

## Table des matières

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

### Chapitre\_1 l'état de l'art sur l'éolienne

1.1 Introduction.....	4
1.2 Etat de l'art et situation de l'éolien dans le contexte des énergies renouvelables.....	4
1.3 Génération d'énergie renouvelable.....	5
1.3.1 Génération de la chaleur.....	6
1.4. Génération d'électricité.....	6
1.4.1 Photovoltaïque.....	7
1.5. Notion théorique sur l'éolien.....	9
1.5.1. D'où vient le vent ?.....	9
1.5.2. Loi de Betz - notions théoriques.....	10
1.6. Distributions de WIBULL.....	11
1.7. Les différents types d'éoliennes.....	13
1.7.1 Les éoliennes à axe vertical.....	13
1.7.2 Les éoliennes à axe horizontal.....	14
1.8. Eléments constitutifs d'une éolienne.....	14
1.8.1. Le terrassement.....	15
1.8.2 Le local électrique.....	15
1.8.3 Le raccordement électrique.....	15
1.8.4. Le mât.....	16

1.8.5 Le système d'orientation de la nacelle .....	17
1.8.6 La nacelle .....	18
1.8.7. Le moyeu de commande du rotor .....	19
1.8.8 Les pales .....	19
1.8.9 Le multiplicateur ou boîte de vitesse .....	19
1.8.10 Le générateur.....	20
1.8.11 L'anémomètre .....	20
1.8.12 Le paratonnerre .....	21
1.8.13. Le balisage .....	21
1.9. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne horizontale.....	21
1.10.La courbe de puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent .....	22
1.11 .principe de la conversion d'énergie.....	23
1.12.connexion directe au réseau pour la MADA.....	24
1 .13.gestion du réseau électrique.....	25
1.11. Conclusion .....	26

## **Chapitre 2 modélisation de la MADA**

2.1 Introduction.....	24
2.2Description de la MADA.....	24
2.3Application des machines asynchrones à double alimentation.....	25
2.4 Fonctionnement de la MADA à vitesse variable.....	26
2.5 APPLICATION DE LA MADA.....	28
2.6. Principe de fonctionnement des moteurs doubles alimentations.....	29
2.7. Régimes de fonctionnement de la MADA.....	29

2.7.1. Régime de fonctionnement synchrone.....	29
2.7.2. Régime de fonctionnement asynchrone.....	30
2.8. Méthodes de variation de la vitesse de rotation.....	30
2.8.2. Côté rotor.....	30
2.8.1. Côté stator.....	31
2.9 Modèle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)	
Dans le repère ABC.. .....	32
2.9.1 Hypothèses simplificatrices.....	32
2.9.2 Les équations électriques et magnétiques de la machine.....	32
2.10 Modèle de la MADA dans le repère de Park.....	35
2.11 Mise sous forme d'équations d'Etat .....	37
2.12 Conclusion.....	40

### **Chapitre 3 commande vectorielle de la MADA**

3.1 Introduction.....	41
3.2 Principe de la commande vectorielle.....	41
3.3 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	42
3.4 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	43
3.5 Les type de commande.....	45
3.5.1 Commande directe.....	45
3.5.2 Commande indirecte.....	45
3.6 Système du régulateur PI.....	47
3.7 Simulation et interprétation.....	48
3.7.1 commande direct.....	49
3.7.2 commande indirect.....	50
3.8. Conclusion.....	58

### **Chapitre 4 la commande mode glissant**

4.1. Introduction.....	59
4.2 Principe de commande par mode de glissement des systèmes a structure variable.....	60
4.2.1 Le mode non glissant.....	60
4.2.2 Le mode glissant.....	60
4.3. Conception de l'algorithme de commande par mode de glissement.....	61
4.4. Condition d'existence et de convergence du régime glissant.....	62
4.4.1 Approche de Lyapunov.....	62
4.4.2.Détermination de la loi de commande.....	62
4.4.3 Choix de la surface de commutation.....	67
4.5 Contrôle de la puissance active.....	68
4.6 Contrôle de la puissance réactive.....	70
4.7 Les résultats de simulations.....	70
Conclusion général.....	72
Bibliographie.....	74

# Listes des Figures

<b>Figure 1-1</b> : Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions.....	5
<b>Figure 1-2</b> : Répartition des sources primaires dans le monde.....	6
<b>Figure 1-3</b> : Evolution de la production mondiale de cellules photovoltaïque en MW.....	8
<b>Figure 1-4</b> : Rose de vent.....	12
<b>Figure 1-5</b> : Exemple de la distribution de Weibull.....	13
<b>Figure I-6</b> : Eolienne à axe verticale.....	14
<b>Figure I-7</b> : Eolienne à axe Horizontale.....	14
<b>Figure I.8</b> : Base d'une éolienne.....	15
<b>Figure I.9.a</b> : Entrée du local électrique.....	15
<b>Figure I.9.b</b> : Armoire électrique.....	15
<b>Figure I.10</b> : Enfouissement des câbles de raccordement électrique.....	16
<b>Figure I.11.a</b> : Montage d'un mât tubulaire.....	17
<b>Figure I.11.b</b> : Tour en treillis métalliques.....	17
<b>Figures I.12</b> : Différentes vues sur des systèmes d'orientation de la nacelle.....	17
<b>Figures I.13</b> : Nacelle d'une éolienne et sa vue en coupe.....	18
<b>Figure I.14.a</b> : Moyeu relié à l'arbre.....	19
<b>Figure I.14.b</b> : Rotor .....	19
<b>Figure I.15</b> : Pale.....	19
<b>Figure I.16</b> : Multiplicateur de vitesse.....	20

<b>Figure I.17</b> : Chaîne de fabrication de générateurs d'éoliennes.....	20
<b>Figure I.18.a</b> : Anémomètre.....	21
<b>Figure I.18.b</b> : Girouette.....	21
<b>Figure 1-19</b> : Limitation de puissance éolienne.....	22
<b>Figure 1-20</b> : La courbe de puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent.....	23
<b>Figure2.1</b> :Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	25
<b>Figure 2.2</b> : cascade hyposynchrone.....	25
<b>Figure 2.3</b> : différentes configurations de fonctionnement de la MADA.....	27
<b>Figure2.4</b> représentation spatiale de la MADA .....	31
<b>Figure2.5</b> : Diagramme de phase de la MADA dans le référentiel (d,q).....	34
<b>Figure 2.6</b> : simulation de MADA avec démarrage à vide.....	38
<b>Figure 2.7</b> : simulation de MADA avec démarrage à vide application d'un couple résistant à l' instant (t=2s ).....	39
<b>Figure3.1</b> : Schéma bloc de la MADA à réguler.....	44
<b>Figure3.2</b> :schéma bloc de la commande directe.....	45
<b>Figure3.3</b> :schéma bloc de la commande indirect sans boucle de puissance.....	46
<b>Figure 3.4</b> : Schéma bloc de la structure de commande indirecte avec boucle de puissance.....	46
<b>Figure3.4</b> : Système régule le courant.....	47
<b>Figure3.4</b> : Représentation des différentes grandeurs de la MADA par la commande vectorielle direct en puissance active et réactive.....	49
<b>Figure3.5</b> : Représentation des différentes grandeurs de la MADA par la commande vectorielle indirect en puissance active et réactive.....	50
<b>Figure 4.1</b> : Modes de fonctionnement dans le plan de phase.....	60

<b>Figure 4.2</b> :Schéma de principe de la commande à structure variable.....	61
<b>Figure4.3</b> : Fonction Sign( non-linéarité tout ou rien ).....	64
<b>Figure 4.4</b> : Phénomène de broutement.....	65
<b>Figure 4.5</b> :Fonction de saturation ( $\varepsilon > 0$ est petit ).....	65
<b>Figure 4.6</b> Fonction de classe $C^1$ ( $\varepsilon > 0$ est petit ).....	66
<b>Figure 4.7</b> : schéma bloc proposé de contrôle du système global.....	69
<b>Figure 4.8</b> commande en puissance avec régulateurs mode glissant.....	70
<b>Figure 4.9</b> : effet de chatterring.....	71

## Listes Des Tableaux

<b>Tableau 1-1</b> : Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement.....	12
--	----

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

BOUACHE Samir

&

AMRANE Mahmoud

pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique option Machines Electriques

---

Thème

---

# Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la conversion de l'énergie éolienne

---

Proposé par : Dr Omar BENZINEB

Année Universitaire 2011-2012



## Remerciements

---

*Nous remercions tout d'abord ALLAH le Tout Puissant de nous avoir ouvert les portes du savoir, nous avoir aidé dans les moments difficiles et nous avoir permis d'être ce que nous sommes devenus.*

*Nous tenons à remercier notre promoteur Dr Omar BENZINEB pour avoir accepté de nous encadrer, pour ses conseils judicieux et pour le soutien qu'il nous a apporté tout au long de la préparation de ce mémoire.*

*Nous adressons nos plus vifs remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant la charge de juger ce travail.*

*Nous sommes reconnaissants envers nos enseignants auxquels nous devons notre formation en électrotechnique grâce à l'enthousiasme qu'ils ont su nous communiquer.*

*On remercie affectueusement nos parents, qui ont su nous faire confiance et nous soutenir tout le long de nos études.*

*Enfin, nous tenons à remercier ceux qui nous ont aidé ou encouragé à élaborer ce mémoire.*

---

## ملخص:

يقدم هذا العمل دراسة طرق التحكم في المولد الحثي ثنائي التغذية المستعمل في تحويل الطاقة الهوائية لإنتاج الكهرباء، من أجل ذلك قمنا بإنشاء نموذج للمولد الحثي ثنائي التغذية، بهدف توليد أكبر قدر من الطاقة، قمنا باستعمال تقنية التحكم الشعاعي والنمط الانزلاقي التي تسمح بدورها في التحكم في الطاقة التفاعلية و الردية. لتحقيق هذا التحكم استخدمنا منظم PI. اختتمت هذه الدراسة بمحاكات المولد الهوائي، واستخلصنا من ذلك ان الماكينة اللاتزامنية ثنائية التغذية لها قدرة جيدة على العمل في التطبيق السالف الذكر.

**كلمات المفاتيح:** الماكينة اللاتزامنية، ثنائية التغذية، مولد هوائي، تحكم شعاعي، النمط الانزلاقي

---

**Résumé :** Ce travail présente la modélisation et la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour la production de l'énergie éolienne. Pour ce faire, un modèle a été établi pour la MADA. Une commande vectorielle et par mode glissement en puissance active et réactive statorique ont été élaborée. Le réglage de cette commande a été effectué par la synthèse de régulateur linéaires PI. Les performances du dispositif ont été analysées et comparées en termes de suivi de consigne, robustesse, et rejet de perturbations. Cette étude a été conclue par la simulation. Nous avons pu ainsi constater la capacité de la MADA à intégrer ce genre d'application.

**Mots clés :** MADA, éolienne, commande vectorielle, commande mode glissant.

---

**Abstract :** This work presents the modelling and the control of the doubly-fed induction machine (DFIM) in the wind power production. With this intention, a model of the DFIM was established. A vector control and sliding mode control of the generator with active and reactive stator powers as control variables. This control is elaborated by linear controllers PI.

The performances of the system are analysed and compared in terms of references tracking, robustness and disturbance rejection. This study was concluded by a simulation. We observed at a result, that the DFIM is able to be used in the wind generation application.

**Keywords :** DFIM, wind turbine , vector control, sliding mode control.

---

## Listes des acronymes et abréviations

$P_v$ : énergie cinétique du vent

$P_{maxl}$  : énergie cinétique du vent maximal

$P_{eol}$ : énergie éolienne

$\beta$  : angle de calage

$V_v$  : La vitesse du vent en m/s

$\Omega$  : La vitesse de la pale en tr/min

$R$  : Le rayon de la pale en m

$C_p$  : Le coefficient de puissance de la turbine

$\rho$  : Masse volumique de l'air

$S$  : La surface d'air en  $m^2$  balayée par les pales

$\lambda$  : La vitesse réduite

$h_{mes}$  : la hauteur des appareils de mesure en m

$K$  : facteur de forme

$C$  : facteur d'échelle en m/s

$P_n$  : puissance nominale

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation

GADA : Génératrice Asynchrone à Double Alimentation

MAS : Machine Asynchrone

$p$  : Nombre de pair de pôle

$f_s$  : fréquence statorique

$f_r$ : fréquence rotorique

$X_S$  : phase statorique

$X_R$  : phase rotorique

F.m.m : force magnétomotrice

$V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$  : Les tensions des trois phases statoriques

$V_{ar}, V_{br}, V_{cr}$  : Les tensions des trois phases rotoriques

$I_{as}, I_{bs}, I_{cs}$  : Les courants des trois phases statoriques

$I_{ar}, I_{br}, I_{cr}$  : Les courants des trois phases rotoriques

$I_d$  : courant direct

$I_q$  : courant en quadrature

$R_s, R_r$  : Les résistances des enroulements statoriques et rotoriques

$L_s, L_r$  : Les inductances de fuites des statoriques et rotoriques

$M_s, M_r$  : Les inductances de fuite mutuelles

$L_s, L_r$  : Les inductances cycliques statoriques et rotoriques

$M_{sr}$  : La mutuelle cyclique entre rotor-stator

$\Phi_s, \phi_r$  : Les flux des trois phases de l'enroulement statorique et rotorique

$s, r$  : Les indices correspondants respectivement aux enroulements statoriques et rotoriques

$S_a, S_b, S_c$  : Les phases des enroulements statoriques

$r_a, r_b, r_c$  : Les phases des enroulements rotoriques

$D, q$  : Les axes correspondant au référentiel lié au repère de PARK

$\theta$  : L'angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor

$\theta_s$  : L'angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe d

$\theta_r$  : L'angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d

$g$  : Le glissement

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique

$f_r$  : Le coefficient de frottement

$C_r$  : Le couple résistant

$J$  : Le moment d'inertie

$P(\theta_s)$  : La matrice de PARK correspondant aux enroulements statoriques

$P(\theta_r)$  : La matrice de PARK correspondant au rotor

$I_A, I_B, I_C$  : courants des phases

$P_r$  : La puissance active rotorique

$Q_r$  : La puissance réactive rotorique

$f$  : La fréquence du réseau

$S$  : L'opérateur de Laplace

$U_c$  : La tension d'entrée d'un niveau de l'onduleur

$K_p$  : Le gain proportionnel du régulateur PI (proportionnel - intégral)

$K_i$  : Le gain intégral du régulateur PI (proportionnel - intégral)

$P_{res}$  : La puissance du réseau

$\omega_r, \omega_s$  : Les pulsations électriques respectivement du rotor et du stator

$\Phi_{ds,r}$  : flux directe statorique et rotorique

FTBO : La fonction de transfert en boucle ouverte

FTBF: La fonction de transfert en boucle fermé

$\tau_r$  : le temps de réponse

$X_{eq}$  : indice des valeurs équivalentes

$X_n$  : indice des valeurs discrètes

$S(x)$  : surface de glissement

$S'(x)$  : dérivé surface de glissement

ref : indice de référence

Q : puissance réactive

P: puissance réactive

# Chapitre1 L'état de l'art sur l'éolienne

---

## 1.1 Introduction

Définition des énergies renouvelables ; sont considérées comme énergies renouvelables toutes les énergies issues du soleil, directement (énergie solaire) ou indirectement (énergie éolienne, hydraulique biomasse), l'énergie issue du magma terrestre (géothermie) et l'énergie issue de la gravitation (énergie marémotrice). Les diverses énergies que l'on pourrait tirer des océans, telles que l'énergie de la houle, des courants marins ou de gradient thermique des mers.

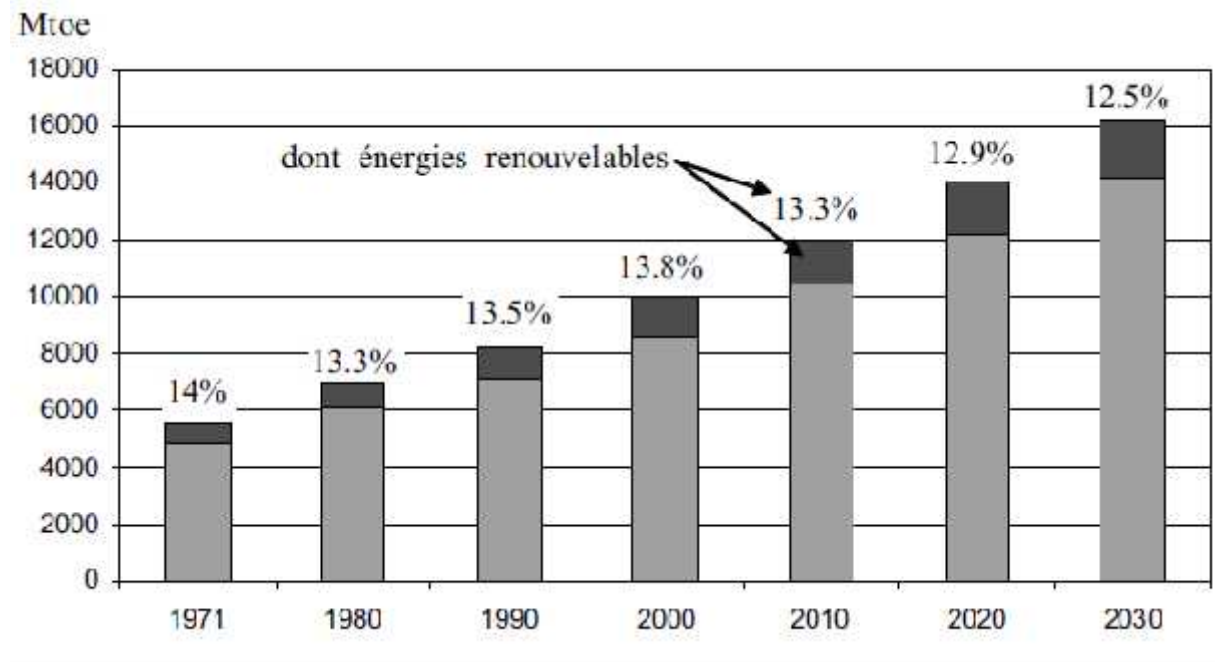
L'énergie éolienne est utilisée par l'Homme depuis des siècles. Pour la propulsion des navires, le pompage de l'eau servant à l'irrigation des cultures et bien entendu, l'exemple le plus connu, celui du moulin à vent destiné à moudre le blé et à le transformer en farine ou encore à remonter l'eau d'un puits. L'idée de fabriquer de l'électricité à partir de l'énergie du vent a germé dans l'esprit du physicien anglais Lord Kelvin en 1802 mais on a attendu 1850 et l'invention de la dynamo pour donner naissance au principe des aérogénérateurs modernes.

Le pays pionnier dans le domaine de l'éolien est sans conteste l'Allemagne avec 23903 MW installés sur son territoire, il est le leader européen suivi de près par l'Espagne avec 16754 MW installés. Au niveau mondial, les Etats-Unis sont en tête de classement depuis la fin 2008 avec 25170 MW. A noter que la Chine et l'Inde réalisent une remarquable émergence avec respectivement 12210 MW et 9645 MW. Ce qui porte la capacité mondiale à 120791 MW de puissance éolienne installée fin 2008, soit une hausse de 28.75% par rapport à 2007. [1]

## 1.2Etat de l'art et situation de l'éolien dans le contexte des énergies renouvelables

Dans le cadre du développement durable , face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problème posés vis à vis du respect de l'environnement , de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables . En effet , la consommation mondiale d'énergie ne cesse de croitre (figure1-1 données 2000)

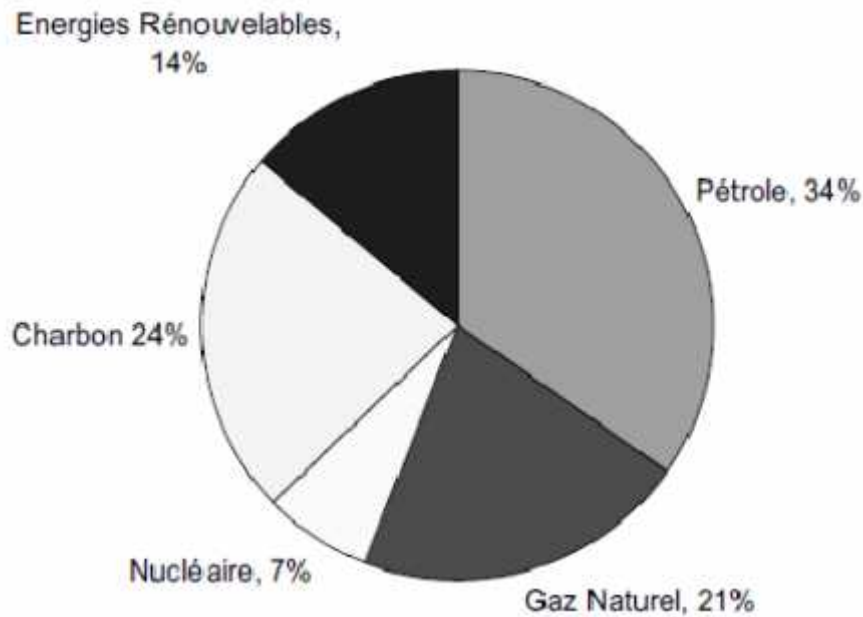
posant des questions cruciales sur l'effet de serre et l'amenuisement des ressources énergétique.  
[2]



**Figure 1-1 :** Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. La figure 1-2 montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles.

Les formes de production d'énergie non renouvelable engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre, qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème, aujourd'hui non résolu, de stockage des déchets radioactifs.



**Figure 1-2 :** Répartition des sources primaires dans le monde

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle ainsi que les courants marins, la géothermie et la biomasse.

### **1.3. Génération d'énergie renouvelable**

Une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est liée au fait que la matière première (source de l'énergie) n'est pas transportable dans la majorité des cas contrairement aux sources traditionnelles comme le pétrole ou l'uranium[2].

**1.3.1 Génération de la chaleur :** une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (chauffage, procédés industriels, ...). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, gaz ou du pétrole. Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables comme : Thermo solaire, Géothermie et Biomasse.

### **1.4. Génération d'électricité**

Une autre famille d'énergies renouvelables est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques et éoliennes, la puissance électrique peut être récupérée et immédiatement utilisée par un



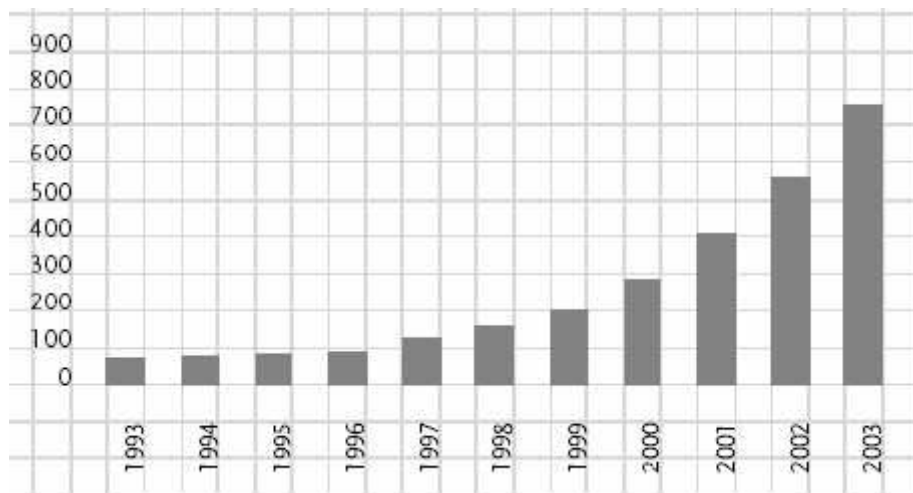
récepteur ou bien transportée vers les réseaux de distribution. Nous donnons ici une description sommaire de chaque ressource énergétique et la façon de produire l'énergie électrique :

#### **1.4.1 Photovoltaïque :**

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Les panneaux solaires actuels sont relativement onéreux à la fabrication malgré la matière première peu coûteuse et abondante (silice) car une énergie significative est nécessaire à la production des cellules. Cependant, de nets progrès ont été faits à ce sujet et on considère aujourd'hui qu'il suffit de 3 à 5 ans pour qu'un panneau produise l'énergie que sa construction a nécessité. Un autre inconvénient est celui de la pollution à la production qui est due à la technologie utilisée. Des progrès technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive. En raison des caractéristiques électriques non fortement non linéaires des cellules et de leur association, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT). Cette dernière caractéristique est assez commune avec la production d'énergie éolienne.

Les panneaux solaires sont très pratiques d'utilisation. L'intégration dans le bâtiment est facile et devient même esthétique. Pour les sites isolés et dispersés qui demandent peu d'énergie, c'est une solution idéale (télécommunication,...).

La technique photovoltaïque malgré sa complexité est aussi en très forte croissance. En 2001, en Europe on comptait environ 250MW installés et en 2003 ce chiffre est monté jusqu'au 560MW de puissance installée. La Figure 1-5 montre l'évolution mondiale de cette ressource qui est en très nette progression depuis le début du siècle ( la production est équivalente à la puissance installée).



**Figure 1-3 :** Evolution de la production mondiale de cellules photovoltaïques en MW

**a. Hydraulique :**

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et « stockable ».

**b. Energie de la mer :**

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux-mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courant, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique.

**c. Production éolienne :**

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps été oubliée, cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de

30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 15000MW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27000MW pour 40000MW de puissance éolienne installée dans le monde. En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une puissance éolienne installée en Europe de l'ordre 70000MW.

## **1.4 Notion théorique sur l'éolien**

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et pour la plupart, ils utilisent des machines asynchrones et synchrones à aimant permanent et doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une grande plage de variation de vitesse. Des stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau sont élaborées et améliorées continuellement dans le but d'améliorer la rentabilité de ces installations éoliennes.

### **1.5.1. D'où vient le vent ? [3]**

On estime que chaque année le vent, raison d'être des aérogénérateurs, distribue entre 2,5 et  $5 \cdot 10^{15}$  kWh ! Ce potentiel énorme que représente l'énergie éolienne est en réalité la résultante de plusieurs phénomènes qui engendrent différents types de forces à l'origine des mouvements d'air que l'on appelle le vent.

Dans un premier temps, l'air est réchauffé par l'ensoleillement mais de façon non uniforme, principalement à cause de la forme sphérique de la Terre. Une fois l'air chauffé, celui-ci va chercher à occuper un plus grand volume en se dilatant et être à l'origine d'une force de pression qui va s'exercer sur une partie de l'atmosphère sous forme de mouvements de convection de l'équateur vers les pôles.

Puis intervient la force de Coriolis qui est directement issue de la rotation de la Terre. Cette force engendre dans l'hémisphère Nord une force qui a tendance à dévier le vent vers la droite, tandis que dans l'hémisphère Sud, le vent sera plutôt dévié vers la gauche.

Enfin, la troisième force correspond aux frottements. Il s'agit des frictions entre le sol et les masses d'air déplacées, ou encore entre les différentes masses d'air qui auront modifié leurs trajectoires aux abords des reliefs rencontrés.

### 1.5.2. Loi de Betz - notions théoriques:

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement poussant par la section de la surface active  $S$  de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active  $S$  de l'éolienne est donnée par :

$$p_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v_v^3 \quad (1)$$

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. la puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz :

$$p_{\max} = \frac{16}{27} \cdot p_v = 0.59 \cdot p_v$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59 % de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p^{opt} = \frac{p_{\max}}{p_v} = \frac{2 \cdot p_{\max}}{\rho \cdot S \cdot v_v^3} = 0.59 \quad (3)$$

En réalité, jusqu'à présent seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnées. Ce rendement appelé coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne, est propre à chaque voilure. ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse de vent :

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{eol}}{\rho \cdot S \cdot v_v^3} \quad (4)$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne une grandeur spécifique est utilisée :

La vitesse réduite  $\lambda$ , qui est un rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse de vent :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v_V} \quad (5)$$

## 1.6. Distributions de WIBULL

Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien. Pour connaître les propriétés d'un site, des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps, sont nécessaires (un à dix ans).

En effectuant la caractérisation d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et en suite adapter les résultats à la hauteur de la mat de l'éolienne. En effet, la vitesse du vent augmente selon la hauteur. L'expression (6) donne la méthode de ce calcul et le tableau des valeurs de rugosité  $\alpha$  en fonction du caractère des obstacles dans l'environnement proche. On précise que  $h$  est la hauteur du mat  $h_{mes}$  la

$$V_V(h) = V_V(h_{mes}) \cdot \frac{\ln(\frac{h}{\alpha})}{\ln(\frac{h_{mes}}{\alpha})} \quad (6)$$

Nature du sol	Paramètre de rugosité
Surface d'un plan d'eau	0.0002
Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu)	0.0024
Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitation éparses sur un relief de collines douces.	0.03
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250m.	0.055
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500m.	0.1
zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250m.	0.2
Village, petites villes, zone agricole avec de nombreuses haies, forêts et terrains très accidentés.	0.4
Grandes villes avec bâtiments hauts ;	0.8
Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel.	1.6

Tableau 1-1 : Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement

Chaque site éolien est caractérisé par une direction de la vitesse de vent dominante. Cependant, elle est variable comme la valeur de la vitesse du vent. Pour décrire ces propriétés spatiotemporelles le diagramme appelé rose des vents peut être élaboré

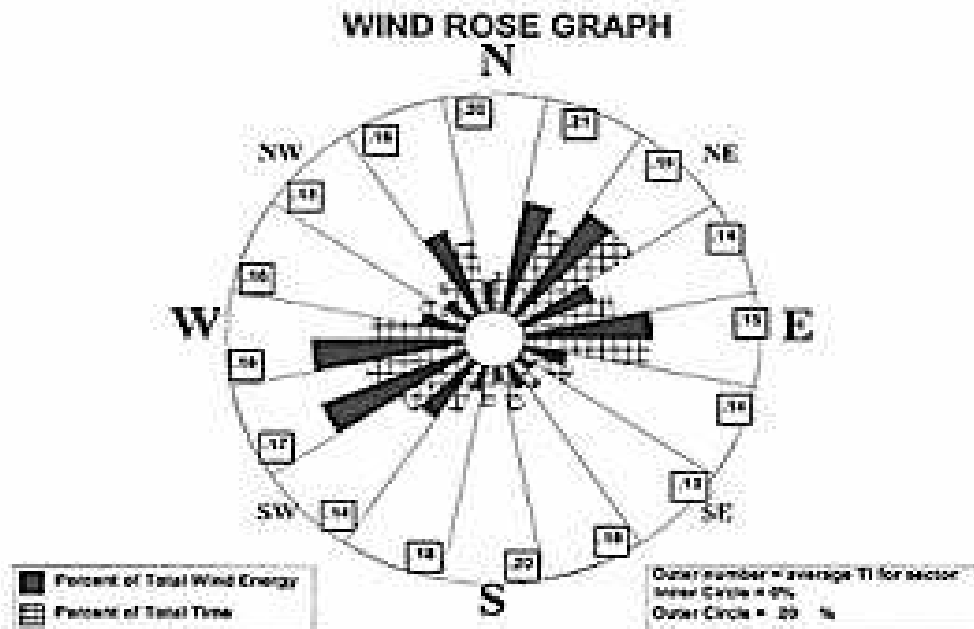
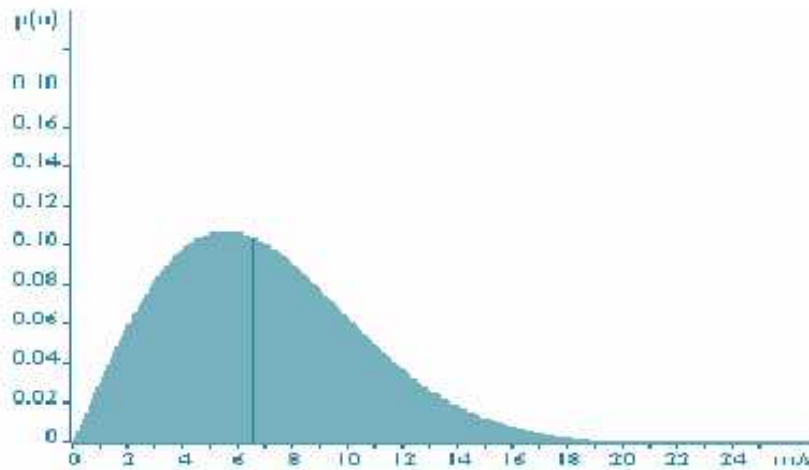


Figure 1-4 : Rose de vent

La rose de vent -Figure(1-6) permet d'avoir une première vue sur la capacité énergétique du site éolien mais elle est destinée plutôt à l'aide au choix de l'emplacement spatial de la turbine et principalement pour éviter les obstacles qui peuvent gêner le flux d'air ; des informations supplémentaires peuvent être insérés dans ce graphique comme la turbulence ou la rugosité du terrain.

La caractéristique la plus importante est la distribution statistique de Weibull (figure 1-7).

Elle s'est révélé la plus adéquate pour l'emploi dans l'éolien.



**Figure1-5** : Exemple de la distribution de Weibull

Cette figure est obtenue grâce à l'expression :  $P(V_V) = \frac{K}{c} \left(\frac{V_V}{c}\right)^{K-1} e^{-\left(\frac{V_V}{c}\right)^K}$

K : facteur de forme (=2, pour l'éolien)

C : facteur d'échelle [m/s] ( $\approx V_V$ )

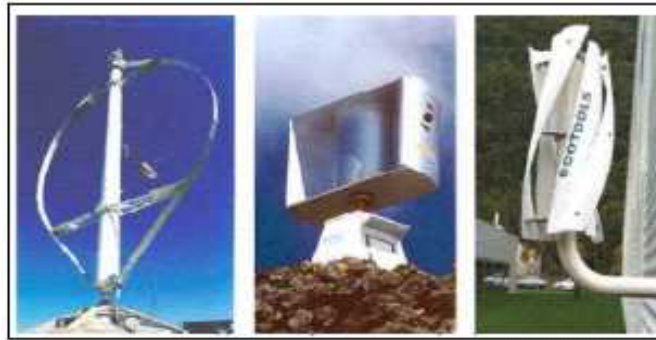
## 1.7. Les différents types d'éoliennes :

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes, selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice [4]:

- Les turbines éoliennes à axe vertical.
- Les turbines éoliennes à axe horizontal.

### 1.7.1 Les éoliennes à axe vertical :

*Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axes horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir des organes de commande et le générateur au niveau du sol donc pas besoin de munir la machine d'une tour, facilitant ainsi les interventions de maintenance. Elles ne nécessitent pas de système d'orientation par rapport à la direction du vent, mais sont en général, de conception assez compliquée. Des pales longilignes sont entraînées par un axe massif et vertical, Figure (I-6).*



**Figure I-6 : Eolienne à axe verticales.**

### **1.7.2 Les éoliennes à axe horizontal :**

Les éoliennes à axe horizontal Figure (I-7) sont les plus employées. Même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important.

Dans ce type d'éoliennes l'arbre est parallèle au sol et présentent un faible encombrement au niveau du sol .Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.



**Figure (I-7) : Eolienne à axe Horizontale.**

### **1.8. Eléments constitutifs d'une éolienne :**

Les éoliennes modernes sont généralement constituées des éléments suivants :



### 1.8.1. Le terrassement :

Ce sont les fondations sur lesquelles repose l'éolienne (figure I.8). Elles sont faites en béton armé et doivent être suffisamment profondes pour soutenir l'édifice.



Figure I.8 : Base d'une éolienne

### 8.2 Le local électrique :

Il se trouve généralement aux pieds de l'éolienne (figure I.9.a), à l'intérieur se trouvent les armoires électriques (figure I.9.b) pour le contrôle du fonctionnement. Il permet de concentrer l'énergie produite avant de la réinjecter sur le réseau de distribution [5].



Figure I.9.a : Entrée du local électrique Figure I.9.b : Armoire électrique

### 1.8.3 Le raccordement électrique :

Le raccordement inter-éolien (dans le cas des fermes éoliennes) et le raccordement au réseau de distribution sont réalisés en liaison souterraine (figure I.10). Le cheminement des

câbles empruntera au maximum et dans la mesure du possible les voies de communications existantes (chemins, voies communales, routes, ...) [6].



**Figure I.10 :** Enfouissement des câbles de raccordement électrique

#### **1.8.4. Le mât :**

Le *mât*, le *pylône* ou encore la *tour* supporte la nacelle. Suivant la construction il permet d'accéder à la nacelle par l'intérieur, il sert également pour le passage des câbles et des diverses liaisons depuis le local électrique. La plupart des mâts des éoliennes modernes sont des tours tubulaires de forme conique fabriquées en acier (figure I.11.a). Typiquement, un mât de 50 mètres pour une éolienne de 600 kW avec un diamètre de rotor de 44 mètres pèse environ 40 tonnes, alors que celui de 60 mètres pour une éolienne de 2 MW avec un diamètre de rotor de 72 mètres pèse 80 tonnes. Il existe également des tours plus légères, faites de treillis métalliques (figure I.11.b), elles ont été pratiquement abandonnées par les constructeurs pour des raisons d'esthétique [7].



**Figure I.11.a** : Montage d'un mât tubulaire

**Figure I.11.b** : Tour en treillis métalliques

### 1.8.5 Le système d'orientation de la nacelle :

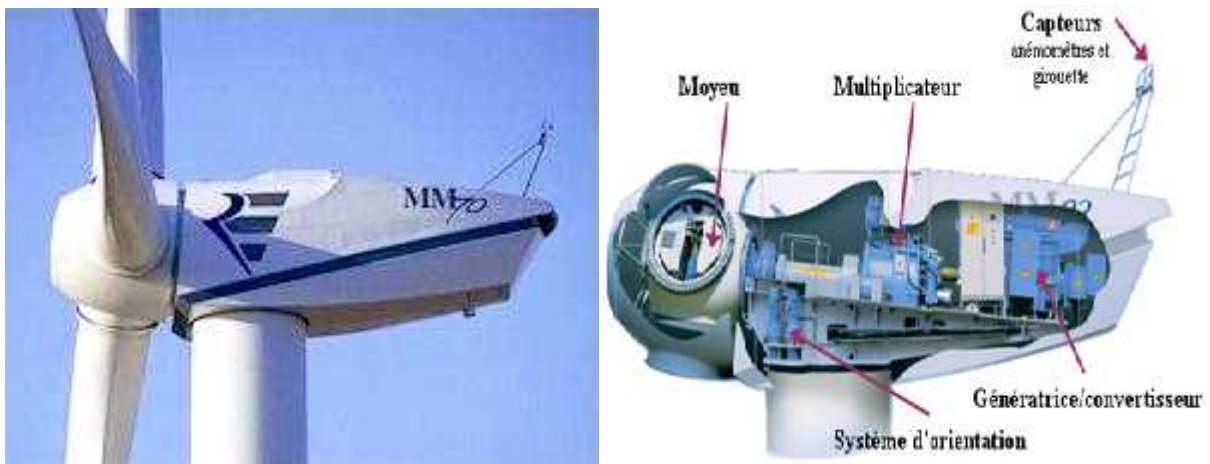
La nacelle est montée sur le mât en général par le biais d'un système d'orientation (figures I.12). La rotation de la nacelle a lieu par l'intermédiaire de trois ou quatre motoréducteurs électriques, équipés de freins à disques sur l'arbre rapide. Un couple de frottement permanent permet de maintenir la nacelle à un angle d'orientation constant pour des moments de rotation standard, sans forte turbulence. Dans le cas de rafales de vent ou de turbulences, les moto-freins permettent de stabiliser l'orientation [ 5].



**Figures I.12** : Différentes vues sur des systèmes d'orientation de la nacelle

### 1.8.6 La nacelle :

Il s'agit de la cabine (figures I.13) à l'intérieur de laquelle se trouvent : l'arbre lent, le multiplicateur, l'arbre rapide, la génératrice, le frein, un régulateur de vitesse et un capteur de chaleur. Elle se trouve au sommet du mât et soutient le rotor. La nacelle est protégée par un capot en composite renforcé par fibres de verre. Elle est équipée d'une isolation acoustique épaisse sur les parois intérieures. L'entrée depuis le mât a lieu par une trappe dans la nacelle.



Figures I.13 : Nacelle d'une éolienne et sa vue en coupe

### 1.8.7. Le moyeu de commande du rotor :

Le moyeu (figure I.14.a) permet de faire pivoter les pales pour un meilleur rendement en fonction de la force du vent. Lorsque les pales sont rattachées au moyeu cela forme le rotor (figure I.14.b).



**Figure I.14.a** : Moyeu relié à l'arbre

**Figure I.14.b** : Rotor

### **1.8.8 Les pales :**

Composantes cruciales de l'éolienne (figure I.15), il existe très peu de fabricants dans le monde capables d'en construire. Elles sont tellement longues qu'il faut des convois exceptionnels pour les transporter. De la nature des pales dépendent le bonfonctionnement, la durée de vie et le rendement de l'éolienne. Elles sont faites en fibre de verre et en fibre de carbone, leur profil est étudié en soufflerie, leur longueur est fonction de la puissance désirée, quant à leur largeur elle est également calculée avec grand soin [7].



**Figure I.15** : Pale

### **1.8.9 Le multiplicateur ou boîte de vitesse :**

Bien des constructeurs aimeraient l'éliminer car il s'agit d'un composant lourd et coûteux se résumant en une grosse boîte d'engrenages (figure I.16), il permet d'avoir un rotor tournant lentement (30 à 40 tours/min) et de le coupler à un générateur de série (donc peu cher) qui,

lui, tourne de 40 à 50 fois plus vite. Dans le cas des éoliennes dites à *attaque directe*, le multiplicateur est éliminé.



**Figure I.16 :** Multiplicateur de vitesse

### **1.8.10 Le générateur :**

Les plus simples et robustes sont des générateurs à induction, mais il faut alors contrôler leur excitation par des condensateurs ou les relier au réseau, ce qui n'est pas facile. On doit essayer de stabiliser la vitesse de ces machines près de leur valeur nominale pour avoir en bout de ligne une fréquence et une tension régulières. Voilà pourquoi certains fabricants installent deux génératrices, l'une exploitant les basses vitesses de vent, l'autre pour les hautes vitesses [8]. La figure I.16 montre une chaîne de fabrication de générateurs d'éoliennes :



**Figure I.17 :** Chaîne de fabrication de générateurs d'éoliennes

### **1.8.11 L'anémomètre :**

La mesure de la vitesse du vent se fait en général à l'aide d'un anémomètre muni d'un rotor à trois coupelles (figure I.18.a) qui, sous l'action du vent, se met à tourner autour d'un axe



vertical. La vitesse de rotation est enregistrée électroniquement. L'anémomètre est aussi doté d'une girouette (figure I.18.b) qui indique la direction du vent.



**Figure I.18.a** : Anémomètre **Figure I.18.b** : Girouette

### **1.8.12 Le paratonnerre :**

Les pales du rotor sont munies d'un système de paratonnerre qui a fait ses preuves sur site réel. De plus, l'éolienne est protégée contre la foudre en raccordant directement à la terre avec des tiges métalliques souterraines

### **1.8.13. Le balisage :**

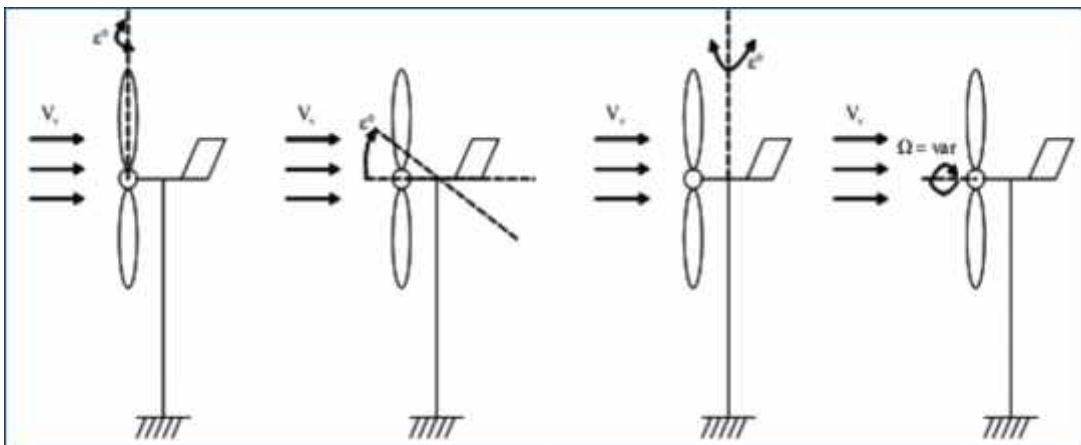
D'une manière systématique, et comme toute construction de grande hauteur, un parc éolien est soumis à un balisage diurne (couleur vive) et/ou nocturne (lumière). Il en va de sécurité des appareils aéronautiques.

## **1.9. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne horizontale**

il existe quatre voies principales pour limiter la puissance éolienne dans le cas de fortes valeurs du vent :

- La première est une technique active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable « pitch » : elle est donc plutôt utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyenne à fortes puissances (quelque centaines de KW). Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe ce qui permet de décaler dynamiquement la courbe du coefficient de puissance de la voilure.

- La seconde technique est passive « stall ». elle consiste à concevoir la forme des pales pour obtenir un décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort régime de vent.
- La troisième façon de limiter la puissance est la déviation de l'axe du rotor dans le plan vertical (un basculement de la nacelle) ou une déviation dans le plan horizontal (rotation autour de l'axe du mat). Ainsi, la turbine n'est plus face au vent et la surface active de l'éolienne diminue.
- La dernière famille qui permet la régulation de la puissance éolienne consiste à faire varier la vitesse de rotation  $\Omega$  par une action électrique. Par le biais de la génératrice accouplée à une chaîne de conversion statique pilotée pour gérer le transfert d'énergie, la vitesse de rotation peut être pilotée selon le point de fonctionnement souhaité. Le plus souvent, dans les turbines classique à axe horizontale, le dispositif de réglage mécanique (pitch ou stall).

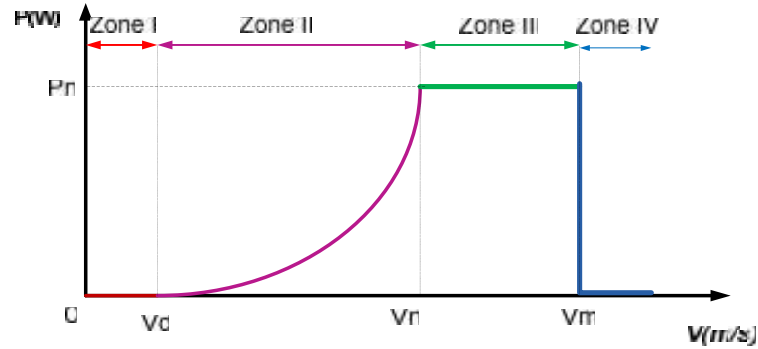


**Figure 1-19 :** Limitation de puissance éolienne

### 1.10. La courbe de puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent :

Sur la caractéristique d'exploitation d'une éolienne figure(1-20), il existe quatre zones :





**Figure 1-20 :** La courbe de puissance d’une éolienne en fonction de la vitesse du vent

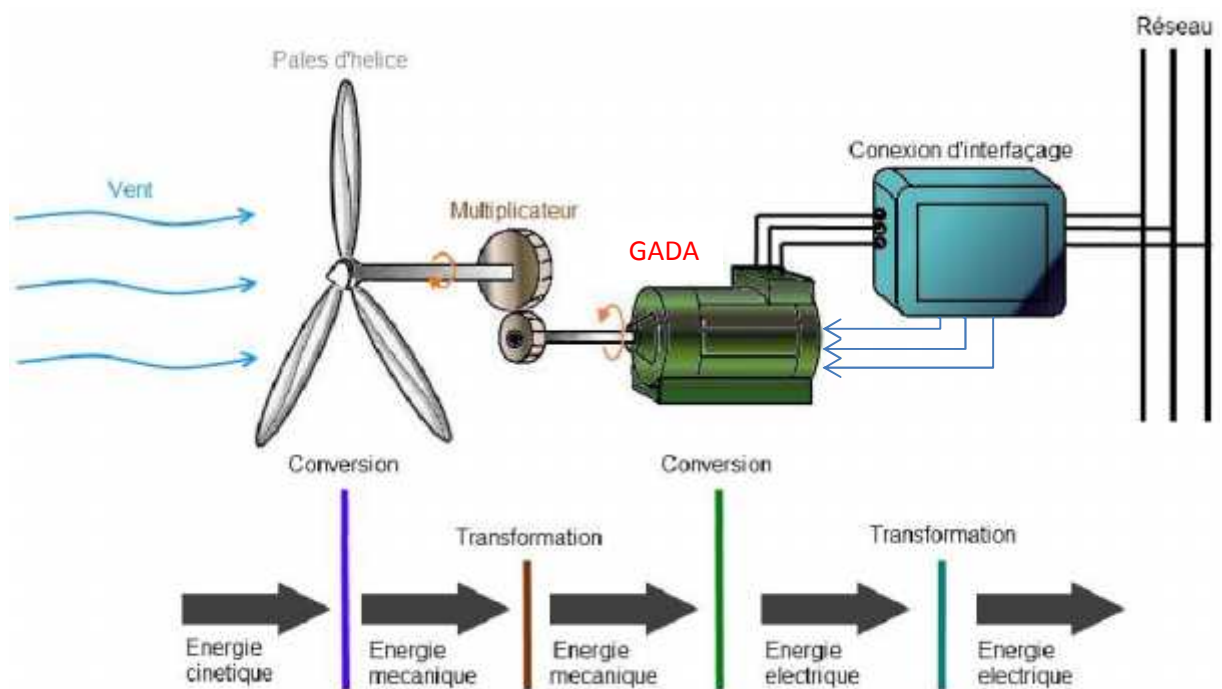
- I. la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage de l’éolienne. Dans ce cas, la turbine ne fonctionne pas et ne produit pas l’énergie.
- II. la vitesse du vent est comprise dans le domaine [ $v_{min}$ ,  $V_{nominal}$ ], correspond à la zone où il est possible d’optimiser la conversion d’énergie éolienne. C’est dans cette zone qu’il est intéressant de faire varier la vitesse de rotation, la puissance récupérée est alors variable ;
- III. ou la puissance développée par l’éolienne est limitée à la puissance nominale. En effet, au-delà de la « vitesse nominal » du vent, le surcoût de dimensionnement ne serait pas amorti par le gain de production ;
- IV. lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l’éolienne. Dans ce cas, la turbine est arrêtée par le système d’arrêt d’urgence afin de protéger la partie mécanique de l’éolienne et d’éviter son endommagement.

### 1.11 Principe de la conversion d’énergie : [21]

Les éoliennes permettent de convertir l’énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- . Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l’énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique
- . Au niveau de la génératrice, qui reçoit l’énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré par la (*figure 1-21*)



**Figure 1-21:** Principe la de conversion d'énergie

## 1.12 Connexion directe au réseau pour la MADA :

Pour cette machine, le rotor est bobiné et comporte des enroulements triphasés couplés en étoile associés à des bagues collectrices qui permettent d'alimenter ses enroulements. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone à cage.

On connecte toujours le stator au réseau mais ici au lieu de court-circuiter les enroulements rotoriques, on les alimente en alternatif à fréquence variable à partir du réseau via un onduleur de taille réduite. La puissance à fournir au rotor est faible devant la puissance produite par le stator (**figure 1-21**).

De cette manière, il est possible de produire de l'énergie avec des vitesses de rotation du rotor variant dans une large plage. En effet, la fréquence des tensions de sortie d'une machine asynchrone dépend de sa vitesse de rotation et donc du glissement.

On peut ainsi obtenir une fréquence de sortie de 50Hz ; quelle que soit la vitesse de rotation de l'éolienne à condition d'injecter au rotor des tensions à une fréquence qui compense cette différence de vitesse. Il faut réguler l'amplitude des tensions rotoriques pour contrôler la production d'énergie.

L'inconvénient majeur de cette machine est la présence de bagues collectrices pour alimenter les enroulements du rotor. Ces contacts s'usent et demandent donc de l'entretien. Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne. Avec un onduleur de taille réduite et une commande appropriée, on obtient une qualité de tension similaire à celle de la machine asynchrone classique.

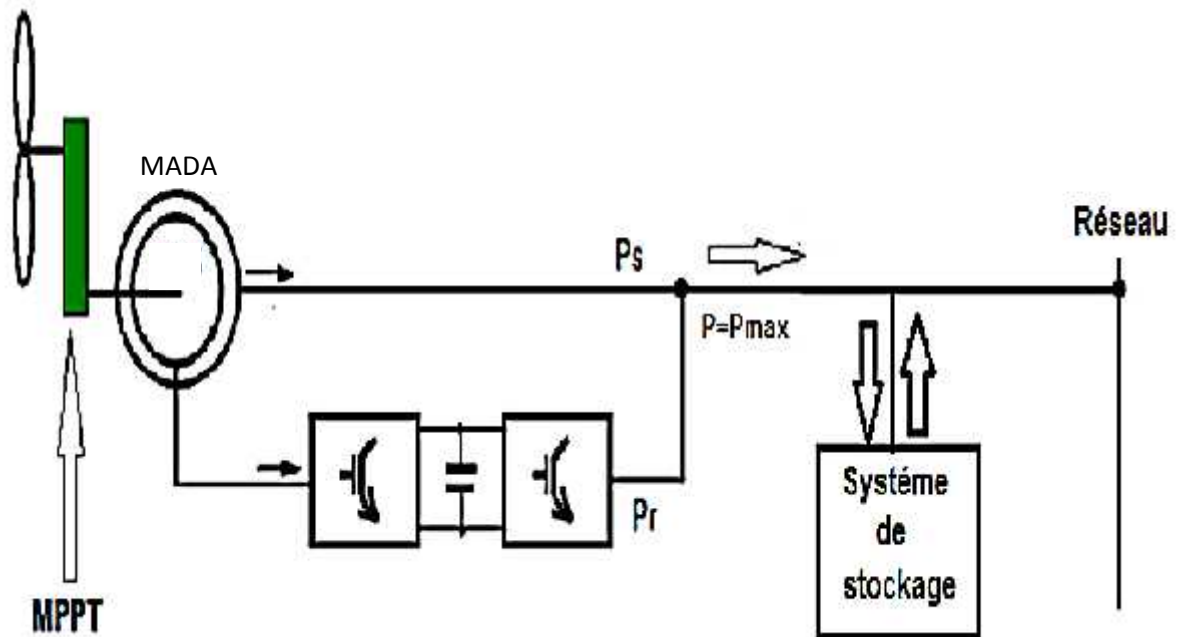


Figure 1-22 : Structure de la cascade

### 1-13 Gestion du réseau électrique :

Pour pouvoir fonctionner correctement et produire de l'énergie électrique, la majorité des éoliennes a besoin d'un réseau puissant qui impose la fréquence et la tension. De plus, ce réseau doit aussi pouvoir fournir la puissance réactive nécessaire aux génératrices asynchrones par exemple et pouvoir absorber en permanence toute la puissance produite par les éoliennes. Tout ceci est très complexe à gérer car la puissance produite par les éoliennes est très fluctuante à cause des aléas du vent. Une éolienne d' 1 MW ne peut pas produire en permanence cette puissance nominale; on ne peut compter que sur 20 à 30 % de cette puissance en moyenne. C'est pour cela qu'il est intéressant d'interconnecter un grand nombre d'éoliennes sur plusieurs sites entre elles afin d'avoir une production qui puisse se stabiliser.

Par contre, de par leur électronique et le réglage possible de l'angle de calage des pales, les éoliennes peuvent fournir des services système. En effet, il est possible de régler la puissance produite en modifiant le pas des pales de l'hélice. Si pendant une période de fort vent il y a un excédent d'énergie électrique au niveau du réseau, pouvant conduire à une déstabilisation de la fréquence, il est possible de limiter la puissance produite par les éoliennes. Ceci est effectué par l'action sur la commande de la partie électronique et sur l'angle de calage des pales afin de diminuer le rendement de l'hélice. Cet axe de recherche est actuellement bien étudié et de nombreux laboratoires apportent leurs contributions pour des solutions innovantes et performante.

De plus, en intervenant sur la commande des onduleurs associés à la génératrice, on peut faire varier la valeur de la puissance réactive produite par un parc éolien. Ainsi, en fonction de la chaîne de conversion choisie, il est possible d'absorber ou fournir une puissance réactive donnée et de contrôler le plan de tension du réseau.

Le gestionnaire de réseau peut alors compter sur l'éolienne pour aider à la correction du facteur de puissance du réseau. Cette option est désormais incorporée à la plupart des éoliennes utilisant des machines asynchrones à double alimentation.

Cependant, s'il y a une période sans vent, on ne peut rien faire et l'exploitant du réseau électrique ne peut donc pas compter sur les éoliennes comme source de production fiable. On peut cependant prédire les conditions de vent et donc de production d'énergie électrique avec quelques jours d'avance. Ceci reste de la prédiction météo et ne change rien lorsque le vent tombe.

Pour avoir une plus grande souplesse d'utilisation et une meilleure efficacité du système, il faudrait pouvoir stocker l'énergie durant les périodes de fort vent pour pouvoir la restituer quand il n'y a plus de vent. Ou alors associer les éoliennes avec d'autres sources de production comme des groupes diesel dans le cas de production sur réseau autonome. [22]

## **1.14 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons donné une vision sur l'état de l'art actuel de la situation des éoliennes dans le contexte des énergies renouvelables avec l'augmentation de la consommation d'énergie primaire dans le monde. Puis on a vu quelques notions théorique, les différents types et éléments constitutifs d'une éolienne ; l'exploitation des éoliennes par le réglage mécanique de la puissance des éoliennes.

# **CHAPITRE 2 Modélisation de la MADA**

---

## **2.1 Introduction**

La modélisation de la machine électrique est une phase primordiale de son développement, les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

Ainsi la modélisation permet de guider les développements par une quantification des phénomènes. En outre elle est d'un apport précieux en permettant d'une part de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement et d'autre part de prévoir des comportements de la machine plus variés que ceux de l'observation expérimentale.

Pour obtenir le modèle d'un système ; trois tâches doivent être accomplies : choisir le modèle, déterminer ses paramètres et enfin vérifier sa validité.

## **2.2 Description de la MADA**

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative" .Elle présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [2].

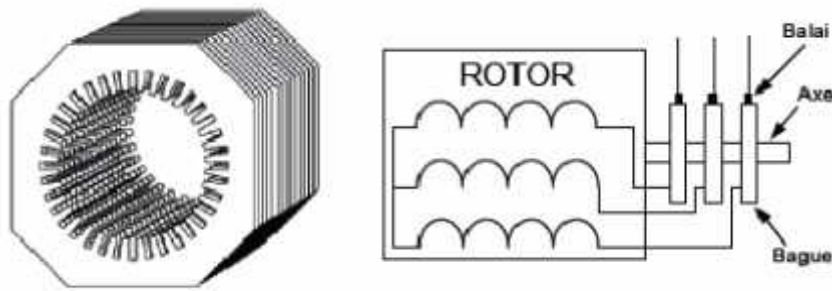


Figure 2.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

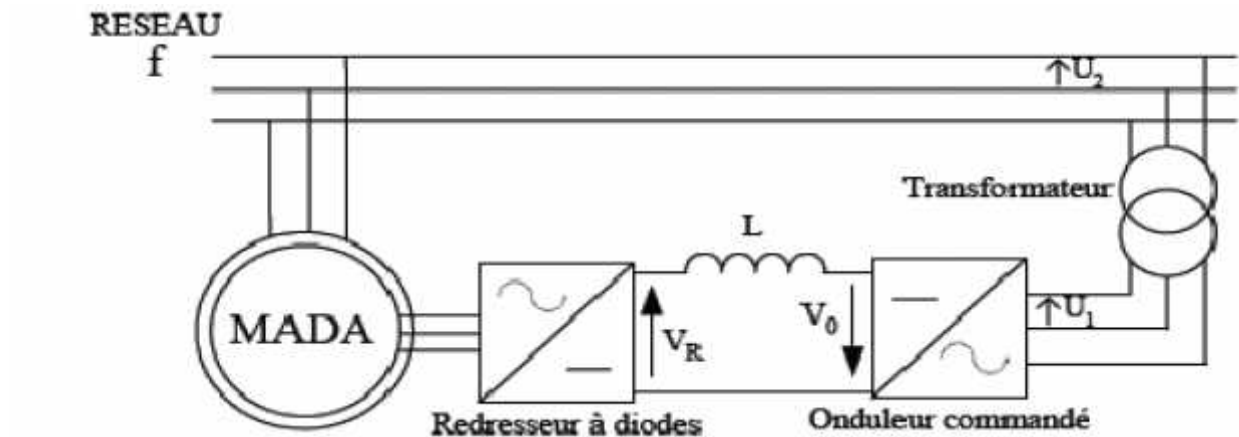


Figure 2.2 : cascade hypo synchrone

## 2.3 Application des machines asynchrones à double alimentation

La première application importante de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage d'écureuil, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commandé. Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

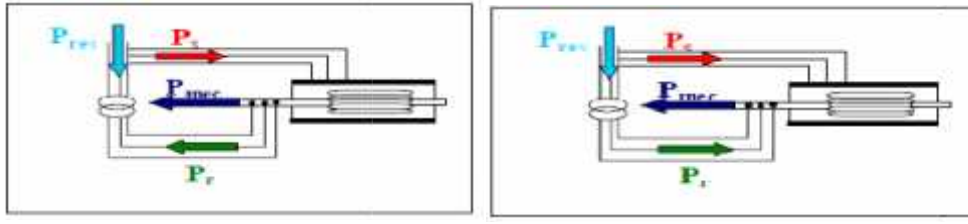
La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence

fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée :

- ❖ Génération des réseaux de bord des navires ou des avions .
- ❖ Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- ❖ Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.
- ❖ Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

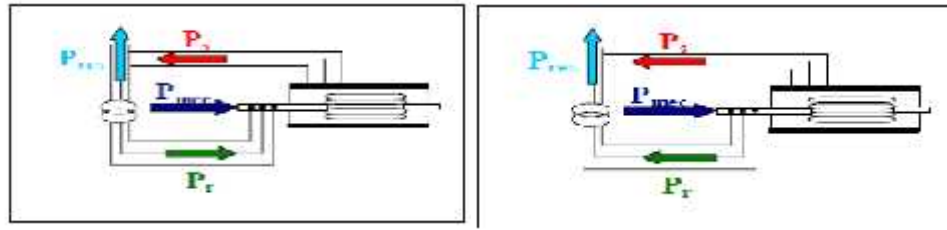
## 2.4 Fonctionnement de la MADA à vitesse variable

- **Stationnaire** ( $g = 1$ ) : Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence  $f_s$ . Par conséquent, le rotor est le siège d'une F.e.m induite avec une fréquence  $f_r$  identique à  $f_s$ . Dans ce cas-là, la MADA se comporte simplement comme un transformateur.
- **Hypo synchrone** ( $0 < g < 1$ ) : En tournant le rotor dans la direction de flux du stator, la fréquence  $f_r$  du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor approche celle du synchronisme, plus  $f_r$  tend vers 0, plus la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible qui correspond à la vitesse du synchronisme.
- **Synchrone** ( $g = 0$ ) : C'est le point, où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence  $f_r$  du rotor s'annule. Autrement dit, le rotor tourne avec la même vitesse que celle du flux statorique; donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier, par conséquent il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.
- **Hyper synchrone** ( $g < 0$ ) : du fait de l'accélération de la machine, le flux rotorique rattrape le flux statorique et par conséquence la fréquence du rotor devient négative. Cette valeur négative signifie que l'ordre de phase du rotor "  $a, b, c$  " s'inverse. L'augmentation de la vitesse relative du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.



Fonctionnement hypo synchrone

Fonctionnement hyper synchrone



Fonctionnement hypo synchrone

Fonctionnement hyper synchrone

**Figure 2.3:** différentes configurations de fonctionnement de la MADA

## 2.5 Application de la MADA

La machine à double alimentation s'apparente fortement, du point de vue technologique, à la machine asynchrone à rotor bobine classique, il ne s'agit pas d'une nouvelle structure, car cette dernière est toujours d'actualité. Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de la vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, ou encore pour sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau. Ces machines sont donc classiques, et ne posent pas de problèmes particuliers de réalisation.

La machine à double alimentation est une machine à rotor bobiné possédant des enroulements triphasés au stator et au rotor.

Cette machine a fait l'objet de trois variantes de fonctionnement : [9]

- ▶ La première fonctionne en alternateur.
- ▶ La seconde fonctionne en moteur, et elle est alimentée par un seul convertisseur.
- ▶ La troisième fonctionne aussi en moteur mais elle est alimentée par deux convertisseurs. [10]



## 2.6. Principe de fonctionnement de moteur doubles alimentations

Pour le fonctionnement de la machine en régime établi, il est nécessaire que les vecteurs forces magnétomotrices ( $F_{mms}$ ) du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Du moment que le vecteur résultant de la F.m.m de l'enroulement statorique tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire, et que le rotor tourne à la vitesse  $w_r$ , par conséquent, pour satisfaire à cette condition, il faut que le vecteur F.m.m de l'enroulement rotorique tourne par rapport au rotor avec la vitesse :

$$w_g = w_s - w_r = w_s - w_s(1-g) = w_s g \quad (2-1)$$

C'est à dire proportionnellement au glissement  $g$  ; si la vitesse du moteur est inférieure à la vitesse synchronisme, les sens de rotation sont identiques ; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à celle du synchronisme, les sens seront opposés.

Pour que la rotation du vecteur Fmm par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence  $f_r$ , définie à partir de  $w_s g = 2\pi f_r$  ; c'est à dire :

$$f_r = f_s g \quad (2-2)$$

Dans les machines synchrones dont l'excitation est assurée par une source continue, le courant dans l'enroulement possède une fréquence  $f_r = 0$ . A partir de (2-1) et (2-2), on voit qu'il n'y a qu'une seule vitesse synchrone  $w_s, (g=0)$ .

## 2.7. Régimes de fonctionnement de la MADA

Dans le moteur à double alimentation, l'enroulement rotorique est couplé à une source de tension à fréquence variable. En fonction du type de régulation de fréquence, on distingue deux régimes fonctionnement : synchrone et asynchrone.

### 2.7.1. Régime de fonctionnement synchrone :

Pour ce régime, la fréquence du glissement est donnée indépendamment de la vitesse angulaire. alors à chaque signal de commande correspondent une fréquence déterminée  $f_r$  et une vitesse de fonctionnement  $w_r$  qui ne dépend pas de la charge. en faisant varier la fréquence  $f_r$ , on peut varier la vitesse. En régime synchrone, le moteur à double alimentation fonctionne comme une machine synchrone. Dans ce régime, on peut réguler la

vitesse. Cependant il est difficile de maintenir la stabilité du régime pour des variations rapides de vitesse, de charge brusque, etc...

### **2.7.2. Régime de fonctionnement asynchrone :**

Pour ce régime de fonctionnement, la fréquence de la tension du réseau appliquée à l'enroulement rotorique de la machine à travers un système de régulation est toujours maintenue égale à la fréquence du glissement  $f_s g$ . Dans ce cas, on ne régule que la valeur et la phase de la tension du réseau.

Le moteur à double alimentation fonctionne toujours comme un moteur asynchrone (même pour  $w_r = w_{s0}$ ) ; c'est à dire que le glissement du moteur varie la variation de la charge.

Dans la machine à double alimentation, il y a toujours deux sources de même fréquence dans les enroulements rotoriques  $f_s g$  :

- ▶ La f.e.m du rotor  $E_{2cc} g$  (f.e.m de court circuit).
- ▶ La tension externe d'alimentation du coté rotorique  $U_r$ .

## **2.8. Méthodes de variation de la vitesse de rotation**

La variation de la vitesse des moteurs asynchrones est assez difficile mais avec l'apparition de l'électronique de puissance, celle-ci est devenue plus facile.

Les méthodes de variation de la vitesse agissant sur :

- ▶ **Le stator**
- ▶ **Le rotor**

### **2.8.1. Côté stator :**

#### **a) Par modification du nombre de paires de pôles P :**

En utilisant la relation  $(w/p)$ , on modifie le nombre de paires de pôles P par commutation sans modifier l'implantation des bobinages, la commutation du nombre de paires de pôles du stator peut être assurée de la façon suivant :

- ▶ monter dans le stator un seul enroulement et changer le nombre de paires de pôles par commutation correspondante des parties de cet enroulement.
- ▶ monter dans le stator deux enroulement indépendant l'un de l'autre.
- ▶ monter dans le stator deux enroulements avec commutation du nombre de pôles de chacun d'eux.

Si le rotor est à cage, en se limite à une division ou à une multiplication par la vitesse, si le moteur est à rotor bobiné, il faut changer le nombre de pôle simultanément dans le stator et dans rotor, ce qui rend la construction du rotor compliquée. Cette méthode n' pas beaucoup d'intérêt, car la variation est brusque.

#### **b) Changement de la tension applique au moteur :**

On sait que le couple est proportionnel au carré de la tension, ceci implique une variation de la vitesse, cette dernière par variation de la tension primaire a une importance secondaire car elle ne permet pas d'assurer le réglage dans de large plage et puis elle n'est pas économique.

#### **c) Changement de la fréquence du réseau :**

Quelque soit la charge, la vitesse d'un moteur dépend fortement de la fréquence du réseau d'alimentation. On distingue deux méthodes d'action sur fréquence :

► **Variation de la fréquence à tension fixe** : La diminution du flux et la saturation des machines électriques sont des problèmes liés aux variations de la fréquence. Lorsque la fréquence  $f_s$  augmente, le flux diminue et entraîne une diminution du couple maximale. Cette technique est utilisée dans des régimes des sur vitesses.

► **Variation de fréquence à  $V/f_s$  constante** : Dans les régimes des sous vitesses il faut maintenir le flux constant pour cette raison on utilise la loi à  $V/f_s$  . Ce mode de variation de vitesse n'est possible que lorsque le moteur est alimenté par une installation spéciale.

### **2.8.2. Côté rotor**

#### **a) Variation de vitesse par variation des résistances rotoriques**

L'insertion d'un rhéostat au circuit rotorique nous permet de varier la résistance rotorique. Ceci entraîne une variation de vitesse cette variation est possible lorsqu'il s'agit des moteurs à bagues

#### **b) Les cascades**

Avec un moteur à rotor bobiné, on a la possibilité de faire varier le glissement en modifiant résistance rotorique, si l'on utilise pour cela un rhéostat, on dissipe en pur perte de l'énergie active et on abaisse d'une façon inacceptable le rendement, pour que le procédé soit viable il faut faire appel à une circuit actif qui permet la récupération de l'énergie correspondante en la réinjectant dans le réseau.

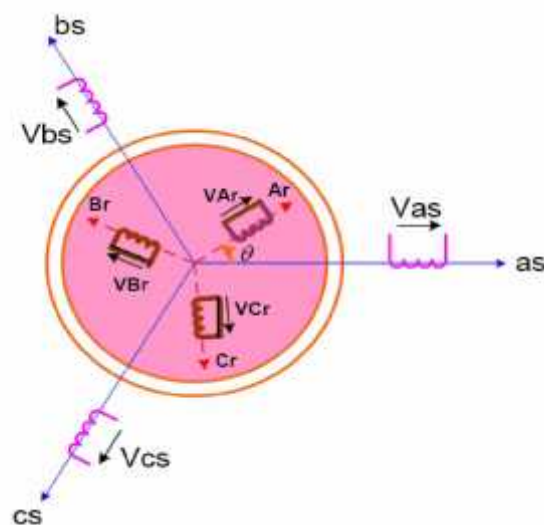
## 2.9 Modèle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dans le repère ABC

### 2.9.1 Hypothèses simplificatrices

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses suivantes:

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants ;
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées ;
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdales d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, que les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques ;
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé. De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements. [11]

### 2.9.2 Les équations électriques et magnétiques de la machine



**Figure 2.4** représentation spatiale de la MADA

$x_{s1}, x_{s2}, x_{s3}$  : correspondants aux trois phases du stator.

$x_{r1}, x_{r2}, x_{r3}$  : correspondants aux trois phases du rotor.

Les six enroulements as, bs, cs et ar, br, cr (figure 2.4) obéissent aux équations électriques suivantes [12]:

**a) Pour le stator :**

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = [R_s] \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

Avec :

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

**b) pour le rotor :**

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = [R_r] \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

Avec :

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

Les flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques s'expriment sous la forme :

$$\begin{cases} \Phi_s = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ \Phi_r = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (2-5)$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}, \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$l_s, l_r$ : Inductances de fuites des statoriques et rotoriques.

$M_s, M_r$  : inductances mutuelles.

$$[Msr] = \begin{bmatrix} Msr \cdot \cos(\theta) & Msr \cdot \cos(\theta + 2 \cdot \frac{\pi}{3}) & Msr \cdot \cos(\theta - 2 \cdot \frac{\pi}{3}) \\ Msr \cdot \cos(\theta - 2 \cdot \frac{\pi}{3}) & Msr \cdot \cos(\theta) & Msr \cdot \cos(\theta + 2 \cdot \frac{\pi}{3}) \\ Msr \cdot \cos(\theta + 2 \cdot \frac{\pi}{3}) & Msr \cdot \cos(\theta - 2 \cdot \frac{\pi}{3}) & Msr \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

Avec :

$$[Mrs] = [Msr]^t$$

En introduisant (2-5) dans (2-3) et (2-4), On obtient finalement [26] :

$$\begin{cases} [Vs] = [Rs] \cdot [Is] + \frac{d}{dt}([Lss] \cdot [Is]) + \frac{d}{dt}([Msr] \cdot [Ir]) \\ [Vr] = [Rr] \cdot [Ir] + \frac{d}{dt}([Lrr] \cdot [Ir]) + \frac{d}{dt}([Mrs] \cdot [Is]) \end{cases} \quad (2-7)$$

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$Cem = p \cdot [Is]^t \frac{1}{\theta} ([Msr] \cdot [Ir]) \quad (2-8)$$

l'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \cdot \frac{d}{dt} \Omega = Cem - Cr - fr \cdot \Omega \quad (2-9)$$

Avec :

$J$  : Inertie totale des parties mobiles.

$\Omega$  : Vitesse mécanique de rotation.

$Cem$  : Couple électromagnétique de la machine.

$cr$  : Couple de charge.

$p$  : Nombre de paires de pôles électriques du moteur.

$fr$  : Coefficient de frottement.

Sachant que la matrice des inductances mutuelles  $M_{sr}$  contient des termes trigonométriques, ce qui rend la résolution analytique du système très difficile ou pratiquement impossible.

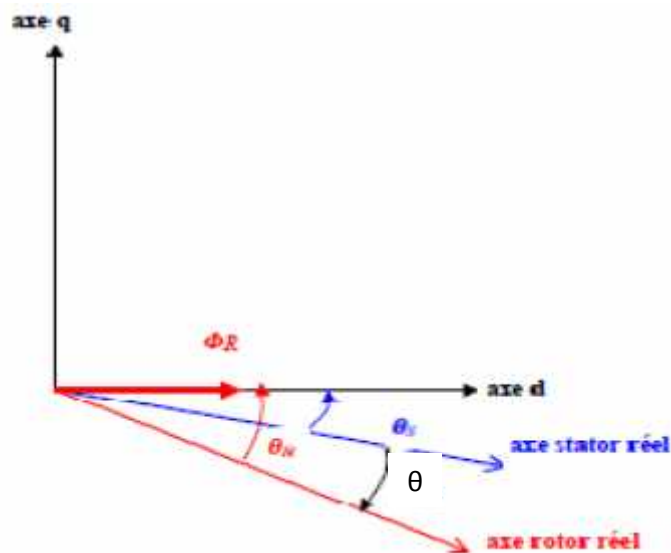
Ceci nous mène à l'utilisation de la transformation de Park qui permettra de rendre ces paramètres indépendants de la position  $\theta$ .

## 2.10 Modèle de la MADA dans le repère de Park

La transformation de Park appelée souvent transformation à deux axes, fait correspondre aux variables réelles leurs composantes, Afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système :

- homopolaire (indice 0)
- d'axe direct (indice d).
- d'axe en quadrature (indice q).

Le passage au système biphasé revient géométriquement à exprimer les composantes ( $x_d$ ,  $x_q$ ); en fonction des axes ( $x_a$ ,  $x_b$ ,  $x_c$ ), de plus cette transformation triphasée doit obligatoirement conserver les F.m.m. C'est-à-dire que le champ dans la machine ne doit pas être altéré [13].



**Figure 2.5 :** Diagramme de phase de la MADA dans le référentiel (d,q)

Les relations entre les grandeurs triphasées et les grandeurs biphasées s'écrivent sous forme matricielle comme suit:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

Avec P, la matrice de transformation de Park donnée par:

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2 \cdot \frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - 4 \cdot \frac{\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2 \cdot \frac{\pi}{3}) & -\sin(\theta - 4 \cdot \frac{\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

La transformation triphasée-biphasée se fait par :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} P \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^t$$

Les tensions, courants et les flux se transforment de la manière suivante :

$$\begin{cases} [V_{s(dq)}] = [P(\theta)] \cdot [V_{s(abc)}] \\ [I_{r(dq)}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [I_{s(abc)}] \end{cases} \quad \begin{cases} [I_{s(dq)}] = [P(\theta)] \cdot [I_{s(abc)}] \\ [I_{r(dq)}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [I_{s(abc)}] \end{cases}$$

$$\begin{cases} [\Phi_{s(dq)}] = [P(\theta)] \cdot [\Phi_{s(abc)}] \\ [\Phi_{r(dq)}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [\Phi_{s(abc)}] \end{cases}$$

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

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{dr} \end{cases} \quad \begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (2-13)$$

tel que :

$L_s = L_s - M_s$  : inductance cyclique statorique.

$L_r = L_r - M_r$  : inductance cyclique rotorique.

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

Les équations électriques sont dans le repère champ tournant :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2-14)$$

Avec :



$$\begin{cases} C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} (\Phi_{ds} \cdot i_{qr} - \Phi_{qs} \cdot i_{dr}) \\ \frac{1}{p} \cdot \frac{d\psi}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \end{cases} \quad (2-15)$$

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad \text{et on sait que } \theta_s = \theta + \theta_r$$

Où  $\theta$  est l'angle entre l'axe statorique et l'axe rotorique.

Nous avons trois orientations possibles du repère d-q : [annexe B]

1. Repère (d-q) lié au stator  $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$ .
2. Repère (d-q) lié au rotor  $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$ .
3. Repère (d-q) lié au champ tournant  $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$ .

Dans ce dernier cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont continues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines.

## 2.11 Mise sous forme d'équations d'Etat

En raison de la nécessité de représenter le modèle non linéaire de la machine asynchrone à double alimentation sous forme d'équation d'état. Nous allons choisir dans tout ce qui suivra, le vecteur  $[i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \omega]^t$  comme vecteur d'état et les grandeurs  $V_{dr}, V_{qr}$  comme variable de commande. Après le calcul, nous aboutissons au système suivant:


$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = 1/\sigma L_s (-R_s \cdot i_{ds} - \frac{M}{L_r} \cdot V_{dr} + \frac{M}{L_r} R_r i_{dr} - M \omega_r \cdot i_{qr} - \omega_r \frac{M^2}{L_r} i_{qs} + \omega_s L_s i_{qs} + \omega_s \cdot M \cdot i_{qr} + V_{ds}) \\ \frac{di_{qs}}{dt} = 1/\sigma L_s (-R_s \cdot i_{qs} - \frac{M}{L_r} \cdot V_{qr} + \frac{M}{L_r} R_r i_{qr} + M \omega_r \cdot i_{dr} + \omega_r \frac{M^2}{L_r} i_{ds} - \omega_s L_s i_{ds} - \omega_s \cdot M \cdot i_{dr} + V_{qs}) \\ \frac{di_{dr}}{dt} = 1/\sigma L_r (-R_r \cdot i_{dr} + L_r \omega_r \cdot i_{qr} + M \omega_r \cdot i_{qs} - \frac{M}{L_s} \cdot V_{ds} + \frac{M}{L_s} R_s i_{ds} - M \omega_s \cdot i_{qs} - \omega_s \frac{M^2}{L_s} i_{qr} + V_{dr}) \\ \frac{di_{qr}}{dt} = 1/\sigma L_r (-R_r \cdot i_{qr} - L_r \omega_r \cdot i_{dr} - M \omega_r \cdot i_{ds} - \frac{M}{L_s} \cdot V_{qs} + \frac{M}{L_s} R_s i_{qs} + M \omega_s \cdot i_{ds} + \omega_s \frac{M^2}{L_s} i_{dr} + V_{qr}) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} C_{em} - \frac{p}{J} \cdot C_r - \frac{f}{J} \cdot \omega \end{cases}$$


(2-16)

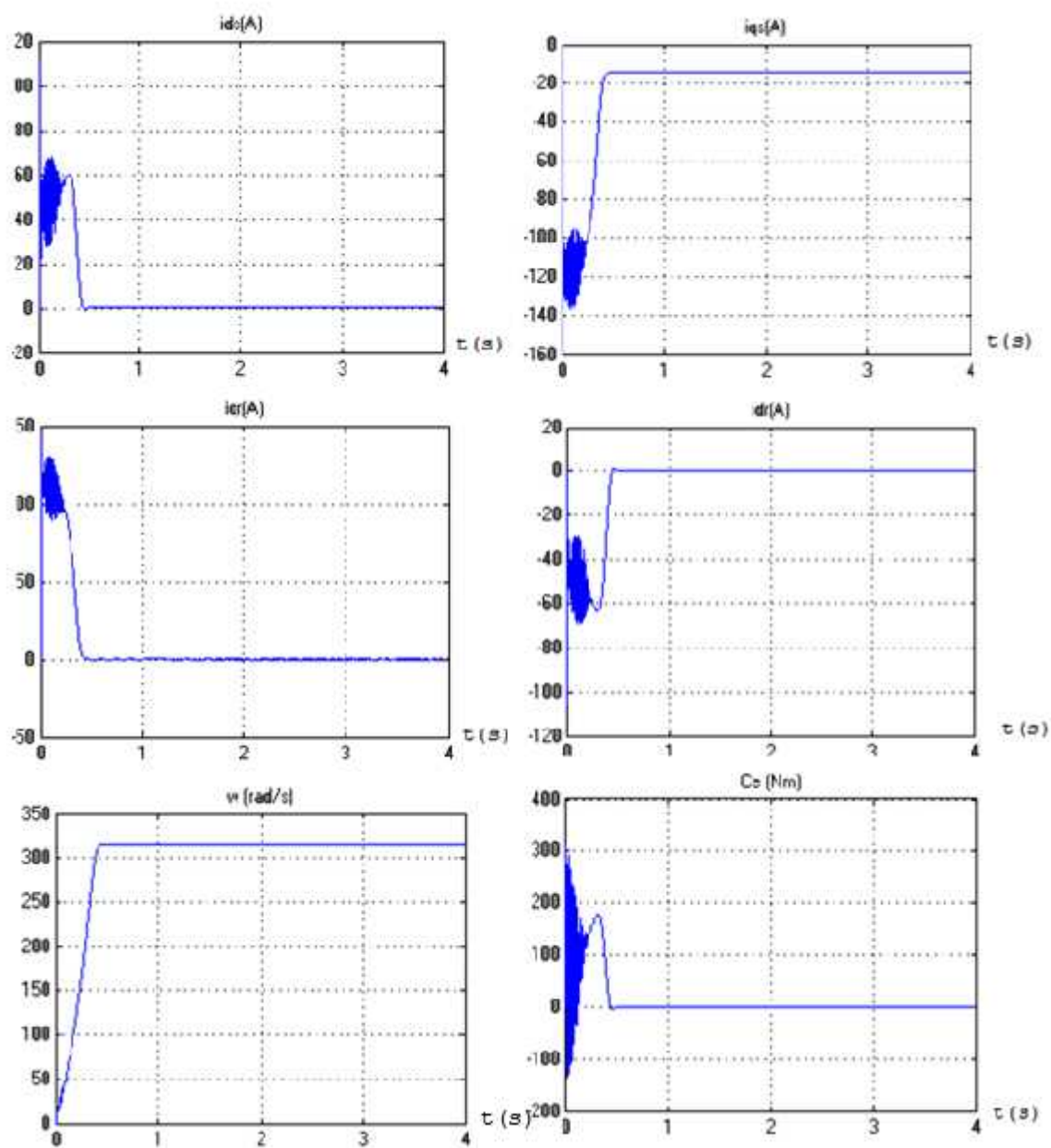
Avec :  $C_{em} = p \cdot M(i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr})$  (2-17)

### 2.11.1 Simulation et interprétation

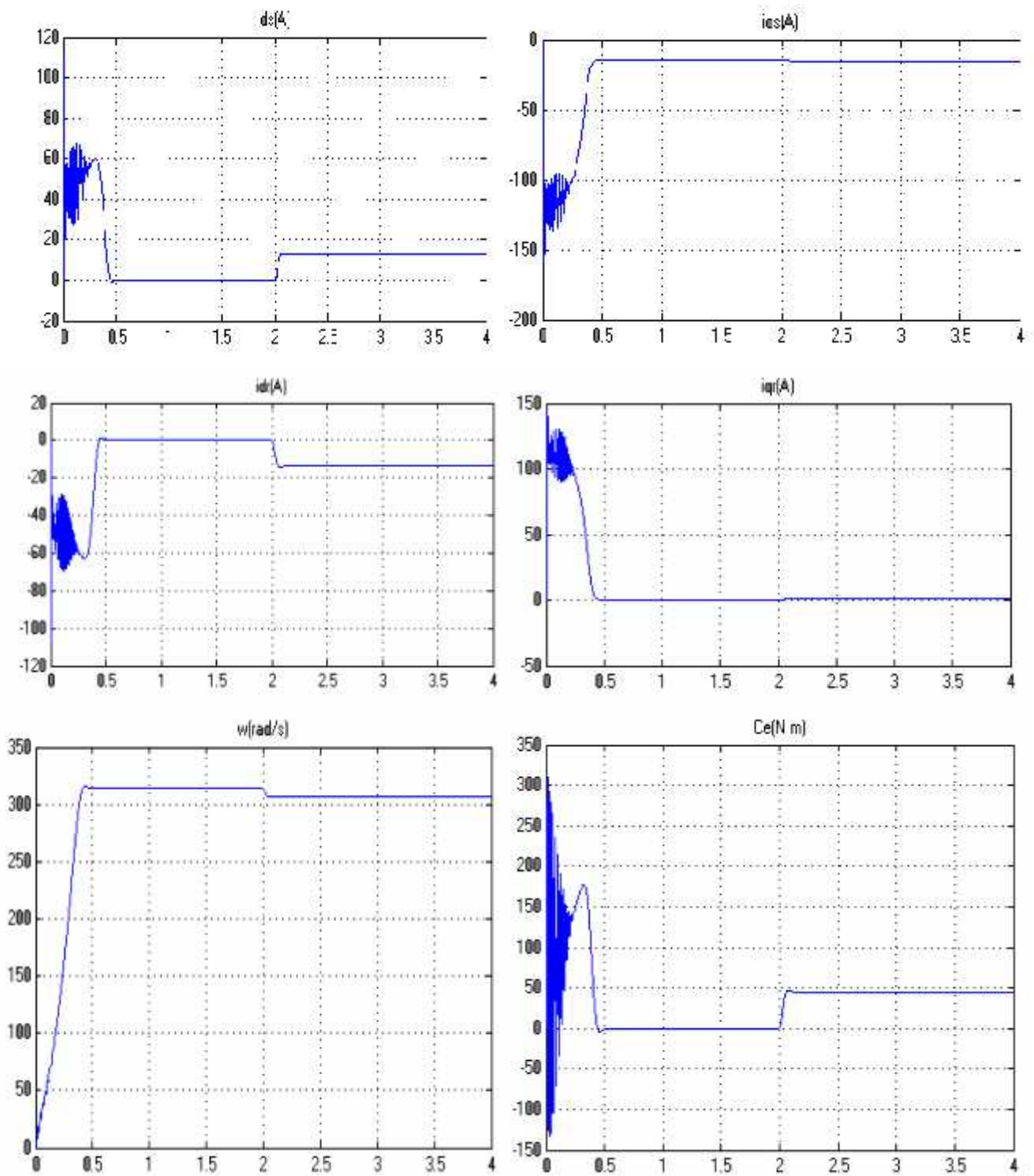
A partir des équations mises sous forme d'état nous avons simulé la MADA à l'aide de logiciel Matlab, dont les différents paramètres de la machines sont donnés à l'annexe A, la simulation est effectuée pour les deux cas suivant :

 Démarrage à vide

 Démarrage à vide avec application d'un couple résistant à l' instant (t=2s )



**Figure 2.6 :** simulation de MADA avec démarrage à vide



**Figure 2.7 :** simulation de MADA avec démarrage à vide application d'un couple résistant à l' instant ( $t=2s$ ) de  $C_{em}=44.77$  N .m

On remarque dans la figure (2.6) que la vitesse passe de 0 jusqu'à une vitesse proche de synchronisme (314 Rd/s) au régime permanent et se stabilise à cette valeur, avec un temps de repense de 0.3 s ; sans dépassement.

Le couple électromagnétique ainsi que les courants  $I_{dr}$  ,  $I_{qr}$  et  $I_{ds}$  passe à 0 au régime permanent .le courant  $I_{qs}$  prend une valeur -18 A (les pertes).

Au démarrage il y a une perturbation ; c'est le régime transitoire [0 - 0.2 s].

Dans la figure(2.7) le couple résistant est appliqué au régime permanent , la vitesse de rotation diminue légèrement au moment de l'application de couple.

Le couple électromagnétique ainsi que les courants statoriques augmentent au moment de l'application de couple résistant.

## **2.12. Conclusion**

Dans ce chapitre un aperçu général sur les machines électriques et leurs applications ont été donnés ainsi que les différents types de fonctionnement. De même que le principe et les régimes de fonctionnement de cette dernière ont été présentés.

Nous avons pu représenter le modèle dynamique de la machine (MADA) par un modèle mathématique, puis on a simplifié le modèle mathématique on passant de repère triphasé au repère biphase (PARK) en s'appuyant sur des hypothèses simplificatrices.

La simulation à montrer que la représentation du modèle était bonne, et que les hypothèses faites n'a pas très influées sur notre modèle.

## Chapitre 3 La commande vectorielle de la MADA

---

### 3.1 Introduction

La machine à courant continu a régné en maître jusqu'à ces dernières années car bien que le coût de fabrication soit assez élevé, les possibilités de réglage (découplage naturel entre le courant dans l'induit et le flux) sont simples à mettre en œuvre et faisaient la différence même si la maintenance pose problème (balais, collecteur).

Depuis quelques années, grâce à la mise au point de calculateurs « temps réel » rapides, on exploite de plus en plus les machines asynchrones. Ils sont de fabrication simple et ne posent pas de problèmes de maintenance. Par contre, on ne savait pas réaliser le découplage courant-flux car on ne peut jouer que sur les caractéristiques de la tension du moteur : il n'y a pas d'excitation ! C'est maintenant chose faite.

La machine à courant continu à excitation séparée est bien adaptée à un contrôle du couple car il suffit de contrôler son courant induit. Le but à atteindre est de faire la même chose avec la machine asynchrone [14].

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée à la MAS en générale, elle nous permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherchée, en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultant. Dans l'hypothèse où le flux  $\phi_{ds}$  est maintenu constant, le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active dépendante uniquement du courant rotorique d'axe q [15].

### 3.2 Principe de la commande vectorielle

De nombreuses études ont été menées autour de cette base de travail pour obtenir les différentes structures de commande vectorielle [10]. Désormais, cette commande constitue aujourd'hui la référence universelle et industrielle en matière du contrôle découplé des puissances active et réactive de la GADA. Le concept de l'orientation du flux, statorique ou de l'entrefer, semble être similaire à la technique de découplage couple-flux appliquée à la commande du moteur à induction à cage. Les problèmes de régulation du couple (puissance active) ou bien de la vitesse ainsi que la puissance réactive du côté stator dépendent du type

d'application (vitesse et flux pour le fonctionnement moteur, et les puissances active et réactive pour le fonctionnement générateur).

Dans de telles conditions, le problème du contrôle des puissances active et réactive du coté stator est transformé à celui de la commande des courants rotoriques. L'orientation du flux est basée sur le retour d'information du vecteur de flux estimé à partir de la mesure des courants statoriques et rotoriques, ou éventuellement obtenu à partir de l'intégration de l'équation tension du stator.

Couple électromagnétique de la machine à courant continu :

$$\begin{cases} C_{em} = K\Phi_f I_a \\ \Phi_f = K I_f \end{cases} \quad (3-1)$$

Couple électromagnétique de la machine asynchrone à double alimentation :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (\psi_{qs} I_{dr} - \psi_{ds} I_{qr}) \quad (3-2)$$

### 3.3 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité, nous allons nous intéresser à un contrôle indépendant des puissances active et réactive en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions et des courants rotoriques générées, aux puissances active et réactive statoriques.

En orientant le flux statorique- selon l'axe d et on négligeant la résistance statorique à partir de la relation (2-14), le modèle obtenu de la MADA se simplifie et le dispositif de commande qui en résulte l'est également. Un contrôle vectoriel de cette machine à été conçu en orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l'axe q soit constamment nul:

$\psi_{qs} = 0$ , nous pouvons écrire :

$$\psi_{ds} = \Phi_s ; \psi_{qs} = 0 \quad (3-3)$$

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (3-4)$$

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (3-5)$$

A partir des équations des composantes directes et quadratures du flux statorique on obtient les relations liant les courants statoriques à ceux du rotor :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (3-6)$$

### 3.4 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

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

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (3-7)$$

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

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (3-8)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (3-6) dans l'équation (3-8) nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive:

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = \frac{V_s \Phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (3-9)$$

En tirant  $\Phi_s = V_s / \omega_s$  de l'équation (3-5) l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{M V_s}{L_s} I_{dr} \quad (3-10)$$

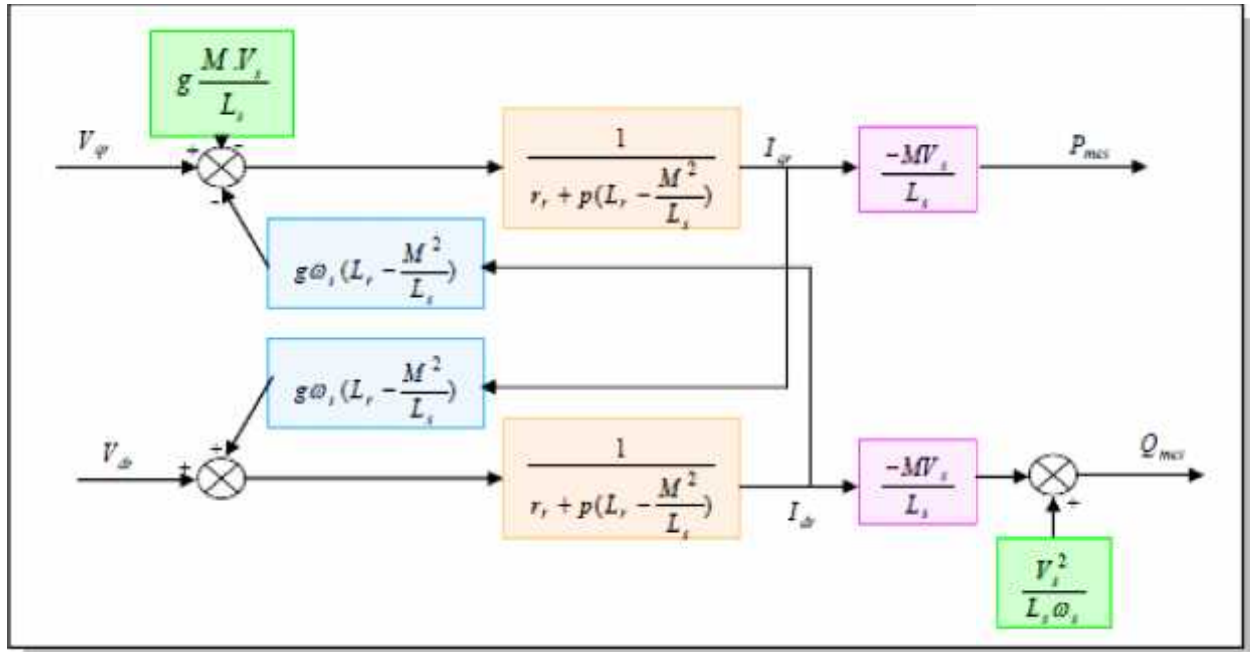
Par ailleurs, on pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants statoriques, en remplaçant les courants de l'équation (3-6) dans les expressions des tensions nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (3-11)$$

$V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les



deux axes en  $(L_r - \frac{M^2}{L_s})$  est minime. En revanche le terme  $g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s}$  représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation, son influence n'est pas négligeable. Les équations (3-9), (3-11) nous permettent d'établir le schéma bloc du système électrique de la MADA à contrôler (figure 3.1)



**Figure 3.1:** Schéma bloc de la MADA à réguler

Dans ce schéma, nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné que l'influence du couplage est minime, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe  $q$  rotorique et la puissance réactive pour l'axe  $d$  rotorique.

La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder un transfert de puissance de l'éolienne optimal.

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [16] :

## 3.5 Les type de commande

### 3.5.1 Commande directe

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour assurer une commande découplée des puissances de la génératrice. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

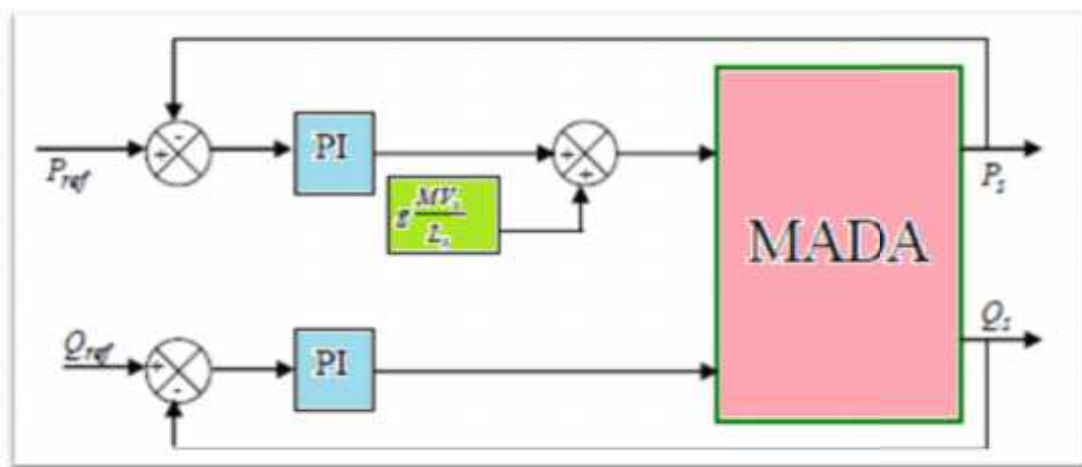


Figure3.2:schéma bloc de la commande directe

### 3.5.2 Commande indirecte

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse le schéma bloc du système à réguler, ou construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances .on aboutit alors à un modèle qui correspond a celui de la machine mais dans l'autre sens. La commande indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc de la MADA. On part donc de puissance statorique en fonction des courants statorique et des expressions des tensions rotorique en fonction des courants rotoriques.

#### a)commande sans boucle de puissance

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

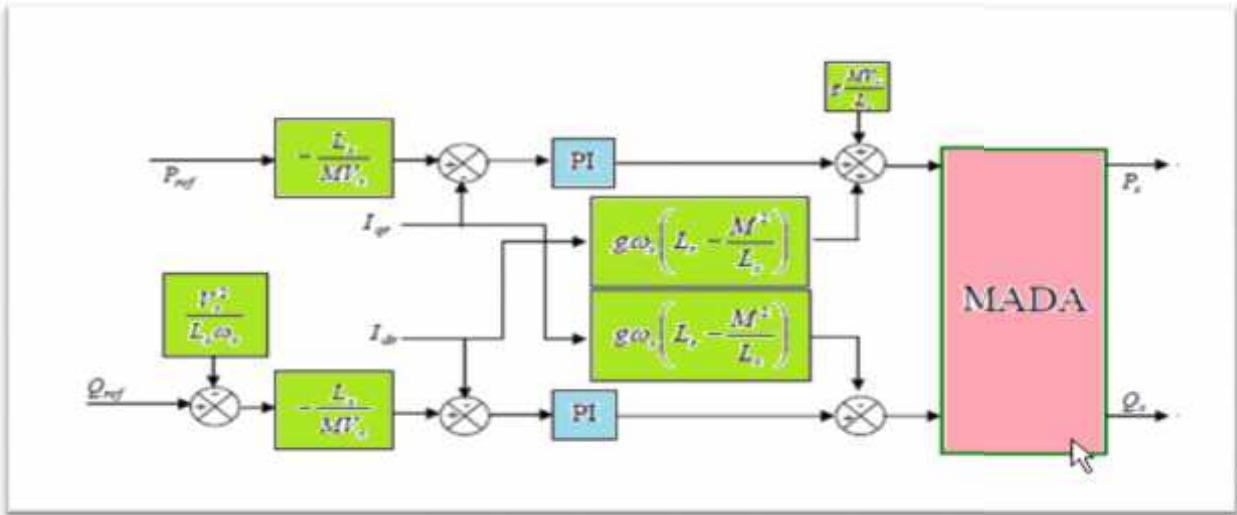


Figure 3.3: schéma bloc de la commande indirect sans boucle de puissance

### b) commande avec boucle de puissance

Dans le but d'améliorer la commande précédente, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté en figure 3.4 sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. Ce type de régulation donne une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle. Cette commande est donc plus performante que la commande directe qui présente plus de perturbations entre les deux puissances.

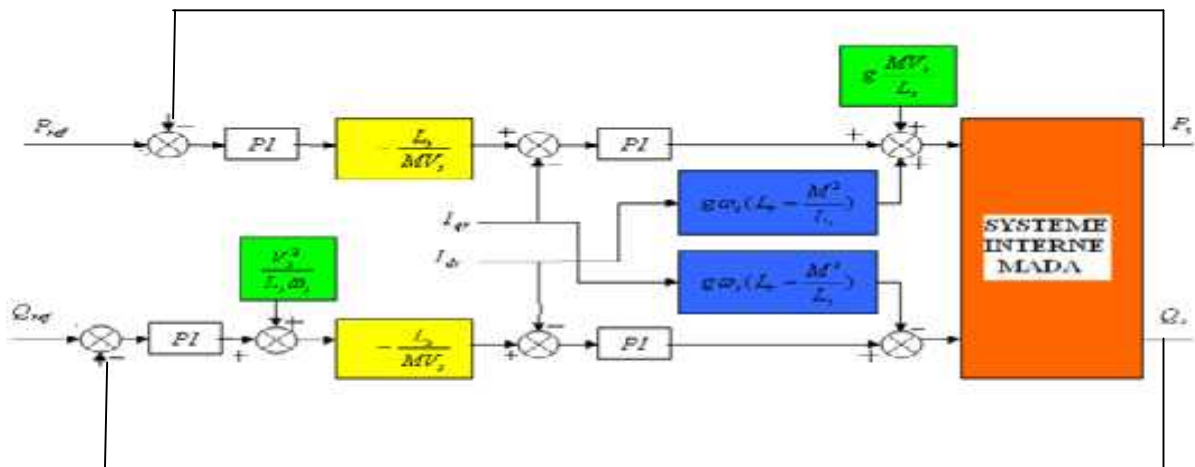


Figure 3.4 : Schéma bloc de la structure de commande indirecte avec boucle de puissance

Dans notre travail, on adopte la commande directe et la commande indirecte avec boucle de puissance.

### 3.6 Système du régulateur PI

D'après le schéma de la figure (3.2), les régulateurs des deux puissances sont indépendant, les termes de perturbations ( $g \frac{MV_s}{L_s}$  et  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ ) sont réguliers afin d'avoir un bon suivie du référence, l'influence de couplage des courants est minime et nécessite pas une régulation [10].

Le régulateur proportionnel-intégral (PI) utilisée pour commander la MADA en génératrice est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre. Permet d'avoir une bonne dynamique et un bon suivi de la référence [1].

La figure (3-4) montre un système en boucle fermé corrigé par un régulateur PI de la forme :

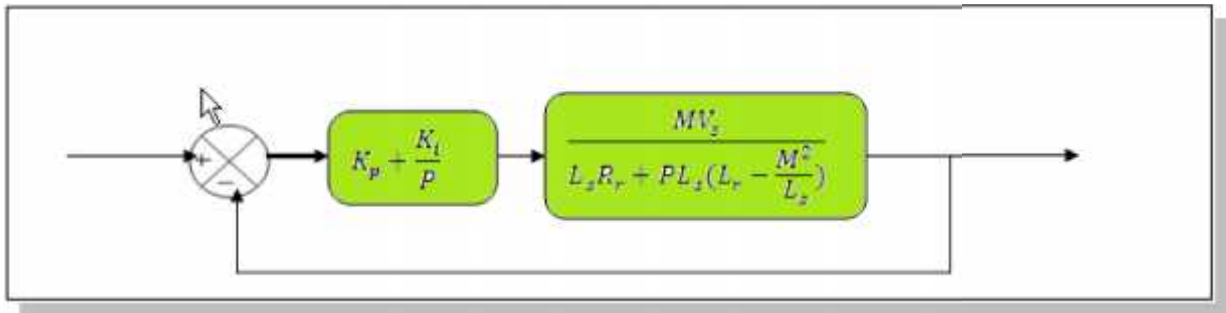


Figure 3.4 : Système régule le courant

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec le régulateur s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{P + \frac{k_i}{k_p} \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}}{\frac{k_p}{k_p} \frac{P + \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}}{P}} \quad (3.12)$$

Nous choisissons la méthode de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivant :

$$\frac{k_p}{k_i} = \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})} \quad (3.13)$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent, directement de ces paramètres ;

$$FTBO = \frac{k_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}}{P} \quad (3.14)$$

Ce qui donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1+\tau r P} \quad (3.15)$$

Avec

$$\tau r = \frac{1}{k_p} \frac{Ls(Lr - \frac{Lm^2}{Ls})}{LmVs} \quad (3.16)$$

Avec  $\tau r$  le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10ms, correspondent à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes. s'imposer une valeur faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables. On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse.

$$k_p = \frac{1}{\tau r} \frac{Ls(Lr - \frac{Lm^2}{Ls})}{LmVs} \quad ; \quad k_i = \frac{1}{\tau r} \frac{RrLs}{LmVs}$$

### 3.7 Simulation et interprétation

La simulation de LA MADA à flux orienté a été faite, la machine de la puissance de 1.08 KW est alimentée par un réseau 220V/380V et de fréquence de 50 HZ.

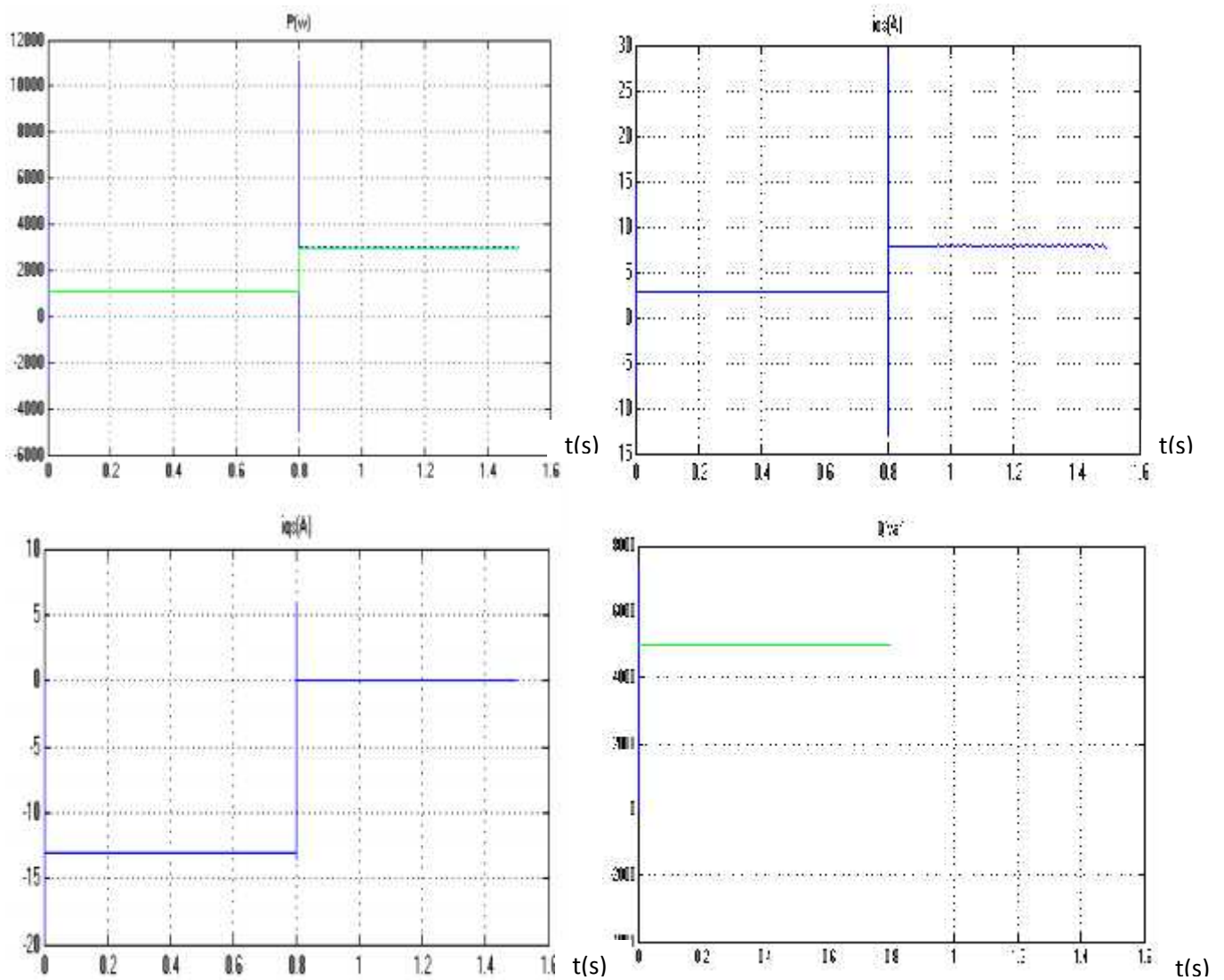
Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche à la vitesse de synchronisme est de 314rad/s.

Une puissance active statorique de référence d'une valeur de 1 KW entre les instants  $t = [0s, 0.8s]$  et 3KW entre les instants  $t = [0.8s, 1.6s]$  respectivement est appliqué sur la machine.

Une puissance réactive statorique de référence d'une valeur de 5.5 (KVar) entre les instants  $t = [0s, 0.8s]$  et 0 Var entre les instants  $t = [0.8s, 1.6s]$  respectivement est appliqué sur la machine.

### 3.7.1 commande direct

#### a)simulation



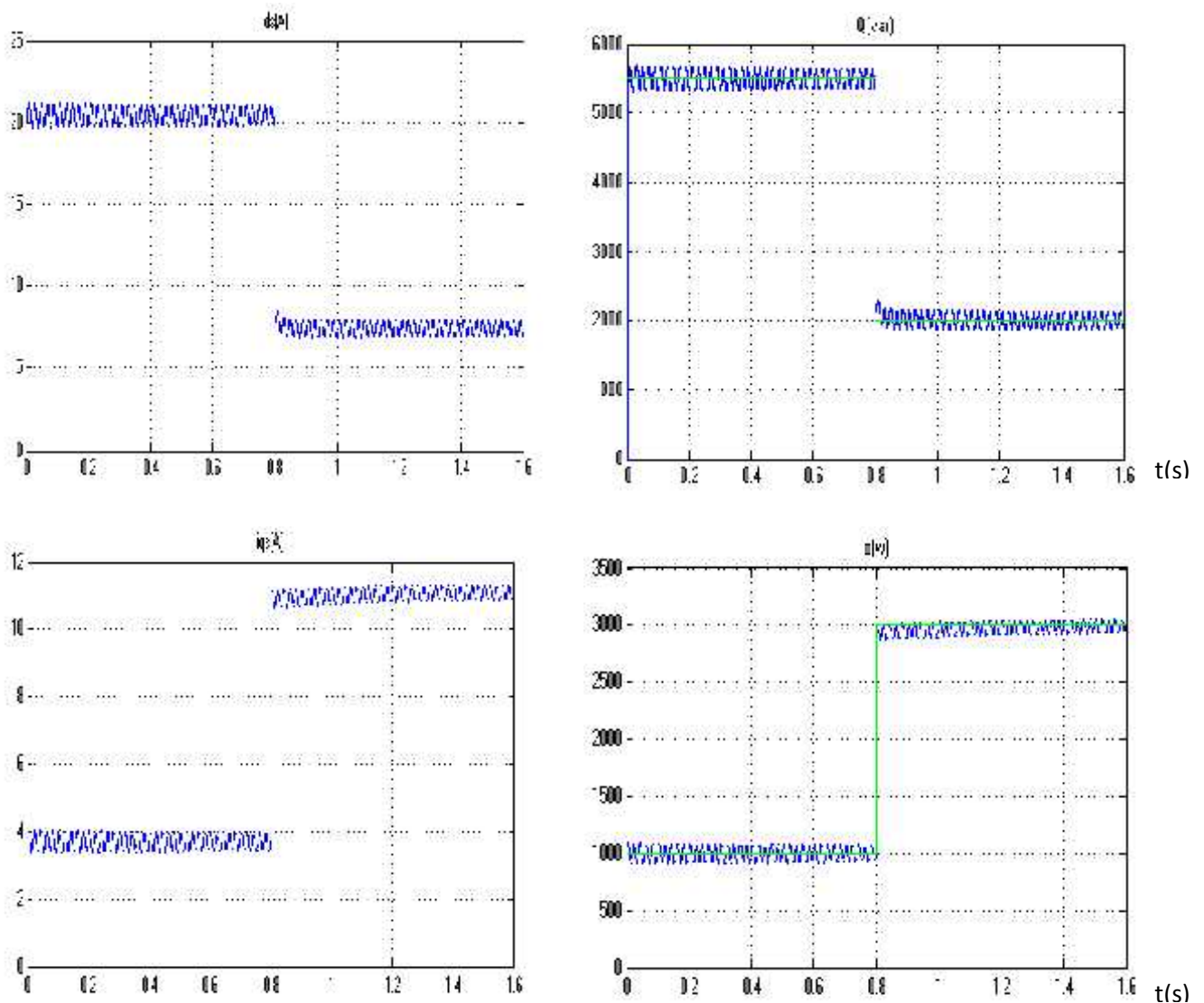
**Figure3.4:** Représentation des différentes grandeurs de la MADA par la commande vectorielle direct en puissance active et réactive

### 3.7.2 commande indirect :

Une puissance active statoriques de référence d'une valeur de 1 KW entre les instants  $t = [0s, 0.8s]$  et 3KW entre les instants  $t = [0.8s, 1.6s]$  respectivement est appliqué sur la machine.

Une puissance réactive statoriques de référence d'une valeur de (5.5 K Var) entre les instants  $t = [0s, 0.8s]$  et 2k Var entre les instants  $t = [0.8s, 1.6s]$  respectivement est appliqué sur la machine.

#### a) simulation



**Figure3.5:** Représentation des différentes grandeurs de la MADA par la commande vectorielle indirect en puissance active et réactive

## **b) Interprétation**

On remarque que les puissances de référence en sont bien suivies par la MADA ainsi que pour les courants statoriques donc ne nécessite pas le bouclage des puissances.

L'effet du couplage entre les deux puissances P et Q, est pratiquement nul. De plus la résistance statorique qui a été négligé dans la modélisation a une légère influence sur les puissances, car on a travaillé à des vitesses élevées.

On remarque aussi que la puissance active est proportionnelle au courant statorique en quadrature  $I_{qr}$  et que la puissance réactive est proportionnelle au courant direct  $I_{dr}$ , comme on a supposé théoriquement.

La composante en quadrature de flux  $\psi_{qs}$  est presque nulle en régime permanent ce qui confirme les hypothèses de la commande par l'orientation de flux statorique.

## **3.8 Analyse des performances**

Dans ce qui suit nous allons étudier les performances des différentes structures de commande ainsi qu'une comparaison sera naturellement effectuée pour déterminer la configuration la plus adéquate pour une application dans le domaine éolien.

### **3.8.1 Robustesse (changement paramétriques)**

Cet essai consiste à faire varier les paramètres du modèle de la machine et de voir si la régulation reste dans les limites des contraintes fixées par le cahier des charges. Cette étude est très importante car dans un système réel les paramètres de la machine sont soumis à des Variations causées par différents phénomènes physiques (Saturation et échauffement). Ajoutons à cela que l'identification de ces paramètres est astreinte à des imprécisions dues à la méthode employée ou aux appareils de mesure. Dans cette optique plusieurs essais de simulation seront réalisés. Ces essais consistent à varier chaque paramètre de la machine indépendamment des autres. Ceci nous permettra de cibler la grandeur pour laquelle les commandes précédemment établies ne sont pas robustes. Ainsi cette démarche nous incitera à prendre les précautions nécessaires pour le maintien de la grandeur précédemment citée mais aussi l'amélioration de la précision de sa mesure.

#### **a) Conditions d'essais**

Afin de faire une analyse objective de la robustesse de la commande, il est impératif de mettre celle-ci dans les conditions les plus défavorables admises par le constructeur. Pour



cela les résistances augmentent de 50% et les inductances diminuent de 50% à cause des effets respectifs de la chaleur et de la saturation.

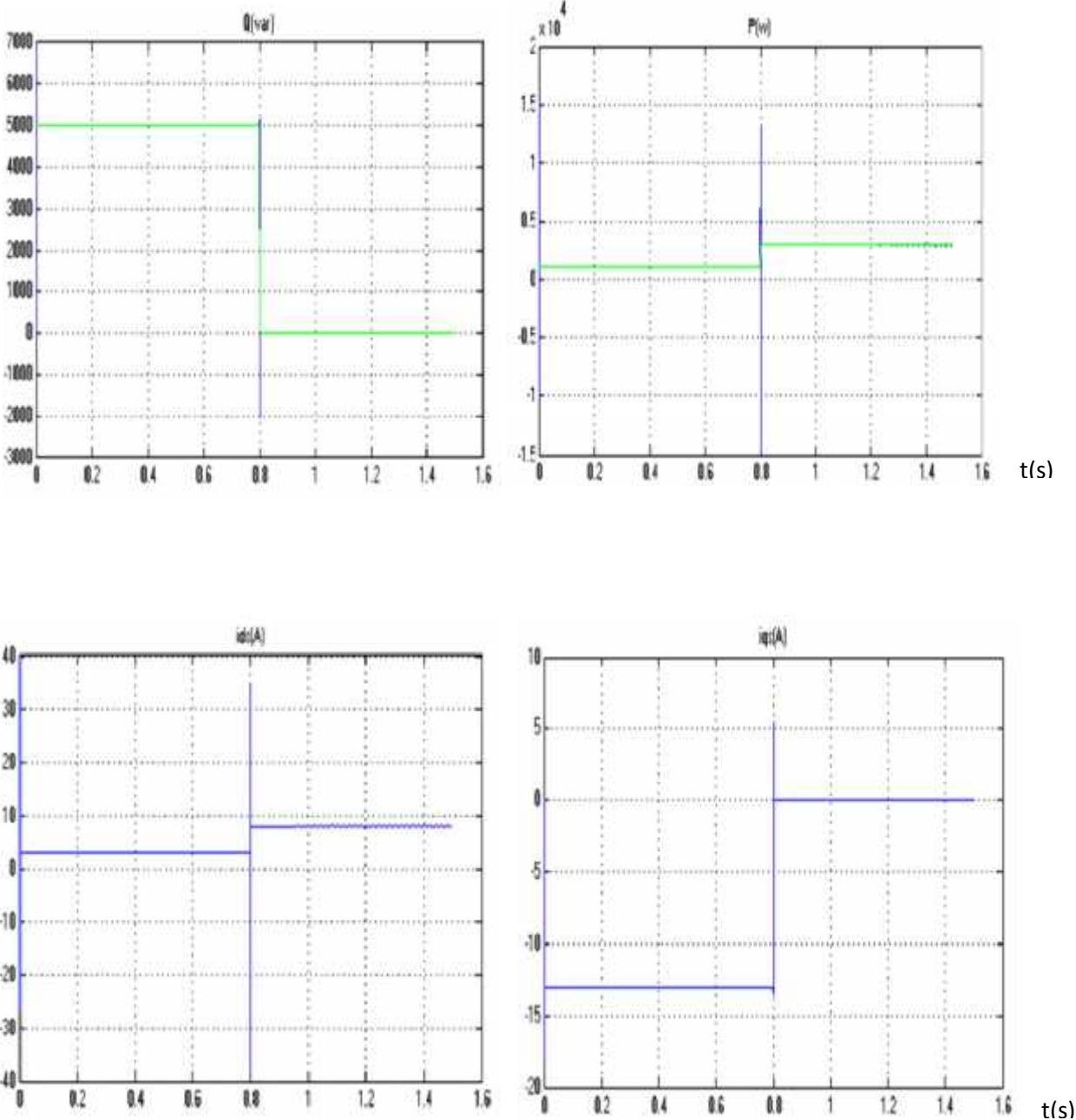
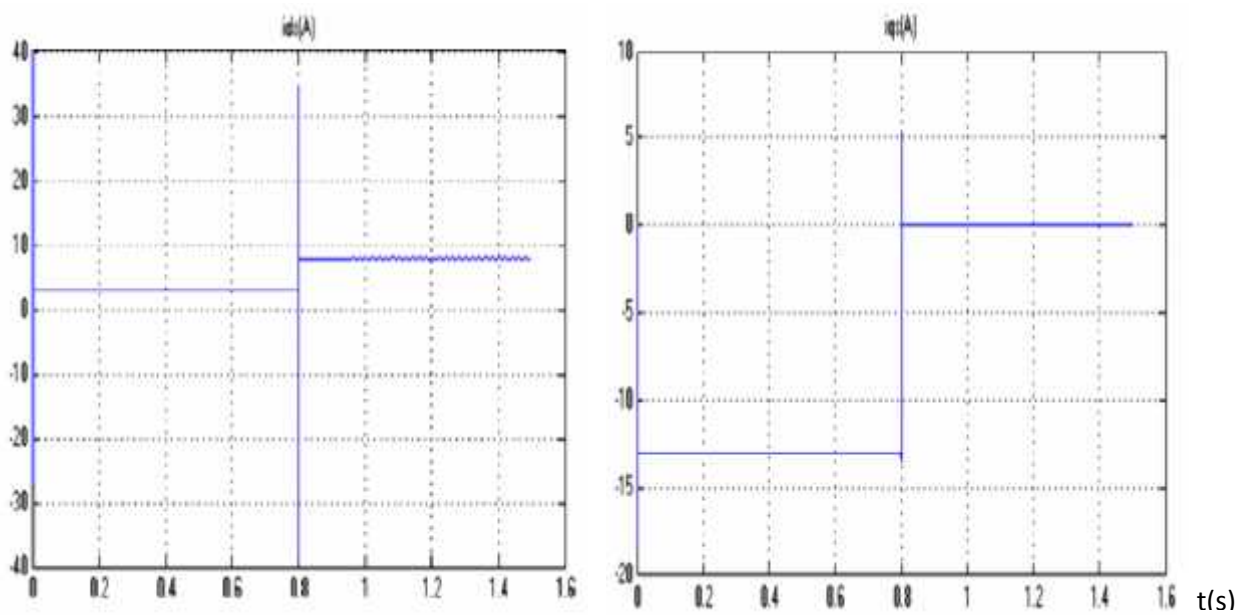
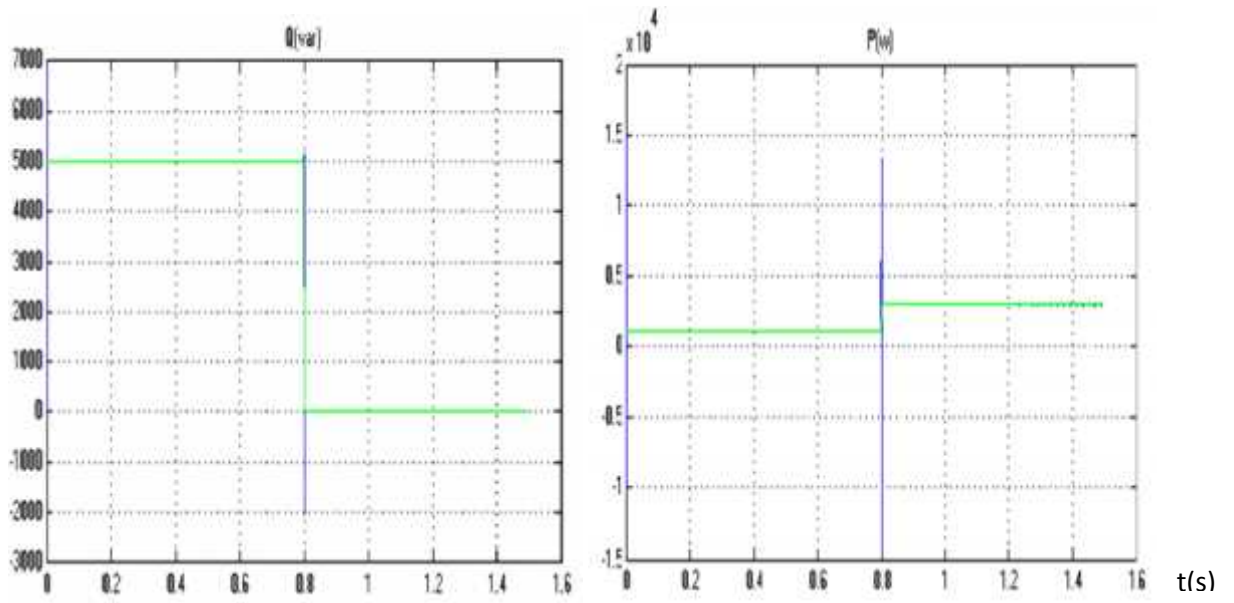
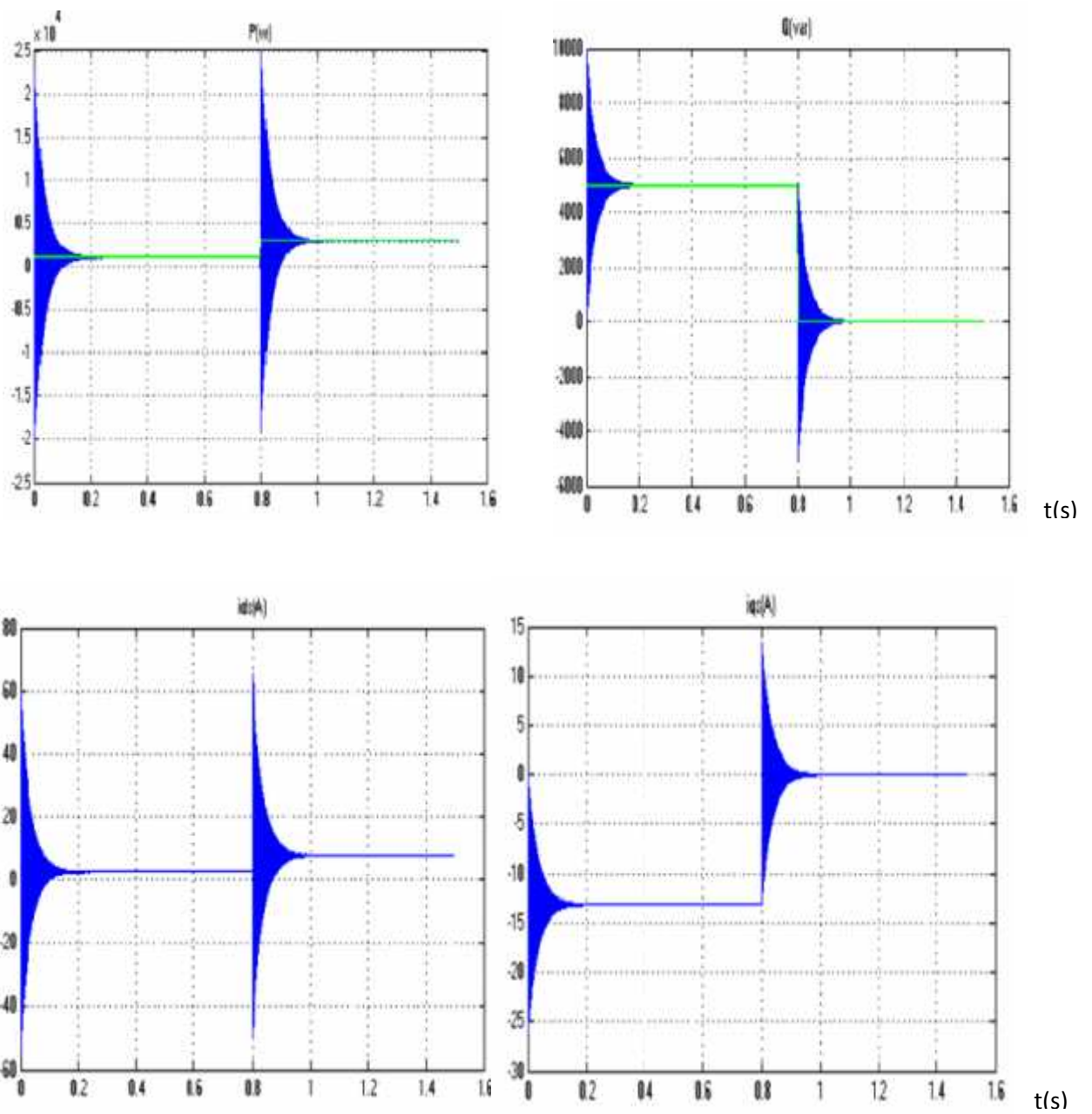


Figure3.6: Essai 1 augmentation de la résistance statorique à 50% (commande directe)



**Figure3.7:** Essai 2 augmentation de la résistance rotorique à 50% (commande directe)



**Figure 3.8 :** déminution de L'inductance statorique de 50 %

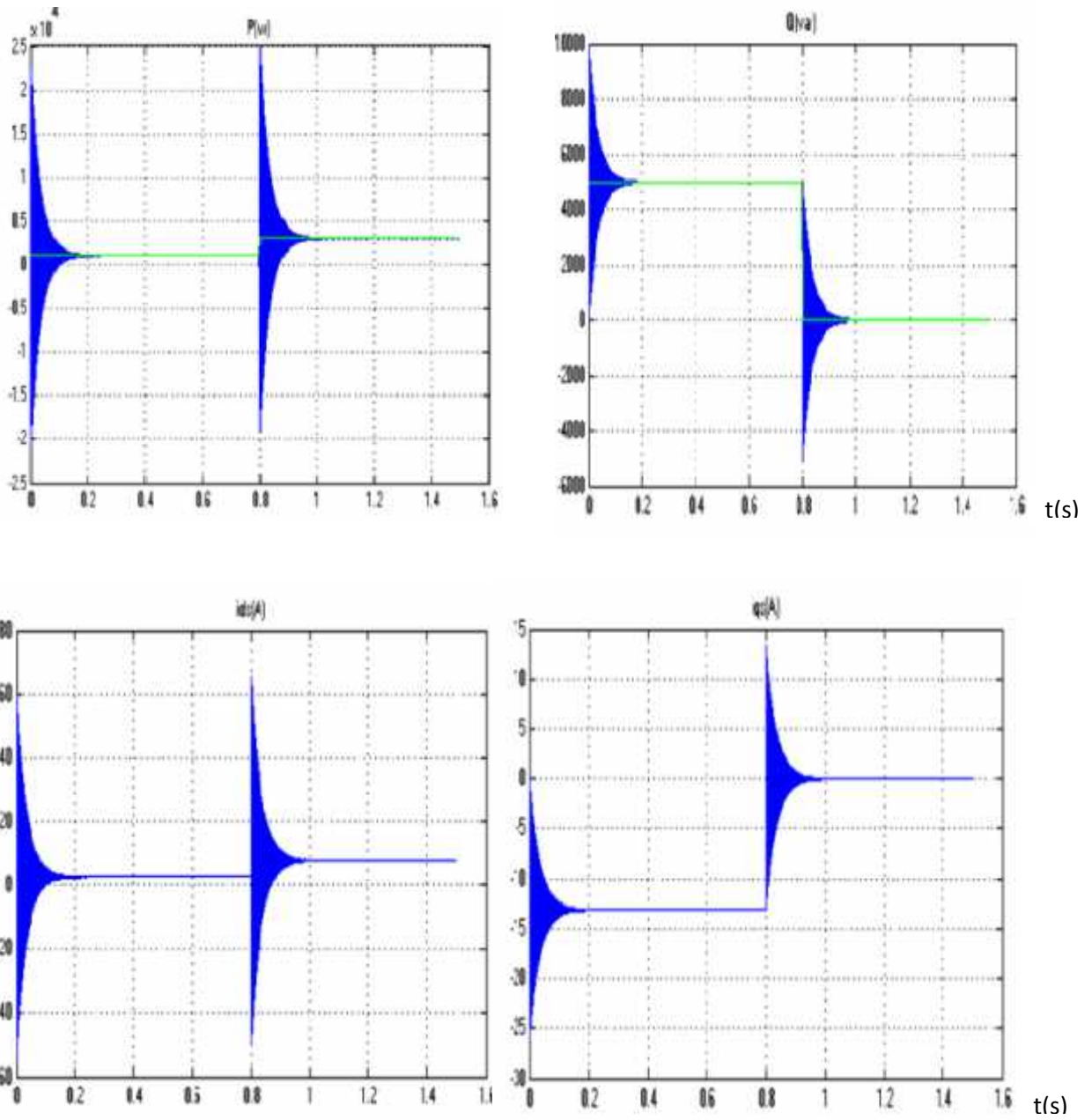


Figure 3.9 : diminution de l'inductance rotorique à 50%

## b) Résultats et interprétations

Lors des variations des résistances statoriques et rotoriques (Figures 3.6 et 3.7), nous n'avons constaté aucun effet sur le suivi des consignes.

Dans le cas de la variation des inductances (Figures 3.8 et 3.9), une dépassement dans le suivi de consignes de la puissance réactive lors de l'utilisation de la commande indirecte en boucle de puissance ouverte. Celle-ci est due au changement des inductances qui fausse l'estimation du courant rotorique à partir des puissances de référence.

### 3.8.2 Suivi de consignes

Cet essai consiste à réaliser des échelons de puissances actives et réactives avec des signes positifs et négatifs.

à  $t=0.8s$  échelon de puissance réactive  $Q_{ref}$  passe de 5500 VAR à -5500VAR

à  $t=0.8s$  échelon de puissance active  $P_{ref}$  passe de 1080W à -1080W

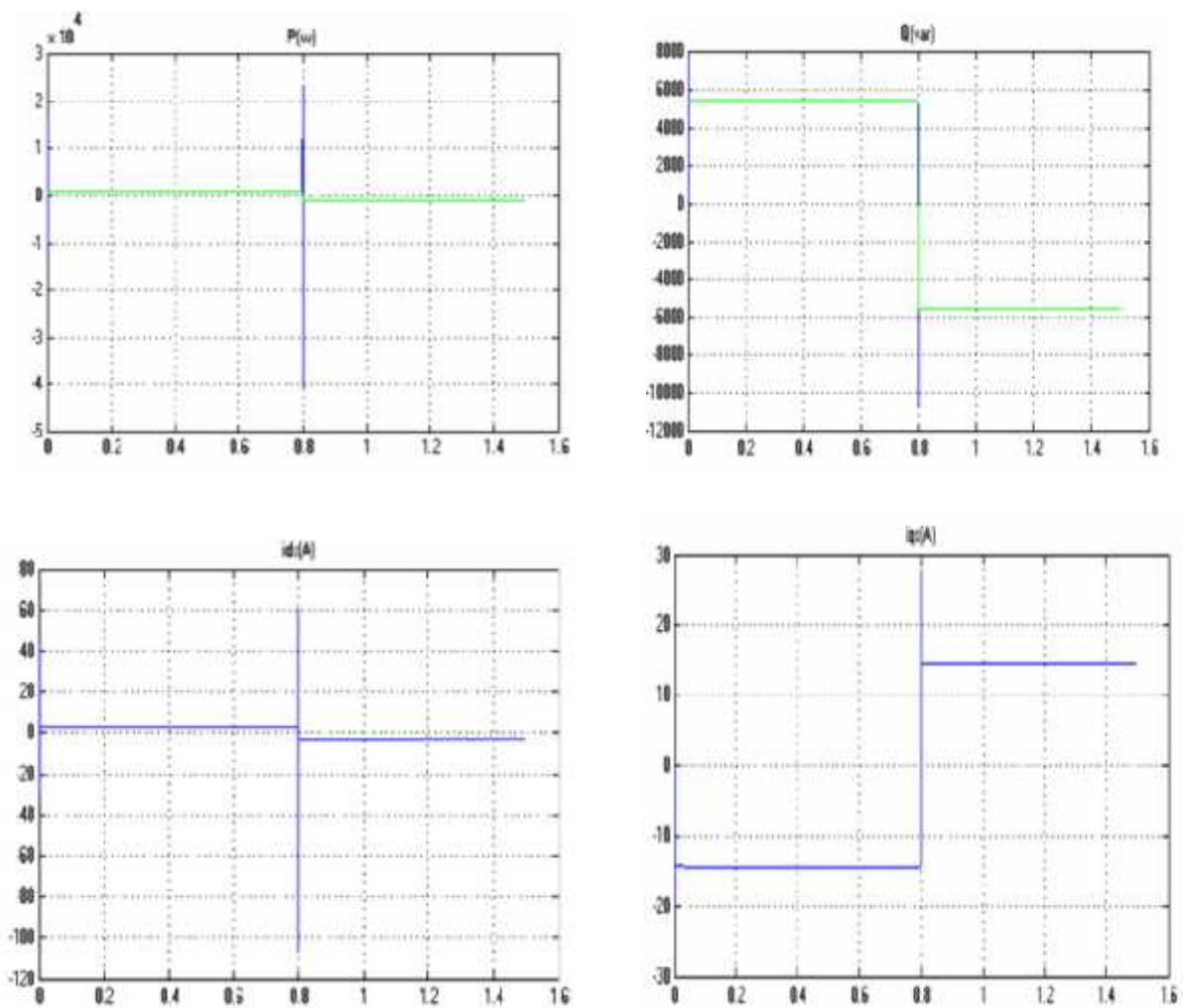
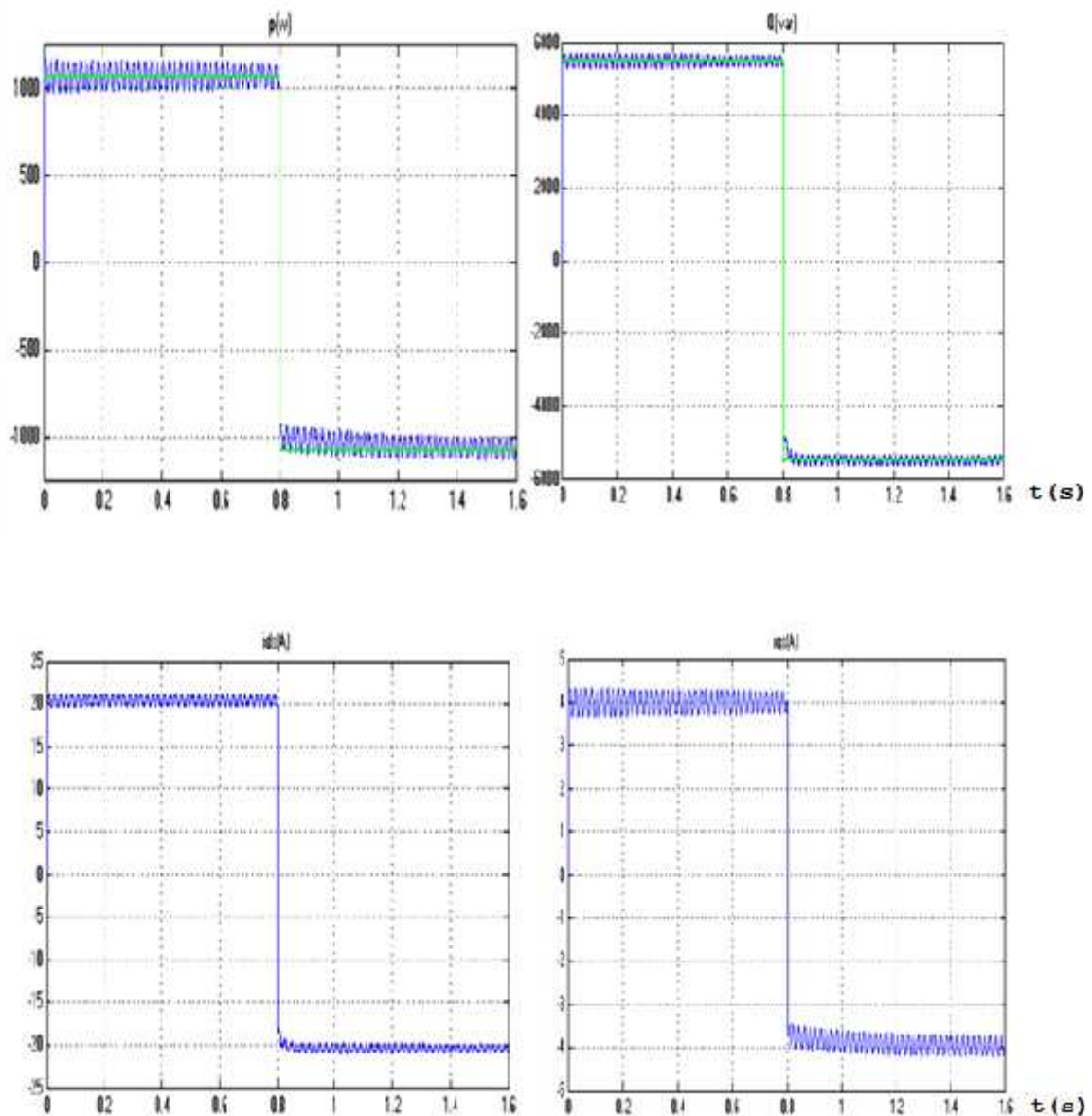


Figure 3.10 : suivi de consignes commande directe





**Figure 3.11** : suivi de consignes commande indirecte

### 3.8.3 Résultats et interprétations

Les résultats de la simulation (Figures 3.11 et 3.10) présentent les différentes courbes obtenues par la commande des puissances actives et réactives générées de la MADA. Cette commande permet de découpler les expressions des puissances actives et réactives statoriques ou autrement dit celle du couple et du flux.

La composante quadrature du courant rotorique  $qr$  / contrôle le couple électromagnétique donc la puissance active. La composante directe contrôle le flux et donc la puissance réactive

Transitée entre le stator et le réseau. Cela est constaté lors des variations des composantes directes et quadrature des courants rotoriques qui sont respectivement les images des puissances réactives et actives.

### **3.8 Conclusion**

Nous avons étudié la commande vectorielle sur la machine asynchrone à double alimentation pour le fonctionnement en génératrice sans régulation de la vitesse, et nous avons pu voir l'efficacité de la commande vectorielle pour le découplage entre le courant et le flux ainsi que la puissance active et réactive.

A partir de ces résultats on a pu voir l'intérêt de la commande vectorielle et l'orientation de vecteur courant et le vecteur flux afin de rendre le comportement de cette machine similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée (MCC) où le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple.

En outre, il convient de souligner qu'après analyse des essais précédemment effectués, il a été constaté que le dispositif étudié ne se limite pas à un fonctionnement générateur. Ceci s'explique par une puissance mesurée qui peut être positive ou négative. Par ailleurs, il est à remarquer que le dispositif peut fonctionner également en hypo et en hyper synchronisme.

Ces deux raisons nous permettent de dire que la MADA fonctionne dans les quatre quadrants du couple et de la vitesse de manière convaincante.

Enfin, il est à noter que la MADA est capable de fournir de l'énergie réactive et donc de compenser le déficit du réseau de cette même énergie

### 4.1. Introduction :

Les premiers travaux sur la commande des systèmes à structure variable par mode glissant furent élaborés lors des années cinquante, soixante en ex-Union soviétique par le chercheur Emelyanov et son équipe [17,18].

Par la suite, ces travaux ont été repris ailleurs; Soit pour compléter l'étude théorique, Soit pour étudier quelques applications possibles, en particulier dans le domaine des entraînements réglés. Cependant, ce n'est qu'à partir des années 80, que la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable, est devenue intéressante et attractive. Elle est considérée comme l'une des approches de commande des systèmes non linéaires et des systèmes ayant des modèles imprécis.

La commande à structure variable a gagné une popularité certaine, en raison de sa simplicité et de son efficacité. Dans de tels systèmes, la commande en commutant, permet d'amener le point figuratif de l'évolution du système sur une hyper-surface de glissement. Lorsque cette hyper surface du glissement est atteinte le régime glissant se produit.

Ce dernier jouit de propriétés fortes intéressantes telles que l'insensibilité aux variations des paramètres de la partie commandée ainsi qu'aux perturbations pouvant agir sur cette dernière, son comportement ne dépendant plus que des paramètres qui définissent l'hyper-surface du glissement.

Bien qu'ayant divers avantages, cette technique de commande possède également un inconvénient qui a limité son utilisation au départ. En effet, dans la pratique, les imperfections, telles que les retards de commutation et l'hystérésis, engendrent des oscillations autour de la surface de glissement.

Plusieurs techniques ont ainsi été proposées pour palier à cet inconvénient. Certaines consistent à approximer la fonction discontinue par une fonction continue au voisinage de la surface de commutation, la réduction du Chattering se faisant au prix d'une perte de précision.



## 4.2 Principe de commande par mode de glissement des systèmes a structure variable

Un système à structure variable est un système dont la structure change durant son fonctionnement. [19]

La commande de tels systèmes par mode de glissement, a en général, deux modes de fonctionnement :

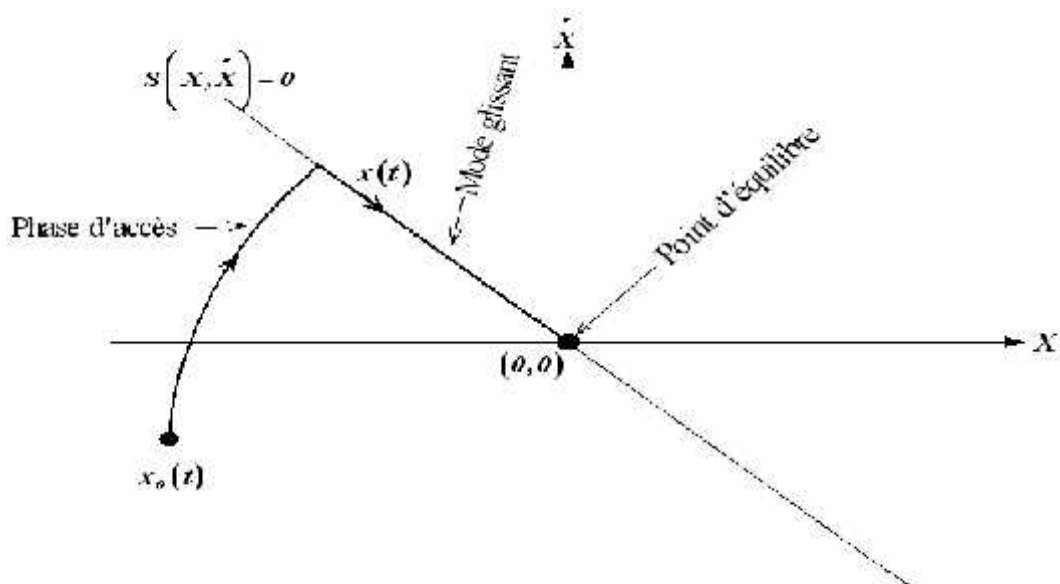
### 4.2.1 Le mode non glissant

**fig 4.1** (Reaching mode ou phase d'accès) ou mode d'accès, ou encore mode de convergence (MC).

### 4.2.2 Le mode glissant

**fig 4.1** (Sliding mode, mode glissant).

Ainsi, la trajectoire de phase, partant d'une condition initiale quelconque, atteint la surface de commutation en un temps fini (mode non glissant), puis tend asymptotiquement vers le point d'équilibre avec une dynamique définie par le mode glissant. [19]



**Figure 4.1** Modes de fonctionnement dans le plan de phase

Le système non linéaire est donné par le système d'équations différentielles suivant:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

(A et B étant continues dérivables et de dérivée continue)

L'application de la commande de la structure variable se définit comme suit:

On se pose les deux questions suivantes :

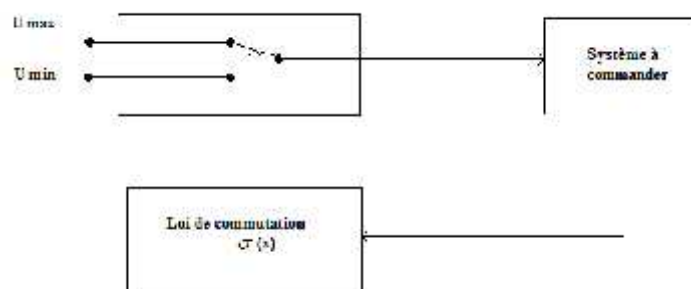
1) En quoi consiste la structure variable de la commande ?

2) Comment la synthétiser ?

La synthèse d'un correcteur à structure variable représentée par la figure 5.2 passe par deux phases:

- La première phase consiste à définir la surface de commutation  $\sigma(x) = 0$  d'ordre inférieur à celui du système donné et représentant la dynamique désirée.

- La seconde phase, quant à elle, a pour but la synthèse de la commande  $u(x, t)$ ,  $[A][X]$  telle que tout état à l'extérieur de la surface de commutation soit contraint de la rejoindre, et ce en un temps fini. Une fois celle-ci atteinte, un régime glissant se produit. Le système adopte la dynamique de cette surface et le point représentatif de l'évolution du système rejoint le point d'équilibre.



**Figure 4.2 :** Schéma de principe de la commande à structure variable

La synthèse de la commande est réalisée lorsque:

-L'origine de l'espace des coordonnées du système est un point d'équilibre stable

-A partir de n'importe quelle condition initiale, le point représentatif du mouvement rencontre l'hyper-surface de glissement en un temps fini.

### **4.3. Conception de l'algorithme de commande par mode de glissement**

La conception de la commande par mode de glissement prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche, qui s'effectue principalement en trois étapes complémentaires définies par [17] :

- Le choix des surfaces de glissement (définition des conditions d'existence et de convergence du régime glissant)
- La détermination de la loi de commande

#### 4.4. Condition d'existence et de convergence du régime glissant

##### 4.4.1 Approche de Lyapunov

Il s'agit de choisir une fonction candidate de Lyapunov  $V(x) > 0$  (fonction scalaire positive) pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction  $V^*(x) < 0$

En définissant par exemple une fonction candidate de Lyapunov pour le système comme suit:

$$V(x) = \frac{1}{2} \cdot S^2(x) \quad (4.2)$$

En dérivant cette dernière, on obtient:

$$V^*(x) = S^*(x) \cdot S(x) \quad (4.3)$$

Pour que la fonction candidate de Lyapunov puisse décroître, il suffit d'assurer que :

$$S^*(x) \cdot S(x) < 0 \quad (4.4)$$

Cette approche est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de la robustesse et de la stabilité des systèmes non linéaires.

##### 4.4.2. Détermination de la loi de commande

Lorsque le régime glissant est atteint, la dynamique du système est indépendante de la loi de commande qui n'a pour but que de maintenir les conditions de glissement (Attractivité de la surface). La surface est ainsi déterminée indépendamment de la commande.

Maintenant, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la trajectoire d'état vers la surface puis vers son point d'équilibre. Tout en maintenant les conditions d'existence du mode de glissement.

L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive des deux côtés. De ce fait, si cette commande discontinue

est indispensable, il n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée. La partie continue peut en effet amener à réduire, autant que nous voulons, l'amplitude de la partie discontinue. En présence d'une perturbation, la partie discontinue a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivité. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties:

- la linéarisation exacte ( $U_{eq}$ )
- la stabilité ( $U_n$ ).

$$U_n = U_{eq} + U_n$$

(4.5)

**$U_{eq}$ :** Commande proposée par Filipov. Elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement  $S(x) = 0$ . La commande équivalente est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle  $\dot{S}(x) = 0$ .

**$U_n$ :** Commande discrète est déterminée pour vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système.

Afin de mettre en évidence le développement précédent, on considère le système d'état (5.1).

On cherche ensuite à déterminer l'expression analogique de la commande  $U$ .

La dérivée de la surface  $S(x)$  est :

$$S^*(x) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial X} \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \quad (4.6)$$

En remplaçant (5.1) et (5.4) dans (5.5), on trouve:

$$S^*(x) = \frac{\partial S}{\partial X} \{ [A][X] + [B]U_{eq} \} + \frac{\partial S}{\partial X} \cdot [B]U_n \quad (4.7)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle. Par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles.

On déduit l'expression de la commande équivalente:

$$U_{eq} = - \left\{ \frac{\partial S}{\partial X} [B] \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial S}{\partial X} [A][X] \right\} \quad (4.8)$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que:

$$\frac{\partial S}{\partial X} [B] \neq 0$$

Durant le mode de convergence, et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (5.6), on obtient la nouvelle expression de la dérivée de la surface

$$S^*(x) = \frac{\partial S}{\partial X} [B] U_n \quad (4.9)$$

et la condition d'attractivité  $S(x) \cdot S^*(x) < 0$  devient:

$$S(x) \frac{\partial S}{\partial X} [B] U_n < 0 \quad (4.10)$$

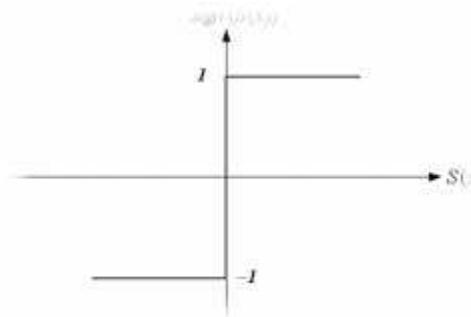
Afin de satisfaire la condition, le signe de  $U_n$  doit être opposé à celui de  $S(x) \frac{\partial S}{\partial X} [B]$ .

La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'une fonction Sign (figure 5.3).

$$U_n = Kx \cdot \text{sign} \cdot S(x) \quad (4.11)$$

Le signe de  $Kx$  doit être différent de celui de  $\frac{\partial S}{\partial X} [B]$ .

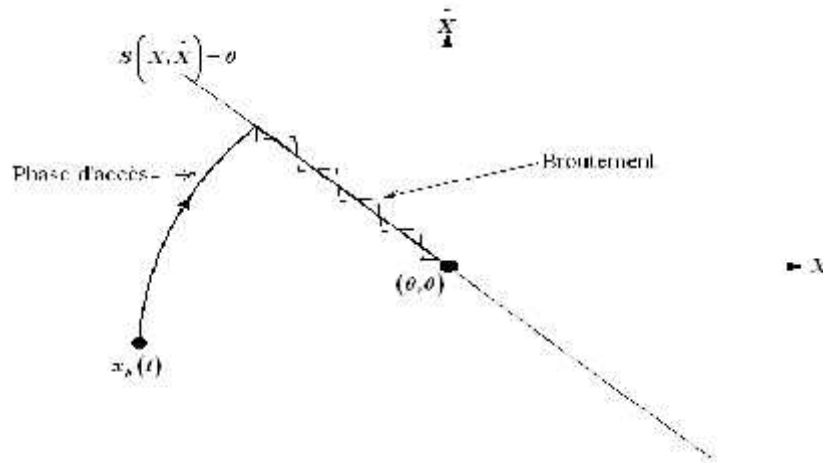
Fonction Sign



**Figure 4.3** Fonction Sign( non-linéarité tout ou rien )

Cependant, La fonction Sign génère sur la surface de glissement, un phénomène appelé broutement (ou Chattering en anglais), qui est en général indésirable car il ajoute au spectre de la commande, des composantes hautes fréquences.

La figure 5.4 représente le phénomène broutement.

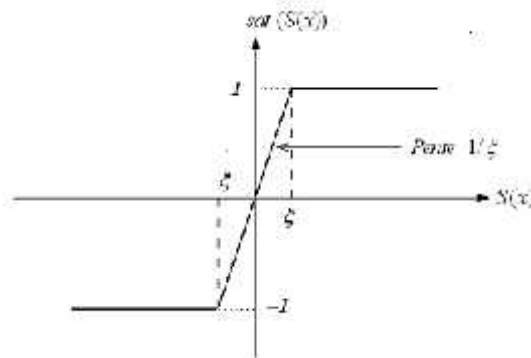


**Figure 4.4 :**Phénomène de broutement

**a) Fonction Sat:**

Un autre technique peut être mise en pratique pour réduire (ou éliminé) le phénomène de broutement en remplaçant la fonction Sign par une fonction de saturation adéquate qui filtre ces hautes fréquences. On donne ci-dessous un exemple de fonction de saturation (figure 5.5)

$$\begin{aligned}
 \text{sat.}((S(x)) = 1 & \quad \text{si} \quad S(x) > \varepsilon \\
 \text{sat.}((S(x)) = -1 & \quad \text{si} \quad S(x) < -\varepsilon \\
 \text{sat.}((S(x)) = \frac{S(x)}{\varepsilon} & \quad \text{si} \quad |S(x)| \leq \varepsilon
 \end{aligned}$$



**Figure 4.5 :**Fonction de saturation ( $\varepsilon > 0$  est petit )

On obtient la commande douce suivante

$$U_n = \begin{cases} Kx \cdot \text{sign} \cdot S(x) & \text{si} \quad |S(x)| > \varepsilon \\ \frac{Kx}{\varepsilon} Kx \cdot \text{sign} \cdot S(x) & \text{si} \quad |S(x)| \leq \varepsilon \end{cases} \tag{4.12}$$

**b) Fonction Intégrale:** La fonction intégrale permet d'améliorer la poursuite de trajectoire (variation des références de puissance). L'ajout de cette action permet de réduire le gain de la fonction Sign et réduire le Chattering.

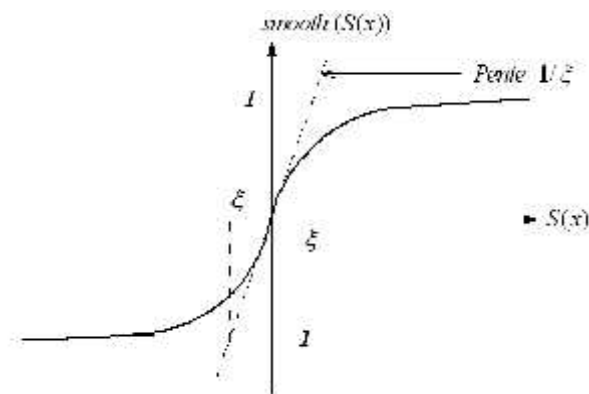
La forme de la surface est donnée par:

$$\eta dq = \varepsilon \int_0^t S(x) dt \quad (4.13)$$

La fonction est ajoutée durant la phase positive de la surface de glissement. Les actions montrent que les ondulations sur les puissances actives et réactives sont réduites. Il subsiste toutefois des ondulations sur la tension du BUS continu.

**b) Fonction Tangente hyperbolique:**

On peut aussi la remplacer par une fonction de classe  $C^1$ . On donne ci-dessous un exemple de ce type de fonction (figure 5.6)



**Figure 4.6** Fonction de classe  $C^1$  ( $\varepsilon > 0$  est petit)

$$smooth(S(x)) = \tanh(S(x)) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{S(x)}{|S(x)| + \varepsilon} \quad (4.14)$$

D'où, la commande douce suivante :

$$Un = Kx \frac{S(x)}{|S(x)| + \varepsilon} \quad (4.15)$$

### 4.4.3 Choix de la surface de commutation :

Pour un système non-linéaire présenté sous la forme suivante :

$$\dot{X} = f(X, t) + g(X, t) \cdot u(X, t) \quad (4.16)$$

$$X \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}$$

Où  $f(x,t)$ ,  $g(x,t)$  sont deux fonctions non linéaires continues et incertaines supposées bornées.

On prend la forme d'équation générale proposée par **j.j.Slotine** pour déterminer la surface de glissement donnée par :

$$s(x) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e$$

$$e = X - X^*$$

Avec :

$$X = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T, X^* = [x^*, \dot{x}^*, \dots, x^{(n-1)*}]^T$$

$e$  : erreur sur la grandeur à régler.

$\lambda$  : Coefficient positif

$s(X)$  : grandeurs désirée

$X$  : variable d'état de la grandeur commandée.

### 4.5 Contrôle de la puissance active [20]

Pour contrôler la puissance on prend  $n=1$ , l'expression de la surface de contrôle de la puissance active a pour forme :

$$s(p) = (p_s^{ref} - p_s) \quad (4.17)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{s}(p) = (\dot{p}_s^{ref} - \dot{p}_s) \quad (4.18)$$

On remplace l'expression de la puissance :

$$\dot{s}(p) = (\dot{p}_s^{ref} - V_s \frac{M}{L_s} I_{qr}) \quad (4.19)$$

on tire l'expression du courant  $I_{qr}$  de l'équation de la tension  $V_{qr}$

$$\dot{s}(p) = (\dot{p}_s^{ref} - V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} (V_{qr} - R_r I_{qr})) \quad (4.20)$$



En remplaçant l'expression de  $V_{qr}$  par  $V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n$ , la commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$\dot{s}(p) = (\dot{p}_s^{ref} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} ((V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n) - R_r I_{qr})) \quad (4.21)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$s(p)=0, \dot{s}(p) = 0, V_{qr}^n = 0$$

On tire de l'équation précédente la valeur de commande équivalente  $V_{qr}^{eq}$  qui s'écrit :

$$V_{qr}^{eq} = -\dot{p}_s^{ref} \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} + R_r I_{qr} \quad (4.22)$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition  $s(p)\dot{s}(p) < 0$  soit vérifiée, on pose :

$$\dot{s}(p) = V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{qr}^n \quad (4.23)$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_{qr}^n = K V_{qr} \text{sign}(s(p)) \quad (4.24)$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre  $K V_{qr}$  doit être **positif**.

Afin d'atténuer tout dépassement possible de la tension de référence  $V_{qr}$ , Il est souvent utile de rajouter un limiteur de tension qui s'exprime par :

$$V_{qr}^{lim} = V_{qr}^{max} \text{sat}(p) \quad (4.25)$$

## 4.6 Contrôle de la puissance réactive :

Pour contrôler la puissance on prend  $n=1$ , l'expression de la surface de contrôle de la puissance réactive a pour forme :

$$s(Q) = (Q_s^{ref} - Q_s) \quad (4.26)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{s}(Q) = (\dot{Q}_s^{ref} - \dot{Q}_s) \quad (4.27)$$

On remplace l'expression de la puissance :

$$\dot{s}(Q) = (\dot{Q}_s^{ref} + V_s \frac{M}{L_s} \dot{I}_{dr}) \quad (4.28)$$

On tire l'expression du courant  $I_{dr}$  de l'équation de la tension  $V_{dr}$

$$\dot{s}(Q) = (\dot{Q}_s^{ref} - V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} (V_{dr} - R_r I_{dr})) \quad (4.29)$$

En remplaçant l'expression de  $V_{dr}$  par  $V_{dr}^{eq} + V_{dr}^n$ , la commande apparait clairement dans l'équation suivante :

$$\dot{s}(Q) = (\dot{Q}_s^{ref} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} ((V_{dr}^{eq} + V_{dr}^n) - R_r I_{dr})) \quad (4.30)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$s(Q)=0, \dot{s}(Q) = 0, V_{dr}^n = 0$$

On tire de l'équation précédente la valeur de commande équivalente  $V_{dr}^{eq}$  qui s'écrit :

$$V_{dr}^{eq} = -\dot{Q}_s^{ref} \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} + R_r I_{dr} \quad (4.31)$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition  $s(p)\dot{s}(p) < 0$  soit vérifiée, on pose :

$$\dot{s}(p) = V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{dr}^n \quad (4.32)$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_{dr}^n = K V_{dr} \text{sign}(s(p)) \quad (4.33)$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre  $K V_{dr}$  doit être **positif**.

Afin d'atténuer tout dépassement possible de la tension de référence  $V_{dr}$ , Il est souvent utile de rajouter un limiteur de tension qui s'exprime par :

$$V_{dr}^{lim} = V_{dr}^{max} \text{sat}(Q) \quad (4.34)$$

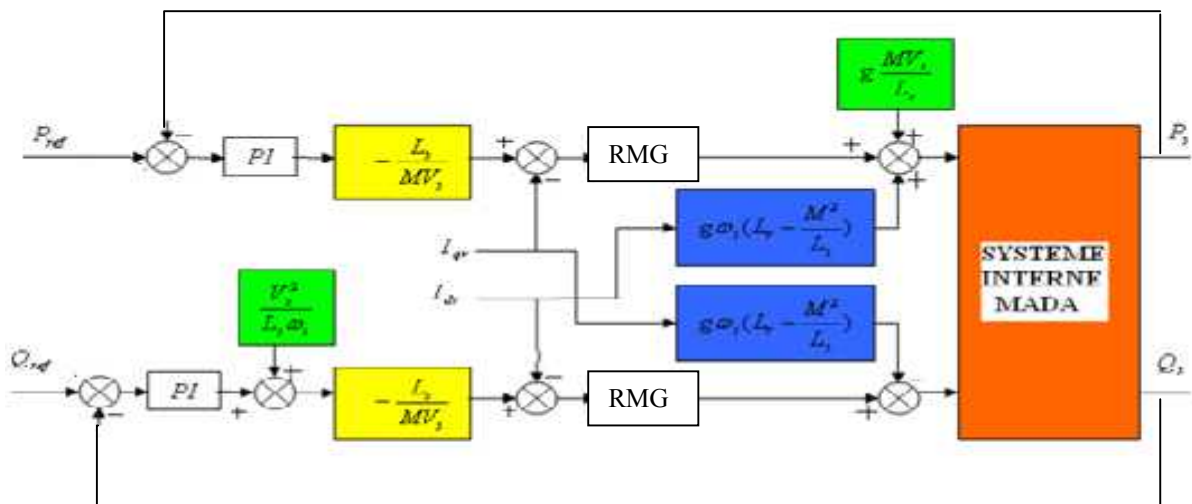
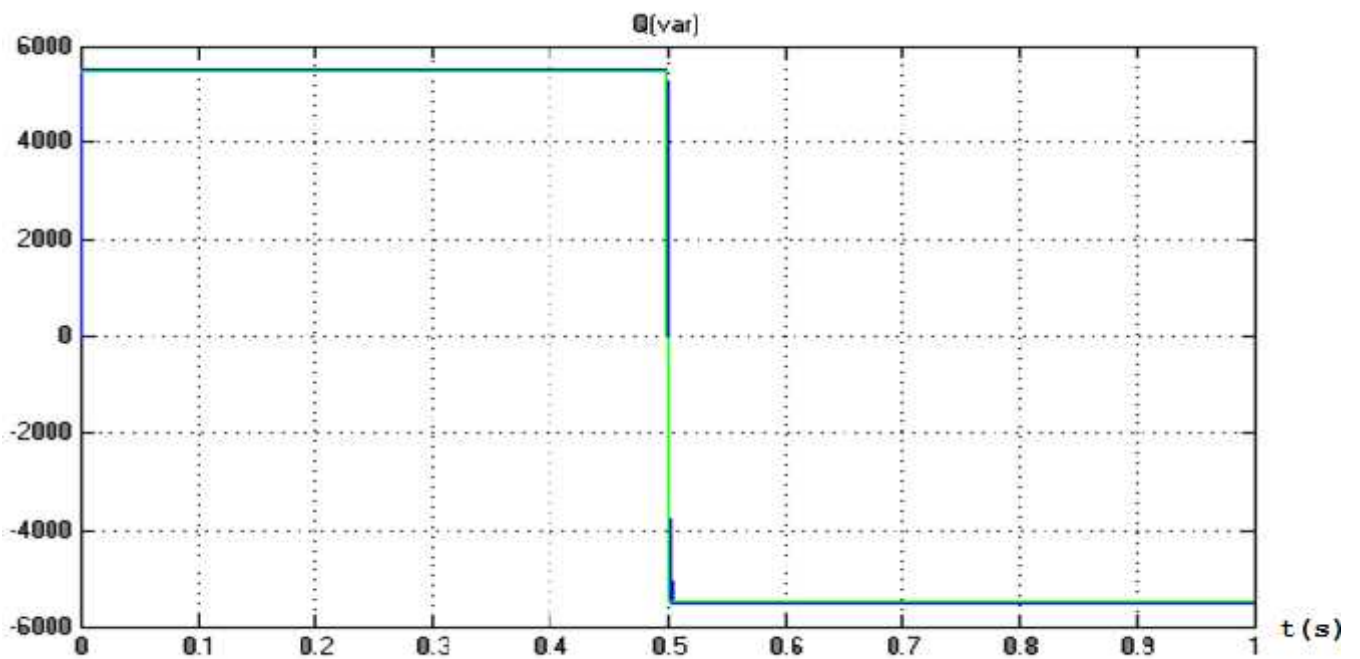
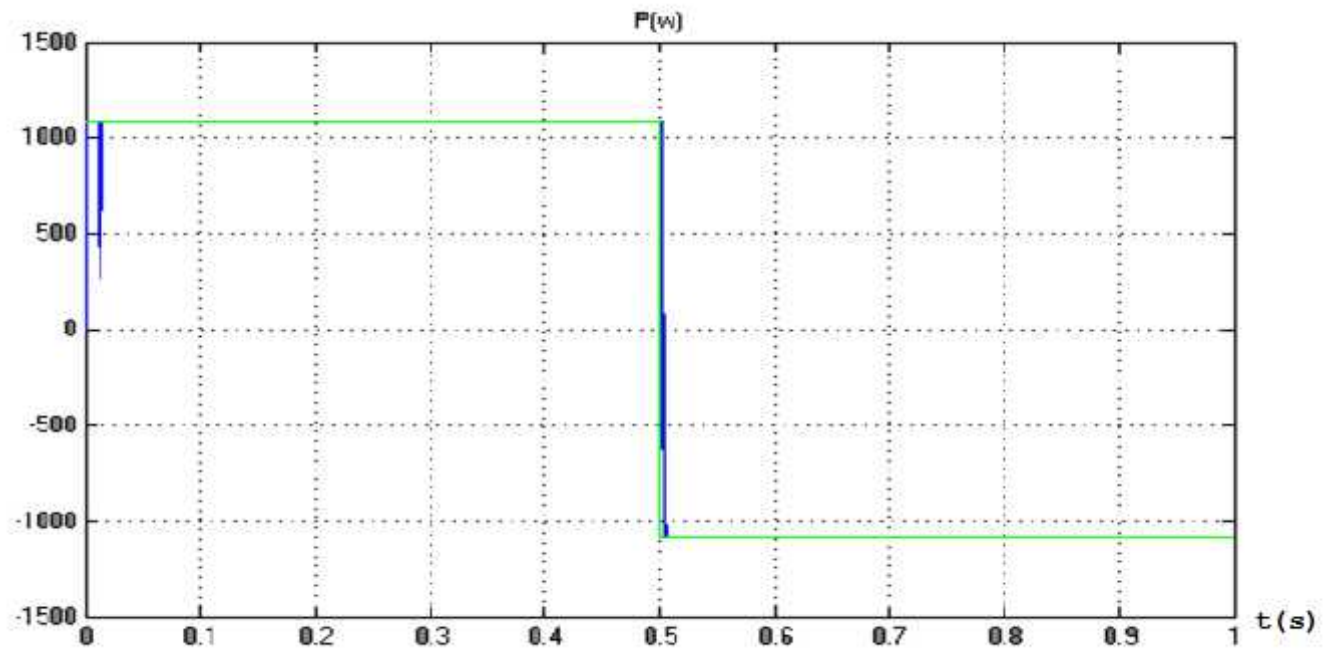


Figure 4.7 : schéma bloc proposé de contrôle du système global

## 4.7 Les résultats de simulations



**Figure 4.8** commande en puissance avec régulateurs mode glissant

#### **4.8. Interprétation**

*Les puissances active et réactive poursuivant parfaitement les variables désirées même en présence de la variation de consigne, en commande par mode glissant les réponses sont sans dépassement.*

#### **4.9. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté la commande d'un système de récupération de l'énergie éolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation. Dans un premier temps, un modèle de la génératrice a été proposé. Ensuite, une stratégie de commande par mode glissant de la génératrice asynchrone permettant un contrôle indépendant des puissances a été proposé. Les régulateurs des puissances actives et réactives par mode glissant ont été proposés et testés. Les résultats de simulation nous ont permis de juger les qualités de la commande à base du RMG associé à une commande adoucie. A travers les caractéristiques de réponse, on observe des bonnes performances même en présence des variations de consignes. La poursuite en puissance est sans dépassement. Le découplage est assuré.

# Introduction générale

---

La croissance constante de la consommation d'énergie sous toutes ses formes et les effets polluants associés, principalement causés par la combustion des énergies fossiles, sont au cœur de la problématique du développement durable et du soin de l'environnement dans une discussion pour l'avenir de la planète.

Le secteur de la génération électrique est le premier consommateur d'énergie primaire et les deux tiers de ses sources sont des carburants fossiles. Il est techniquement et économiquement capable de faire des efforts importants pour réduire les atteintes de l'activité humaine sur la climat et l'environnement. Une des possibilités est d'accroître le taux de production d'électricité à partir de ressource de type non-fossiles et renouvelables.

D'autre part, le processus de libéralisation des marchés électriques, qui a démarré il y a quelques années, permet le développement d'une offre nouvelle pour la production d'électricité. Certains producteurs de petite taille ne peuvent pas être raccordés au réseau de transport d'électricité, la connexion est alors faite directement au réseau de distribution. Ces comportements particuliers se sont progressivement développés et sont maintenant définis sous la nom de Génération Décentralisée.

De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de technologie éolienne est l'aérogénérateur; i.e. une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un courant électrique. La taille de ces turbines éoliennes modernes va de quelques watts jusqu'à plusieurs mégawatts. La majorité des systèmes commerciaux actuels sont des turbines éoliennes à axe horizontal (HAWT) avec des rotors à trois pales (tripales). Les turbines peuvent transférer de l'énergie électrique à un réseau de puissance à travers des transformateurs, lignes de transport et sous-stations associés.

Une grande partie du parc éolien actuel est constitué de systèmes raccordés au réseau public.. Pourtant, un des domaines où les technologies renouvelables peuvent se développer de façon substantielle est celui de l'électrification rurale ou des sites isolés. Quand les méthodes conventionnelles de fourniture d'énergie électrique comme

l'extension du réseau et l'utilisation de générateurs diesel deviennent trop coûteuses ou difficiles à implémenter, les technologies renouvelables, capables de générer de l'électricité sur place, sont une possibilité très intéressante, tant au niveau technique qu'économique.

Actuellement, le système éolien à vitesse variable basé sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est le plus utilisé dans les fermes éoliennes terrestres. Son principal avantage, et non des moindres, est d'avoir ses convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la MADA, ce qui en fait un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions possibles de conversion électromécanique (machine synchrone à aimants permanents par exemple). En effet, la MADA permet un fonctionnement sur une plage de vitesse de  $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme, garantissant ainsi un dimensionnement réduit des convertisseurs statiques car ceux-ci sont connectés entre le bobinage rotorique de la MADA et le réseau électrique.

Notre but est d'observer le comportement des commandes en puissance de la MADA face à la commande linéaire (orientation de flux statorique) et non linéaire avec alimentation parfaite. Notre travail est partagé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'état de l'art des turbines éoliennes, à leur fonctionnement ainsi qu'à leurs performances dans la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique à travers les lois de la mécanique des fluides, et la modélisation mathématique des aérogénérateurs. L'intérêt de la vitesse variable dans l'extraction de puissance est également étudié dans cette partie.

Le deuxième chapitre concerne la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, sa mise en équation permet de simuler son modèle, en l'alimentant par deux sources triphasées sinusoïdales parfaites : l'une au niveau du rotor et l'autre au niveau du stator.

Au troisième chapitre, on a utilisé la commande vectorielle par orientation du flux statorique, pour pouvoir commander la puissance active et réactive indépendamment.

Au quatrième chapitre, on a simulé la commande par mode glissement pour pouvoir extraire une bonne qualité des puissances avec la robustesse de la commande aux changements paramétriques.

Nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisageables.

# Conclusion Générale

---

Lors de cette étude nous avons modélisé la Machine asynchrone Double Alimentation pour la génération d'électricité à partir d'énergie éolienne. Celle-ci a été suivie des commandes adaptée en vue d'atteindre les meilleures performances des puissances active et réactif.

Notre travail s'est selon les étapes suivantes :

- L'établissement d'un état de l'art relatif aux énergies renouvelables et particulièrement l'énergie éolienne qu'utilise la MADA .
- L'étude aérodynamique donnant les bases théoriques justifiant le rôle de la MADA par son fonctionnement à la vitesse variable.
- L'établissement d'une stratégie de commande afin d'imposer des références de puissance active et réactives, de permettre un fonctionnement à vitesse variable et de conforter ainsi notre problématique.

Plusieurs modes de contrôle ont été donc établis en vue de les comparer et d'en retire le meilleur. Ainsi, plusieurs structures de commande ont été réalisée, desquelles nous avons choisi la structure indirecte en boucle fermée par sa robustesse et sa capacité à limiter les courants rotoriques donc à protéger le bobinage de la machine et le régulateur IP de par sa simplicité .

- L'établissement d'une autre commande qu'est la commande mode glissant

Nous avons pu noter alors, que la MADA fonctionnait d'une façon efficace dans les conditions auxquelles nous l'avons soumise. Cela prouve la viabilité de son application dans un système éolien.

Grace à la commande en puissance active et réactive de la MADA , celle-ci devient un outil intéressant pour le le gestionnaire du réseau. L'opérateur système est ainsi doté d'un dispositif qui lui est utile car ces puissances peuvent être positives ou négatives.



A travers cette étude nous obtenons non seulement un moyen générant de l'énergie avec un rendement optimal, mais aussi un outil améliorant et contribuant à la qualité du réseau.

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

- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.
- Utilisation d'autres types de régulateurs plus performants dans la commande du dispositif.
- Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : Logique floue, réseau de neurones.
- L'intégration d'un système de stockage inertiel.
- L'étude des perturbations de la production de l'énergie éolienne vis à vis des déséquilibres du réseau.

# Bibliographie

---

[1][www.ecosources.info](http://www.ecosources.info)

[2]Adam Mericki ; « étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance» Thèse de doctorat en génie électrique.5 avril 2005

[3][www.pomms.org](http://www.pomms.org)

[4]Abdenour Abdelli ;« optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive » Thèse de doctorat énergie électrique ;15octobre 2007

[5][www.altech.enr.com](http://www.altech.enr.com)

[6][www.cadarache.cea.fr](http://www.cadarache.cea.fr)

[7][www.windpower.org](http://www.windpower.org)

[8][www.volta-electricite.info](http://www.volta-electricite.info)

[9]P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi, "Eoliennes", *Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique*,

[10]Frédéric POITIERS, « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau», Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003.

[11] machines électrique tome 1(j. châtelain)A .62\_T.1EX1.livrer.

[12]S. KHELFA; "Commande vectorielle d'une machine à induction; impacts de la saturation de la machine et la modulation du convertisseur ", Thèse de Magister en électricité industrielle, Batna, 2001.

[13] Yacine Abderrahmane Bencherif « modélisation et commande d'une MADA pour la production de l'énergie éolienne» Thèse d'ingénieur en Electronique

[14]Patrick BRUNET « introduction a la commande vectorielle des machines asynchrone »

[15]F. Merahi « Alimentation et commande d'une machine asynchrone double alimentation (application a l'énergie éolien) » Thèse magister.ENP 2007

[16] BOUGURMI BRAHIM,DOUALI BELKACEM «commande et modélisation de générateur asynchrone dans un e installation éolienne autonome ou connecte a un réseau stable» Thèse d'ingénieur en Electronique ;2006

[17]ANIMEUR H «Contribution à la commande d'une Machine asynchrone double étoile par mode de glissement Thèse de doctorat Université EL Hadj Lak dar de BATNA MAI 2008

[18] BOUAOUICHE T Commande à structure variable et étude de l'intégration d'éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation sur le réseau électrique Thèse de doctorat de l'Université de Nantes mai 2007.

[20] Mohamed Adjoudj , Mohamed Abid, «commande par mode glissant d'une MADA monté dans une éolienne» laboratoire IRECOM sidi bel Abbas

[21] Thèse USTHB ; Etude de l'influence de l'éolienne sur le réseau de distribution, 2010

[22] Thèse de doctorat de l'Université Nancy I , Contrôle-commande d'un GADA avec système de stockage pour la production éolienne, par Armande BOYETTE ,2006

## Annexe A

### Les paramètres de la machine asynchrone double alimentation

symbole	description	valeur	unités
Rs	Résistance statorique	0.455	Ω
Rr	Résistance rotorique	0.62	Ω
Ls	Inductance cyclique statorique	0.084	H
Lr	Inductance cyclique rotorique	0.081	H
Lm	Inductance mutuelle	0.078	H
P	Nombre de paires de pôles	2	
J	Moment d'inertie	0.3125	Kg.m <sup>2</sup>
Pn	Puissance nominale	7500	W

## Annexe B

### Equation de park de la MADA dans les autre référentiels

Dans un référentiel lié au stator on a :  $\omega_s=0$  et  $\omega_r=\omega$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} + \omega \cdot \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} - \omega \cdot \Phi_{dr} \end{array} \right.$$

Dans un référentiel lié au rotor on a :  $\omega_r=0$  et  $\omega_s=\omega$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega \cdot \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} \end{array} \right.$$