclusion générale.</b>	<b>77</b>

### Introduction général

Dans le monde, il existe différentes sources d'énergies utilisables afin de pouvoir répondre aux nombreuses demandes de la population mondiale, qui elle, augmente de jours en jours. Ces demandes énergétiques concernent les transports, le chauffage, ainsi que l'utilisation du téléphone ou même de la télévision. Cette utilisation de l'énergie a permis une amélioration du niveau de vie des populations des pays développés.

Nous pouvons donc nous demander quelles sont les conséquences ainsi que les problèmes et les bienfaits dus à la consommation énergétique mondiale.

En premier lieu, nous allons présenter les différentes sources d'énergies utilisées avec leurs modes d'utilisation. En second lieu, nous montrerons les avantages de certaines énergies utilisées, et pour finir, les conséquences ainsi que les problèmes rencontrés avec d'autres énergies.

Parmi ces différentes sources d'énergies, deux sortes se distinguent : les énergies dites non renouvelables et les énergies dites renouvelables. Ces énergies existent sous différentes formes. Elles peuvent être liquides ou gazeuses. Cependant, les énergies les plus utilisées restent non renouvelables à l'image du pétrole ou même du charbon.

De nos jours, la consommation d'énergie est une des plus grandes préoccupations car elle est en augmentation constante et elle a un grand impact sur notre environnement. Les principales conséquences sont, la pollution atmosphérique causant une augmentation de l'effet de serre qui provoque un réchauffement climatique. Ce réchauffement climatique risque d'engendrer une fonte partielle des calottes polaires élevant ainsi le niveau des mers, inondant les zones côtières basses, certaines îles et les deltas.

Les espèces animales sont particulièrement menacées, puisque environ 20% à 30% des espèces évaluées à ce jour sont sensibles d'être exposées à un grand risque d'extinction.

La végétation en cours d'être ravagée par une croissance des feux de forêts qui provoqueraient un grand dégazage (libération de gaz contenu dans les arbres). La fonte du pergélisol en arctique est dû à son réchauffement. Entre 33% et 50% du pergélisol de l'Alaska dégèlerait si sa température augmenterait de 1 degré.

En Sibérie des lacs provoquent un grand dégagement de méthane suite à leur formation dû à la fonte du pergélisol. Une analyse prouve que ce méthane était gelé depuis de milliers d'années.

Un souci préoccupant au sujet des énergies non renouvelables qui s'épuisent et deviennent de plus en plus rares. De nombreux combustibles fossiles ne suffiront plus pour subvenir aux besoins des personnes à l'avenir.

Depuis ces dernières années étant donné l'accroissement du coût des combustibles fossiles et des problèmes environnementaux dérivés de leur exploitation, nous assistons à un renouveau des énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables sont inépuisables, propres et peuvent être utilisées de manière autogérée (puisqu'elles peuvent être utilisées dans le même lieu où elles sont produites). Elles présentent en outre l'avantage additionnel de se compléter entre elles.

C'est dans ce contexte général, que s'inscrit notre étude qui s'intéresse à la filière éolienne qui désigne l'énergie cinétique véhiculée par les masses d'air, c'est-à-dire par les vents. Il s'agit d'une énergie renouvelable de plus en plus utilisée pour produire une électricité verte à grande échelle. Notre objectif est la commande par des contrôleurs fractionnaires d'une éolienne utilisant une génératrice asynchrone une MADA en particulier, nous avons réparti notre travail en quatre chapitres :

**Le premier chapitre** est consacré à des généralités sur le système éolien, et des présentations sur leur fonctionnement et ces différents types ainsi que la machine qui sera utilisée pour l'étude menée dans ce mémoire qui est la machine asynchrone à double alimentation.

**Le second chapitre** est consacré à la modélisation du couplage mécanique entre la turbine et la MADA et à la modélisation de la machine à double alimentation.

**Le troisième chapitre** met en œuvre d'une manière générale la structure de commande par modèle interne et son principe de base. Et une synthèse des régulateurs fractionnaires puis on va présenter la fonction idéale de Bode qui est utilisée comme fonction de transfert à imposer à la boucle fermée ces régulateurs.

**Le quatrième chapitre** est consacré à la structure de la commande de l'éolienne dans le but d'extraire le maximum de puissance. Puis présente une stratégie de commande appliquée à l'asservissement en puissance active et réactive statorique de la MADA qui est la commande vectorielle. Et en fin les résultats simulation obtenus sous le logiciel Matlab-Simulink à travers plusieurs essais seront présents afin de tester les performances des régulateurs.

### 1. Introduction

Avec la croissance des industries, et par conséquent, avec l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, le problème des énergies renouvelables est un sujet d'actualité. C'est pour cette raison, que nous allons ici nous intéresser à un des outils permettant de produire une énergie renouvelable: les éoliennes. En effet, elles sont aujourd'hui de plus en plus répandues dans le monde.

L'énergie éolienne est l'énergie du vent. C'est une énergie plus respectueuse de l'environnement que les énergies classiques telles que les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire, car elle cause moins de pollution. Quoique le vent soit une source d'énergie gratuite, sa puissance varie considérablement en fonction du lieu et du moment ainsi que du climat et des saisons. Le vent ne peut assurer un apport énergétique régulier et il est difficile à contrôler. Toutefois, il est possible de prévoir la vitesse moyenne du vent, sa direction et son intensité dans certains lieux.

Dans ce chapitre, on présente dans la première partie les éoliennes d'une manière générale. Dans la deuxième partie on présentera le fonctionnement d'une centrale éolienne et les différents types des machines utilisées dans les éoliennes ainsi que le choix de la machine qui sera utilisée pour l'étude menée dans ce mémoire qui est la machine asynchrone à double alimentation et ce dernier est présent dans la troisième partie.

### 2. Généralités sur l'éolienne

#### 2.1. Historique

L'énergie éolienne est utilisée depuis des siècles par l'homme, cette énergie était transformée en énergie mécanique, d'une part sur terre par les moulins et des systèmes de pompage de l'eau, d'autre part en mer, par les bateaux.

Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.C environ. 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 Age. [24]

Utilisés tout d'abord pour mouliner 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 siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIXème siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000.

A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive [24].

Aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration de l'aérogénérateur ainsi que sur la chaîne de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. Les premières éoliennes mettent en œuvre une génératrice asynchrone liée aux pâles par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse, fonctionnant à vitesse fixe et directement reliée au réseau (pas d'interface électronique). Cette technologie est surtout employée au Danemark dans les années 1970. Les systèmes les plus récents se dirigent d'une part vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent avec l'insertion d'électronique entre la génératrice et le réseau, et d'autre part vers l'utilisation de génératrices spéciales tournant à basse vitesse afin de s'affranchir du réducteur de vitesse [20].

### **2.2. L'énergie éolienne en quelques chiffres**

La puissance d'un outil de production d'électricité se mesure en GW (GigaWatt) et son multiple par 1000, le TW (TéraWatt). La production d'électricité (l'énergie produite) se mesure en GWh (GigaWatt-Heure).

Comme presque toutes les énergies renouvelables (excepté les énergies géothermique et marémotrice), l'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire. Or, la Terre reçoit en 30minutes l'équivalent en énergie solaire de la consommation annuelle de l'humanité, tous types d'énergies confondus. De 1 à 2% de cette énergie provenant du soleil est convertie en vent, soit 50 à 100 fois plus que l'énergie convertie en biomasse par la photosynthèse.

L'installation d'une éolienne nécessite une surface de  $1\text{Km}^2$ , cela représente une surface d' 1 million de  $1\text{km}^2$  pour la totalité du parc mondial, soit un carré de  $1000\text{Km}$  de côté, Cela ne représente que 0,2% de la surface terrestre [GWE 10].

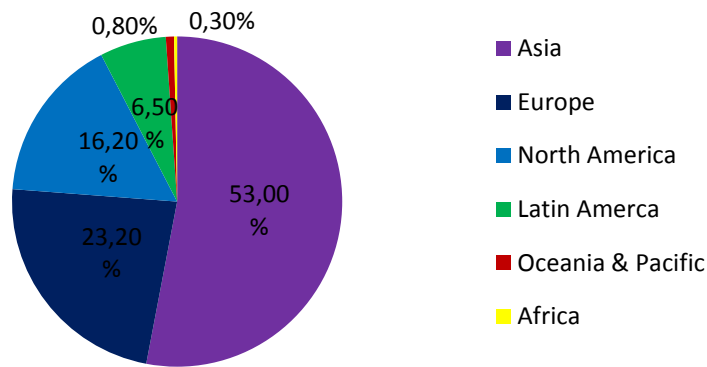
La consommation électrique mondiale est de 16 millions de  $\text{GWh}$  par an sachant que la production d'une éolienne de  $5\text{MW}$  est de plus de  $15\text{GWh}$  par an, Il faut donc environ 1 million d'éoliennes pour répondre à la totalité de la demande électrique mondiale. [24]

### **2.3. L'énergie éolienne dans le monde**

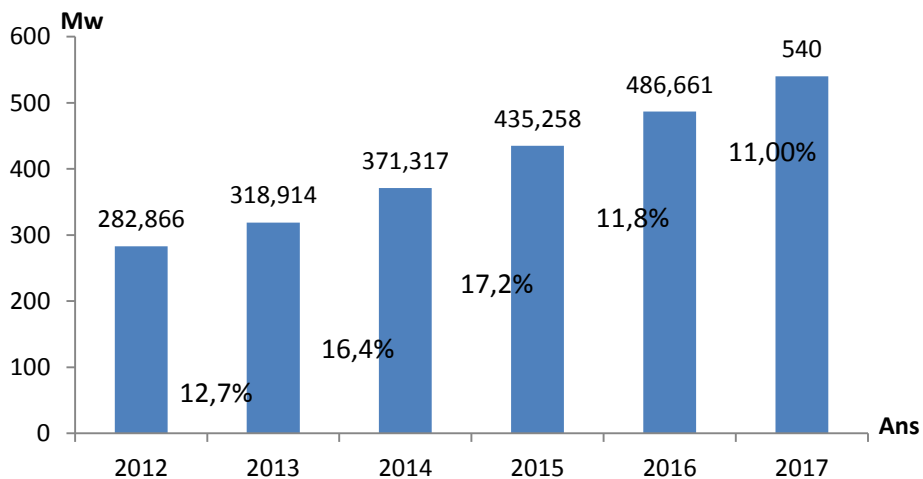
La capacité éolienne mondiale a atteint  $456'486\text{MW}$  en juin 2016, dont  $21'714\text{MW}$  ont été ajoutés au premier semestre 2016. Cette augmentation est similaire à celle du premier semestre 2015, alors que  $21,6\text{GW}$  ont été ajoutés. Toutes les éoliennes installées dans le monde à la mi-2016 à généré environ 4,7% de la demande mondiale d'électricité.

La capacité éolienne mondiale a augmenté de 5% en six mois (après 5,8% au cours de la même période en 2015 et 5,6% en 2014) et de 16,1% sur une base annuelle (mi-2016 par rapport au milieu de 2015).

Au deuxième semestre de 2016, une capacité supplémentaire de plus de 40 GW à été érigée dans le monde entier, ce qui a apporté de nouvelles installations annuelles à au moins 65 GW, ajoutant seulement 1,5 GW de plus que l'année précédente. La capacité totale d'éolien installée a atteint 500 GW en 2016. Comme le montre les figures (1.1) et (1.2),



**Figure (1.1) :** les nouvelles capacités de l'énergie éolienne dans le monde en 2016



**Figure (1.2) :** la capacité totale de l'énergie éolienne installée en 2012-2017 dans le monde

## 2.4. L'énergie éolienne en Afrique

L'Afrique a vu un développement remarquable dans le domaine des énergies renouvelables en particulier l'énergie éolienne. Et parmi les projets les plus importants on a par exemple, le projet du Kenya (Le projet d'énergie éolienne du lac Turkana).

Le projet d'énergie éolienne du lac Turkana (« The Lake Turkana Wind Project ») se situe au Nord-Ouest du Kenya, lieu relativement isolé sans réseau de transmission énergétique. Ce site est particulièrement favorable à la production d'électricité par des turbines éoliennes puisqu'il se trouve dans le « couloir éolien du Turkana » où des courants jets subtropicaux s'engouffrent entre les Monts Kulal et Nyiru respectivement au nord et au sud du site du parc éolien. Les vents provenant de l'Océan Indien traversent le couloir Turkana créés par les plateaux d'Ethiopie et du Kenya dans la vallée du Rift et sont renforcés par l'amplitude climatique élevée entre les montagnes et le lac qui produit un mouvement des vents à 11 mètres par seconde. Cette grande vitesse fait de cette région le parfait emplacement pour la production d'énergie électrique par des turbines éoliennes. Il s'agit du premier projet du genre au Kenya et un des plus importants projets d'Afrique.

Le Projet fait partie du plan de développement d'énergie la moins coûteuse du secteur de diversification énergétique kenyan vers des technologies propres. Ainsi, l'objectif principal du projet est de fournir du courant électrique fiable, et de faible coût au moyen d'une augmentation d'environ 17 % de la puissance électrique installée du Kenya.

Il comprendra 365 turbines éoliennes toutes mises en œuvre par Vestas Wind Systems (entreprise danoise qui a installé ses turbines éoliennes dans plus de 70 pays.)

En plus de l'implantation de ces éoliennes et de leurs fondations, le projet prévoit la construction d'un réseau collecteur sous tension de 33 kV, ainsi qu'un réseau routier de 428km du Lac Turkana à la sous-station de Susua permettant l'accès au site et ses alentours à des fins de construction, d'exploitation et de maintenance.

Le projet va augmenter de 30% l'énergie actuellement installée au Kenya et durant les 20 années d'opération du projet, une réduction de 16 millions de tonnes de carbones est prévue. Il conduira, selon des estimations prudentes, à une réduction allant jusqu'à 736 615 tonnes d'émissions annuelles d'équivalent CO<sub>2</sub>. Le parc éolien du lac Turkana aura une capacité de 300 MW, soit 20% de la capacité énergétique nationale !

Ce projet a été élu « projet africain d'énergie renouvelable » pour l'année 2014. « Ce parc est très important pour le Kenya. L'important réseau de transmission dont il sera doté pourra également desservir les futurs projets qui ne seront pas reliés au réseau

électrique.» a expliqué Sarah Tame, l'organisatrice de l'IJ Global Awards pour l'Europe et l'Afrique qui s'est déroulé en 2014 à Londres.

Il est à noter que l'infrastructure de transport électrique aurait dû être achevée en octobre 2016, mais cela n'a pas pu être possible, en raison des conflits juridiques causés par les demandes de compensation des propriétaires des terrains situés le long de sa trajectoire.

Le projet va donc pourvoir les zones rurales en électricité fiable et peu chère. Il donnera accès aux crédits de carbone, rendra fonctionnels les TICS (technologies de l'information et de la communication), illuminera les écoles et les centres de santé qui jusque-là en étaient dépourvus, et créera de nouveaux emplois.



*Figure (1.3) : KENYA : Le projet du lac TURKANA plus grand parc éolien d'Afrique.*

## **2.5. L'énergie éolienne en Algérie**

Le groupe Sonelgaz s'est investi dans le domaine des énergies nouvelles et renouvelables. Dans son programme de développement des énergies renouvelables, le groupe prévoit la réalisation de 67 projets de centrales électron-solaires, dont 27 centrales photovoltaïques, 27 centrales hybrides, 6 centrales solaires thermiques et 7 centrales éoliennes. Les plus puissantes centrales solaires seront de type solaire thermique, avec une capacité maximale de 400 MW pour l'une d'entre elles. Pour une question d'efficacité optimale, elles seront toutes installées dans les régions du sud, notamment dans les wilayas d'Adrar, d'El Oued et de Béchar.

Un autre domaine des énergies renouvelables est à développer et promouvoir en Algérie, c'est l'énergie éolienne. Un projet portant sur la réalisation d'une ferme éolienne à Adrar a été attribué au consortium algéro-français, Cegelec. Ainsi le fabricant français d'éoliennes Vergnet a remporté un appel d'offres international auprès de la Compagnie

d'Engineering de l'électricité et du gaz (CEEG), une filiale du groupe Sonelgaz, concernant l'installation du premier parc éolien à Adrar au sud-ouest du pays. Ce complexe éolien aura une puissance de 10 MW et devrait être mis en service courant 2012. Mais après plus d'une année et demi de retard pour le lancement de cette ferme éolienne, elle n'a été mise en service que le 03 juillet 2014, alors que d'autres projets programmés dans le plan du gouvernement sont en attente de concrétisation.

### **3. D'où vient le vent ?**

Comme toutes les formes d'énergie, le vent est un sous-produit de l'énergie solaire. Le soleil chauffe une masse de terre et la chaleur dégagée par cette terre est absorbée par l'air environnant, Quand l'air arrive à une certaine température, il commence à s'élever rapidement. Il en résulte une zone de basse pression au niveau du sol et une zone de plus haute pression en altitude. L'air se déplace naturellement des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Ce mouvement de l'air crée le vent. Les zones de la terre qui sont proches du soleil, comme l'équateur, deviennent plus chaudes que les zones éloignées, comme les pôles. Comme l'air quitte les zones chaudes et monte, l'air froid des zones environnantes, se précipite pour remplir l'espace laissé libre par l'air montant, créant ainsi des vents de surface. A cause du relief, de la topographie, de la rugosité de la surface et de l'endroit, certaines zones sont plus venteuses que d'autres. Plus le vent est rapide, plus il peut produire d'énergie. Pour cette raison, il est important de placer les éoliennes sur des sites de vent à grande vitesse.

### **4. Définition de l'énergie éolienne**

Le mot « éolienne » vient du grec Αἴολος (Eole), le dieu des vents. Le terme signifie également « rapide », « vif » ou « inconstant ».

Le nom d'éolienne a été donné aux turbines transformant l'énergie cinétique acquise par l'air propulsé à une certaine vitesse par le vent en énergie mécanique utilisable sur un arbre tournant.

Cette énergie mécanique était utilisée par les anciens moulins pour faire tourner la meule à moulin le grain ou autre denrée ou encore à pomper l'eau du sous-sol pour l'irrigation.

### **5. Principe de l'énergie éolienne**

Le rôle principal d'une éolienne est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur l'arbre de transmission en mouvement rotatif puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice électrique, et cette transformation prend deux étapes [18]

- Au niveau de la turbine (rotor), on voit la transformation d'énergie cinétique du vent à une énergie mécanique ; cette dernière est transmise à la génératrice.
- Au niveau de la génératrice, qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

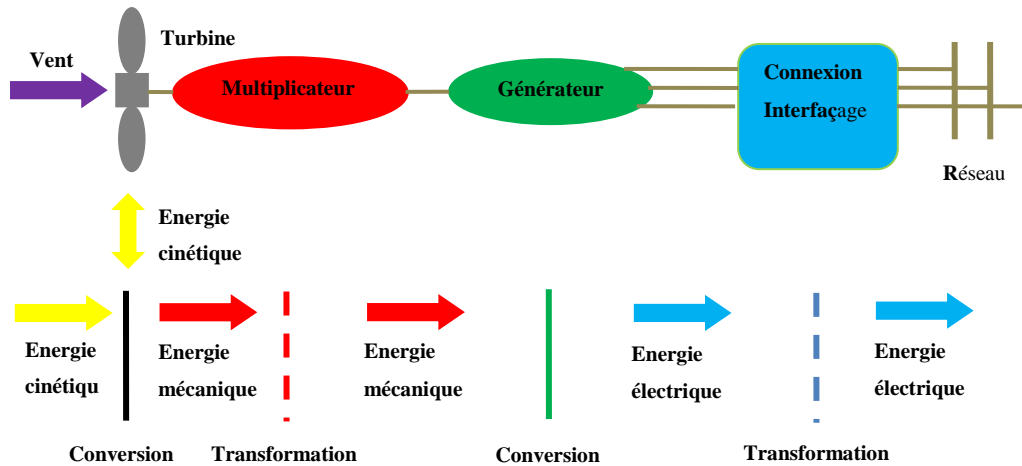


Figure (1.4) Principe de la convention d'énergie [18]

## 6. Types d'éoliennes

On distingue plusieurs types d'éoliennes, elles se différencient selon la position de leurs axes de rotation et leurs performances.

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

### 6.1. Eoliennes à axe horizontal :

Les voilures à axe horizontal sont de loin les plus utilisées actuellement. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multipales.

La voile peut être placée avant la nacelle (upwind) et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire.

Une autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de toute mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (downwind). Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. La figure (1.5) montre les deux procédés.

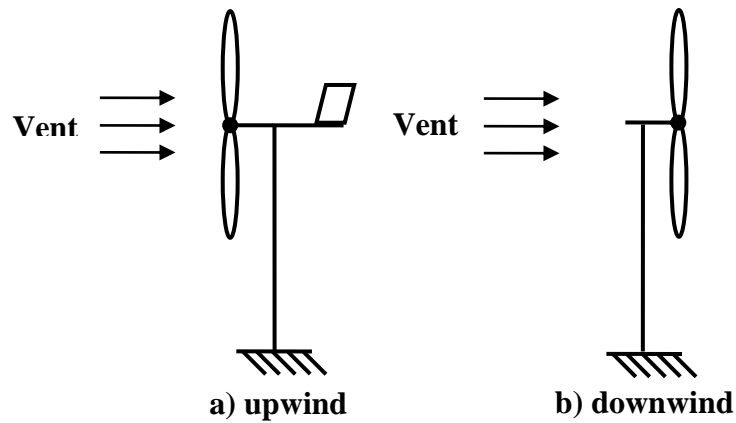


Figure (1.5) : Type de montage de la voilure [19]

### 6.1.1. Avantages et inconvénients de l'éolienne à axe horizontal

#### ➤ Avantages

- Son rendement est élevé
- Elle est équipée d'un système qui permet de les orienter en fonction du vent
- Les frais de fonctionnement sont faibles
- Elle est moins exposée aux contraintes mécaniques que celle de l'éolienne à axe vertical

- Son coût est moins important que l'éolienne à axe vertical
- Elle est mieux adaptée au secteur
- Elle est plus solide

#### ➤ Inconvénients

- Elle est moins simple que l'éolienne à axe verticale
- Les pales du rotor doivent être non flexibles
- Elle fait beaucoup de bruit.
- Il y a moins de sécurité pour les oiseaux car elle tourne à haute vitesse.

### 6.2. Eoliennes à axe vertical (VAWT):

Une autre famille d'éoliennes est basée sur les voilures à axe vertical. Ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connue. Elles peuvent avoir un intérêt dans certains secteurs d'application. Il existe principalement trois technologies :

Les turbines Darrieus classiques ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius, comme montré à la figure (1.6). Toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales.

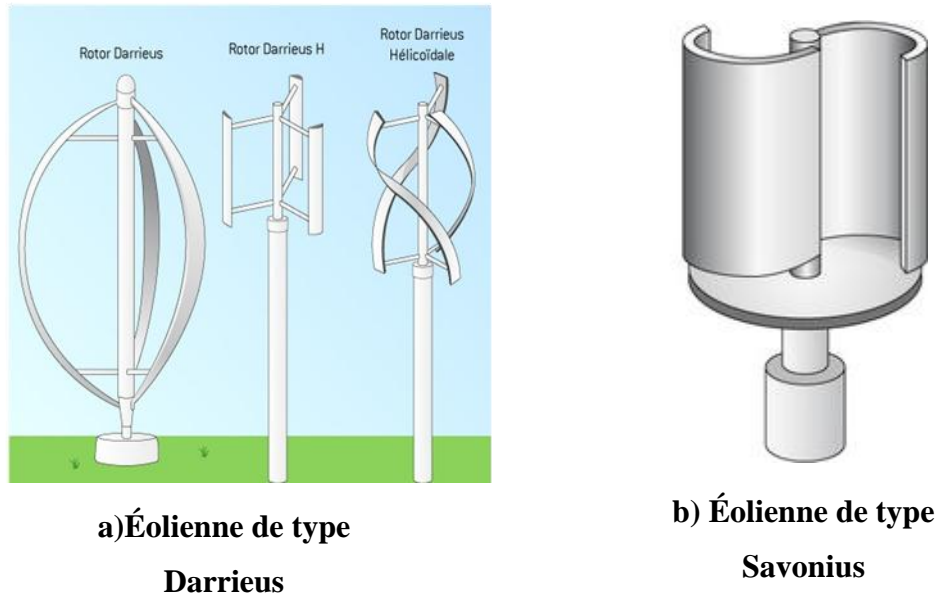


Figure (1.6) : les différents types de l'éolienne à axe vertical

### 6.2.1. Avantages et inconvénients de l'éolienne à axe vertical

#### ➤ Avantages

- Sa conception est plus simple que l'éolienne à axe horizontal
- Elle est plus facile d'accès
- Elle ne nécessite pas de système d'orientation par rapport à la direction du vent, ce qui constitue un avantage de construction non négligeable
  - Lors du fonctionnement, elle n'est pas soumise aux contraintes importantes sur les pales, les roulements et les axes dues aux changements d'orientations

#### ➤ Inconvénient

- Son rendement est médiocre, ce qui n'a pas facilité son développement
- Le rotor se situe en général très près du sol, les vents sont donc très faibles dans la partie inférieure du rotor
  - Elle ne démarre pas automatiquement, il faut utiliser la génératrice comme moteur pour permettre le démarrage de l'éolienne
  - un démontage complet de l'éolienne est nécessaire pour procéder au remplacement du palier principal du rotor
  - Il n'y a aucun système d'orientation au vent

## 7. Fonctionnement de l'éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 m/m) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 trs/m, vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur.

Des convertisseurs électriques ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50Hz), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 0.6 à 1 kVolts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance situé dans la nacelle ou à l'intérieur de mât jusqu'à un niveau de 20 à 30 kVolts. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produit par chacune des éolienne d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique de distribution.

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimal de l'ordre de 10-15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner [25]. Figure (1.7)

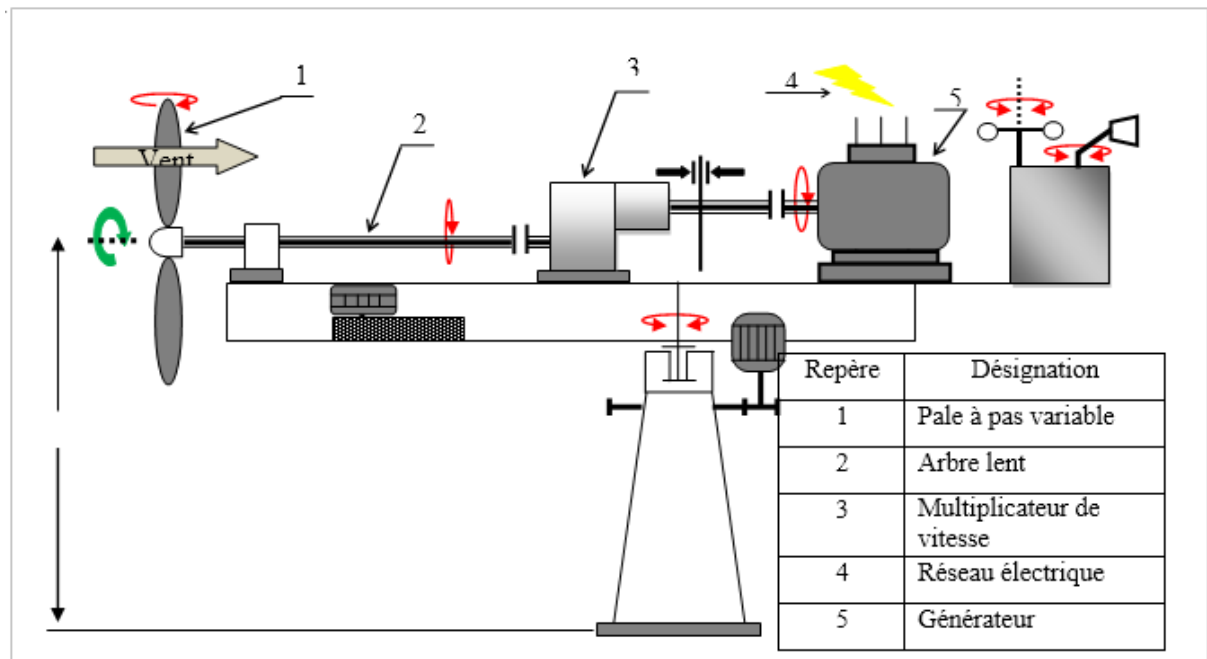


Figure (1.7) : Schéma symbolique d'une éolienne [25]

### 7.1. Pourquoi les éoliennes s'arrêtent-elles par le vent ?

Ceci correspond au choix des ingénieurs qui conçoivent les éoliennes. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 27 m/s est généralement faible (inférieur à 1), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions elles subiraient des efforts

importants qui entraîneraient une usure prématurée de leur équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs conceptions n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants.

La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1.5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs. [26]

### 7.2. Avantages et inconvénients [25]

#### ➤ Avantages

- Indéfiniment durable et propre. Elle n'entraîne aucune pollution de l'aire.

Complètement renouvelable, parfaitement fiable et très efficace.

- Peut-être complément aux filières traditionnelles
- Ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs
- Elle permet que le terrain occupé par les parcs éoliens soit utilisé à d'autres fins,

par exemple : agricultures

- Elles fonctionnent de façon rentable dans les régions suffisamment ventées
- Elimination des frais et les risques de transport associés des énergies fossiles
- Associée à peu d'impacts environnementaux, en comparaison avec les autres sources d'énergie (chaque MW-heure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0.8 à 0.9 tonne les émissions de CO<sub>2</sub> produites chaque année par la production d'électricité avec le charbon ou le diesel)

- Une éolienne est construite en acier, elle est en grande partie recyclable après son temps de fonctionnement (environ de 20 ans), elle est entièrement démontable.

#### ➤ Inconvénients

- Instable, elle est sujette à des variations du vent et à des périodes de calme
- Difficulté de stockage de l'énergie
- Les équipements sont chers et produisant du bruit (bruit d'origine mécanique ou aérodynamique, les éoliennes installés actuellement produisent un bruit de 55dBA à leurs pieds)

- Interférences électromagnétiques induit par leurs générateurs (interférences avec les radars en particulier avec les radars météorologiques, ceci peut constituer un obstacle à la propagation de l'onde).
- Constitue un obstacle mortel pour les oiseaux migrateur(les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit, les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci).

## 8. Fonctionnement d'une centrale éolienne [21]

### 8.1. Principe

A la hauteur de la nacelle souffle un vent de vitesse  $V_{vent}$ . Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse de seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt. A la vitesse seuil détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement, le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage éolienne et commence à tourner.

Une puissance  $P_{vent}$  est alors captée est transmise à l'arbre avec un coefficient de puissance. Au rendement du multiplicateur pré, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine. On distingue alors deux cas, soit l'éolienne est reliée au réseau de distribution (directement ou à travers des convertisseurs statiques), soit elle alimente en autonome une charge isolée à travers ou sans les convertisseurs statiques.

### 8.2. Bilan des forces sur une pale

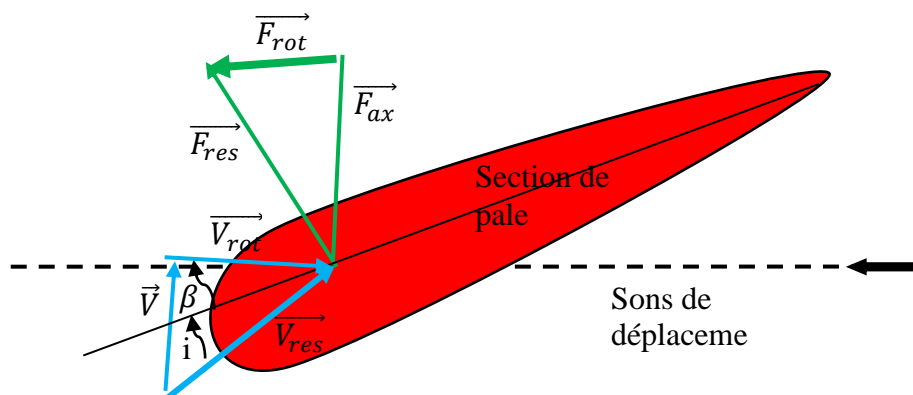


Figure (1.8) : Bilan des forces sur une pale [21]

La Figure (1.8) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur  $V$ .

Le vecteur  $V_{rot}$  représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée  $V_{res}$ .

L'action du vent sur la pale produit une force  $F_{res}$  qui se décompose en une poussée axiale  $F_{ax}$  directement compensée par la résistance mécanique du mât et une poussée en direction de la rotation  $F_{rot}$  qui produit effectivement le déplacement.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

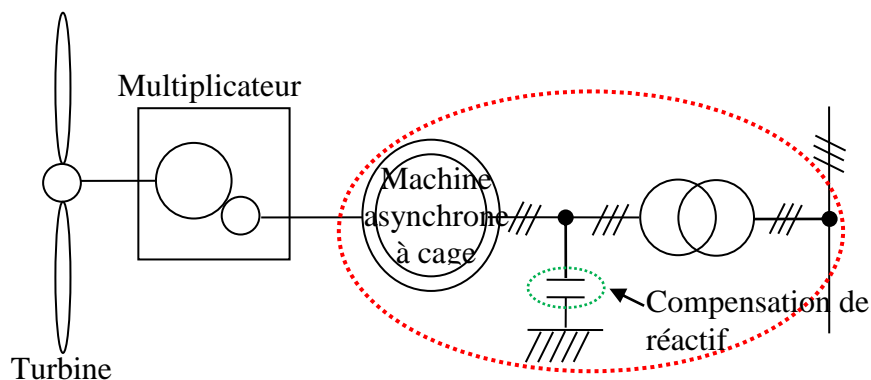
### 8.3. Différents types des machines utilisées dans l'éolienne

Les éoliennes actuellement installées peuvent être classées selon deux catégories

- les éoliennes à vitesse fixe.
- les éoliennes à vitesse variable.

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées, elles contenaient pour la plus part un générateur asynchrone à cage d'écureuil.

Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau comme le montre la figure (1.8), sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de pair de pôles de la génératrice. En effet c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, une fiabilité et un faible coût, ce qui permet une installation rapide d'ordre de KW.



**Figure (1.9) :** Système à vitesse fixe.

### Remarque

- Un multiplicateur entraîne cette machine à une vitesse qui est maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales.

- Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la Puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage.

Cependant, pour des puissances supérieures au MW, ce sont les éoliennes à vitesse variable qui se développer à l'avenir. En effet ces dernières présentent deux structures :

- La première basée sur une machine asynchrone à cage pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable par des convertisseurs statiques.

L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine. Ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système.

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite.

L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs. Il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille de plus les performances des composants électroniques utilisés par ces convertisseurs tel que les transistors IGBT diminuent à partir d'une certaine puissance.

- La deuxième est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné qui est le type utilisé dans notre machine étudiée.

La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance situés au circuit rotorique. La plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator, et moins de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux. L'inconvénient de ce système est la présence de balais au rotor, ce qui demande un travail de maintenance plus important.

### 8.4. Le choix de la MADA dans la conversion électromécanique

Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme, car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante. Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor, en fonction de la vitesse de vent. En effet, la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone, on arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large

plage de vitesse de vent, et de pouvoir tirer le maximum de puissance possible pour chaque vitesse de vent.

## 9. Génératrice asynchrones

La machine asynchrone(MAS) est utilisée dans la plupart des cas car cette génératrice peut supporter de légères variation de vitesse ce qui est un atout pour les éoliennes où la vitesse du vent peut évoluer rapidement notamment lors de rafales. Ces variations de vitesse engendrent des sollicitations mécaniques importantes sur le système qui se trouvent plus réduits avec une machine asynchrone qu'avec une génératrice synchrone qui fonctionne à vitesse fixe.

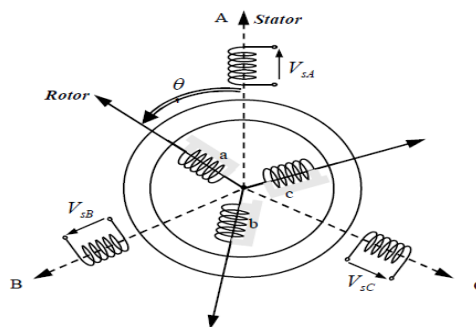
La machine asynchrone est peu utilisée sur site isolé car elle nécessite des batteries de condensateur pour la fourniture d'énergie réactive.la génératrice asynchrone nécessite de fonctionner à une vitesse nominale de plusieurs centaines de tour par minute, ce qui implique l'utilisation d'un multiplicateur entre le rotor (arbre lent) est la génératrice (arbre rapide).

Cette chaîne cinétique implique des forces de les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau : la vitesse du rotor est presque constante. Dans notre cas on se base sur une machine à vitesse variable, une génératrice à double alimentation la MADA. [25]

### 9.1. Principe et structure de la machine à double alimentation

#### 9.1.1.Structure de la machine à double alimentation [22]

La machine asynchrone à double alimentation est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles. Son stator est identique à celui de la machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS) ou d'une machine synchrone (MS) et son rotor se diffère radicalement puisqu'il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques comme le montre la figure (1.10)



**Figure (1.10) :** Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée

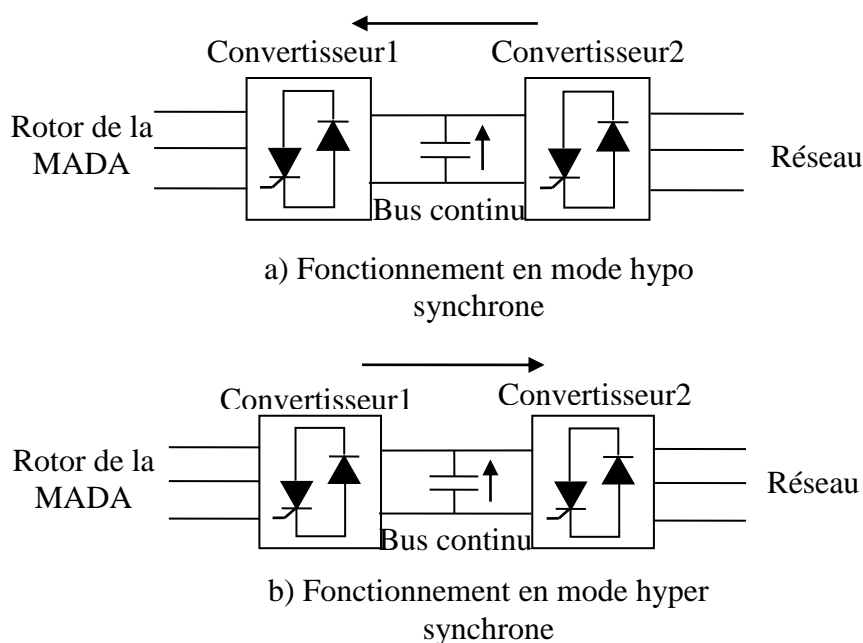
### 9.1.2. Principe

Le système de la *MADA* permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent, en effet la *MADA* permet un fonctionnement en génératrice hyper synchrone et hypo synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. La vitesse variable permet à l'éolienne de fonctionner sur une plus large de vitesse de vent et de pouvoir tirer le maximum de puissance possible pour chaque vitesse de vent.

- Fonctionnement en hypo synchrone (vitesse de rotation inférieur à la vitesse de synchronisme).
- Fonctionnement en hyper synchrone (vitesse de rotation supérieur à la vitesse de synchronisme). [25]

### 9.2. Les convertisseurs de puissance de la *MADA*

A la différence de certaines machines synchrone, qui utilisent des convertisseurs traversés par la totalité de la puissance nominale, les convertisseurs de la *MADA* sont dimensionnés pour laisser passer 30% de la puissance nominale. Ils coûtent donc moins chers, sont moins encombrants et permettent également de piloter la *MADA* par le rotor en réglant sa vitesse de rotation mécanique. C'est un convertisseur statique qui se compose d'un redresseur, d'un bus continu et d'un onduleur, il est réversible en courant (Pr traverse le convertisseur dans un sens pour un fonctionnement hypo synchrone, et dans le sens opposé pour un fonctionnement hyper synchrone), comme le représente dans la figure (1.11), l'onduleur devient alors redresseur et le redresseur devient onduleur. [25]



**Figure (1.11) : fonctionnement hypo et hyper synchrone [25]**

### 9.3. Les phases de fonctionnement de la MADA [25]

Il y a 5 phases de fonctionnement d'une éolienne intégrant une MADA

- La phase de démarrage de la machine : la production électrique commence lorsque la vitesse mécanique atteint environ 70% de la vitesse de synchronisme de la génératrice mais la puissance électrique reste assez faible.
- La phase d'extraction de la puissance maximale ou phase MPPT : la vitesse mécanique varie. Elle peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale et la puissance électrique augment rapidement.
- L'angle de calage des pales  $\beta$  reste à sa valeur minimale afin d'obtenir un coefficient de puissance maximale est ainsi obtenue pour chaque valeur de la vitesse mécanique et pour des vitesses de vent moyennes (7-13 m/s environ).
- La phase à vitesse mécanique quasi constant : l'angle  $\beta$  de calage des pales varie afin d'obtenir une puissance électrique maximale pour différentes valeurs de vent (pitch control) et la puissance électrique augmente très rapidement jusqu'à sa valeur nominale
- La phase à puissance constante : lorsque la vitesse du vent augmente encore l'angle de calage des pales devient important afin de conserver la puissance électrique nominale constante.
- Arrêt de l'éolienne : lorsque la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à  $90^\circ$  (mise en drapeau) jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

### 9.4. Les avantages et les inconvénients de la MADA [23]

Nous introduisons succinctement dans ce paragraphe les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable.

#### 9.4.1. Les avantages de la MADA

La MADA présente plusieurs avantages à savoir :

- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la vitesse de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la

machine et augmentent son rendement. De plus, l'alimentation de la machine par deux onduleurs permet de travailler à des fréquences relativement élevées évitant ainsi un déclassement des convertisseurs tout en maintenant un couple à l'arrêt. Cette même propriété assure un contrôle quasi insensible aux variations résistives de la machine.

- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine assure un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- La *MADA* se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6).
- Un fonctionnement en régime dégradé plus souple que la machine à simple alimentation, quand un onduleur tombe en panne.

### 9.4.2. Les inconvénients de la *MADA*

Contrairement à ses avantages, la *MADA* présente aussi des inconvénients tels que

- Un nombre important de convertisseurs est utilisé (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) que celui utilisé pour la machine à cage. Nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium, donnent maintenant un petit avantage à la *MADA*.
- La *MADA* présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines de grande puissance [RAM 00].

## 10. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne. Leur historique, définition et fonctionnement ...etc.

Puis, un bref aperçu sur le fonctionnement d'une centrale éolienne, les différents types des machines utilisées dans l'éolienne où on a choisi la machine à étudier dans notre mémoire qui est la machine asynchrone à double alimentation comme on a donné la cause de choix de cette machine .

A la fin de ce chapitre, on a donné un aperçu sur la structure et le principe de notre machine ainsi les phases de leur fonctionnement, et les avantages et inconvénients de la *MADA*.

## 1. Introduction

Pour pouvoir simuler le fonctionnement du système de production de l'énergie éolienne, l'élaboration de son modèle mathématique s'avère indispensable.

Dans le cadre de notre travail, on fait une modélisation du système éolien basé sur une machine à double alimentation.

Afin d'optimiser un système de conversion d'énergie, dans une éolienne il est nécessaire de connaître les différents organes qui le composent, de la source jusqu'à l'utilisation [4].

Pour se faire, il faut d'abord étudier la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique qui est assuré par la turbine et à la sortie de la turbine on a une énergie mécanique. Cette dernière est couplée avec une génératrice électrique pour convertir l'énergie mécanique produite par la turbine en énergie électrique. La connexion mécanique entre la turbine et la génératrice est réalisée par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas où la vitesse de la turbine et de la génératrice ne sont pas de même ordre de grandeur. Cette même turbine entraîne la *MADA*, qui est connectée au réseau électrique directement par le stator mais également à travers de convertisseurs statiques triphasés à *IGBT* (Insulated Gate Bipolar Transistor) par le rotor, celui-ci est muni d'un système bagues/balais. Ces convertisseurs côté *MADA* et réseau, notés respectivement *CCM* et *CCR*, sont commandés en modulation de largeur d'impulsion (*MLI*) [8].

La figure (2.1) illustre le modèle global du système éolien à base de la machine asynchrone à double alimentation pour la fourniture de la puissance au réseau électrique.

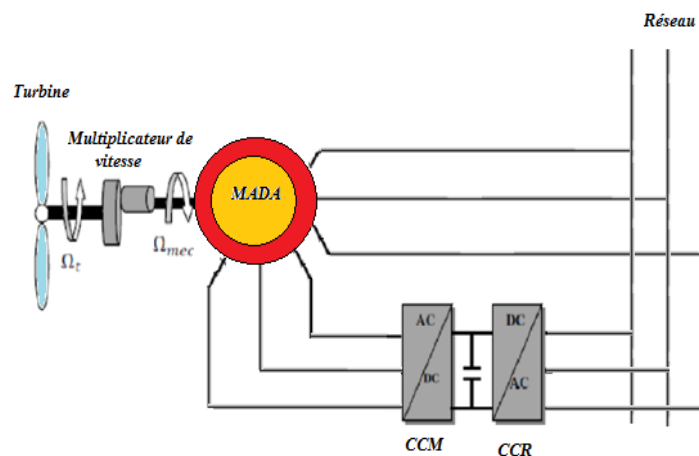


Figure (2.1) : Synoptique d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA.

Ce chapitre est constitué de deux parties, une première partie est consacrée à la modélisation du couplage mécanique entre la turbine et la *MADA* et la deuxième partie est consacrée à la modélisation de la machine à double alimentation.

## 2. Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.

Dans cette section, on va faire dans une première étape la modélisation de la source primaire, qui est le vent. Ainsi que les différentes parties mécaniques de l'éolienne qu'on va modéliser sous certaines hypothèses simplificatrices.

### 2.1. Modèle du vent.

La ressource du vent, du point de vue de sa distribution statistique est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de la rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales évolue au cube de la vitesse du vent [4].

On a vu dans le premier chapitre que le vent de vitesse  $V_v$ , appliqué sur les pales de l'éolienne entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine, rappelant que cette puissance s'exprime par.

$$P_{mec} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V_v^3 \quad (2.1)$$

Le couple mécanique développé par la turbine dépend lui aussi de la vitesse du vent et son expression s'exprime.

$$C_t = \frac{P_{mec}}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p(\lambda, \beta) \rho R^2 V_v^3 \quad (2.2)$$

Avec

$V_v$ : vitesse du vent

$R$ : Rayon de l'aérogénérateur.

$\rho$ : Densité de la masse d'air.

$C_t$ : Couple mécanique de la turbine.

$\Omega_t$ : vitesse de rotation de la turbine.

$C_p$  représente le coefficient de puissance qui dépend du rapport de vitesse  $\lambda$  et de l'angle de calage  $\beta$

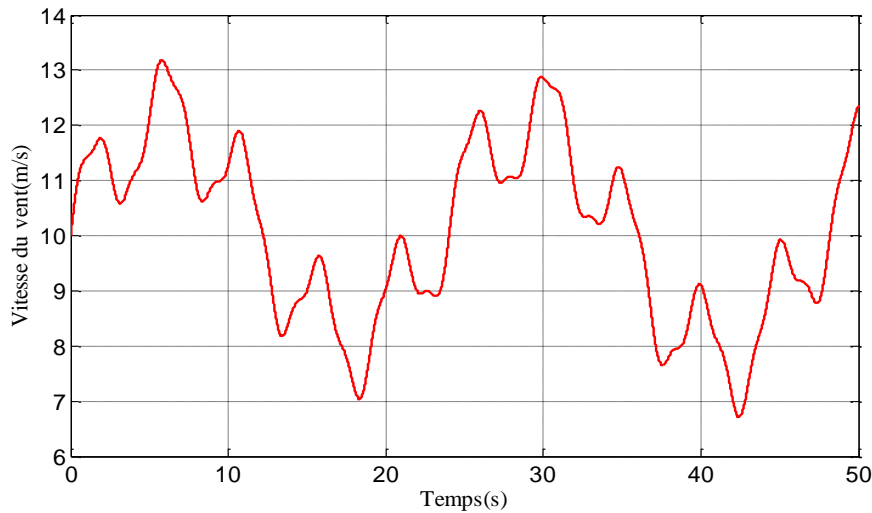
$$C_p = (0.5 - 0.167(\beta - 2)) \sin \frac{\pi(\lambda + 0.1)}{(18.5 - 0.3(\beta - 2))} - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (2.3)$$

L'expression du rapport de vitesse s'exprime par.

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V_v} \quad (2.4)$$

La figure (2.2) montre le profil du vent choisi a une valeur moyenne de 10 m/s et une somme de plusieurs harmoniques, et il est modélisé par l'équation [15].

$$V_v(t) = V_{v moy} + 0.2 \sin(0.1047 t) + 2 \sin(0.2665 t) + \sin(1.2930 t) + 0.2 \sin(3.6645 t) \quad (2.5)$$



**Figure (2.2) : Profil de la vitesse du vent**

## 2.2. Modélisation du couplage mécanique entre la turbine et la MADA

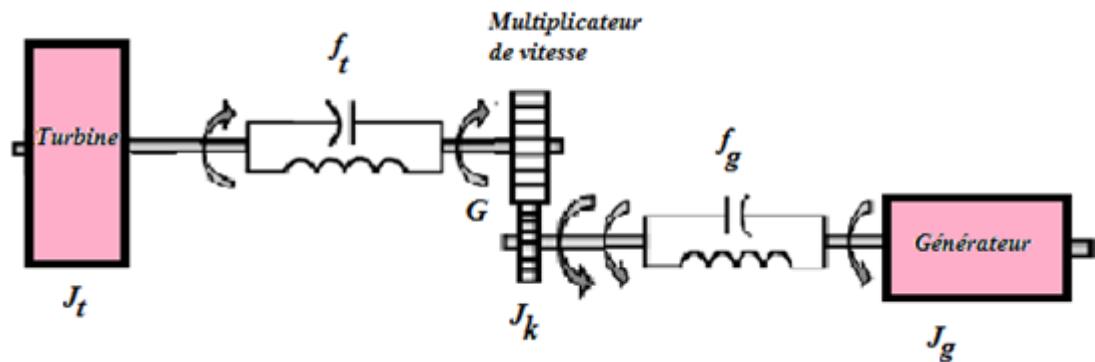
La modélisation de la partie mécanique est très complexe car elle exige la connaissance de plusieurs paramètres difficile à obtenir. Le système mécanique complet se compose de.

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

Le schéma de la figure (2.3) montre un exemple de la modélisation du couplage mécanique entre la turbine et la *MADA*.

Notons que  $f_t$  est le coefficient de frottement par rapport à l'air et de la partie mécanique et  $f_g$  le coefficient de frottement du côté de la génératrice et que  $G$  correspond au gain de vitesse qu'on suppose constant et égal à  $G$ .

$J_t$  est le moment d'inertie de la turbine qui représente à lui seul 90 % du moment d'inertie global, alors que celui de la génératrice  $J_g$  est de l'ordre de 6 à 8 %. Le reste (2 à 4 %) correspond au moment d'inertie du multiplicateur de vitesse  $J_k$  [1].

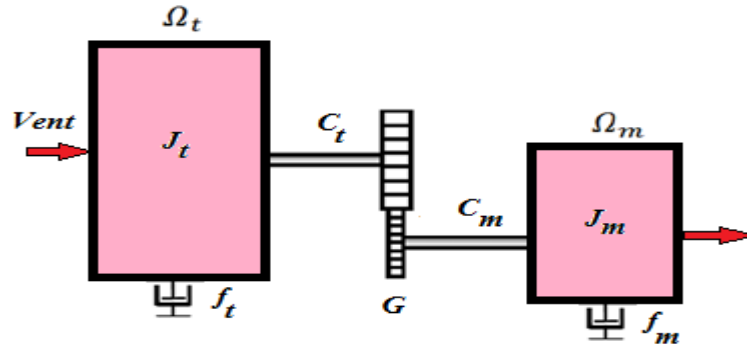


*Figure (2.3) : Modèle de la turbine*

Afin d'obtenir le modèle simplifié de la partie mécanique on pose des hypothèses simplificatrices suivantes.

- Les trois pales de la turbine sont considérées identiques.
- La répartition de la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales.
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est très faible et peut être négligé.
- L'inertie du multiplicateur de vitesse est négligeable devant celle de la turbine et celle du générateur, ce qui permet de le considérer comme un gain de vitesse égal à  $G$  ou un gain de couple égal à  $1/G$ .

Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la figure (2.4).



**Figure (2.4) :** Modèle simplifié à deux masses de la turbine éolienne.

Avec

$J_t$  : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne [Kg.m<sup>2</sup>]

$f_t$  : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la turbine [N.m/rad/s]

$C_t$  : Couple mécanique de la turbine éolienne [N.m]

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

$f_m$  : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA [N.m/rad/s]

$C_m$  : Couple mécanique sur l'arbre de la MADA [N.m]

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide). En considérant que le multiplicateur est idéal ce qui veut dire que les pertes mécaniques sont négligeables, il est alors modélisé par un simple gain constant.

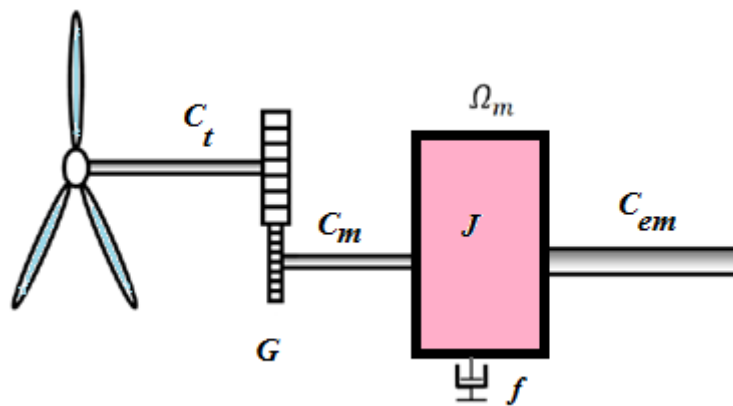
$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad ; \quad \Omega_m = G \cdot \Omega_t \quad (2.6)$$

L'expression de l'inertie totale  $J$  équivalente du système éolien vu du rotor de la génératrice peut être retrouvée à partir de la puissance due à l'inertie totale du système. Cette puissance est composée de la puissance issue de l'inertie de la turbine et la puissance qui vient de l'inertie du générateur. Ainsi on peut déduire que l'inertie totale du système éolien est composé de l'inertie de la turbine  $J_t$  et du coefficient de multiplicateur  $G$  et de l'inertie de la génératrice  $J_m$ , ce qui donne.

$$J = J_m + \frac{J_t}{G^2} \quad (2.7)$$

En suivant la même procédure, le coefficient de frottement visqueux total  $f$  du système peut être retrouvé à partir de la puissance totale dissipée par frottements. Elle est constituée des pertes par frottement dans la turbine et des pertes par frottements dans le générateur, on obtient donc.

$$f = f_m + \frac{f_t}{G^2} \quad (2.8)$$



**Figure (2.5) :** Modèle de transmission mécanique à une masse ramené sur l'arbre rapide

L'équation de mouvement qui permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique  $C_m$ , disponible au niveau du rotor de la génératrice est donnée par la relation [15].

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} + f\Omega_m = C_{em} - C_m \quad (2.9)$$

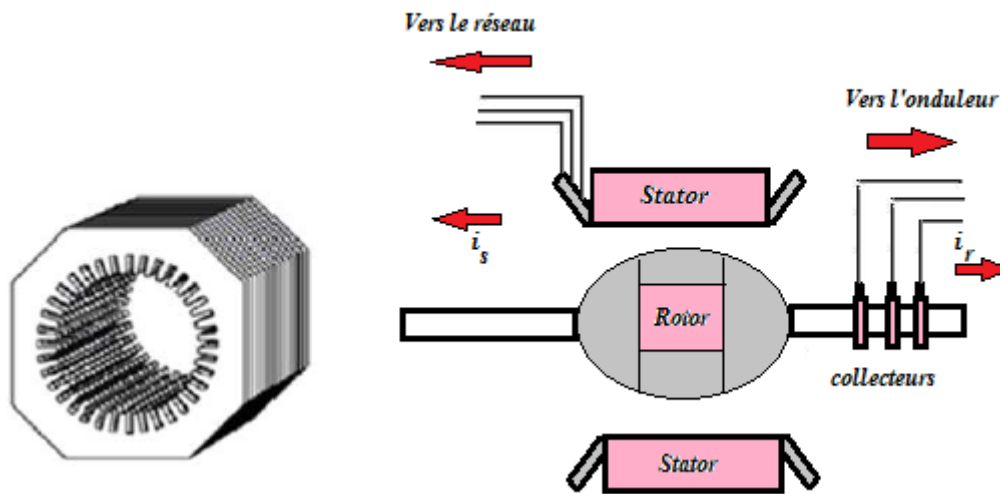
### 3. Modélisation de la machine à double alimentation.

Pour mieux représenter le comportement de la *MADA*, on a fait une description de cette machine puis représenté différents modes de fonctionnement. Ensuite on a consacré la dernière partie de cette section à la modélisation de la *MADA*.

#### 3.1. Description et structure de la *MADA*.

La machine à double alimentation en anglo-saxon « doubly fed induction machine (*DFIM*) » comme son nom l'indique, est une machine triphasée à courant alternatif qui

comprend un stator fixe équipé de trois enroulements identiques et d'un rotor tournant autour de l'axe de la machine qui est constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquels viennent s'insérer les enroulements. Ces derniers sont connectés en étoiles et reliés à un collecteur constitué de trois à quatre bagues. Leurs extrémités sont accessibles de l'extérieur par l'intermédiaire de bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des ballais, ce qui permet d'accéder aux grandeurs rotoriques. La figure (2.5) montre la construction générale de la *MADA* [10] [7].



**Figure (2.6) :** Structure du stator et des contacts rotoriques de la machine asynchrone

La double alimentation désigne que la machine est connectée au réseau par son stator et son rotor. Elle est connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur statique qui se compose d'un redresseur, d'un bus continu et d'un onduleur, il est réversible en courant (la puissance rotorique  $P_r$  traverse le convertisseur dans un sens pour un fonctionnement hyper synchrone et dans le sens opposé pour un fonctionnement hypo synchrone), l'onduleur devient alors redresseur et le redresseur devient onduleur, comme le montre la figure (2.6).

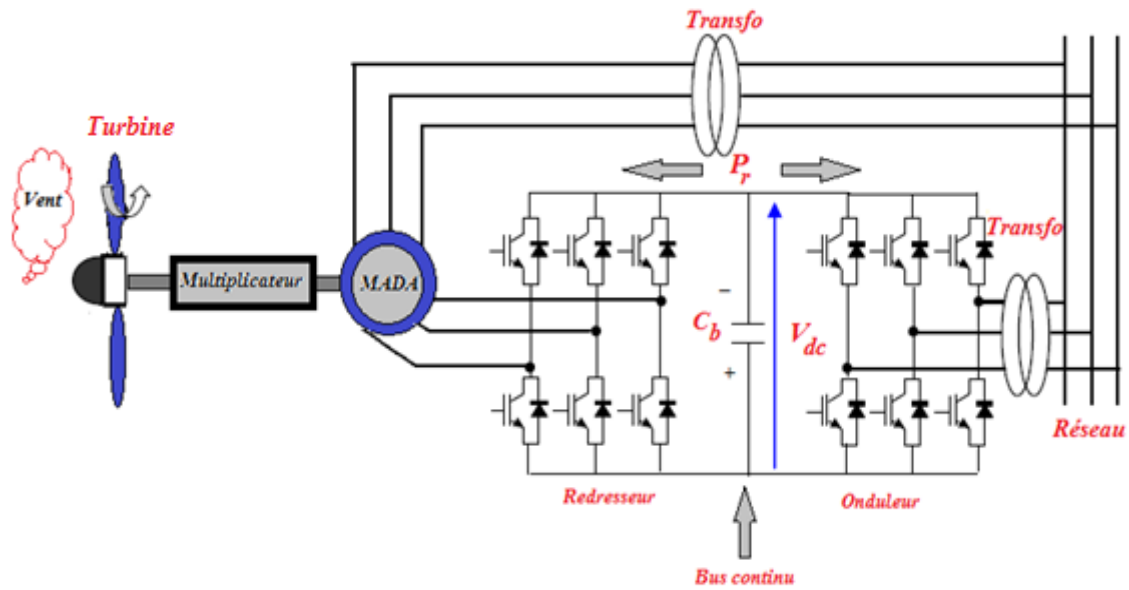


Figure (2.7) : schéma de l'alimentation de la MADA pour une application de production d'énergie éolienne.

### 3.2. Mode de fonctionnement de la MADA

Le mode de fonctionnement de la MADA est similaire à celui de la machine asynchrone classique, mais la grande différence apparaît dans le fait que la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

En effet, la machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en génératrice. Dans le cas de la MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine qui lui offre la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous présentons dans ce qui suit les différents modes de fonctionnement. [9]

#### 3.2.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

La figure (2.8.1) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transitée par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

### 3.2.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

La figure (2.8.2) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

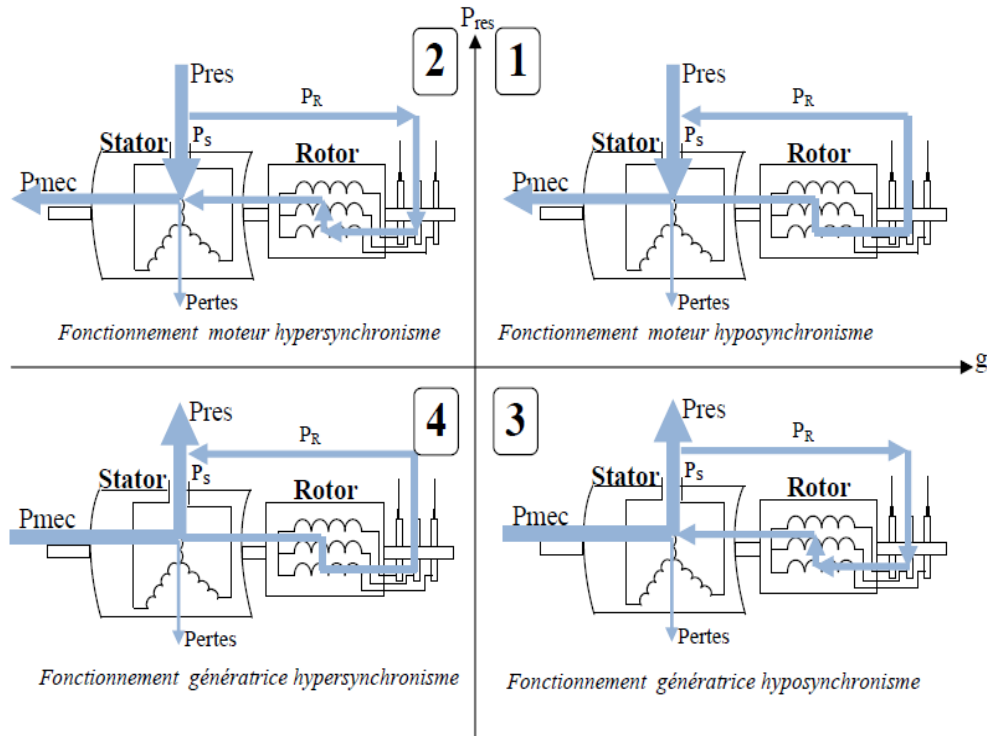


Figure (2.8): Quadrants de fonctionnement de la MADA [2].

### 3.2.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

La figure (2.8.3) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

### 3.2.4. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

La figure (2.8.4) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

On conclut que la *MADA* est plus avantageuse que la machine à cage classique et ses avantages résident dans le fait qu'il y a une production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchrone) et dans la récupération de la puissance de glissement.

### 3.3. Modélisation de la *MADA*

Pour modéliser de la *MADA*, il faut d'abord déterminer un modèle dans un référentiel diphasé, soit tournant ( $d-q$ ) soit fixe au stator ( $\alpha-\beta$ ). Ces référentiels sont définis à partir du référentiel triphasé naturel de la *MADA* à l'aide de transformations mathématiques adaptées.

Le modèle présenté dans le cadre de ce mémoire repose sur les hypothèses simplificatrices classiques.

- Effet des encoches négligé ;
- Distribution spéciale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer ;
- Influences de l'effet de peau et de l'échauffement non prises en compte ;
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante ;
- Pas de régime homopolaire puisque le neutre n'est pas connecté ;
- Les pertes par courant de Foucault et par hystérésis sont négligées ;
- Les résistances et les inductances ne varient pas avec la température.

La figure (2.8) représente les trois bobines statoriques ( $S_a, S_b, S_c$ ) dans le repère (a, b, c) et (A, B, C) décalées entre elles par un angle de  $\frac{2\pi}{3}$ , et trois bobines rotoriques similaires à celle du stator ( $R_a, R_b, R_c$ ).

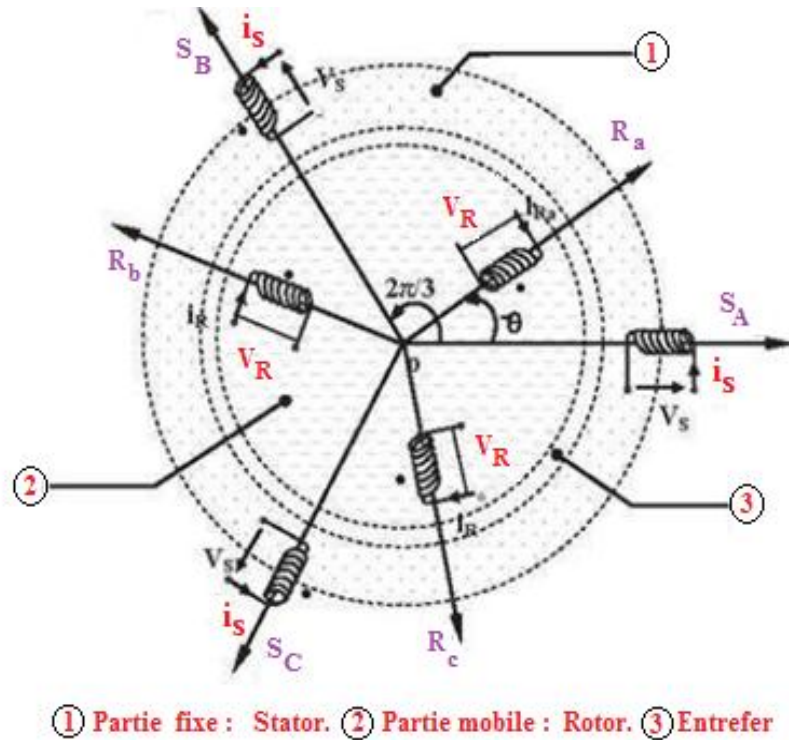


Figure (2.9) : Représentation simplifié de la MADA [7].

### 3.3.1. Modélisation de la MADA dans le plan (a, b, c)

- Equation électrique

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \quad (2.10)$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \quad (2.11)$$

Avec :

$[V_s] = [V_{as} V_{bs} V_{cs}]^T$  : Vecteur tension statorique.

$[V_r] = [V_{ar} V_{br} V_{cr}]^T$  : Vecteur tension rotorique.

$[i_s] = [i_{as} i_{bs} i_{cs}]^T$  : Vecteur courant statorique.

$[i_r] = [i_{ar} i_{br} i_{cr}]^T$  : Vecteur courant rotorique.

$[\varphi_s] = [\varphi_{as} \varphi_{bs} \varphi_{cs}]^T$  : Vecteur flux statorique.

$[\varphi_r] = [\varphi_{ar} \varphi_{br} \varphi_{cr}]^T$  : Vecteur flux rotorique.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad ; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$[R_s]$  et  $[R_r]$  représentent respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

• **Equations magnétiques**

$$[\varphi_s] = [L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \quad (2.12)$$

$$[\varphi_r] = [L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s] \quad (2.13)$$

$[L_{ss}]$  Et  $[L_{rr}]$  représentent respectivement les matrices d'inductances statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}]$  : correspond à la matrice des inductances stator-rotor.

$[M_{rs}]$  : correspond à la matrice des inductances rotor-stator.

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as} & M_{as} \\ M_{as} & L_{as} & M_{as} \\ M_{as} & M_{as} & L_{as} \end{bmatrix} \quad ; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & L_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & M_{ar} & L_{ar} \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{rs} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

La machine est définie par 5 inductances

- L'inductance propre d'une phase statorique  $L_{as}$
- L'inductance propre cyclique du rotor  $L_{ar}$
- L'inductance mutuelle entre deux phases du stator  $M_{as}$
- L'inductance mutuelle entre deux phases du rotor  $M_{ar}$
- L'inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une autre du rotor  $M_{rs}$

En utilisant les équations (2.14) et (2.15) dans (2.12) et (2.13), on obtient.

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}][i_r]) \quad (2.14)$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{rs}][i_s]) \quad (2.15)$$

Dans ce cas les flux statoriques et rotoriques en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles sont exprimés par.

$$[\varphi_s] = [L_s][i_s] + [M_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \quad (2.16)$$

$$[\varphi_r] = [L_{rr}][i_r] + [M_r][i_r] + [M_{rs}][i_s] \quad (2.17)$$

- **Equation mécanique**

$$C_{em} = C_r + f\Omega_m + J \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (2.18)$$

$f$  : Coefficient de frottement visqueux

$J$  : Moment d'inertie de la partie tournante

$C_r$  : Couple résistant

$C_{em}$  : Couple électromagnétique

- **Transformation de Park**

La transformation de Park permet le passage d'un système triphasé quelconque (a,b,c) décalés respectivement les uns des autres d'un angle électrique de  $\frac{2\pi}{3}$  en système à trois axes orthogonaux (d, q, 0).

Dans la matrice de Park, c'est l'angle  $\theta_s$  qui intervient pour les grandeurs statoriques et  $\theta_r$  pour les grandeurs rotoriques.

Où

$\theta_s$  : est l'angle électrique de la transformation de Park pour la grandeur statorique.

$\theta_r$  : est l'angle électrique de la transformation de Park pour la grandeur rotorique.

Soit :

$$\theta_s = \theta_r + \theta \quad \text{Donc} \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta}{dt}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad ; \quad \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad \text{et} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$\omega_s$  : Pulsation des courants statoriques

$\omega_r$  : vitesse électrique du rotor

$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$  : Le glissement

On définit la matrice de Park et la matrice inverse de Park par.

$$P(\theta_s) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_s & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin\theta_s & \sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$P(\theta_s)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_s & \sin\theta_s & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

La transformation de Park pour les tensions, les courants et les flux se présentent comme suit :

$$(V_{sdq0}) = P(\theta_s) \cdot (V_{sabc}) \quad \Rightarrow \quad (V_{sabc}) = P(\theta_s)^{-1} \cdot (V_{sdq0})$$

$$(i_{sdq0}) = P(\theta_s) \cdot (i_{sabc}) \quad \Rightarrow \quad (i_{sabc}) = P(\theta_s)^{-1} \cdot (i_{sdq0})$$

$$(\varphi_{sdq0}) = P(\theta_s) \cdot (\varphi_{sabc}) \quad \Rightarrow \quad (\varphi_{sabc}) = P(\theta_s)^{-1} \cdot (\varphi_{sdq0})$$

Avec

$(V_{sdq0}) = (v_{ds} \ v_{qs} \ v_{0s})^t$  : Composantes de la tension statorique dans le plan  $(d, q, 0)$

$(V_{sabc}) = (v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs})^t$  : Composantes de la tension statorique dans le plan  $(a, b, c)$

$(i_{sdq0}) = (i_{ds} \ i_{qs} \ i_{0s})^t$  : Composantes du courant statorique dans le plan  $(d, q, 0)$

$(i_{sabc}) = (i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs})^t$  : Composantes du courant statorique dans le plan  $(a, b, c)$

$(\varphi_{sdq0}) = (\varphi_{ds} \ \varphi_{qs} \ \varphi_{0s})^t$  : Composantes du flux statorique dans le plan  $(d, q, 0)$

$(\varphi_{sabc}) = (\varphi_{as} \ \varphi_{bs} \ \varphi_{cs})^t$  : Composantes du flux statorique dans le plan  $(a, b, c)$

### 3.3.2. Modélisation de la MADA dans le plan $(d, q)$

- **Equation électrique**

L'expression des tensions statoriques suivant les axes  $d$  et  $q$  est. [7]

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{rs} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (2.21)$$

- **Equations magnétiques**

L'expression des flux statoriques suivant les axes  $d$  et  $q$

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (2.22)$$

Avec

$L_s = L_{as} - M_{as}$  : Inductance propre cyclique du stator

$L_r = L_{ar} - M_{ar}$  : Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor

$M = \frac{3}{2} M_{rs}$  : Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor

- **Equation mécanique**

On donne l'équation dérivant le couple électromagnétique en fonction de la vitesse.

$$C_{em} = J \frac{d\Omega_m}{dt} + f\Omega_m + C_r \quad (2.23)$$

Avec

$\Omega_m = \frac{\omega_r}{p}$  la vitesse mécanique en (rad/s), et  $p$  le nombre de paire de pôles rotorique.

- **Couple électromagnétique**

L'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et des courants rotoriques est donnée par.

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{dr}) \quad (2.24)$$

On remarque que l'équation du couple électromagnétique n'est pas linéaire, et c'est dû aux produits croisés entre les flux statoriques et les courants rotoriques. D'où la nécessité d'utiliser la commande par orientation du flux pour simplifier les calculs des lois de commande.

#### 4. Conclusion

Dans un contexte lié à la modélisation de la chaîne éolienne, on a fait une représentation du système éolien à vitesse variable basé sur la *MADA* dans un premier temps puis on a fait une modélisation de la source primaire qui est le vent, en essayant d'être plus près de la réalité, et on a modélisé aussi les différentes parties mécaniques de l'éolienne sous certaines hypothèses simplificatrices.

Et dans un deuxième temps nous avons fait une description et présenté la structure et le principe de fonctionnement de la machine à double alimentation puis nous avons effectué la modélisation de celle-ci.

Afin de régulariser les puissances actives et réactives statoriques, on choisit d'utiliser les contrôleurs fractionnaires. Des simulations vont être réalisées pour comparer les contrôleurs fractionnaires aux contrôleurs entiers étudiés dans le mémoire [7], en termes de suivi de consigne, sensibilité et robustesse vis-à-vis des variations des paramètres qu'on va voir dans les prochains chapitres.

## 1. Introduction

Dans le cadre de la commande des systèmes linéaires quelconques, on est amené à concevoir et dimensionner un correcteur qui permet de répondre aux performances liées à la stabilité, la précision et à la rapidité.

Il existe plusieurs structures de commande des régulateurs, on peut citer : la structure de commande directe comme illustré par le schéma de la figure (3.1) qui représente une contre réaction unitaire ou  $G(p)$  est la fonction de transfert du système qu'on contrôle par  $C(p)$

On va présenter dans ce qui suit une autre structure de commande du contrôleur  $C(p)$  qui est la structure de commande par modèle interne.

La méthode de commande par modèle interne s'est développée vers la fin des années 70 et au début des années 80 par *M. MORARI* [7]. Cette méthode regroupe les avantages de la boucle ouverte qui se présente par la facilité de la synthèse du contrôleur et la possibilité de tenir pouvoir traiter les procédés avec retard, et les avantages de la boucle fermée qui sont la possibilité d'avoir une erreur statique nulle en régime permanent à des échelons de consigne en présence de perturbations ainsi que des erreurs de modélisation du procédé à contrôler [16].

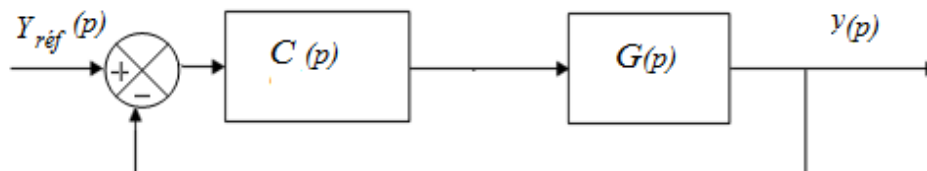


Figure (3.1) : schéma d'un système de commande en boucle fermée.

## 2. Structure de la commande par modèle interne.

Dans l'absolu, dans une structure de commande en boucle ouverte, afin d'assurer un bon suivi de consigne, le correcteur doit être égale à l'inverse du modèle. Cependant l'inversion de manière directe est pratiquement irréalisable notamment dans le cas d'un système à déphasage non minimal ou d'un système dont le degré relatif est non nul.

Dans cette optique, on propose des solutions qui permettent de déterminer un correcteur qui s'approche au mieux de l'inverse du modèle. Dans la suite de ce travail on va présenter la structure de commande par modèle interne et son principe de fonctionnement.

### 2.1. Structure de base de la méthode par modèle interne

Comme son nom l'indique, la commande par modèle interne incorpore une simulation du processus par un modèle interne  $G_m(p)$  dans sa structure de commande elle-même, la structure de commande par modèle interne peut se schématiser comme l'indique la figure (3.2). Où  $C_{IMC}(p)$  et  $G_m(p)$  représentent respectivement les fonctions de transfert du correcteur et du modèle. Le procédé est représenté par la fonction de transfert  $G(p)$  reliant sa sortie à la commande.

En général  $G(p)$  est très complexe pour être utilisée pour la synthèse du contrôleur. On utilisera pour se faire le modèle  $G_m(p)$  qui doit satisfaire le compromis de bien représenter le système mais qui doit être le plus simple possible pour simplifier la structure du contrôleur  $C_{IMC}(p)$  qui sera synthétisée sur la base de  $G_m(p)$

Dans le principe de base de la commande par modèle interne, la commande  $u(p)$  issue du correcteur  $C_{IMC}(p)$  est appliquée simultanément au procédé de fonction de transfert  $G(p)$  et à son modèle  $G_m(p)$ . La commande par modèle interne exploite alors cet écart de comportement pour corriger l'erreur sur la consigne [13].

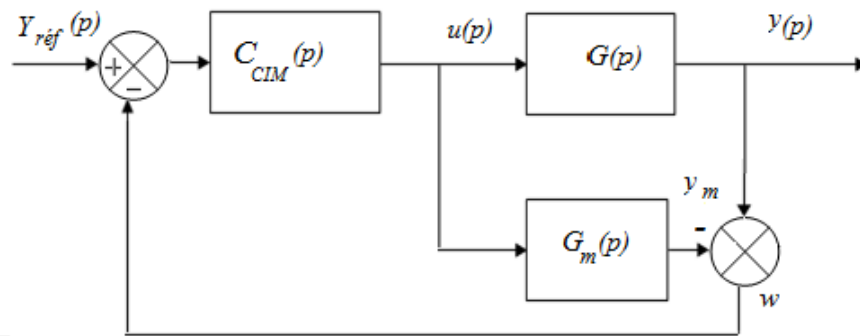


Figure (3.2) : Structure de commande par modèle interne.

Les équations correspondantes au schéma de commande de la figure (3.2) sont :

$$w(p) = [G(p) - G_m(p)]u(p) \quad (3.1)$$

$$u(p) = C_{IMC}(p)[y_{réf} - w(p)] \quad (3.2)$$

En remplaçant (3.2) dans (3.3) on obtient.

$$u(p) = C_{IMC}(p)[y_{réf}(p) - (G(p) - G_m(p).u(p))] \quad (3.3)$$

$$u(p)[1 + C_{IMC}(p)(G(p) - G_m(p))] = C_{IMC}(p)y_{réf}(p) \quad (3.4)$$

$u(p)$  s'exprime alors par

$$u(p) = \frac{C_{IMC}(p)}{1 + C_{IMC}(p)[G(p) - G_m(p)]} y_{réf}(p) \quad (3.5)$$

Comme  $y(p) = G(p).u(p)$ , au final la grandeur de sortie  $y(p)$  s'exprime en fonction de la grandeur de référence.

$$y(p) = \frac{G(p)C_{IMC}(p)}{1 + C_{IMC}(p)[G(p) - G_m(p)]} y_{réf}(p) \quad (3.6)$$

Lorsque  $G_m(p) = G(p)$ , l'expression (3.6) devient

$$y(p) = G_m(p).C_{IMC}(p).y_{réf}(p) \quad (3.7)$$

L'équation (3.7) n'est autre que celle de la sortie lorsqu'on utilise la structure de commande en boucle ouverte. C'est cette relation qui a rendu cette commande par modèle interne célèbre et cette même relation qui est utilisée pour faire la synthèse de la fonction de transfert du contrôleur.

### 3. Relation entre le contrôleur de la structure de commande par modèle interne et celui de la structure de commande standard

Afin d'exprimer l'expression de la fonction de transfert du régulateur  $C(p)$  de la structure standard, on doit d'abord calculer la fonction de transfert de  $C_{CIM}(p)$  de la structure de commande par modèle interne déjà illustré au paravent dans la figure (3.2).

En calculant la fonction de transfert en boucle fermée des deux structures de commandes de la figure (3.1) et (3.2), on obtient

- Pour la structure de commande standard

$$\frac{y(p)}{y_{ref}(p)} = \frac{C(p)G(p)}{1 + C(p)G(p)} \quad (3.8)$$

- Pour la structure de la commande par modèle interne (en supposant que  $G(p) = G_m(p)$  )

$$\frac{y(p)}{y_{ref}(p)} = G(p)C_{IMC}(p) \quad (3.9)$$

En égalant l'équation (3.8) et (3.9), on obtient

$$C_{IMC}(p) = \frac{C(p)}{1 + C(p)G(p)} \quad (3.10)$$

D'où

$$C(p) = \frac{C_{IMC}(p)}{1 - C_{IMC}(p)G(p)} \quad (3.11)$$

Dans ce cas la méthode de commande par modèle interne est équivalente à la méthode de commande directe, mais dans le cas où l'expression du système s'avère complexe, cela implique que l'expression du régulateur obtenu est aussi complexe rendant sa réalisation onéreuse. La méthode étant basée sur l'inversion du modèle du système, elle ne peut pas être utilisée dans le cas des systèmes à phase non minimale ou bien un système qui contient un retard, car le régulateur obtenu est instable. C'est pour cette raison qu'il est plus intéressant d'utiliser la méthode de commande par modèle interne.

#### 4. Synthèse de $C(p)$ en utilisant la méthode de la commande par modèle interne

Pour calculer la fonction de transfert de  $C(p)$ , il faut d'abord calculer la fonction de transfert de  $C_{IMC}(p)$  et pour se faire on passe par trois étapes.

- La première étape consiste à décomposer la fonction de transfert de  $G_m(p)$  en deux fonctions de transfert.

$$G_m(p) = G_m^i(p)G_m^s(p) \quad (3.12)$$

$G_m^i(p)$ : contient les zéros instables, le retard éventuellement contenus dans  $G(p)$ , le gain statique doit être égal à 1.

$G_m^s(p)$  : contient les pôles stables, c'est la fonction de transfert qui sera utilisée pour calculer  $C_{IMC}(p)$ .

➤ Deuxième étape, le contrôleur  $C_{IMC}(p)$  est calculé par l'équation

$$C_{IMC}(p) = \frac{1}{G_m^s(p)} H(p) \quad (3.13)$$

Où  $H(p)$  est la fonction de transfert qu'on souhaite imposer à la boucle fermée. Morari propose de choisir  $H(p)$  sous la forme.

$$H(p) = \frac{1}{(1 + T_f p)^r} \quad (3.14)$$

Où :  $r$  est un nombre entier à déterminer de sorte que  $C(p)$  finale calculé soit causal.

$T_f$  la constante de temps à imposer à la boucle fermée.

Lorsqu'on souhaite obtenir une réponse indicielle avec dépassement  $H(p)$  peut être choisie sous la forme :

$$H(p) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{2z}{w_n}\right)p + \left(\frac{1}{w_n^2}\right)p^2\right)^r} \quad (3.15)$$

La fonction de référence  $H(p)$  est caractérisée par trois paramètres, le coefficient d'amortissement  $z$  et la pulsation non amortie  $w_n$ .

En utilisant l'équation (3.11) on peut finalement déduire, l'expression du contrôleur  $C(p)$  de la structure standard.

### 5. Exemple d'application

Pour illustrer cette méthode de synthèse basée sur le principe de la commande par modèle interne, soit à contrôler un système dont la fonction de transfert est donnée par

$$G(p) = \frac{2}{(1 + p)^{10}} \quad (3.16)$$

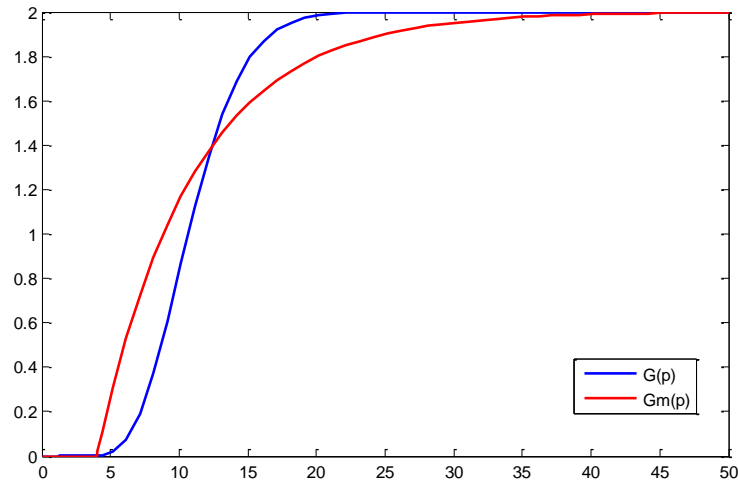
La réponse indicielle de ce système est représentée par la figure (3.3).

On constate que cette réponse ressemble à celle d'un modèle du premier ordre avec retard.

En utilisant donc un modèle du premier ordre avec retard comme approximation on obtient :

$$G_m(p) = \frac{2}{1 + 7p} e^{-3p} \quad (3.17)$$

Sa réponse indicielle est aussi représentée par la figure (3.3)



**Figure (3.3):** Tracés des réponses indicielles du système réel et du modèle approximé.

On constate que l'allure de la réponse indicielle de  $G(p)$  se caractérise par une tangente non nulle, c'est pour cette raison qu'on a approximé  $G_m(p)$  par un élément de retard pour qu'elles aient à peu près la même dynamique, et on remarque que les deux allures ont le même régime permanent. Ce qui donne l'avantage d'utiliser le modèle approximé pour le calcul du contrôleur  $C(p)$

### 5.1. Synthèse du régulateur $C(p)$ avec une fonction approximé du premier ordre

On souhaite imposer à la boucle fermée le comportement d'un modèle du premier ordre caractérisé par un gain statique unitaire pour garantir une erreur statique nulle, et une constante de temps arbitrairement égale à 10, avec un retard qui ne sera pas tenu en compte lors du calcul de  $C(p)$ . Le modèle de référence est donc :

$$H(p) = \frac{1}{1 + 10p} e^{-3p} \quad (3.18)$$

Après avoir décomposé  $G_m(p)$  sous la forme de l'équation (3.12), où  $G_m^i(p) = e^{-3p}$  et

$$G_m^s(p) = \frac{2}{1+7p}$$

Le contrôleur  $C_{IMC}(p)$  est calculé par.

$$C_{IMC}(p) = \frac{1 + 7p}{2(1 + 10p)} \quad (3.19)$$

D'après l'expression de  $G_m(p)$ , le régulateur de la structure classique s'exprime par.

$$C(p) = \frac{\frac{1 + 7p}{2(1 + 10p)}}{1 - \left(\frac{1 + 7p}{2(1 + 10p)}\right) \left(\frac{2}{1 + 7p}\right) e^{-3p}} = \frac{1 + 7p}{2(1 + 10p - e^{-3p})} \quad (3.20)$$

On constate que l'expression de  $C(p)$  risque d'être instable à cause de l'élément de retard qu'il contient dans son dénominateur. Pour contourner le problème de l'instabilité et simplifier la mise en œuvre du contrôleur  $C(p)$  on propose deux méthodes.

➤ La première méthode consiste à réécrire l'expression (3.20), de la manière suivante.

$$C(p) = \frac{1 + 7p}{2(1 + 10p - e^{-3p})} = \frac{1 + 7p}{20p \left[1 + \left(\frac{1 - e^{-3p}}{10p}\right)\right]} \quad (3.21)$$

On obtient alors un régulateur  $PI$  en cascade avec un filtre qu'on appelle le predict de Smith, qui peut être mis sous la forme

$$C(p) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1 - e^{-3p}}{10p}\right)} \left[\frac{k_i}{p} + k_p\right] \quad (3.22)$$

Avec

$k_i=1/20$  gain du régulateur intégral.

$k_p=7/20$  gain du régulateur proportionnel.

Le schéma de réalisation de ce contrôleur est illustré par la figure (3.4)

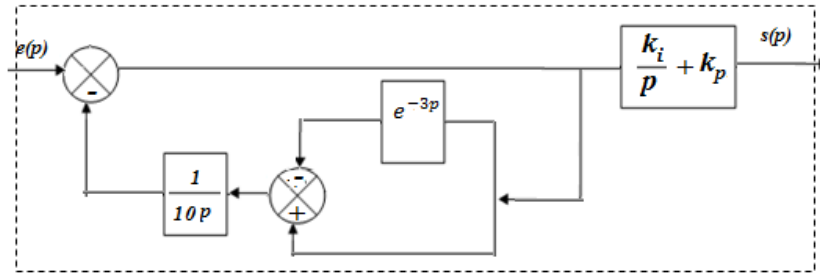


Figure (3.4) : Schéma du contrôleur  $C(p)$

On présente dans la figure (3.5) les résultats de simulation, d'un côté, des deux boucles de régulations du système réel et du système approximé et de l'autre côté le résultat du modèle de référence.

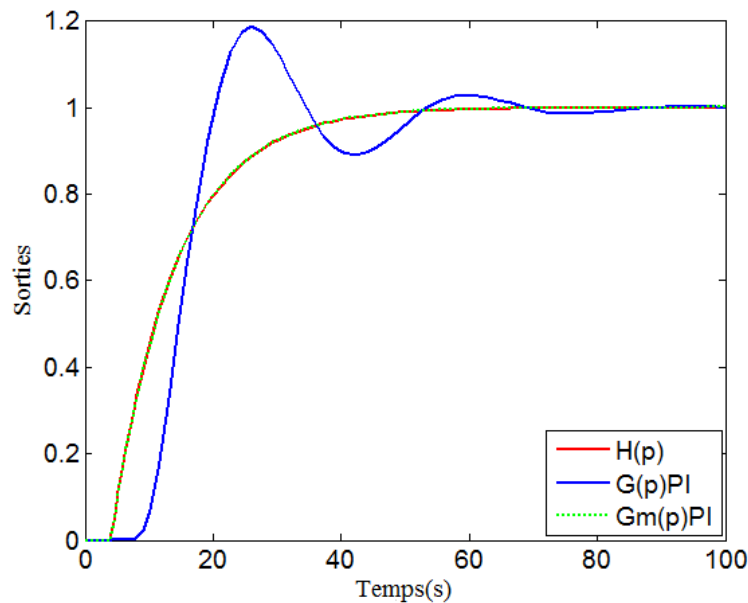


Figure (3.5) : Tracé des réponses des sorties du système réel et du système approximé du premier ordre et du modèle de référence

En comparant la courbe obtenue par simulation de la boucle du régulateur  $PI$  associé au modèle  $G_m(p)$  avec la courbe de la fonction de transfert de la boucle fermée de référence  $H(p)$ , on constate qu'elles ont le même régime permanent, mais le régime transitoire de la courbe du régulateur  $PI$  associé au système  $G(p)$  est très loin de celui de  $H(p)$  en plus elle se caractérise par un dépassement ce qui veut dire qu'on a pas atteint la dynamique souhaitée, la cause c'est parce que  $G_m(p) \neq G(p)$ .

➤ La deuxième méthode consiste à approximer l'élément de retard  $e^{-3p}$

$$\text{On a: } e^{-3p} = e^{-3/2p} \cdot e^{-3/2p} = \frac{e^{-3/2p}}{e^{+3/2p}} \approx \frac{1 - (\frac{3}{2p})}{1 + (\frac{3}{2p})}$$

$$C(p) = \frac{1+7p}{2(1+10p - e^{-3p})} = \frac{1+7p}{2(1+10p - \frac{1-3/2p}{1+3/2p})}$$

Qui peut être écrit sous la forme d'un régulateur *PID* en cascade avec un filtre du premier ordre.

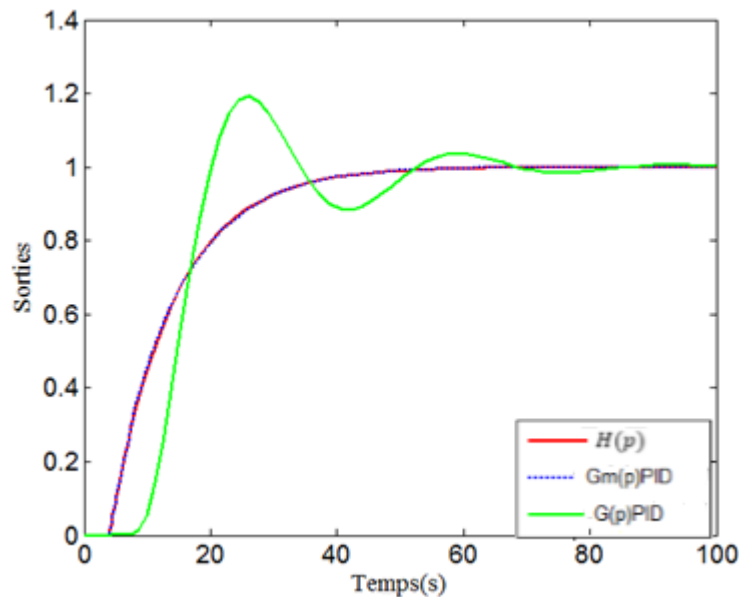
$$C(p) = \frac{1}{15p + 13} \left[ \frac{k_i}{p} + k_p + k_d p \right] \quad (3.23)$$

Avec

$k_p = \frac{17}{4}$  Gain de l'opérateur proportionnel.

$k_i = \frac{1}{2}$  Gain de l'opérateur intégral.

$k_d = \frac{21}{4}$  Gain de l'opérateur dérivé.



**Figure (3.6) :** Tracé des réponses des sorties du système réel et du système approximé du premier ordre et du modèle de référence.

D'après la figure (3.6) on voit que le régulateur *PID* en cascade avec le filtre associé à la fonction de transfert en boucle fermée approximé lorsque celle-ci est du premier ordre

donne le même régime permanent que celui du modèle de référence souhaité obtenir mais leurs régimes transitoires est différent. De plus quand le régulateur PID est associé au système réel qui est représentée par la courbe bleu qui est caractérisée par un dépassement est complètement différente de la courbe qu'on souhaite obtenir.

## 5.2. Synthèse du régulateur $C(p)$ avec une fonction approximé du second ordre

On souhaite obtenir le modèle de référence  $H(p)$  du premier ordre donné par l'équation (3.19), en considérant une fonction de transfert approximé du second ordre qui est donné par l'équation (3.24).

$$G_m(p) = \frac{2\omega_n^2}{p^2 + 2 \cdot \omega_n \cdot z \cdot p + \omega_n^2} e^{-3p} \quad (3.24)$$

Où

$\omega_n$  : La pulsation non amortie est égale à 0.3

$z$  : Le coefficient d'amortissement est égal à 0.85

La figure (3.7) illustre les deux réponses indicielles celle du système  $G(p)$  et celle du modèle approximé  $G_m(p)$ , comme on peut le constaté elles ont le même régime permanent, mais leurs régimes transitoire est meilleur que le modèle approximé de premier ordre illustré dans la figure (3.3).

En décomposant l'équation (3.24) en deux fonctions où on va extraire une fonction qui contient les pôles stables qui est représentée par l'équation (3.25).

$$G_m^s(p) = \frac{0.18}{p^2 + 0.51p + 0.09} \quad (3.25)$$

Pour le calcul du correcteur on utilise la fonction  $G_m^s(p)$ , on obtient

$$C_{IMC}(p) = \frac{p^2 + 0.51p + 0.09}{0.18(1 + 10p)} \quad (3.26)$$

L'expression du régulateur  $C(p)$  est donnée par l'équation

$$C(p) = \frac{\frac{p^2 + 0.51p + 0.09}{0.18(1 + 10p)}}{1 - \left(\frac{e^{-3p}}{1 + 10p}\right)} = \frac{p^2 + 0.51p + 0.09}{0.18[1 + 10p - e^{-3p}]}$$

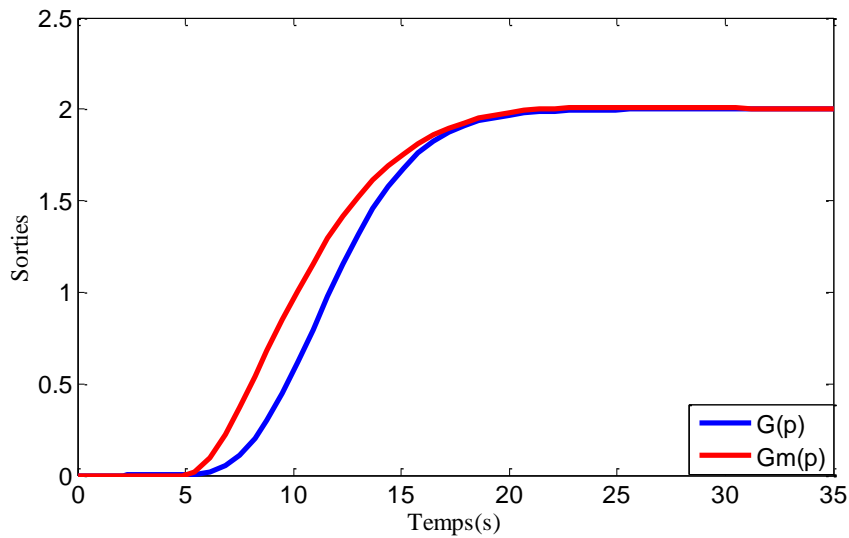
$$C(p) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1 - e^{-3p}}{10p}\right)} \left[ k_d p + k_p + \frac{k_i}{p} \right] \quad (3.27)$$

$C(p)$  est un régulateur *PID* en cascade avec le predict de Smith.

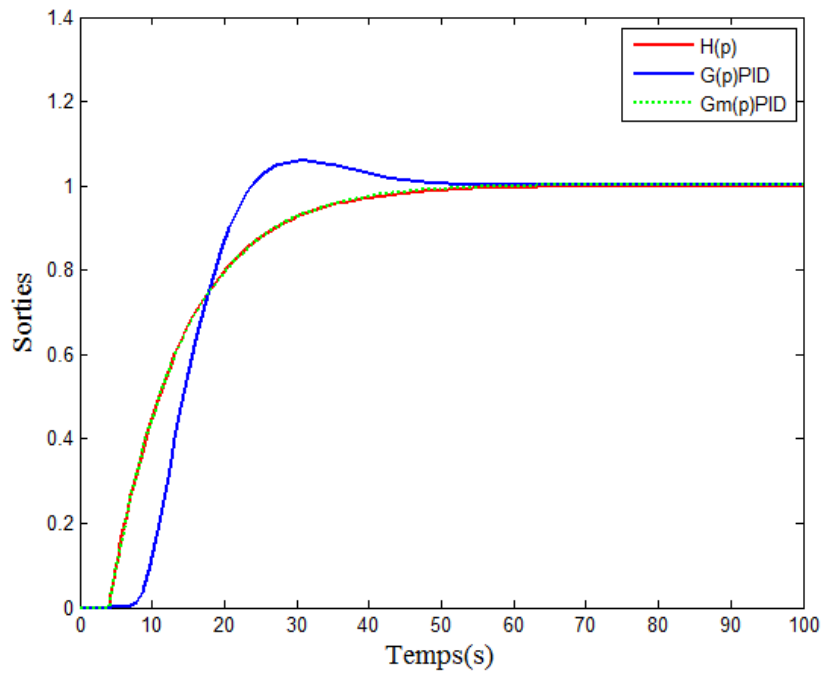
$k_p = 0.283$  Gain du régulateur proportionnel.

$k_i = 0.05$  Gain du régulateur intégral.

$k_d = 0.555$  Gain du régulateur dérive



**Figure (3.7) :** Tracé des réponses indicielles du système réel et du modèle approximé du second ordre



**Figure (3.8) :** Tracé des réponses des sorties du système approximé du second ordre et du modèle de référence.

Les résultats de la simulation sont donnés par la figure (3.8), on constate que la réponse indicielle du système approximé  $G_m(p)$  est proche de celle du système réel  $G(p)$ , et on voit très bien que dans cette simulation que le régime transitoire de la boucle fermée  $PID$  associé au système approximé  $G_m(p)$  est très proche de celui de la courbe de la boucle fermée  $H(p)$  qu'on souhaite obtenir.

D'après les résultats de simulations que nous avons réalisé précédemment lors de l'approximation du système réel à une fonction de premier ordre puis à une fonction du second ordre, on peut dire que ces deux approximations ont les mêmes performances et la même dynamique.

## 6. Synthèse des régulateurs fractionnaires

La synthèse des contrôleurs fractionnaires se fonde sur des spécifications qui relèvent de la théorie de la commande fréquentielle classique, qui doivent refléter aussi bien la stabilité que la robustesse du système de la boucle fermée [17].

Dans la synthèse des contrôleurs fractionnaires on utilise la méthode de commande par modèle interne, en imposant à la boucle fermée correspondante à la fonction idéale de Bode comme modèle de référence [16].

### 6.1. Fonction idéale de Bode.

Au milieu des années 1940, Bode a imaginé une fonction qui est sensée assurer, lorsqu'elle décrit la boucle ouverte, des performances constantes vis-à-vis des variations du gain de la boucle ouverte.

La fonction idéale de Bode est concrétisée par Oustaloup à travers ces travaux sur la commande fractionnaire par un intégrateur d'ordre non entier [16,17]. La fonction de transfert de la boucle ouverte de commande est donnée par.

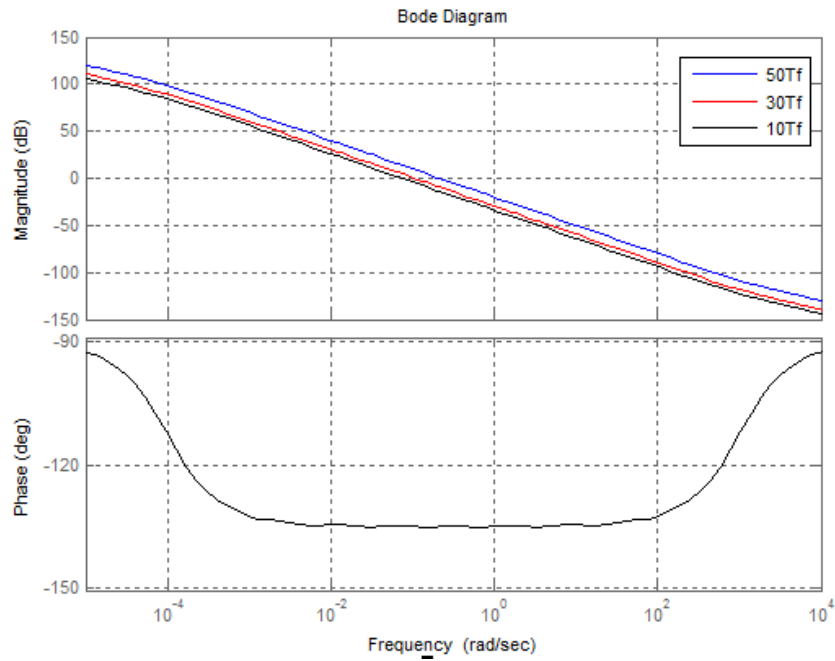
$$FTBO(p) = \left(\frac{\omega_c}{p}\right)^{\alpha+1} = \frac{1}{\tau_c p^{\alpha+1}} \quad , \quad \alpha \in [0,1] \quad (3.28)$$

Où :  $\omega_c = \frac{1}{\tau_c^{-(\alpha+1)}}$  est la fréquence de coupure et  $(\alpha + 1)$  correspond à la pente de la caractéristique idéale du gain.

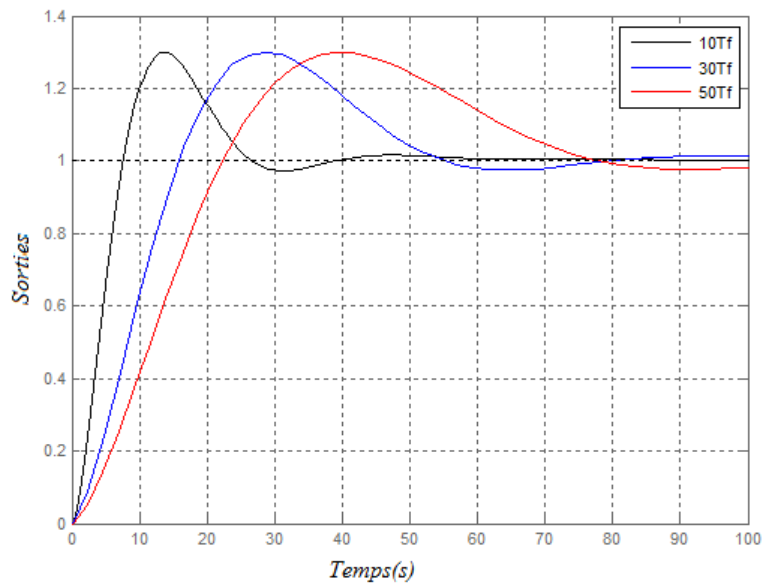
Le système résultant en boucle fermée, dans le cadre d'une configuration typique à retour unitaire, présente le même comportement qu'un système du second ordre faiblement amortie (pulsation naturelle, coefficient d'amortissement, pulsation propre...). La fonction de transfert en boucle fermée correspondante est donnée par.

$$FTBF(p) = \frac{FTBO(p)}{1 + FTBO(p)} = \frac{1}{1 + p^{\alpha+1}} \quad (3.29)$$

Les figures (3.9) et (3.10) représentent le diagramme de Bode et la réponse indicielle de la FTBF respectivement pour  $\alpha = 0.5$  et trois valeurs de  $T_f$ .



**Figure (3.9) :** Diagramme de Bode de la fonction idéale de Bode pour  $\alpha = 0.5$  et différentes valeurs de  $T_f$



**Figure (3.10) :** Réponse indicielle de la FTBF pour différentes valeurs de  $T_f$

Le régime transitoire de la *FTBF* dépend de son comportement en boucle ouverte autour de la fréquence de coupure  $\omega_c$ , le but d'utiliser le contrôleur fractionnaire rentre dans ce

contexte. La figure (3.9) montre que la phase reste constante pour n'importe quelle valeur de  $T_f$  ce qui permet d'avoir un système en boucle fermée robuste comme le montre la figure (3.10) cela se traduit par un dépassement de la réponse indicielle en boucle fermée constant.

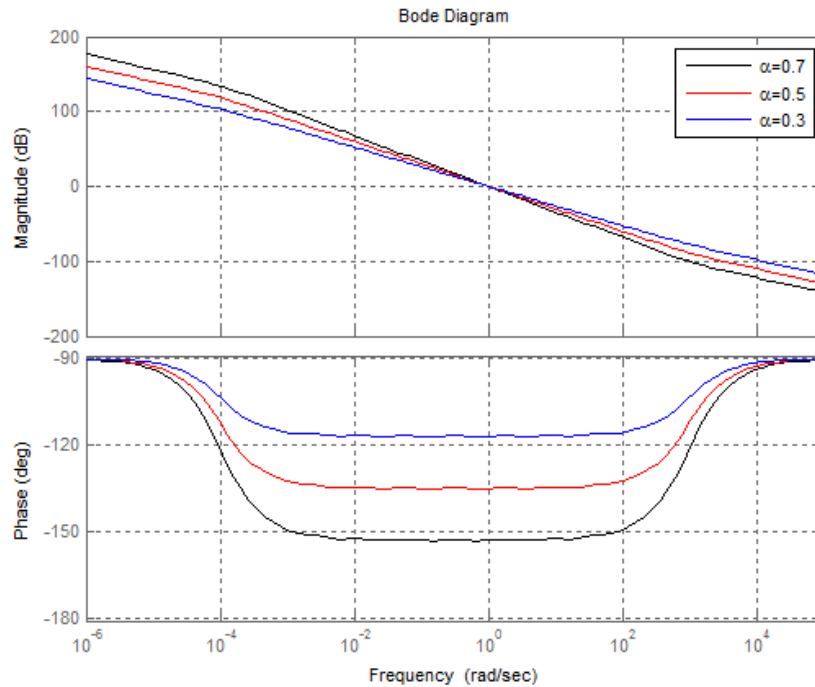


Figure (3.11) : Diagramme de Bode en variant  $\alpha$

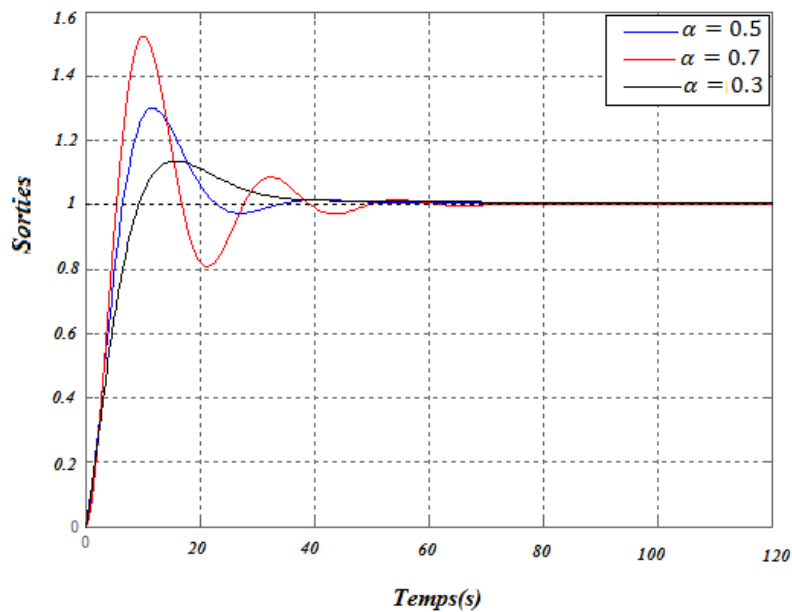


Figure (3.12) : Réponse indicielle de FTBF en variant  $\alpha$

La figure (3.11) montre que la valeur de la phase est constante indépendamment de la valeur de  $\omega_c$ , elle vaut  $\phi = -110^\circ$  pour  $\alpha = 0.3$  donc la phase de marge est de  $\phi_m = 70^\circ$ , pour une valeur de  $\alpha = 0.5$  la marge de phase est égale  $\phi_m = 45^\circ$ , et pour  $\alpha = 0.7$  on a  $\phi_m = 25^\circ$ .

La figure (3.12) montre que la stabilité et la robustesse du système en boucle fermée dépend de la valeur de l'ordre non entier  $\alpha$  et de la marge de phase du système en boucle ouverte et pour une valeur de  $\alpha = 0.5$  le système rentre dans un compromis entre la stabilité et la rapidité.

## 6.2. Synthèse du régulateur fractionnaire $C(p)$ avec une fonction approximé du premier ordre

Afin d'illustrer l'efficacité du contrôleur fractionnaire qui est basé sur la méthode de commande par modèle interne soit à contrôler le système dont le modèle est celui de l'équation (3.17) dont le modèle approximé est donnée par l'équation (3.18).

On souhaite obtenir un modèle de référence  $H(p)$  qui est une fonction de transfert du « premier ordre » caractérisée par la propriété fractionnaire  $\alpha = 0.5$  ( $0 < \alpha < 1$ ) et d'un gain statique égal à 1 et une constante de temps qui est arbitrairement choisie qui est égale à 8.

$$H(p) = \frac{1}{1 + 8p^{\alpha+1}} \quad (3.30)$$

Dans ce cas on trouve  $C_{IMC}(p)$  égal à.

$$C_{IMC}(p) = \frac{1 + 7p}{2[1 + 8p^{\alpha+1}]} \quad (3.31)$$

D'après l'expression (3.19), le régulateur fractionnaire s'exprime par.

$$C(p) = \frac{1 + 7p}{2[1 + 8p^{\alpha+1} - e^{-3p}]} \quad (3.32)$$

Après développement on trouve.

$$C(p) = \frac{1 + 7p}{16p^{\alpha+1} \left[ 1 + \left( \frac{1 - e^{-3p}}{8p^{(\alpha+1)}} \right) \right]}$$

L'expression du contrôleur trouvé se compose d'un régulateur *PI* et d'un filtre fractionnaire.

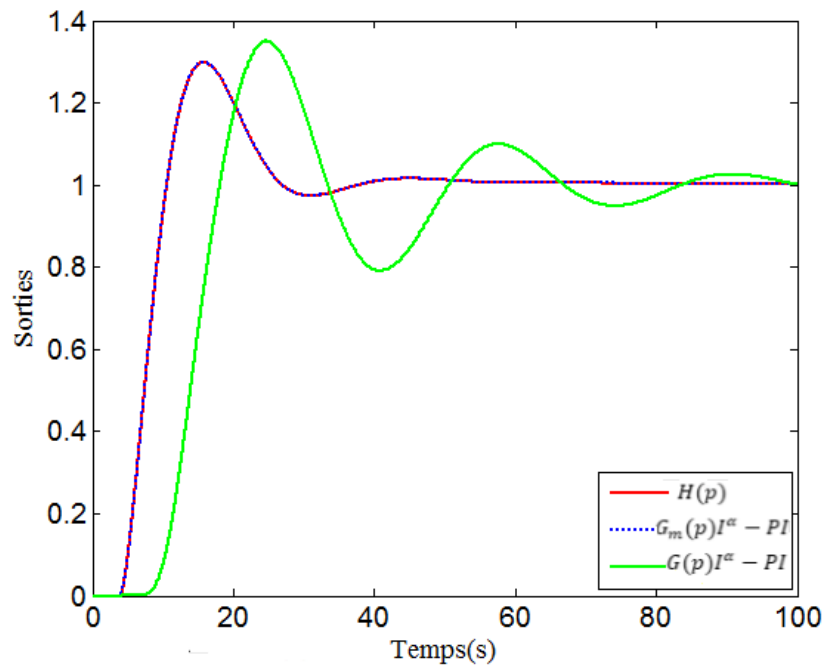
$$C(p) = \frac{1}{p^\alpha} \frac{1}{1 + \left( \frac{1 - e^{-3p}}{8p^{(\alpha+1)}} \right)} \left[ \frac{k_i}{p} + k_p \right] \quad (3.33)$$

Où

$k_p = 0.4375$  Gain du régulateur proportionnel.

$k_i = 0.0625$  Gain du régulateur intégral.

La figure (3.13) montre les résultats de simulation de la boucle de régulation du système approximé du premier ordre, et de la boucle de régulation du système réel et du modèle de référence.



**Figure (3.13) :** Tracé des réponses des sorties du système approximé du premier ordre et du système réel et le modèle de référence fractionnaire.

D'après les résultats obtenus on voit très bien qu'au régime permanent l'erreur statique est nulle et la forme du régime transitoire de la sortie du système approximé associé avec le régulateur *PI* fractionnaire est exactement la même que celle du modèle de référence que l'on souhaite obtenir ce qui veut dire qu'on a atteint l'objectif de la dynamique.

## 6.2. Synthèse du régulateur fractionnaire $C(p)$ avec une fonction approximé du second ordre.

On veut obtenir le modèle de référence  $H(p)$  du premier ordre donné par l'équation (3.29), en considérant la fonction de transfert approximé du second ordre donnée par l'équation (3.24)

L'expression du régulateur est donnée.

$$C(p) = \frac{\frac{p^2 + 051p + 0.09}{0.18(1 + 8p^{(\alpha+1)})}}{1 - \left(\frac{e^{-3p}}{1 + 8p^{(\alpha+1)}}\right)} = \frac{p^2 + 051p + 0.09}{0.18[1 + 8p^{(\alpha+1)} - e^{-3p}]}$$

$$C(p) = \frac{1}{p^\alpha} \frac{1}{1 + \left(\frac{1 - e^{-3p}}{8p^{(\alpha+1)}}\right)} \left[ k_d p + k_p + \frac{k_i}{p} \right] \quad (3.35)$$

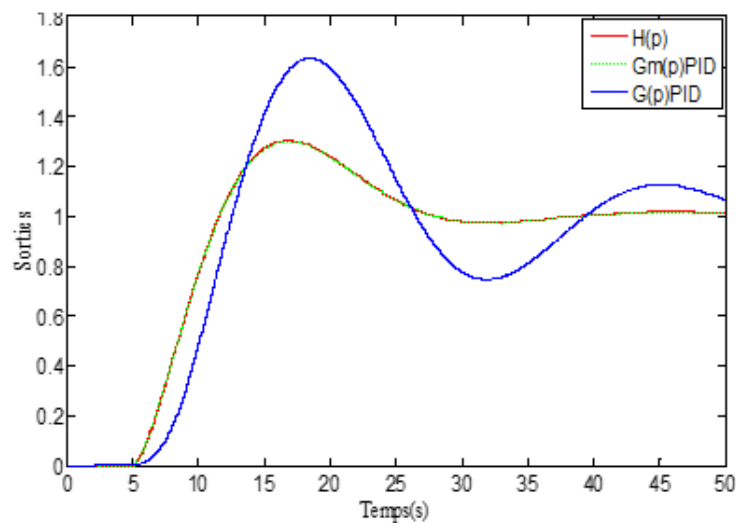
$C(p)$  est un régulateur *PID* avec un filtre fractionnaire ou

$k_p = 0.352$  Gain du régulateur proportionnel

$k_i = 0.0625$  Gain du régulateur intégral

$k_d = 0.694$  Gain du régulateur dérivé

Les résultats de la simulation de la boucle de régulation du système approximé du second ordre et de la boucle du modèle de référence sont illustrés dans la figure (3.14).



**Figure (3.14) :** Tracés des sorties du système approximé du second ordre et du modèle de référence fractionnaire.

Les résultats de simulation montrent que la courbe de la boucle fermée du régulateur *PID* associé au modèle  $G_m(p)$  est semblable à la courbe de la fonction de transfert de référence  $H(p)$ . Ce qui veut dire que les trois objectifs de stabilité, précision et rapidité sont atteints grâce au contrôleur *PID* fractionnaire. Par contre lorsque le régulateur *PID* est associé au système réel on obtient la courbe bleue qui n'est pas semblable à celle du modèle de référence souhaité pendant le régime transitoire en particulier.

### 7. Conclusion

Après avoir montré et expliqué d'une manière générale la structure de commande par modèle interne et son principe de base, on peut dire que cette méthode s'avère très efficace et simple à mettre en œuvre. Et pour se familiariser avec cette méthode on a traité des exemples d'applications. Des régulateurs *PI* et *PID* sont étudiés pour démontrer les limites et les capacités des régulateurs entiers afin de les comparer aux régulateurs fractionnaires.

Dans la suite du chapitre, on a fait une synthèse des régulateurs fractionnaires puis on a présenté la fonction idéale de Bode qui est utilisée comme fonction de transfert à imposer à la boucle.

## 1. Introduction

Nous avons vu au chapitre (2) que l'avantage d'utiliser la *MADA* dans un système de production éolienne est la présence d'un convertisseur entre le rotor et le réseau qui permet le contrôle du transfert de puissance entre le stator et le réseau. L'énergie électrique, peut non seulement être produite du stator vers le réseau mais également, pour les vitesses supérieures au synchronisme du rotor vers le réseau.

Afin d'extraire le maximum de puissance à partir du vent, et donc augmenter le rendement du système, une commande de la vitesse mécanique de la *MADA* s'impose. Cette commande consiste à contrôler la vitesse mécanique de la génératrice pour qu'elle suive la référence qui est la vitesse de la turbine et vu que la puissance est directement proportionnelle à la vitesse, par conséquent la puissance active correspondant à la puissance optimale fournie par la turbine.

Dans la première partie, de ce chapitre nous évoquons une stratégie de commande de la turbine pour extraire le maximum de puissance, puis on a effectué des simulations sous *MATLAB\SIMULINK*. Ensuite, on a détaillé la méthode de synthèse du régulateur fractionnaire PI en cascade avec un intégrateur d'ordre non entier qu'on va utiliser pour asservir la vitesse mécanique ainsi que le couple électromagnétique. Un régulateur fractionnaire sera également utilisé pour le contrôle des puissances statoriques produites par la *MADA*.

La deuxième partie est consacrée à la commande vectorielle de la *MADA*, où on va présenter deux types de commande vectorielle : *directe* et *indirecte*. Dans le cadre de cette commande la *MADA* sera pilotée par les tensions rotoriques pour permettre la maîtrise des puissances produites tant au niveau actif et réactif qui est l'objectif de ce présent chapitre.

Enfin, pour évaluer la capacité de robustesse du régulateur fractionnaire, on va faire une comparaison entre le contrôleur *PI* en cascade avec un intégrateur d'ordre non entier et le régulateur *PI* entier utilisé dans le mémoire de DAHMANI.M et YAKOUBI.H [7].

## 2. Stratégie de commande de la turbine éolienne

### 2.1. Extraction du maximum de la puissance éolienne

La vitesse de la turbine  $\Omega_t$  est variable en fonction de la vitesse du vent  $V_v$ , donc on doit contrôler le couple électromagnétique  $C_{em}$  afin de régler la vitesse mécanique  $\Omega_m$  pour qu'elle suive la référence  $\Omega_{mec-ref}$  qui mène à l'extraction du maximum de puissance. Cependant la référence de la vitesse de la turbine  $\Omega_{t-ref}$  correspond à la valeur optimale du rapport de vitesse

$\lambda_{opt}$  et on fixe l'angle de calage  $\beta = 2^\circ$ . L'obtention de ces deux paramètres permet d'avoir un coefficient de puissance maximale  $C_{pmax}$ .

Le couple électromagnétique est contrôlé par un régulateur  $PI$  en cascade avec un filtre fractionnaire, comme l'illustre la figure (4.1).

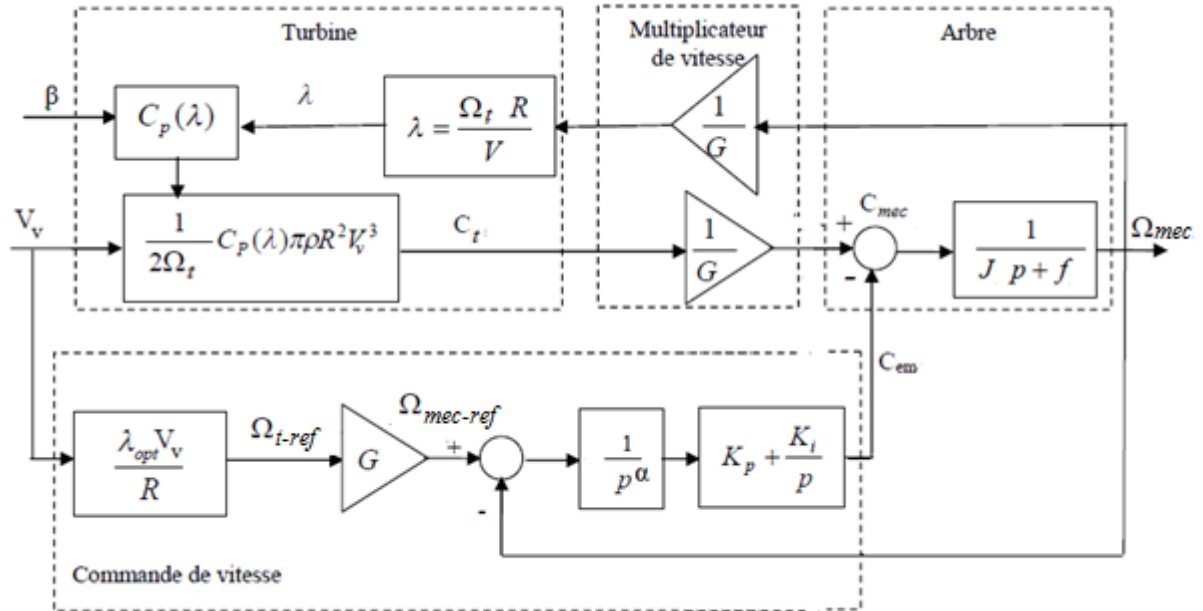


Figure (4.1) : Schéma bloc avec asservissement de la vitesse mécanique.

## 2.2. Synthèse du régulateur $I^\alpha - PI$

Pour calculer le régulateur de vitesse, on considère le modèle mécanique donné par la figure (4.2). Dans ce modèle on considère que le couple mécanique  $C_m$  est une perturbation qu'on peut négliger lors de la synthèse des contrôleurs.

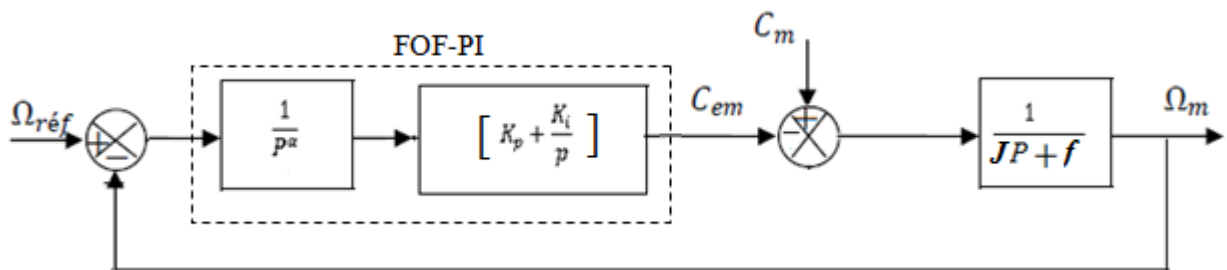


Figure (4.2) : schéma de commande utilisant la structure  $I^\alpha - PI$

La fonction de transfert du système à réguler est du premier ordre caractérisé par un gain statique et une constante de temps respectivement égaux à  $G_0 = \frac{1}{f}$ ,  $T = \frac{J}{f}$

La fonction de transfert à imposer à la boucle fermée est de premier ordre d'ordre non entier donnée par.

$$H(p) = \frac{1}{1 + T_r p^{\alpha+1}} \quad (4.1)$$

Avec

$T_r$  la constante de temps de la fonction de référence que l'on fixe à une valeur de 3.9 ms. On a choisi cette valeur de telle sorte qu'elle soit proche du temps de réponse de la fonction de transfert de la boucle fermée du régulateur entier donnée dans le mémoire [7], et on fixe  $\alpha$  à une valeur  $\alpha = 0.3$  pour que le dépassement de la réponse indicielle de  $H(p)$  ne soit pas très important sachant que  $0 < \alpha < 1$ .

Après avoir utilisé la méthode de commande par modèle interne on trouve un régulateur  $PI$  en cascade avec un filtre fractionnaire donné par.

$$C(p) = \frac{1}{p^\alpha} \left[ k_p + \frac{k_i}{p} \right] \quad (4.2)$$

Avec

$$k_p = \frac{T}{G_0 T_r} = 1200$$

$$k_i = \frac{1}{G_0 T_r} = 3.0755$$

### 2.3. Résultats de simulation de la turbine seule

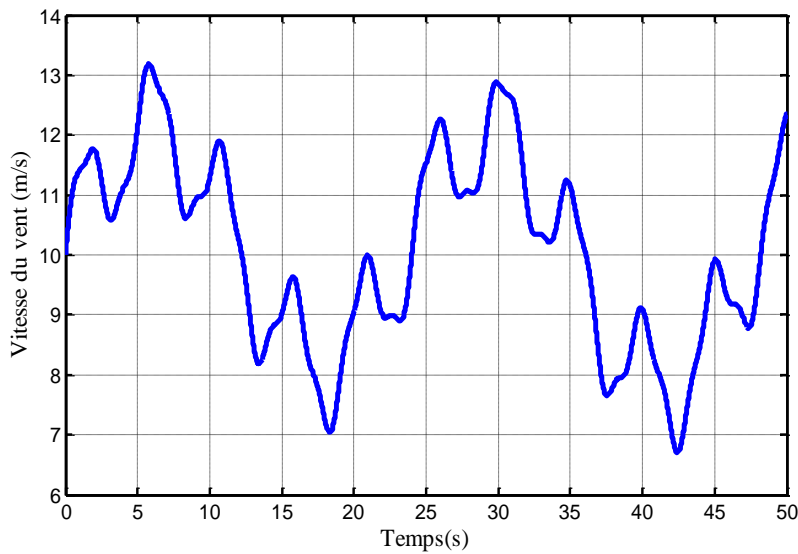
Après avoir fait la synthèse du régulateur fractionnaire  $I^\alpha - PI$ , on a effectué des simulations du système sous l'environnement *MATLAB/SIMULINK*.

La turbine est soumise à un vent dont le profil est celui de la figure (4.3). Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures (4.4) à (4.8).

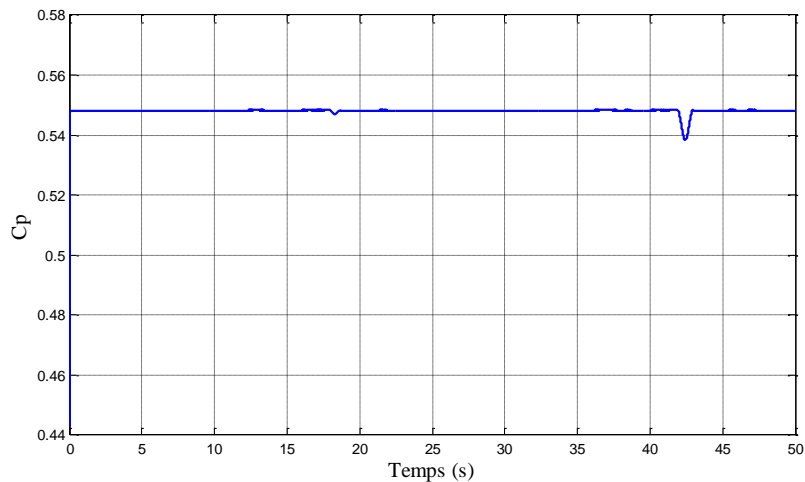
D'après les deux figures (4.4) et (4.5), on constate que l'extraction du maximum de puissance du vent est réalisée, en imposant un rapport optimal  $\lambda_{opt}$  garantissant un coefficient de puissance maximal. On remarque que les valeurs du coefficient de puissance  $C_p$  et  $\lambda$  sont quasiment maintenues sur toute la plage de vitesse. Il faut noter néanmoins, qu'aux faibles vitesses (7m/s), aux instants  $t=18s$  et  $t=43s$ , on constate des perturbations au niveau des allures de  $\lambda$  et de  $C_p$ .

La figure (4.6) montre que l'allure du couple électromagnétique est semblable à celle du couple mécanique de la turbine ce qui garantit un bon suivi de consigne de la vitesse mécanique de la génératrice avec la vitesse mécanique de référence.

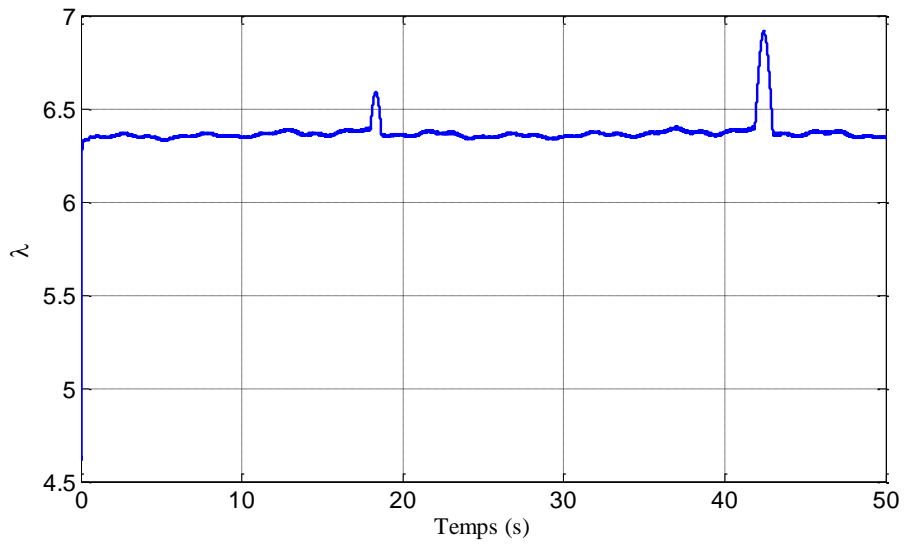
La vitesse du vent a une valeur moyenne de 10 m/s. Cette vitesse entraine la turbine avec une vitesse moyenne de 6 rd/s comme illustré dans la figure (4.7). Vu que cette vitesse est trop faible pour entrainer la génératrice par conséquent on place un multiplicateur dans la boîte à vitesse qui augmente le nombre de rotation par unité de temps. En outre la vitesse transmise à la MADA devient importante comme le montre la figure (4.8).



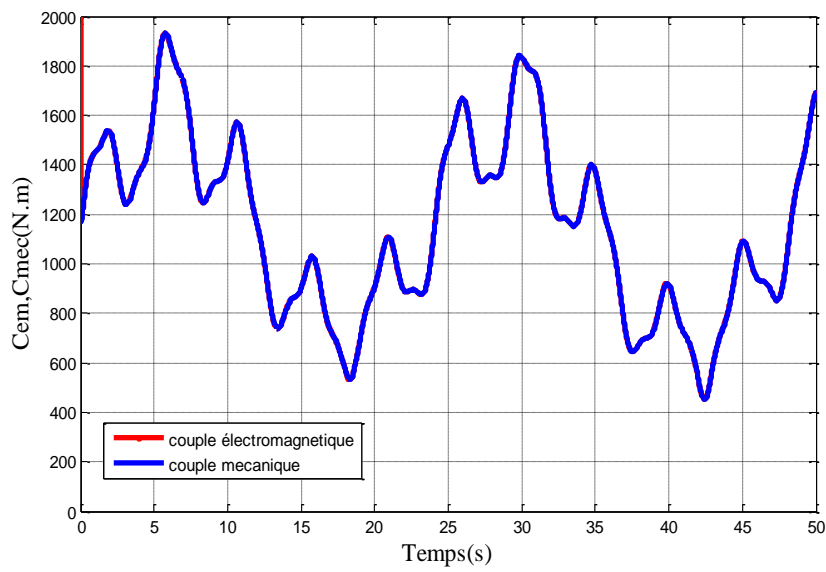
**Figure (4.3) :** Profil du vent  $V_v$



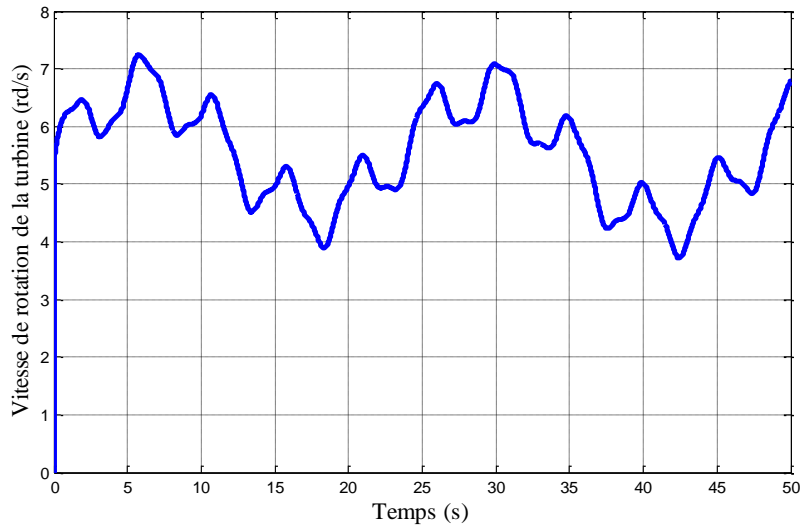
**Figure (4.4) :** Allure du coefficient de puissance



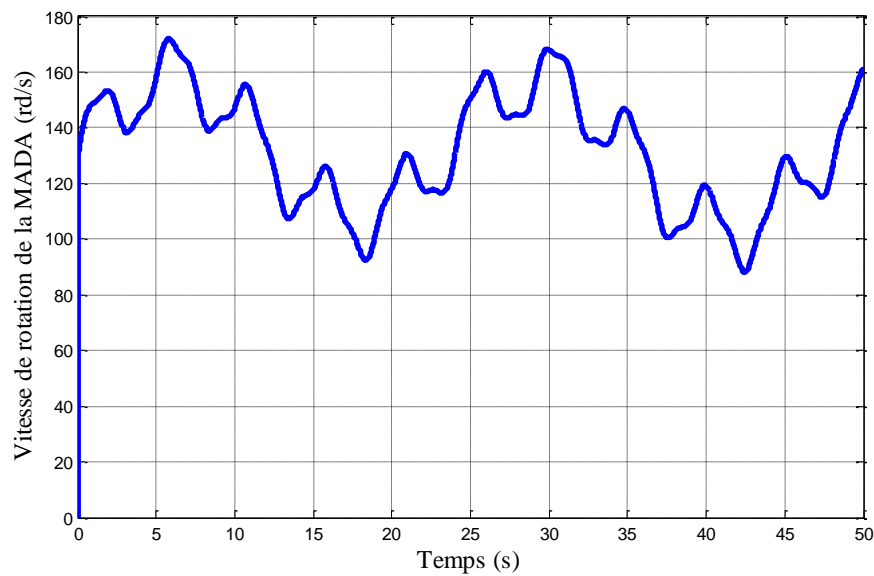
**Fig. (4.5) :** Allure du rapport de vitesse



**Fig. (4.6) :** Couple électromagnétique, et Couple mécanique



**Fig. (4.7) :** *Vitesse de rotation de l'arbre lent*



**Fig. (4.8) :** *Vitesse de rotation de l'arbre rapide*

Après avoir comparé les résultats de simulation obtenus précédemment en utilisant un régulateur *PI* en cascade avec un filtre fractionnaire aux résultats de simulation obtenus dans le mémoire [7] en utilisant un régulateur *PI* entier, on peut dire que ces deux régulateur on les mêmes performances dans la commande de vitesse.

### 3. Commande vectorielle de la MADA

Dans cette section, on va expliquer la commande par orientation de flux d'une MADA. Cette commande est appliquée aux machines électriques pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants.

Pour appliquer la commande vectorielle à la génératrice, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques ou rotoriques de la machine sont supposés triphasés, donc, toutes les composantes homopolaires sont annulées [12].

La figure (4.9) comporte trois blocs, le premier bloque représente le bloque de la commande vectorielle qui donne la relation entre les puissances active et réactive et les tensions de commande  $V_{dr}$ ,  $V_{qr}$ . Le deuxième bloque représente la transformée inverse de Park, pour récupérer les tensions rotoriques  $V_{ar}$ ,  $V_{br}$ ,  $V_{cr}$  dans le plan (a, b, c). Ces dernières sont alors injectées dans le troisième bloque qui est la MADA afin de commander les puissances active  $P_{smes}$  et réactive du  $Q_{smes}$ .

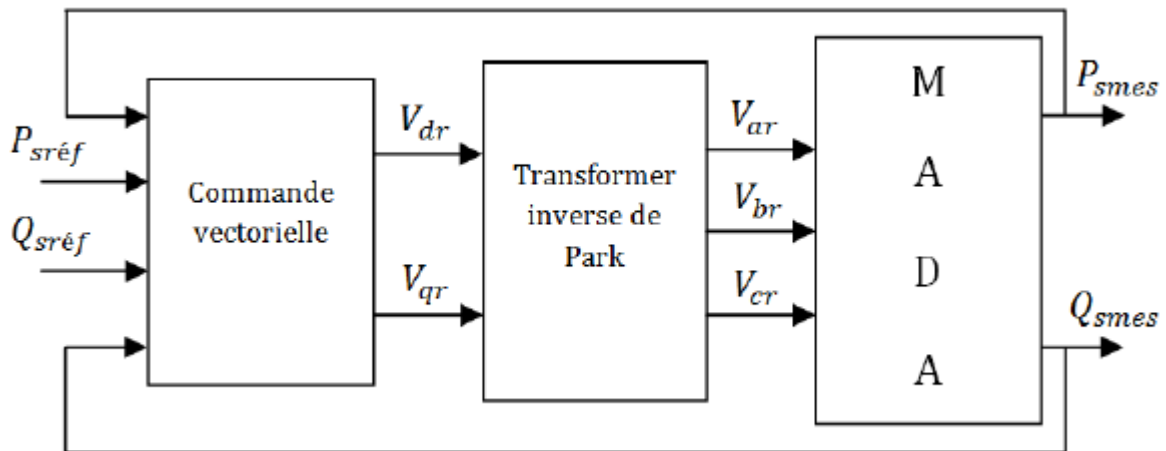


Figure (4.9) : schéma synoptique de la commande de la MADA.

#### 3.1. Principe de commande de la MADA

Dans cette commande, la MADA est contrôlée d'une manière semblable à celle de la machine à courant continu à excitation séparée. L'idée fondamentale de cette commande est de ramener le comportement de la machine à celui d'une machine à courant continu. La méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne le vecteur du flux pour obtenir un contrôle similaire à celui de la machine à courant

continu à excitation séparé,  $i_{dr}$  est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant  $i_{qr}$  est analogue au courant d'induit. Donc les composantes  $i_{dr}$  et  $i_{qr}$  sont mutuellement découplées [7].

la figure (4.10) montre la disposition des angles avec le système d'axe choisi elle met en évidence l'axe fixe AB lié au stator l'axe tournant ab lié au rotor et l'axe  $dq$  tournant à la vitesse du synchronisme ou le flux est synchronisé avec l'axe d et le vecteur  $V_s$  avec l'axe q .

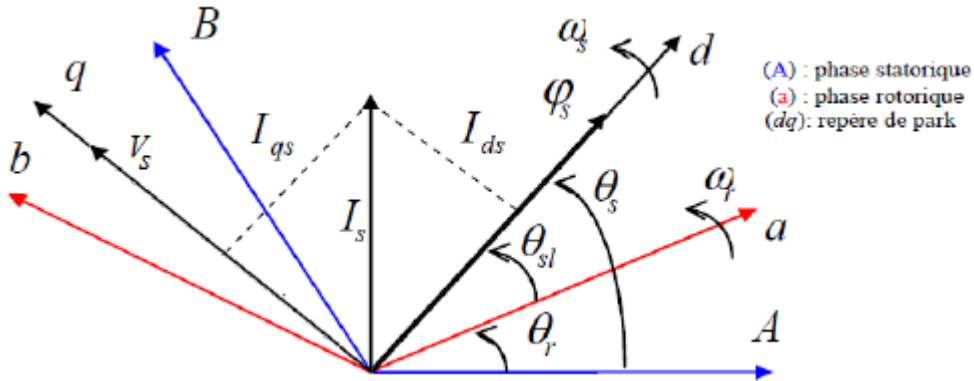


Figure (4.10) : Orientation de l'axe d sur le flux statorique [7].

### 3.1.1. Choix du référentiel du modèle de Park

Dans le but de contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, on va faire un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des grandeurs rotoriques, aux puissances actives et réactives statoriques [18].

Pour une approche linéaire classique, la difficulté réside dans la non linéarité en sortie, la commande vectorielle contourne cette difficulté par l'orientation du flux statorique suivant un référentiel  $d-q$  lié au champ tournant statorique en alignant le vecteur flux statorique  $\varphi_s$  avec l'axe  $d$ , cette orientation conduit [2].

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \quad ; \quad \varphi_{qs} = 0$$

L'expression du couple électromagnétique de l'équation (2.26) devient alors

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} \varphi_s i_{qr} \quad (4.3)$$

Si on suppose que le réseau électrique est stable de tension  $V_s$ , cela conduit à un flux statorique  $\varphi_s$  constant. Cette considération associée à l'équation (4.3) montre que le couple électromagnétique  $C_{em}$  est directement proportionnel au courant rotorique en quadrature  $i_{qr}$  [9].

De plus, la résistance statorique peut être négligée étant donné que c'est une hypothèse réaliste pour les génératrices de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes [15]. Ainsi on obtient l'équation (2.23) devient.

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (4.4)$$

Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (4.5)$$

En s'alignant sur le repère choisi et en utilisant les simplifications ci-dessus inhérentes à ce repère, nous pouvons simplifier les équations des tensions flux statoriques, sachant que

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}.$$

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (4.6)$$

Et l'équation (2.24) des flux statoriques devient

$$\begin{cases} \varphi_s = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (4.7)$$

A partir des équations (4.7) on peut obtenir les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques.

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (4.8)$$

D'après l'équation (4.8) on constate que les courants statoriques sont proportionnels aux courants rotoriques ce qui permet de commander la *MADA* par les courants rotoriques.

### 3.1.2. Relation entre les puissances statoriques et les courants rotoriques.

Dans le référentiel  $d-q$ , les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone et en adoptant l'hypothèse simplificatrice ( $V_{ds} = 0$ ) on obtient.

$$\begin{cases} P_s = V_s i_{qs} \\ Q_s = V_s i_{ds} \end{cases} \quad (4.9)$$

On constate que les puissances active et réactive statoriques dépendent directement des courants statoriques.

Afin d'exprimer ces puissances en fonction des courants rotoriques on remplace  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$  par leurs expressions données par l'équation (4.9), on obtient.

$$\begin{cases} P_s = V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (4.10)$$

En approximant  $\varphi_s$  par  $\frac{V_s}{\omega_s}$ , l'expression de la puissance réactive  $Q_s$  devient.

$$\begin{cases} P_s = V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (4.11)$$

### 3.1.3. Relation entre les tensions rotoriques et les courants rotoriques.

Pour obtenir les relations qui lient les tensions rotoriques aux courants rotoriques, on va exprimer dans un premier temps les flux rotoriques d'après les équations (2.22) en remplaçant les courants statoriques par leurs expressions dans l'équation (4.9) et en approximant  $\varphi_s$  par  $\frac{V_s}{\omega_s}$

On obtient.

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \end{cases} \quad (4.12)$$

Dans un deuxième temps on intégrera les expressions des flux rotoriques d'axe  $d-q$  dans les tensions rotoriques de l'équation (2.23), on obtient.

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{dr}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{qr}}{dt} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} + g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (4.13)$$

A partir de l'équation (4.13) et après l'avoir étudié dans le domaine de Laplace, on peut déduire la relation entre les tensions rotoriques de la machine et les puissances statoriques. Il est donc possible de mettre en place un schéma bloqué de la MADA, qu'on essayera de réguler par la suite.

Le schéma bloqué de la figure (4.11), comporte en entrée les tensions rotoriques et en sortie les puissances active et réactive statoriques. On voit que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre, et du moment qu'on a de faible glissement et que l'influence de  $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)$  est minime. On peut établir une commande vectorielle sans soucis, car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront être commandés indépendamment avec leurs propres régulateurs.

Le terme  $g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s}$  représente une force électromagnétique qui dépend de la vitesse de rotation et son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage, le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

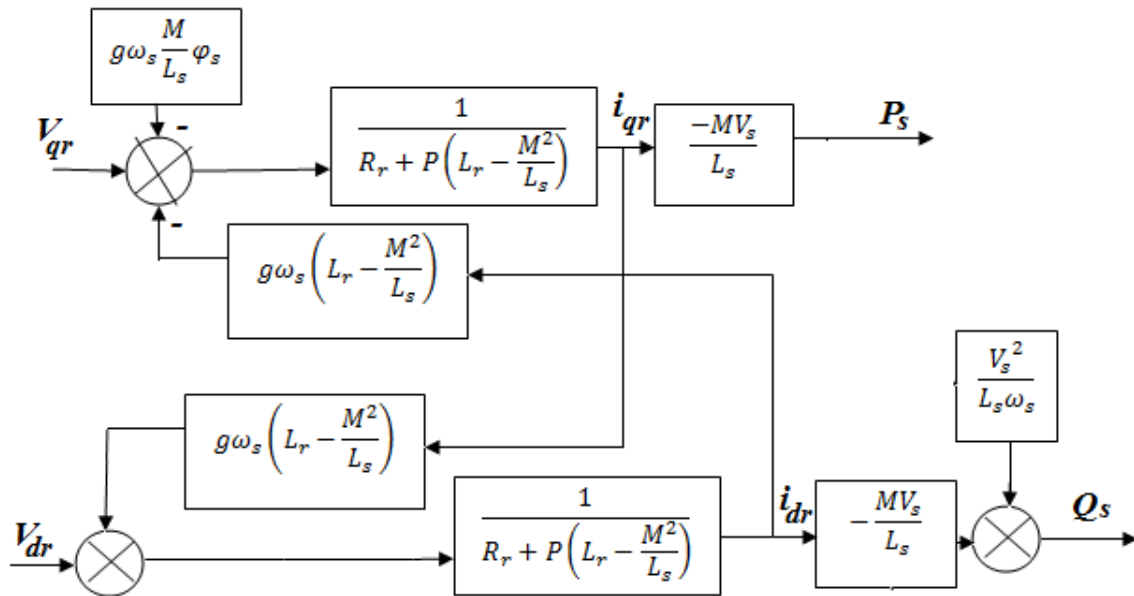


Figure (4.11) : schéma bloc de la commande de la MADA

Ainsi, il existe deux méthodes de commandes pour contrôler les puissances de cette machine.

### 3.1.4. Commande directe.

Dans cette méthode on contrôle directement les puissances active et réactive en utilisant les tensions  $V_{qr}$  et  $V_{dr}$  d'où son nom « méthode directe ». Elle consiste à négliger les termes de couplage et de mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe.

En apportant quelques modifications dans le schéma bloqué de la figure (4.11), où on a ajouté les termes de découplage aux tensions rotoriques, et déplacé la constante  $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$  de la puissance réactive vers la tension rotorique directe afin de faciliter le calcul du régulateur des puissances, on obtient le schéma bloqué de la figure (4.12).

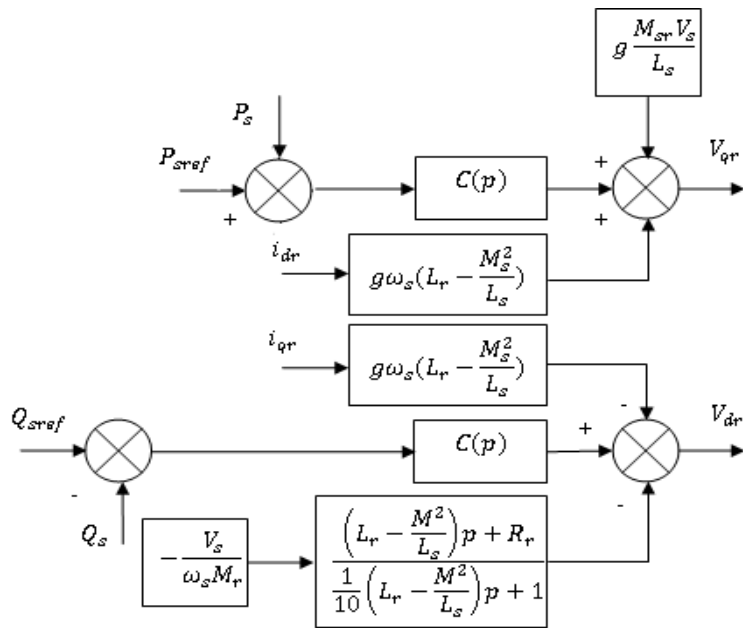


Figure (4.12) : Bloc détaillé de la commande directe.

### 3.1.5. Commande indirecte.

Cette méthode consiste à tenir compte des termes de couplages et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles de régulations l'une pour contrôler les puissances et l'autre pour contrôler les courants rotoriques.

La commande indirecte présente un avantage, car le contrôle des courants rotoriques permet de protéger la machine en cas de courants importants en introduisant des limiteurs de courants.

Le principe de base de cette méthode c'est de reproduire, en sens inverse le schéma bloqué du système à réguler, donc on construit un schéma bloqué qui exprime les puissances statoriques et les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, comme l'illustre la figure (4.13).

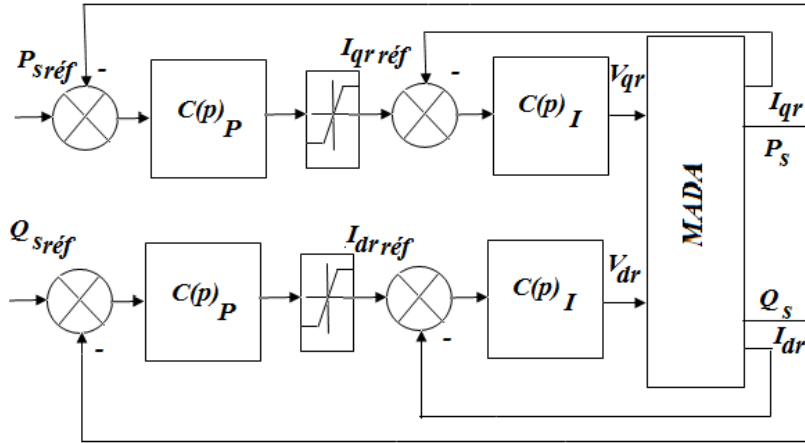


Fig (4.13) : schéma bloqué de la commande indirecte

On constate, que la méthode indirecte est plus compliquée que la méthode directe du fait qu'on utilise deux régulateurs l'un pour contrôler les puissances statoriques et l'autre pour le contrôle des courants rotoriques. Dans ce présent travail, on a opté pour la commande directe où on va calculé dans ce qui suit les régulateurs qui permettent de contrôler les puissances statoriques  $P_s$  et  $Q_s$ .

### 3.1.6. Synthèse du régulateur fractionnaire.

On utilise un régulateur fractionnaire pour commander la MADA en génératrice, c'est un régulateur simple à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables [9].

La figure (4.14) montre une partie de notre système bouclé et corrigé par le régulateur fractionnaire dont la fonction de transfert est de la forme  $\frac{1}{p^\alpha} \left( k_p + \frac{k_i}{p} \right)$ , correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure (4.12).

Vu que la fonction de transfert qui lie la puissance active statorique  $P_s$  à la tension rotorique en quadrature  $V_{qr}$  est similaire à la fonction de transfert qui lie la puissance réactive statorique  $Q_s$  à la tension rotorique direct  $V_{dr}$ , donc le calcul d'un seul régulateur suffit puis on l'implémente dans les deux axes du schéma de commande comme illustré dans la figure (4.11).

Les expressions des fonctions de transfert,  $\frac{P_s}{V_{qr}}$  et  $\frac{Q_s}{V_{dr}}$  sont respectivement donnés par.

$$\frac{P_s}{V_{qr}} = \frac{-MV_s}{L_s R_s + pL_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (4.14)$$

$$\frac{Q_s}{V_{dr}} = \frac{-MV_s}{L_s R_s + p L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}$$

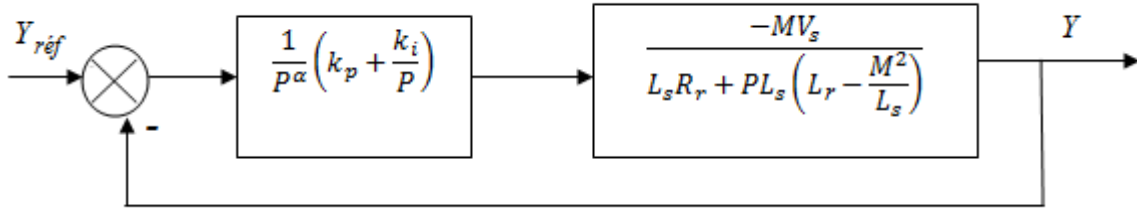


Figure (4.14) : schéma de commande utilisant la structure fractionnaire

La fonction de transfert du système à réguler est du premier ordre caractérisé par un gain statique

et une constante de temps respectivement égaux à  $G_0 = \frac{MV_s}{L_s R_r}$  ,  $T = \frac{\left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{R_r}$

Soit  $H(p)$  la fonction que l'on souhaite imposer à la boucle fermée de constante de temps  $T_c$

Qui correspond aux objectifs fixés.

$$H(p) = \frac{1}{1 + T_c p^{\alpha+1}} = \frac{y}{y_{ref}} \quad (4.15)$$

Avec  $T_c$  la constante de temps de la fonction de référence que l'on fixe à valeur de  $5 \cdot 10^{-3}$  s et  $\alpha = 0.3$ .

En utilisant la méthode de synthèse de la commande par modèle interne pour déterminer les différents paramètres du régulateur on obtient.

$$C(p) = \frac{1}{p^\alpha} \left[ \frac{T}{G_0 T_c} + \frac{1}{p} \right] = \frac{1}{p^\alpha} \left[ k_p + \frac{k_i}{p} \right] \quad (4.16)$$

$C(p)$  présente une structure intéressante car il est composé d'un régulateur  $PI$  en cascade avec un intégrateur fractionnaire.

Avec

$$k_p = \frac{T}{G_0 T_c} = -0.0025$$

$$k_i = \frac{1}{G_0 T_c} = -0.1832$$

### 3.2. Résultats de simulation de la MADA seule.

Afin d'évaluer les performances apportées par les régulateurs fractionnaires, intégrés à la commande vectorielle qu'on a appliqué à la MADA, une étude par simulation numérique sous l'environnement *MATLAB/SIMULINK* a été réalisée. L'objectif de cette section est de faire des comparaisons entre les puissances statoriques produites par la MADA, puis comparer les courants rotoriques en faisant varier l'ordre non entier du régulateur fractionnaire.

#### 3.2.4. Comparaison entre les régulateurs $PI$ entier et $I^\alpha - PI$ .

Pour voir l'efficacité du régulateur fractionnaire, on a décidé de faire une comparaison entre les puissances active et réactive statoriques obtenues à l'aide des régulateurs  $PI$  entier et fractionnaire. Les expressions des régulateurs fractionnaire et  $PI$  entier contiennent les mêmes gains proportionnel et intégral, la seule différence réside dans le fait que l'expression du régulateur fractionnaire comporte un intégral d'ordre non entier.

L'expression du régulateur  $PI$  entier

$$C(p) = \frac{T}{G_0 T_c} + \frac{1}{p} = k_p + \frac{k_i}{p}$$

L'expression du régulateur fractionnaire

$$C(p) = \frac{1}{p^\alpha} \left[ \frac{T}{G_0 T_c} + \frac{1}{p} \right] = \frac{1}{p^\alpha} \left[ k_p + \frac{k_i}{p} \right]$$

Avec

$$G_0 = \frac{MV_s}{L_s R_r}, \quad T = \frac{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{R_r}.$$

$$k_p = \frac{T}{G_0 T_c} = -0.0025.$$

$$k_i = \frac{1}{G_0 T_c} = -0.1832.$$

Les résultats de simulations illustrés dans les figures (4.14) et (4.15) montrent bien que la puissance active statorique obtenue à l'aide de régulateurs fractionnaires pendant le régime transitoire est meilleure que celle obtenue à l'aide de régulateurs entiers utilisés dans le mémoire [7].

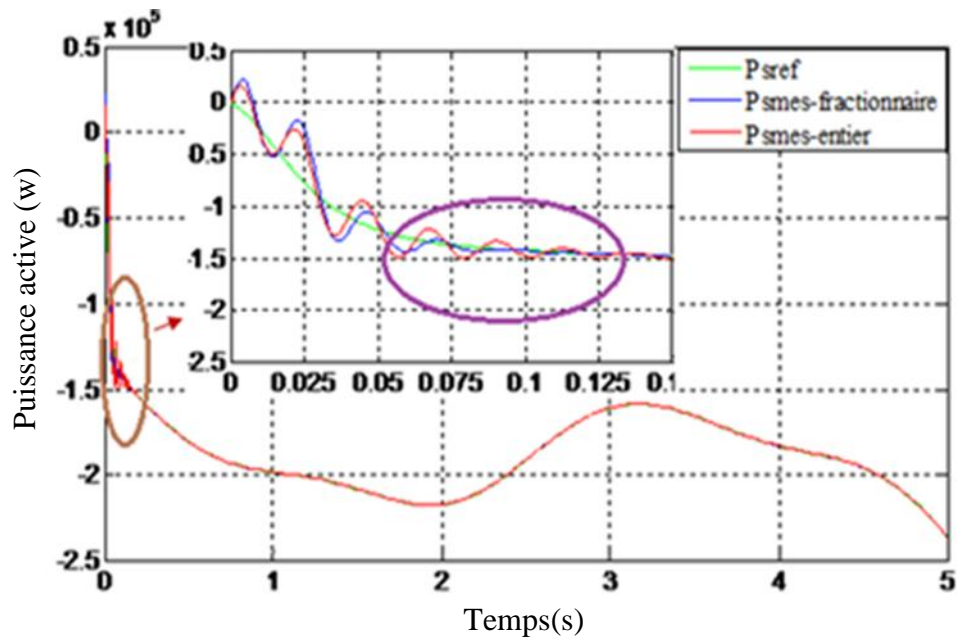


Figure (4.15) : Puissance active avec régulateurs PI fractionnaire et PI entier.

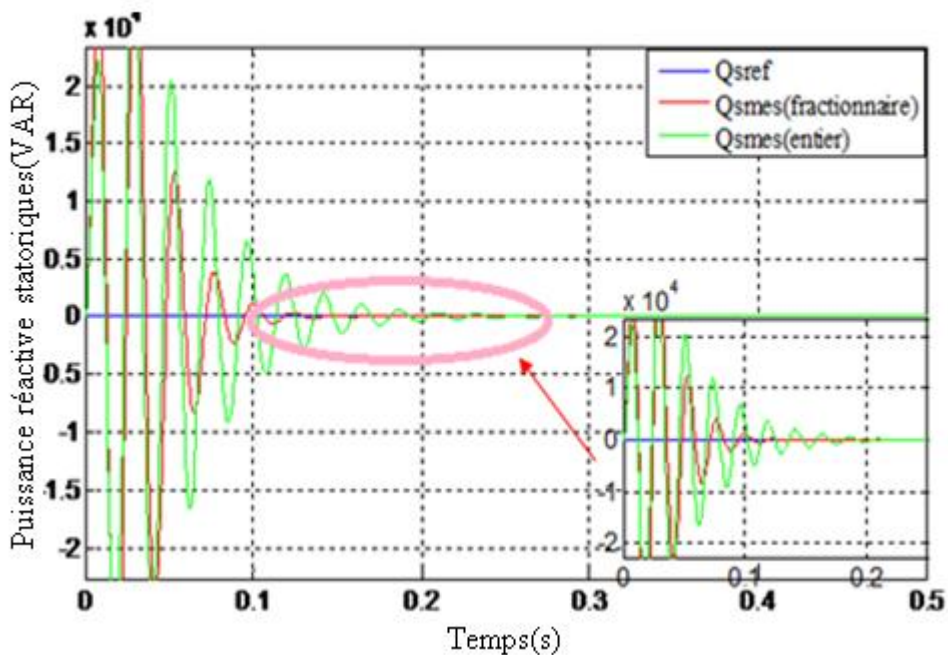
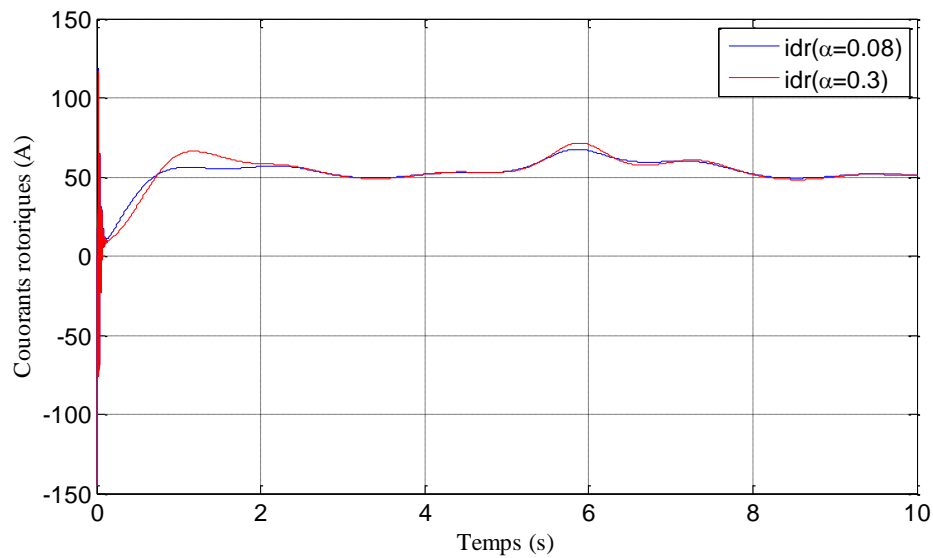


Figure (4.16) : Puissances réactives avec régulateur fractionnaire et PI entier.

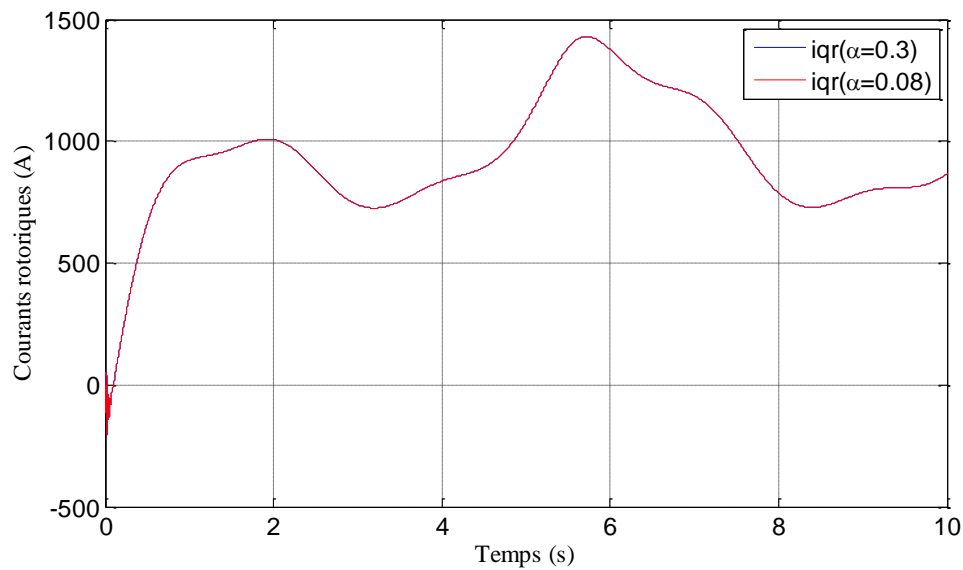
### 3.2.5. Résultats de simulations des courants rotoriques.

Dans cette section on va présenter les performances des courants rotoriques  $i_{qr}$  et  $i_{dr}$ , on fais varier l'ordre non entier  $\alpha$  de l'operateur intégral.

Les figures (4.17) et (4.18) montrent l'effet de variation de l'ordre non entier  $\alpha$  sur les deux courants rotoriques  $i_{dr}$  et  $i_{qr}$ .



**Figure (4.17) :** Effet de variation de  $\alpha$  sur le courant  $i_{dr}$



**Figure (4.18) :** Effet de variation de  $\alpha$  sur le courant  $i_{qr}$

D'après les résultats de simulations obtenus, les figures (4.17) et (4.18) montrent que pour une valeur de  $\alpha$  égale  $\alpha = 0.08$  le courant  $i_{dr}$  répond rapidement, et dans le cas du courant  $i_{qr}$  l'ordre non entier n'a aucune influence.

### 3.2.6. Essai de robustesse sur la puissance active

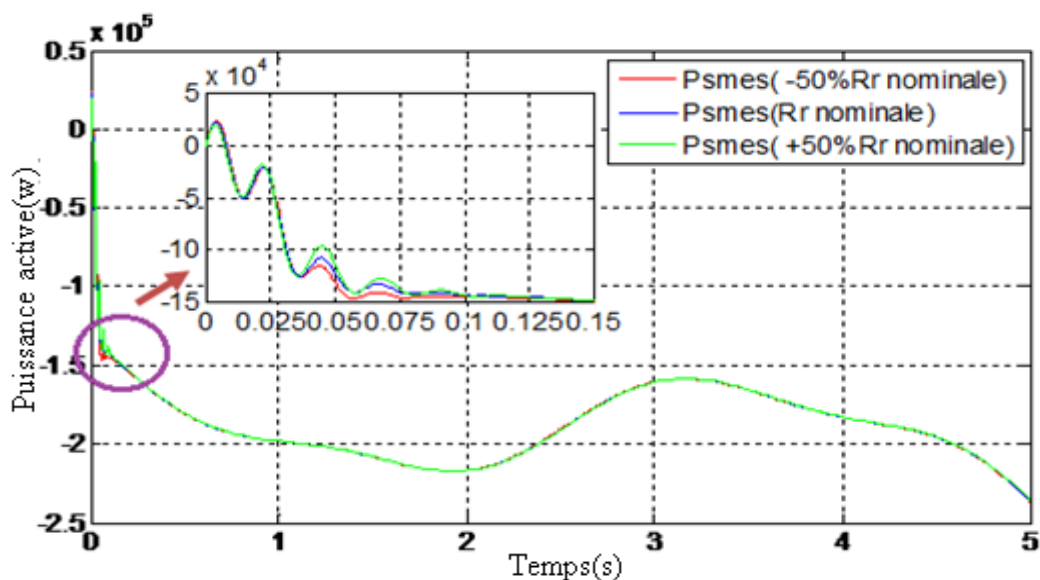
Ces essais consistent à faire varier les paramètres du modèle de la *MADA* utilisé, toutefois les calculs de régulateurs sont basés sur des fonctions de transfert dont les paramètres sont

maintenus fixes, mais dans le système réel, ces paramètres sont soumis à des variations entraînées par différents phénomènes physiques (saturation des inductances, échauffement des résistances...).

Dans un contexte d'essai de robustesse sur la *MADA*, on va faire dans un premier temps une variation de la résistance rotorique, et dans un second temps une variation de l'inductance mutuelle entre stator et rotor.

#### ✓ Variation de la résistance rotorique

L'effet de cette variation sur la puissance active est montré sur la figure(4.19), le principe de cette variation consiste à faire varier la résistance de +50% de sa valeur nominal puis de -50% de sa valeur nominal, et les résultats de simulations prouve les hautes performance du système de réglage adopté .

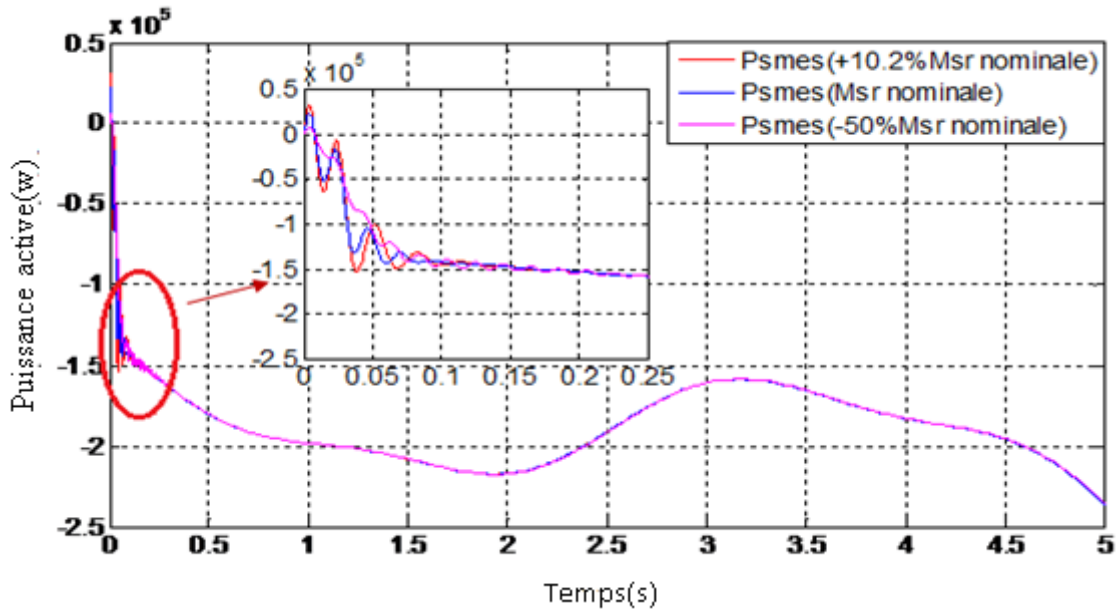


*Figure (4.19) : Effet de la variation de la résistance rotorique sur la puissance active*

#### ✓ Variation de l'inductance mutuelle

Pour bien évaluer les performances des contrôleurs fractionnaires sur la *MADA*, on impose cette fois une valeur de +10.2% de la valeur nominal de l'inductance mutuelle entre stator et rotor  $M_{sr}$ , puis une valeur de -50% de sa valeur nominale.

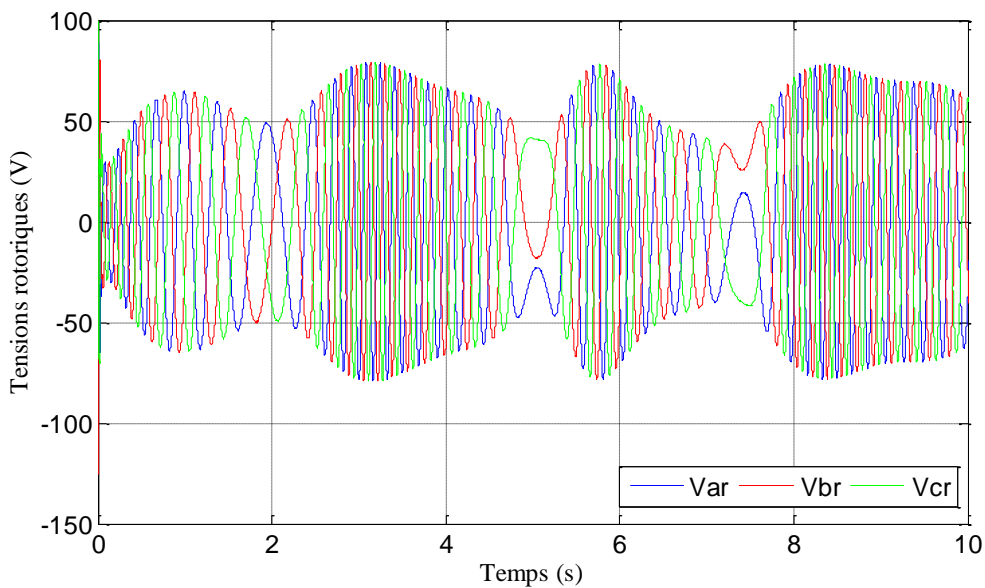
Les résultats de simulation sont illustrés dans la figure (4.20), on constate que la variation de l'inductance mutuelle n'a pas d'effet sur le bon rendement de la *MADA*, et cela prouve une autre fois les hautes performances du régulateur fractionnaire.



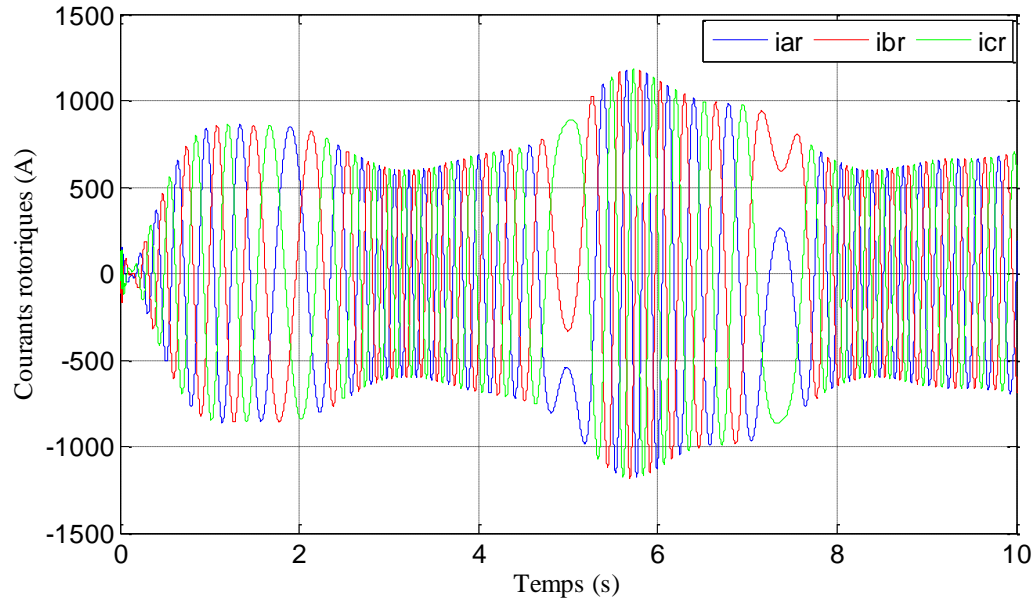
*Figure (4.20) : Effet de la variation de l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor sur la puissance active*

### 3.2.7. Résultats de simulation du système global

On va finaliser notre simulation par un essai global, en combinant la turbine avec la MADA, les figure (4.21) et (4.22) montrent les résultats de simulation des courants et tensions rotoriques, on constate qu'à  $t=5$  s et à  $t=7.5$  s des régimes transitoires qui sont dus au passage de la MADA de l'hyper à l'hypo synchronisme.



*Figure (4.21) : Tensions rotoriques*



**Figure (4.22) :** Courants rotoriques

#### 4. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter la structure de la commande de l'éolienne dans le but d'extraire le maximum de puissance. La vitesse de rotation peut être contrôlée directement par la commande directe de vitesse avec un contrôleur fractionnaire. Puis on a présenté une stratégie de commande appliquée à l'asservissement en puissance active et réactive statorique de la *MADA* qui est la commande vectorielle.

Les simulations de la *MADA* associé à la turbine ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation en mode génératrice.

## Conclusion Générale

---

Le travail présenté dans ce mémoire a concerné la commande par des contrôleurs fractionnaires d'une éolienne en utilisant une génératrice à double alimentation. L'objectif était la commande puis la simulation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une partie mécanique qui est la turbine associée à la MADA où on a commandé ses puissances statoriques active et réactive grâce à ses grandeurs rotoriques. La MADA est alimentée par deux convertisseurs statiques séparés par un bus continu. Cette configuration est très répandue ces dernières années, car elle présente de nombreux avantages sur le plan technique et économique.

**Le premier chapitre** a été consacré à la présentation de l'énergie éolienne suivi d'un bref aperçu historique. Ensuite nous avons traité des généralités sur les systèmes éoliens en se rendant compte de l'état actuel de l'exploitation mondiale de ce gisement énergétique.

Puis nous avons parlé de différents types d'éolienne à axe horizontal et à axe vertical. Et à la fin du chapitre on a expliqué la cause du choix d'une machine à vitesse variable et cité les avantages et les inconvénients qu'elle apporte.

Dans le **deuxième chapitre** nous avons fait la modélisation du système éolien, commençant par le couplage mécanique qui est la turbine puis la machine à double alimentation en donnant les équations électriques, mécaniques et magnétiques.

Le travail présenté dans le **troisième chapitre** porte sur la méthode de la commande par modèle interne qui a pour objectifs d'obtenir des régulateurs fractionnaires. Le modèle de référence utilisé est la fonction en boucle fermée de la fonction idéale de Bode dans le cas des contrôleurs fractionnaires. Dans la suite du chapitre on a fait une synthèse des régulateurs fractionnaires et traité quelques exemples d'applications pour démontrer leurs performances.

Enfin, le **quatrième chapitre** est consacré à la commande vectorielle qui a permis d'assimiler la MADA à une machine à courant continu à excitation séparée, pour que son étude soit aisée surtout pour sa simulation sous *MATLAB/SIMULINK* que nous avons effectuée afin de mieux comprendre le fonctionnement de la machine à double alimentation et de démontrer les capacités de cette commande.

Suite aux résultats obtenus dans ce présent travail des perspectives pouvant améliorer le fonctionnement de la MADA seront souhaitables :

## Conclusion Générale

---

- ✓ Pour mieux assiéger le projet, une cascade alimentant le rotor à partir du réseau, composé d'un *CCM*, d'un bus continu et d'un *CCR* va compléter la chaîne éolienne. La commande vectorielle permet d'imposer des tensions rotoriques de références sur le *CCM*, avec le contrôle du bus continu on peut limiter les harmoniques injectés dans le réseau et d'améliorer la qualité de l'énergie.
- ✓ Amélioration de la robustesse de la machine vis-à-vis des déséquilibres du réseau des creux des tensions et des fluctuations.
- ✓ L'implémentation expérimentale des différents algorithmes de commande de la *MADA*.

**Paramètres de la turbine [7]**

Paramètres de la turbine	Valeurs
Puissance nominale	0.18 MW
Rayon de la turbine $R$	11.6 m
Rapport du multiplicateur de vitesse $k$	23.75
Coefficient d'inertie de la turbine $J$ (ramené sur l'arbre rapide)	4.6822 N.m
Coefficient du aux frottements visqueux de la turbine $f$	0.012 N.m
Masse volumique de l'air $\rho$	1.225 Kg/m <sup>3</sup>

**Paramètres de la MADA [7]**

Paramètres de la MADA	Valeurs
Tension nominale	400 V 3~
Fréquence nominale	50 Hz
Nombres de paires de pôles	2
Resistance statorique $R_s$	0.6 $\Omega$
Resistance rotorique $R_r$	0.164 $\Omega$
Inductance statorique $L_s$	0.097 H
Inductance rotorique $L_r$	0.0218 H
Inductance mutuelle $M_{sr}$	0.0436 H

- [1] MELLOUL A. « Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne. » Mémoire de Magister, université UFA, 2011.
- [2] POITIERS F. « Etude et commande de génératrices synchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. » Thèse de Doctorat, université de Nantes, 2000.
- [3] ARDJOUN S. « Commande en vitesse par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation. » Mémoire de Magister, université DSB, 2010.
- [4] ABDELLI A. « Optimisation multicritère introduction général chaîne éolienne passive. » Thèse de Doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2007.
- [5] COURTECUISSSE V. « Supervision d'une centrale multi source à base d'éolienne et de stockage d'énergie connecter au réseau électrique. » Thèse de Doctorat école doctorale : sciences des métiers de l'ingénieur, 2008.
- [6] BELLARBI S. « Etude et simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (turbine+MADA+réseau) en mode continu et discrète. » Mémoire de fin d'étude, université AB, 2013.
- [7] DAHMANI M. et YAKOUBI H. « Commande d'un système de production de l'énergie éolienne. » Mémoire de fin d'études, université UMMTO, 2016.
- [8] AIT RAMDANE N. « Commande robuste d'une génératrice à double alimentation pour la conversion de l'énergie éolienne » Mémoire de Magister, université UMMTO, 2012.
- [9] BOYETTE A. « contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de Doctorat, université Henri Poincare, Nancy 1, 2006.
- [10] DENDOUG A. « Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation. » Thèse de Doctorat, université Batna, 2008.
- [11] LARIBI M. AIT CEIKH M.S. LARBES C. BARAZANE L. « Application de la commande synergétique au contrôle de vitesse d'une machine asynchrone » Revue des Energies Renouvelables Vol. 13, n°3, pp. 485 – 496, 2010.
- [12] EL AIMANI S. « Modélisation de différentes technologies d'éolienne intégrées dans un réseau de moyenne tension. » Thèse de Doctorat, université des sciences et de technologie de Lille, 2004.
- [13] LITIM M. « Commande à modèle interne synthèse et application. » Mémoire de Magister, université Batna, 2012.
- [14] BETTAYEB M. MANSOURI R. « IMC-PID-fractional-order-filter controllers design

- for integer order systems. » ISA Transactions, vol.05, n°53, pp.1620-1628, 2014.
- [15] MESBAH K. « Etude du générateur asynchrone et coordination des puissances dans une ferme éolienne connectée au réseau » Thèse de Doctorat, université UMMTO 2016.
- [16] TITOUCHE K. « Contribution à la synthèse de contrôleur fractionnaire pour la command multi objectifs des systèmes linéaires.» Thèse de Doctorat, université UMMTO 2017.
- [17] AIT KAID D. « Commande d'une machine sans capteur mécanique à l'aide de régulateur fractionnaire » Mémoire de Magister, université UMMTO 2011.
- [18] GUEBLI I. « Modélisations de la génératrice asynchrone en vue de la production d'énergie éolienne ».Mémoire de Fin d'Etudes, université CLT, 2012.
- [19] BOUHEDDA A. «Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne » Mémoire de Magister université UMMTO, 2011.
- [20] BENNOUR C. « Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » Mémoire de Magister, université MKB, 2012.
- [21] LEMMOUCHIA Z. « Commande robuste de la machine asynchrone doublement alimentée MADA avec et sans capteur de vitesse » Mémoire de Magister, université d'EO, 2013.
- [22] TARAK G. « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, école centrale de Lille, 2011.
- [23] MIRECKI A. « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat de l'institut national de Toulouse, 2005.
- [24] ROUABHI R. « Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation application : énergie éolienne » Mémoire de Magister, université FAS, 2012.
- [25] Rapport Interne « Energies Renouvelables » Sonelgaz, 2017.