

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département d'Automatique**

**Projet de fin d'études**

En vu de l'obtention du diplôme

**D'Ingénieur d'Etat en Automatique**

Intitulé

**Amélioration du rendement d'une  
éolienne à base d'une MADA  
connectée au réseau électrique**

Réalisé par :

**AYADI Mehdi Mohamed Lamine**

**MESSALI Amir**

Proposé et dirigé par :

**Pr H. CHEKIREB**

**Mr A. DJOUDI**

**Promotion : Juin 2015**

*Nous dédions ce travail à :*

*Nos très chers parents et grands parents*

*A toutes nos familles*

*A tous nos amis*

*A toute la promotion 2015*

*A tous ceux qui ont partagé nos joies et peines*

# *Remerciements*

Nous remercions avant tout, notre Dieu qui nous a éclairé la bonne voie, et nous a aidés à la parcourir.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre enseignant et encadreur Monsieur H.CHEKIREB pour nous avoir proposé ce sujet et bien encadré, ainsi que pour tous les conseils qu'il nous a prodigué et son aide tout au long de cette expérience.

Nous remercions très chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner notre travail.

Enfin nous ne pouvons terminer cet espace sans remercier nos camarades, avec lesquels nous avons passé des moments agréables à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ainsi qu'à l'Ecole Préparatoire en Sciences et Techniques d'Oran.

**الملخص :** في هذا العمل، نحن نركز على تحسين أداء نظام تحويل الطاقة الهوائية باستعمال ماكينة لامتزامنة ذات تغذية مزدوجة، و هذا باستخدام تقنية التحكم الانزلاقي، ذلك في غياب أو وجود اضطرابات في الشبكة الكهربائية.

**كلمات مفتاحية :** توربينات الرياح، ماكينة لامتزامنة ذات تغذية مزدوجة، النمط الانزلاقي، أقصى تتبع للطاقة، ارتفاع فرق الكمون، إنخفاض فرق الكمون.

**Résumé :** Dans ce travail, nous nous intéressons à l'amélioration du rendement d'une chaîne éolienne à l'aide d'une MADA, en utilisant la commande par mode de glissement, et ceci en absence ou présence de perturbations dans le réseau électrique.

**Mots clés :** Éolienne, MADA, mode glissant, MPPT, surtension, baisse de tension.

**Abstract:** In this work, we focus on improving the performance of a wind chain with a doubly-fed induction generator, using the sliding mode control, and this in the absence or presence of disturbances in the electric-power transmission.

**Key words:** Wind turbine, doubly-fed induction generator, sliding mode, MPPT, overvoltage, voltage reduction.

**Table des matières**

Résumé ..... 1

Table des matières ..... 2

Table des illustrations ..... 5

Nomenclatures ..... 7

Introduction générale ..... 11

Chapitre I Généralités sur la Conversion Eolienne ..... 13

    I.1 Introduction ..... 14

    I.2 Généralité sur L'éolienne ..... 15

    I.3 Choix du type d'éolienne utilisée ..... 16

    I.4 Production optimale d'énergie dans un système éolien ..... 18

    I.5 Energie cinétique du vent et conversion en énergie mécanique ..... 19

    I.6 Choix de la machines électriques et systèmes de conversion ..... 24

        I.6.1 Machines asynchrones à double alimentation (MADA) ..... 24

        I.6.2 Différents régimes de fonctionnement de la MADA ..... 24

        I.6.3 Fonctionnement en génératrice à vitesse variable ..... 25

        I.6.4 Avantages de cette machine ..... 26

    I.7 Conclusion ..... 27

Chapitre II Modélisation du dispositif ..... 28

    II.1 Introduction ..... 29

    II.2 Partie mécanique ..... 29

        II.2.1 Modèle simplifié de la turbine ..... 29

    II.3 Partie Electrique ..... 32

        II.3.1 Modélisation du convertisseur « back to back » ..... 32

        II.3.2 Modèle de la source dans le référentiel de Park ..... 35

            II.3.2.1 Mise en équation de la source triphasée ..... 35

        II.3.3 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation ..... 37

            II.3.3.1 Modèle de Park de la MADA ..... 38

II.3.3.2 Equations d'état du système .....	39
II.4 Conclusion.....	45
Chapitre III Commande par les modes glissants de la puissance active et celle réactive de la MADA .....	46
III.1 Introduction .....	47
III.2 Principe et conception de la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable.....	47
III.2.1 Choix des surfaces de glissement.....	49
III.2.1 Conditions de convergence du mode de glissement .....	49
III.3 Synthèse de la loi de commande .....	50
III.4 Contrôle des convertisseurs utilisés .....	53
III.4.1 Contrôle du CCR.....	53
III.4.2 Contrôle du CCM.....	55
III.5 Modèle du vent.....	55
III.6 Maximisation de la puissance extraite.....	57
III.6 .1 Stratégie de la maximisation de puissance avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure .....	57
III.6.2 Stratégie de la maximisation de puissance sans connaissance de la courbe caractéristique de la voilure .....	61
III.7 Test de robustesse .....	64
III.8 Conclusion.....	66
Chapitre IV Influence des Perturbations du réseau Electrique .....	67
IV.1 Introduction.....	68
IV.2 Les perturbations électriques en BT .....	68
IV.2.1 Les tensions industrielles BT .....	69
IV.2.2 Les tensions nominales .....	69
IV.2.3 La fréquence.....	70
IV.2.4 Les perturbations d'amplitude .....	70
IV.3 Norme EN 50160.....	70
IV.4 Problèmes du réseau électrique traité.....	74
IV.4.1 Surtension .....	74

---

IV.4.2 Creux de tension .....	74
IV.5 Simulation et interprétation .....	75
IV.5.1 Surtension .....	75
IV.5.2 Creux de tension .....	77
IV.6 Conclusion.....	81
Conclusion générale et perspectives .....	82
Annexe A : Transformations Tri_Bi.....	84
Annexe B : Paramètres de la chaine éolienne .....	92
Bibliographie .....	94

## Table des illustrations

### Chapitre I Généralités sur la Conversion Eolienne

Fig. I.1 La conversion d'énergie dans une chaîne éolienne.....	14
Fig. I.2 Principaux composants d'une centrale éolienne.....	16
Fig. I.3 Eoliennes à axe horizontal.....	17
Fig. I.4 Puissance en fonction de la vitesse de rotation de l'arbre de la machine.....	18
Fig. I.5 Exploitation de l'énergie optimale.....	18
Fig. I.6 Lieu des maxima. ....	19
Fig. I.7 Tube de courant autour d'une éolienne. ....	20
Fig. I.8 Coefficient de puissance .....	21
Fig. I.9 Variation du coefficient de puissance en fonction de l'angle d'orientation des pales $\beta$ et du ratio de vitesse $\lambda$ .....	22
Fig. I.10 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.....	23
Fig. I.11 Circulation de la puissance en hyposynchrone.....	26
Fig. I.12 Circulation de la puissance en hypersynchrone.....	26

### Chapitre II Modélisation du dispositif

Fig. II.1 Schéma d'une turbine éolienne.....	30
Fig. II.2 Schéma bloc du modèle de la turbine.....	32
Fig. II.3 Circuit double alimentation de la machine asynchrone.....	33
Fig. II.4 Onduleur à deux niveaux à base de transistors IGBT.....	34
Fig. II.5 Repère (d q) lié au vecteur tension du réseau $\vec{V}_s$ .....	36
Fig. II.6 Orientation de l'axe d sur le vecteur tension au stator.....	44

### Chapitre III Contrôle par les modes glissants de la puissance active et celle réactive de la MADA

Fig. III.1 Modes de fonctionnement dans le plan de phase.....	48
Fig. III.2 Trajectoire du vecteur l'état vis-à-vis de la surface.....	50
Fig. III.3 Le phénomène de broutement.....	52
Fig. III.4 Fonction saturation.....	53
Fig. III.5 Schéma de régulation du CCR.....	54

Fig. III.6 Schéma de régulation du CCM.....	55
Fig. III.7 Composante lente de la vitesse du vent.....	56
Fig. III.8 Vitesse du vent tenant compte de la composante rapide.....	56
Fig. III.9 Caractéristique d'une voilure.....	57
Fig. III.10 Caractéristique de la turbine éolienne.....	58
Fig. III.11 Test de l'éolienne dans le cas où la voilure est connue.....	61
Fig. III.12 Test de l'éolienne dans le cas de l'utilisation d'un algorithme du type 'MPPT'.....	63
Fig. III.13 Test de l'éolienne dans le cas où la voilure est connue en présence des variations paramétriques.....	65
Tableau III.1 Règles issues de la méthode 'perturber-observer'.....	62

## Chapitre IV Influence des Perturbations du Réseau Electrique

Fig. IV.1 Surtension et creux de tension.....	75
Fig. IV.2 Test de l'éolienne dans le cas où le réseau subit une surtension.....	77
Fig. IV.3 Test de l'éolienne dans le cas où le réseau subit une baisse de tension.....	80
Tableau IV.1 Comparaison des exigences de la tension d'alimentation selon l'EN50160 et les normes CEM EN 61000. ....	72
Tableau IV.2 Valeurs des tensions harmoniques individuel les aux points de fourniture, jusqu'au rang 25, exprimées en pourcentage de $U_n$ .....	73

## NOTATION

<b><i>MADA</i></b>	Machine à double alimentation
<b><math>\rho</math></b>	La densité d'air
<b><i>S</i></b>	La surface active de la voilure
<b><i>m</i></b>	La masse d'air en mouvement
<b><math>P_r</math></b>	La puissance extraite du vent
<b><math>P_t</math></b>	La puissance totale théorique
<b><math>P_{are}</math></b>	La puissance aérodynamique de l'éolienne
<b><math>C_p</math></b>	Le coefficient de puissance
<b><math>\beta</math></b>	L'angle d'orientation des pales
<b><math>\lambda</math></b>	La vitesse relative
<b><i>CCM</i></b>	Convertisseur coté MADA
<b><i>CCR</i></b>	Convertisseur coté réseau
<b><i>R</i></b>	Longueur d'une pale
<b><math>V_v</math></b>	Vitesse du vent
<b><math>V_{est}</math></b>	Vitesse du vent estimé
<b><math>\Omega_{turb}</math></b>	Vitesse de rotation de la turbine
<b><i>G</i></b>	Gain du multiplicateur
<b><math>\Omega_{mec}</math></b>	Vitesse mécanique
<b><i>f</i></b>	Le coefficient de frottement visqueux
<b><math>J_{t1}</math></b>	Inertie totale des masses en rotation

$C_D$	Couple dynamique
$C_{mec}$	Couple produit par la turbine au niveau de l'arbre
$C_{em}$	Couple électromagnétique
$C_{vis}$	Couple visqueux
$J_{t2}$	Inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice
$C_{aer}$	Le couple aérodynamique
$[v_s]_{abc}$	Vecteurs de tensions triphasés statorique
$[v_r]_{abc}$	Vecteurs de tensions triphasés rotorique
$[v_s]_{dq}$	Vecteur de tension biphasé statorique
$[v_r]_{dq}$	Vecteur de tension biphasé rotorique
$[i]_{abc}$	Vecteurs de courants triphasés statorique
$[i]_{dq}$	Vecteur de courant biphasés statorique
$P(\theta)$	Matrice de passage biphasé-triphasé
$R_s$	Résistances statorique d'une phase
$R_r$	Résistances rotorique d'une phase
$M$	Inductance mutuelle
$[\Psi_s]_{abc}$	Vecteurs de flux statorique
$[\Psi_r]_{abc}$	Vecteurs de flux rotorique
$\psi_{ds}$	Flux statorique suivant l'axe d
$\psi_{qs}$	Flux statorique suivant l'axe q
$\psi_{dr}$	Flux rotorique suivant l'axe d

$\psi_{qr}$	Flux rotorique suivant l'axe q
$[L_s]$	La matrice d'inductance statorique.
$[L_r]$	La matrice d'inductance rotorique.
$(d,q)$	Axes correspondants au repère diphasé tournant
$v_{ds}$	Tension statorique suivant l'axe d
$v_{dr}$	Tension rotorique suivant l'axe d
$v_{qs}$	Tension statorique suivant l'axe q
$v_{qr}$	Tension rotorique suivant l'axe q
$V_s$	Tension statorique
$i_{ds}$	Courant statorique suivant l'axe d
$i_{dr}$	Courant rotorique suivant l'axe d
$i_{qs}$	Courant statorique suivant l'axe q
$i_{rq}$	Courant rotorique suivant l'axe q
$\omega_s$	Vitesse de rotation vu au stator
$\omega_r$	Vitesse de rotation vu au rotor
$\omega_m$	Vitesse machine
$p$	Nombre de paires de pole
$T_s$	Constante de temps du stator
$T_r$	Constante de temps du rotor
$P_s$	Puissance active statorique
$Q_s$	Puissance réactive statorique

---

$P_r$	Puissance active rotorique
$Q_r$	Puissance réactive rotorique
$S(x)$	Surface de glissement
$e(x)$	Erreur de réglage
$P_{ref}$	Puissance active statorique de référence
$Q_{ref}$	Puissance réactive statorique de référence
$C_{p_{opt}}$	Le coefficient de puissance optimal
$MLI$	Modulation de largeur d'impulsion
$PI$	Proportionnel intégral
$BT$	Basse tension
$MT$	Moyenne tension
$HT$	Haute tension
$U_n$	Tension nominale
$rms$	Tension nominale efficace

## Introduction générale

La croissance constante de la consommation de l'énergie sous toutes ses formes principalement, la combustion des énergies fossiles, représentent l'un des facteurs majeurs de la pollution de l'environnement. Ajouter à cela, le fait que cette source n'est pas éternelle, car les réserves fossiles ne sont disponibles que pour quelques décennies. Ces deux questions sont au cœur de la problématique du développement durable et de la protection de l'environnement.

Par ailleurs, nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables. Longtemps négligées, les techniques d'extraction de la puissance [BEN-12] de ces ressources demandent des recherches et développements plus approfondis visant à fiabiliser et à augmenter l'efficacité énergétique.

C'est pour atteindre cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur une énergie renouvelable qui est en plein essor actuellement, « l'énergie éolienne ». En 2008, la production annuelle totale de toutes les installations éoliennes de la planète a atteint 260 TWh, soit l'équivalent de plus de 1.5% de la consommation mondiale en électricité.

De ce fait, l'énergie éolienne apparaît comme étant une bonne initiative pour éviter l'énergie nucléaire, non pas pour remplacer les ressources conventionnelles, mais plutôt comme une énergie complémentaire aux énergies traditionnelles. Une des possibilités est d'accroître le taux de production d'électricité à partir des ressources de type non-fossiles et renouvelables [MIG-07] & [MIR-05].

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé. L'idée de décentraliser l'énergie en produisant de petites quantités de façon localisée (proche du besoin) est de plus en plus admise. Parmi les applications potentielles de ce qu'on a l'habitude de qualifier de « petit éolien » (gamme jusqu'à 100kW), on peut citer le domaine de l'électrification rurale pour une consommation locale d'électricité ou pour sa transformation vers d'autres secteurs énergétiques.

De nos jours, la machine asynchrone double alimentation (MADA) est la machine à vitesse variable la plus couramment utilisée dans les unités de production éolienne supérieure à 1MW [MIN-10]. Les éoliennes sont aussi équipées d'un système de commande basé sur les convertisseurs d'électronique de puissance pour s'adapter aux conditions du vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant chaque fois le point de fonctionnement optimal. Le présent mémoire est donc consacré à la commande de la puissance active et réactive d'une MADA connectée au réseau et au maintien de la production d'énergie en présence des perturbations affectant la tension du réseau. Pour ce faire, ce mémoire est organisé comme suit :

Au chapitre I, sont présentées des généralités sur l'énergie éolienne. Dans ce cadre, la technologie éolienne est alors abordée. On présentera des généralités sur la MADA, ses applications, ses différents modes de fonctionnement et les convertisseurs qui leur sont associés.

Le chapitre II est dédié à la modélisation des éléments fondamentaux de la chaîne de conversion d'énergie à base de la MADA. Ainsi, nous présentons tout d'abord un modèle de la partie mécanique de ce système qui n'est autre que la turbine éolienne. Puis, nous enchainons par la modélisation de l'alimentation de la MADA par un convertisseur du type « back to back ». Ce chapitre s'achève par la modélisation de la MADA où un modèle d'état est développé lequel est basé sur les grandeurs électriques du stator.

Le troisième chapitre est consacré à la commande par les modes glissants de la puissance active et réactive au stator de la MADA. Tout d'abord, est fourni un bref rappel théorique sur la technique des modes glissants. Par la suite, nous établissons la loi de commande des puissances au stator par la technique des modes glissants. Nous simulons le comportement de la MADA sous la conduite de cette loi de commande pour deux cas. Ces derniers sont relatifs à la situation où la caractéristique de la voilure est connue ou inconnue ce qui fixe la méthode pour déterminer la référence de la puissance optimale. Dans le cas inconnu, un algorithme de la poursuite du point maximal MPPT est nécessaire pour générer la référence de la puissance optimale.

Le chapitre IV est dévolu aux perturbations du réseau électrique et leurs influences sur le comportement de la production de la puissance électrique par la MADA. Nous nous intéressés surtout à l'effet d'une surtension ou d'un creux de tension au niveau du réseau sur les performances de la MADA. Pour ce faire, nous simulons le comportement de la MADA dans ces situations.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale qui résume le travail effectué, ainsi que les perspectives.

# Chapitre I

# Généralités sur la Conversion Eolienne

## I.1 Introduction

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Considérée comme étant la moins chère des énergies renouvelables, cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement, car elle répond à leur besoin urgent en électricité. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales à énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie peut être facilement intégré dans un système électrique existant. Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

L'avantage principale de l'énergie éolienne est qu'elle est "renouvelable" non dégradée, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif, et qui respecte l'environnement. Géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). Cependant, elle est aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts). Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent assez chers.

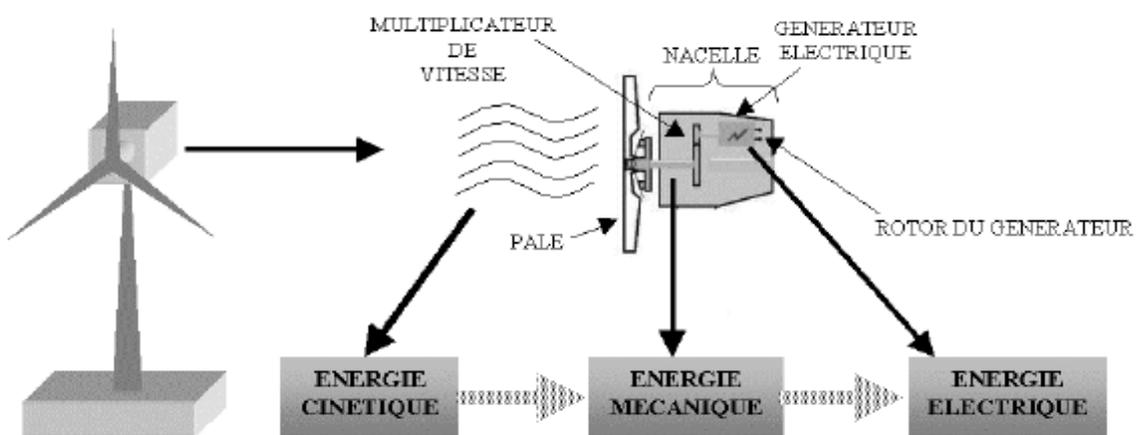


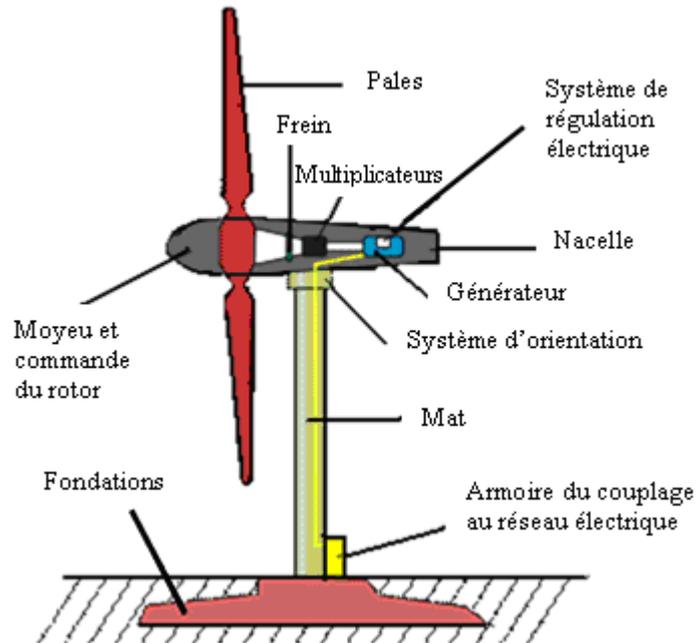
Fig. I.1 Conversion d'énergie dans une chaîne éolienne.

## I.2 Généralité sur L'éolienne

L'éolienne est un dispositif de conversion d'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie électrique. L'énergie cinétique du vent est tout d'abord transformée en énergie mécanique au niveau d'une turbine puis en énergie électrique au niveau d'une génératrice. Il est évident que ces transformations s'opèrent avec une certaine perte d'énergie.

Fondamentalement, une centrale éolienne est constituée de trois parties principales : les pales (entre 1 et 3), la nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement [MER-07].

- **La tour (le mât) :** est généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, elle doit être la plus haute que possible pour éviter les perturbations près du sol.
- **Le rotor :** formé par des pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement entre 1 à 3.
- **Les pales :** permettent de capter la puissance du vent et de la transférer au rotor. La majorité des installations sont dotées de système tripale ,et se caractérisent par leur géométrie et matériaux de fabrication qui doivent assurer de bonnes performances aérodynamiques.
- **La nacelle :** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbre lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le système est également équipé d'un frein à disque, différent du frein aérodynamique, permettant d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur utilisé est généralement une machine synchrone ou asynchrone. On retrouve également un dispositif hydraulique ou électrique d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela, viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.



**Fig. I.2 Principaux composants d'une centrale éolienne**

L'éolienne utilise l'énergie cinétique du vent pour produire de l'électricité. L'énergie du vent fait tourner les pales autour d'un rotor. Ce dernier est connecté à l'arbre principal qui entraîne la génératrice produisant de l'électricité. Les éoliennes sont montées au sommet d'une tour de manière à capturer le plus d'énergie possible. A une hauteur de 30m ou plus, elles peuvent tirer parti d'un vent plus rapide et moins turbulent. Une pale exploite le même principe aérodynamique appliquée à une aile d'avion. Lorsque le vent souffle, une poche d'air à basse pression (ou dépression) se forme derrière la pale, cette poche d'air à basse pression tire la pale vers elle, ce qui a pour effet de faire tourner le rotor.

C'est ce qu'on appelle la portance, qui est caractérisée généralement par une force beaucoup plus forte que celle du vent contre la pale. C'est ce qu'on appelle la traînée. La combinaison des effets des deux forces (celle de la portance et de la traînée) permet de tourner le rotor comme une hélice et la rotation de l'arbre entraîne la génératrice à produire de l'énergie électrique.

### I.3 Choix du type d'éolienne utilisée

Il existe plusieurs types d'éolienne selon leur structure ou selon leur vitesse.

Les structures les plus connues sont les éoliennes à axe vertical **[LEC]**.

Il existe aussi les éoliennes à axe horizontal, les éoliennes rapides (turbo-éolienne) et les éoliennes lentes.

Notre choix s'est porté sur les éoliennes à axe horizontal, car elle présente plus d'avantages en termes de production d'énergie, vu que notre but principal est d'optimiser cette production.

Les éoliennes à axe horizontal [SI] sont les plus utilisées, basées essentiellement sur la technologie des moulins à vent. Leurs pales sont aérodynamiques, tout droit inspirées des ailes d'avions. Ainsi, la portance utilisée pour maintenir un avion en vol, est plutôt exploitée pour générer un couple moteur entraînant la rotation.



**Fig. I.3 Eoliennes à axe horizontal.**

Si on classe les éoliennes selon leur vitesse, deux grandes familles se distinguent, les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable.

Pour les éoliennes à vitesse fixe, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Ce qui implique que sa vitesse est imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. Le couple mécanique produit par la turbine tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Donc fonctionnant en hypersynchrone, elle fournit de la puissance électrique au réseau.

On distingue deux types d'éoliennes à vitesse fixe : les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables.

Cependant notre choix s'est porté sur les éoliennes à vitesse variable, car pour optimiser la puissance débitée en fonction du vent, il est souhaitable de pouvoir régler la vitesse de rotation de l'éolienne. L'idée est de réaliser un générateur à fréquence fixe et à vitesse variable. Le générateur à vitesse variable assure un fonctionnement dans une large gamme de la vitesse du vent donc permet de récupérer un maximum de puissance tout en réduisant les nuisances sonores lors d'un fonctionnement à faible vitesse du vent. En vitesse variable, on régule le système de façon à ce que pour chaque vitesse du vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. Ce mode de fonctionnement est appelé '**Maximum Power Point Tracking**' [SAC-10 & [YAM-91]]. La puissance maximale est atteinte pour une vitesse de rotation de la turbine donnée par la caractéristique de l'éolienne de la **Figure (I.4)**.

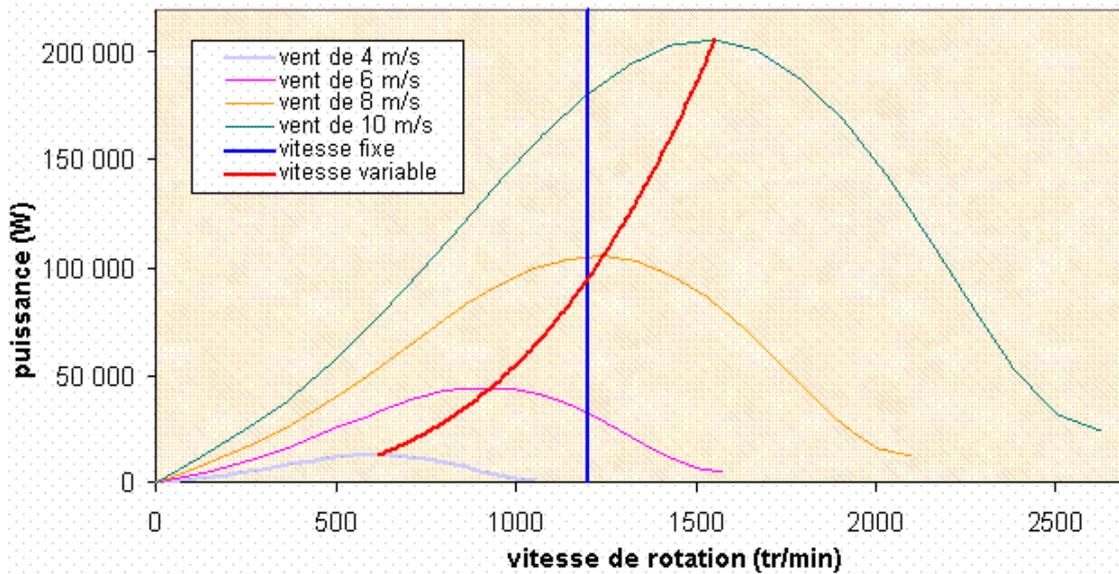


Fig. I.4 Puissance en fonction de la vitesse de rotation de l'arbre de la turbine.

#### I.4 Production optimale d'énergie dans un système éolien

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la **Figure (I.5)**.

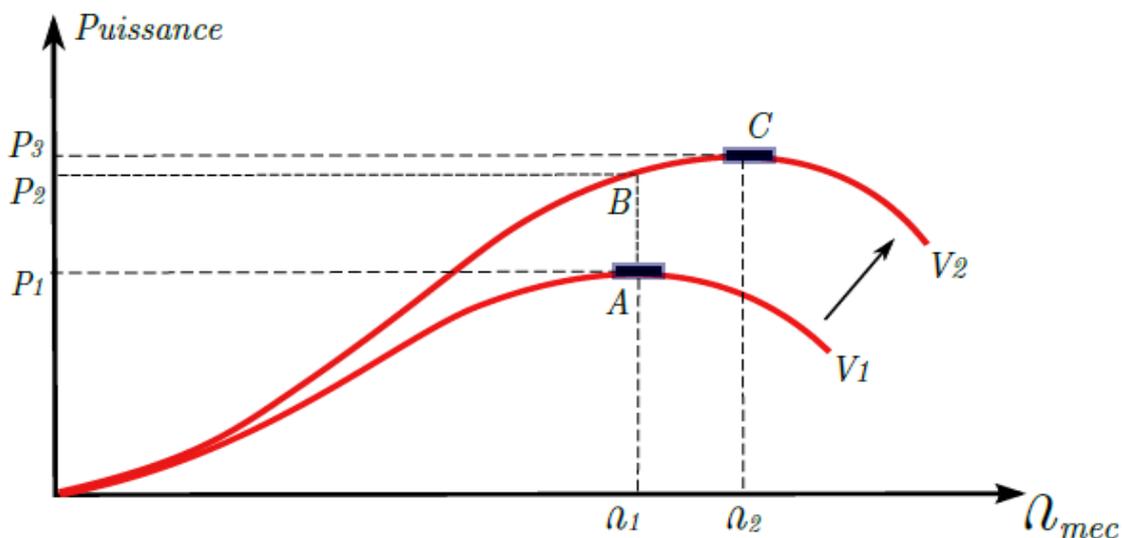


Fig. I.5 Exploitation de l'énergie optimale.

Pour une vitesse  $v_1$  du vent et une vitesse mécanique de la génératrice  $\Omega_1$ , on recueille la puissance  $P_1$  (point A). Si par exemple, la vitesse du vent passe de  $v_1$  à  $v_2$  et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance obtenue

serait  $P_2$ , elle se trouve sur la 2<sup>ème</sup> caractéristique (au point B). Cependant, la puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (au point C). Par conséquent, si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de ramener la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure  $\Omega_2$ . Pratiquement, cela revient à rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée [BEN-11].

Il est donc nécessaire d'introduire la variation de vitesse d'une éolienne. En effet, la vitesse de la turbine doit être adaptée par rapport à la vitesse du vent en suivant une consigne lieu des maxima (Figure (I.6)). C'est pour cela que les éoliennes à forte et moyenne puissance raccordées au réseau fonctionnent à vitesse variable.

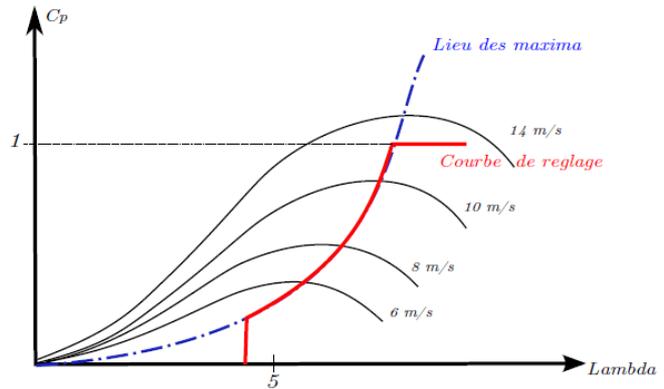
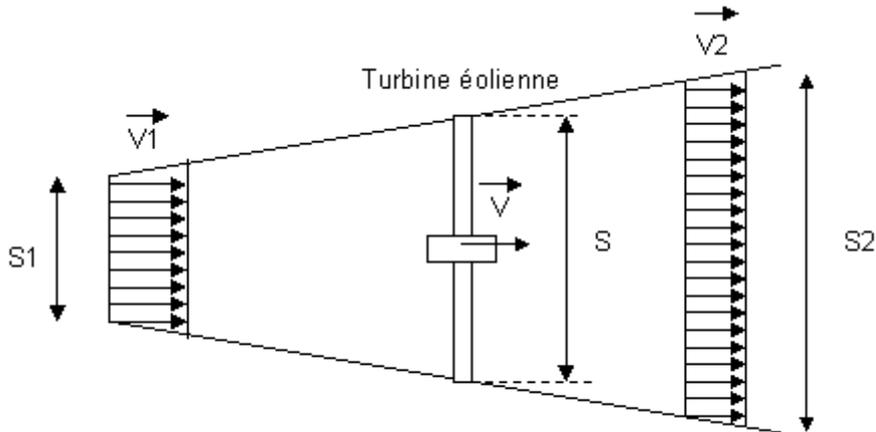


Fig. I.6 Lieu des maxima

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence calculée pour maximiser la puissance extraite.

### I.5 Energie cinétique du vent et conversion en énergie mécanique (notions théoriques).

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (I.7) sur lequel on a représenté la vitesse du vent non perturbé  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval après passage à travers le rotor. Nous supposons que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse  $V_1$  et la vitesse du vent  $V_2$  soit  $(V_1 + V_2)/2$  [BAT -12].



**Fig. I.7 Tube de courant autour d'une éolienne**

La masse d'air en mouvement, de densité  $\rho$ , traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est donnée par la relation :

$$m = \rho S \frac{V_1 + V_2}{2} \tag{I.1}$$

La puissance  $P_r$  extraite s'exprime alors comme la variation de l'énergie cinétique de cette masse (seconde loi de Newton) :

$$P_r = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} m = \frac{(V_1^2 - V_2^2) \rho S (V_1 + V_2)}{4} \tag{I.2}$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance théorique  $P_t$  correspondante serait alors :

$$P_t = \frac{\rho S V_1^3}{2} \tag{I.3}$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

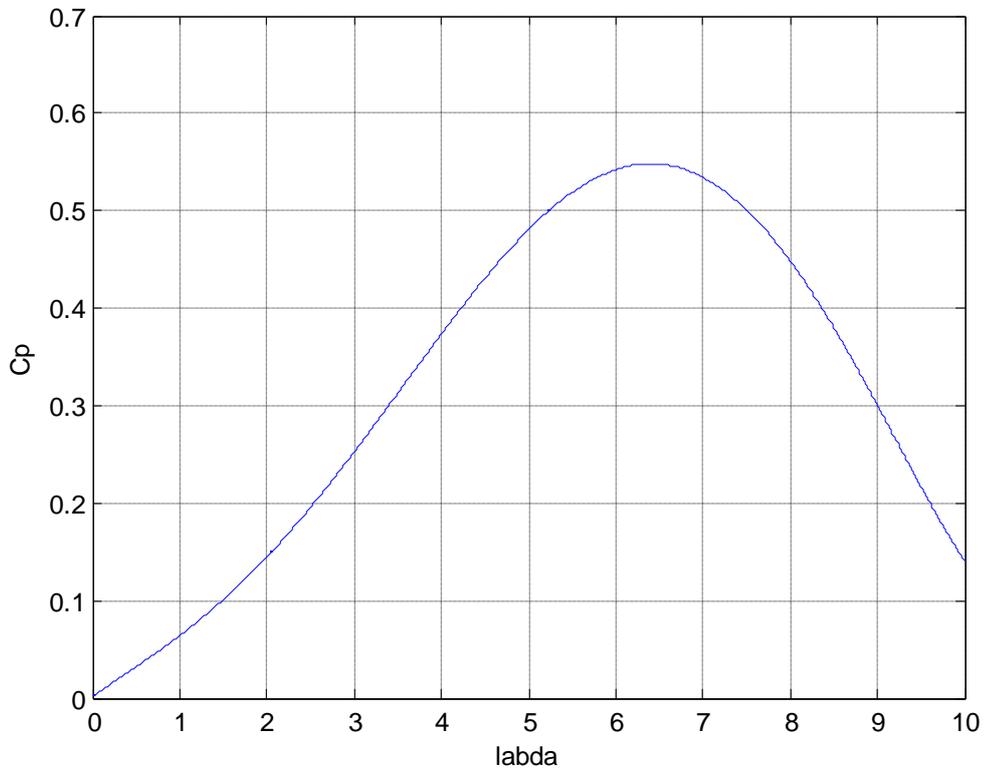
$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \tag{I.4}$$

Le ratio  $P_r/P_t$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  [POI-03], il s'exprime par la relation (I.5) et présente un maxima de 16/27 soit 0,59 [[HER-01].

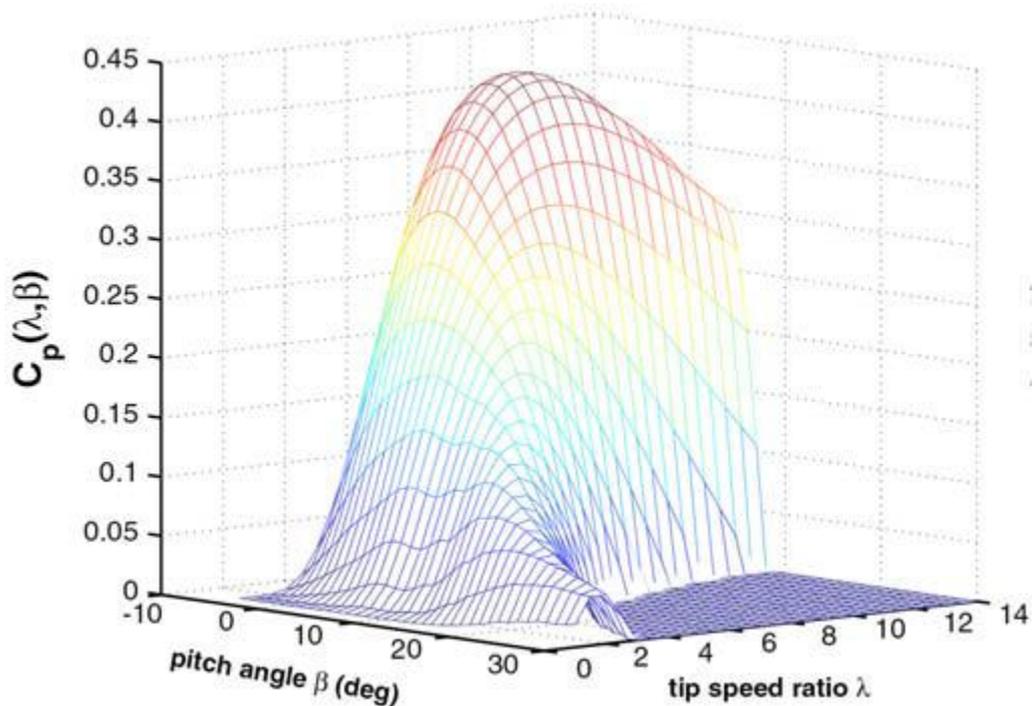
$$C_p = \frac{P_r}{P_t} = 0.59 \tag{I.5}$$

C'est cette limite théorique appelée limite de Betz [LEC-99] qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse du vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_v} \tag{I.6}$$



**Fig. I.8 Coefficient de puissance d'une turbine**



**Fig. I.9** Variation du coefficient de puissance en fonction de l'angle d'orientation des pales  $\beta$  et du ratio de vitesse  $\lambda$

L'angle de calage  $\beta$  joue un rôle assez important dans une éolienne, ce dernier intervient indirectement sur la puissance au travers du coefficient de puissance [POI-03] comme le montre la (Figure ( I.9)).

La puissance mécanique  $P_r$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur [HEI-98] s'exprime ainsi :

$$P_r = C_p P_t = \frac{1}{2} C_p \rho S V_1^3 \quad (\text{I.7})$$

Pour différentes valeurs de l'angle d'orientation des pales, il existe une valeur de  $\lambda$  appelée  $\lambda_{opt}$  pour laquelle on a un coefficient de puissance  $C_p$  maximale, et par voie de conséquence une puissance captée maximale.

Il est alors possible d'élaborer des lois de commande qui permettent de capter la puissance maximale quelque soit la vitesse du vent jusqu'à la puissance nominale de la génératrice où la puissance extraite est limitée à cette valeur.

Dans la littérature, des expressions approchées du coefficient de puissance pour les turbines des éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable sont proposées :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.44 \left( \frac{125}{\lambda_i} - 6.94 \right) e^{-\frac{16.5}{\lambda_i}} \quad (I.8)$$

Avec :  $\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} + \frac{0.002}{\beta^3 + 1}}$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left( \frac{151}{\lambda_i} - 0.58 \beta - 0.002 \beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{-\frac{18.4}{\lambda_i}} \quad (I.9)$$

Avec :  $\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02 \beta} + \frac{0.003}{\beta^3 + 1}}$

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la **Figure (I.10)**, les maxima théoriques des courbes de puissance [ABD-07] ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse du vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple.

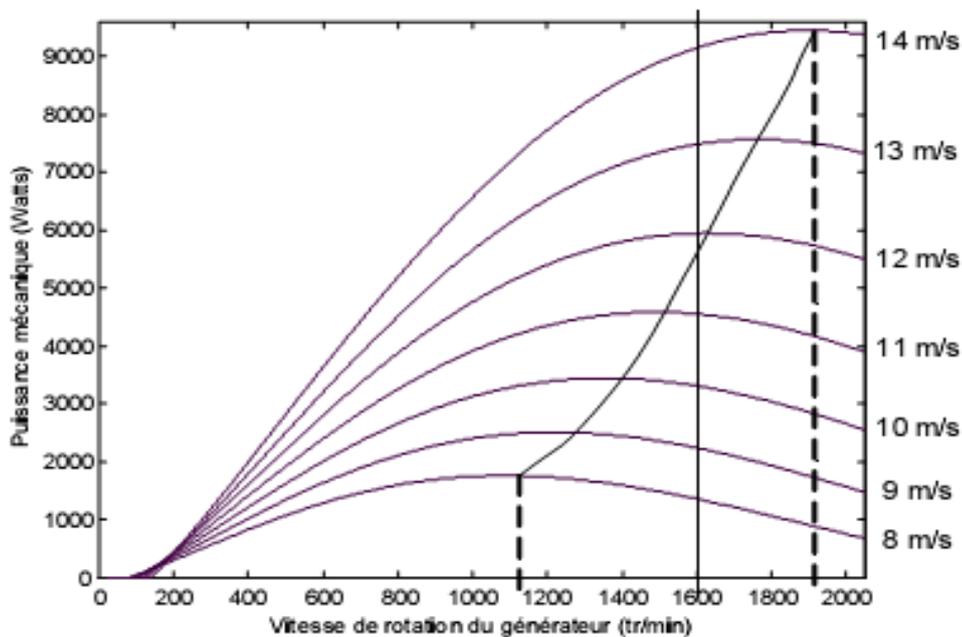


Fig. I.10 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

## I.6 Choix de la génératrice et système de conversion

Plusieurs types de machine [CAM-03] [DJO -08] [HAM-08] peuvent être utilisés en génératrice dans les systèmes éoliens, les plus répandus sont :

Les machines synchrones :

- A rotor bobiné
- A aimant permanent

Les machines asynchrones :

- A cage d'écureuil
- A rotor bobiné
- Doublement alimentée

Notre choix s'est porté sur les machines asynchrones à double alimentation à rotor bobiné, car c'est les plus adaptées pour les éolienne à vitesse variable, et présentent plusieurs avantages, qui sont mentionnés dans ce sous chapitre.

### I.6.1 Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné possède un stator triphasé identique à celui d'une machine asynchrone classique, et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes utilisés. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence du bobinage au rotor est alors compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur.

### I.6.2 Différents régimes de fonctionnement de la MADA

Les différents régimes de fonctionnement de la MADA sont définis en fonction du glissement [MIR-05], on les classe comme suit :

**1. 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  $f_s$ . Donc, la MADA se comporte simplement comme un transformateur.

**2. hypo synchrone ( $0 < g < 1$ )**

En tournant le rotor dans la direction du flux du stator, la fréquence  $f_r$  de glissement du rotor décroît. Plus la vitesse du rotor approche la vitesse de synchronisme, plus  $f_r$  tend vers 0, et plus la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible, ce qui correspond à la vitesse de synchronisme.

**3. synchrone ( $g=0$ )**

Quand la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence  $f_r$  de glissement du rotor s'annule. Dans ce cas, les enroulements du rotor tournent à 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. On constate que la puissance du stator est égale à celle du réseau, alors que celle du rotor est nulle (l'écoulement de puissance entre le réseau et le rotor s'arrête).

**4. hyper synchrone ( $g < 0$ )**

Par accélération, le flux rotorique dépasse le flux statorique et la fréquence de glissement du rotor devient négative. L'augmentation de la vitesse des enroulements du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.

**I.6.3 Fonctionnement en génératrice à vitesse variable**

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, cependant la grande différence réside dans le fait que dans MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et en dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions au rotor qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de faire fonctionner la MADA en hyper ou hypo synchronisme [MER-07]. Nous nous intéressons au fonctionnement générateur.

**➤ Fonctionnement en mode générateur hyposynchrone :**

La **Figure (I.11)** montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [DJO -08].

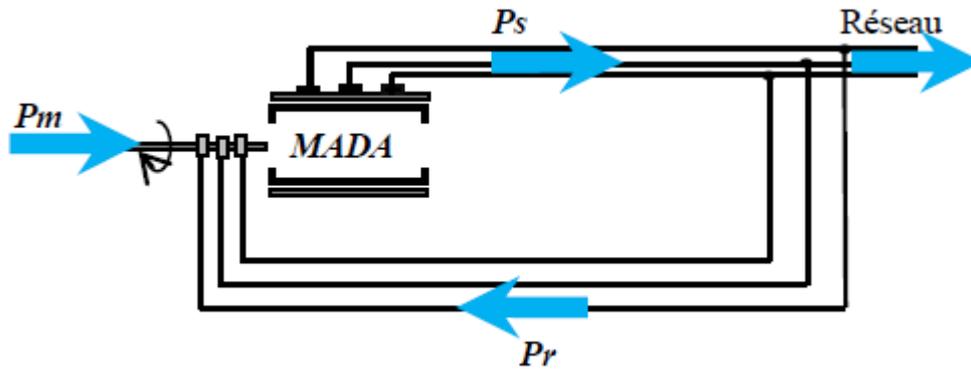


Fig. I.11 Circulation de la puissance en hyposynchrone.

➤ **Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone :**

La **Figure (I.12)** montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée comme étant des pertes joule dans le rotor [DJO -08].

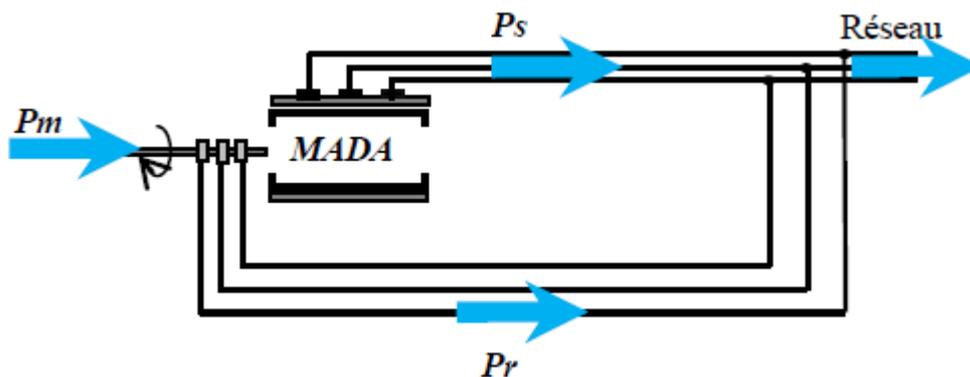


Fig. I.12 Circulation de la puissance en hypersynchrone.

#### I.6.4 Avantages de cette machine

L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse en commandant la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques, ce qui offre un aspect plus économique lorsqu'on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau, tout en réduisant leurs tailles d'environ 70% par rapport à des convertisseurs placés au stator.

Pour le fonctionnement de la MADA en génératrice, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable [BEN-11] permet de faire fonctionner le stator à une fréquence fixe même si la vitesse du rotor varie.

Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie.

D'autres avantages [PIN-04] peuvent lui être attribués :

- Contrôle de la puissance active et celle réactive séparément.
- Peut être magnétisée par le réseau électrique ou par son propre rotor.
- Peut générer sa propre puissance réactive.

## I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement l'aérogénérateur ainsi que ses éléments constitutifs et son fonctionnement. Puis, nous avons présenté la classification des éoliennes selon leur structure et leur vitesse (à vitesse fixe et à vitesse variable). Il ressort que c'est l'éolienne à axe horizontal et à trois pâles qui est la plus couramment exploitée pour les installations de moyenne et grande puissance.

Nous avons expliqué par la suite l'intérêt d'utiliser la vitesse variable afin d'optimiser la production d'énergie.

Ensuite, nous avons rappelé succinctement quelques notions théoriques relatives à la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique obtenue au niveau de l'éolienne.

Enfin, nous avons brièvement parlé des types de générateur pouvant être exploités pour la conversion d'énergie éolienne, puis expliqué l'intérêt d'utiliser la machine asynchrone à double alimentation. Ainsi, nous avons énuméré ses différents régimes et expliqué son fonctionnement en génératrice, tout en présentant ses avantages.

# Chapitre II

# Modélisation du dispositif

## II.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est d'effectuer une modélisation du système de conversion éolien. Ce système comporte une partie mécanique représentée par la turbine éolienne, où on modélisera l'éolienne, et une partie électrique, dédiée essentiellement à la MADA, comportant le convertisseur « back to back ».

Enfin, on développe la modélisation de la MADA dans le repère de Park, et les équations d'états de celle-ci ainsi que la modélisation du convertisseur « back to back ».

## II.2 Partie mécanique

La turbine éolienne assure la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique laquelle est transmise à la génératrice. Les dispositifs constituant une éolienne sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique. L'objectif est d'avoir un bon compromis entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement et électriquement.

On s'intéresse dans cette partie à la modélisation mécanique de la turbine éolienne [MIR-05].

### II.2.1 Modèle simplifié de la turbine

La turbine à modéliser comporte trois pales de longueur  $R$  fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{\text{turb}}$  [BEH-12]. Cet arbre est couplé à une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  [MIR-05].

- **Modélisation de la turbine**

La **Figure (II.1)** montre le schéma d'une turbine éolienne [MIR-05].

La puissance cinétique, d'un vent de vitesse  $V$  à travers une section droite  $S$ , est déterminée par :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{II.1})$$

La puissance aérodynamique produite au niveau du rotor de la turbine est une partie de  $P_t$ , elle s'écrit alors comme suit :

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

Où  $C_p$  désigne le coefficient de puissance. Pour la turbine utilisée dans notre projet, il est exprimé, en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$  et de l'angle d'orientation des pales  $\beta$ , par :

$$C_p = (0,44 - 0,0167\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0,3\beta}\right) - 0,00184(\lambda - 3)\beta \quad (\text{II.3})$$

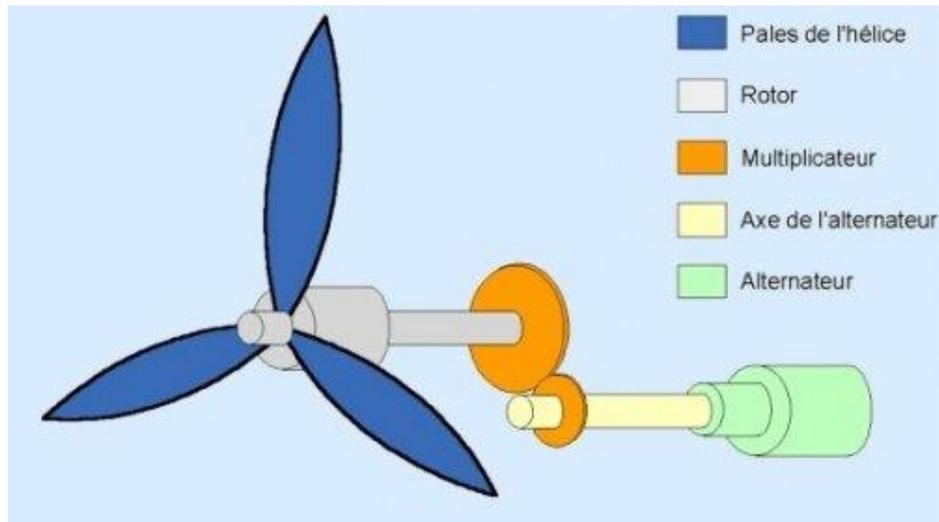
Il est à noter que  $\lambda$  définit le ratio entre la vitesse  $R\Omega_{turbine}$  de la pointe d'une pale et la vitesse du vent :

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

$\Omega_{turb}$  Étant la vitesse de rotation la turbine.

Le couple aérodynamique est donné par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turb}} = \frac{1}{2} \frac{C_p \rho S V^3}{\Omega_{turb}} \quad (\text{II.5})$$



**Fig. II.1** Schéma d'une turbine éolienne.

- **Couple de référence de la génératrice**

Dans ce qui suit, nous allons établir l'expression de la référence du couple de la génératrice dans un fonctionnement en régime permanent [MIR-05]. Pour la composante lente du vent et en régime permanent on peut écrire:

$$J_{t1} \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_D = 0 \quad (\text{II.6})$$

Où  $J_{t1}$  est l'inertie totale des masses en rotation ramenée sur l'arbre de la turbine. Le couple dynamique  $C_D$  vérifie la relation :

$$C_D = C_{mec} - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.7})$$

Dans la relation (II.7),  $C_{mec}$  désigne le couple produit par la turbine au niveau de l'arbre de la génératrice et  $C_{em}$  le couple électromagnétique de la MADA.

De plus, si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux, on obtient :

$$C_{em} = C_{mec} \quad (\text{II.8})$$

A partir de la mesure de la vitesse mécanique et de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent, on obtient :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turb}} = \frac{1}{2} \frac{C_p \rho S V_{est}^3}{\Omega_{turb}} \quad (\text{II.9})$$

Où  $V_{est}$  peut être obtenu à partir de la relation

$$V_{est} = \frac{R \Omega_{turb}}{\lambda} \quad (\text{II.10})$$

Dans le cas idéal, le multiplicateur peut être représenté par un simple gain  $G$  ainsi, la vitesse  $\Omega_{turb}$  de l'arbre d'entrée du multiplicateur est transformée en la vitesse  $\Omega_{mec}$  de l'arbre de la génératrice comme suit :

$$\Omega_{turb} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.11})$$

La conservation de la puissance mécanique au niveau du multiplicateur conduit au fait que le couple  $C_{mec}$  sur l'arbre de la génératrice est lié au couple aérodynamique  $C_{aer}$  par :

$$C_{mec} = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{II.12})$$

En substituant  $V_{est}$  par son expression (II.10) dans (II.9) et en tenant compte de (II.11) et (II.12), l'expression (II.8) conduit au couple de référence que doit développer la génératrice donné par :

$$C_{ref} = C_{em} = \frac{1}{2} \frac{\pi \rho C_p R^5}{\lambda_{max}^3 G^3} \Omega_{mec}^2 \tag{II.13}$$

Ce dernier est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice. Il est à noter que dans (II.13),  $\lambda_{max}$  est la valeur maximale du ratio de vitesse, relatif à la valeur maximale du coefficient de puissance  $C_{pmax}$  pour une vitesse donnée du vent.

• **Equation dynamique de l'arbre.**

La modélisation de la transmission mécanique est basée sur l'équation dynamique des moments des forces agissant sur l'arbre donc on a:

$$J_{t2} \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} - C_{em} - f\Omega_{mec} \tag{II.14}$$

Dans cette dernière équation  $C_{em}$ ,  $f$ ,  $J_{t2}$  représentent respectivement le couple électromagnétique de la génératrice, le coefficient de frottement visqueux et l'inertie totale (l'inertie de la génératrice et de la turbine) ramenée sur l'arbre de la génératrice.

En tenant compte des hypothèses simplificatrices introduites précédemment, le schéma bloc du modèle de la turbine peut être représenté par la **Figure (II.2)**.

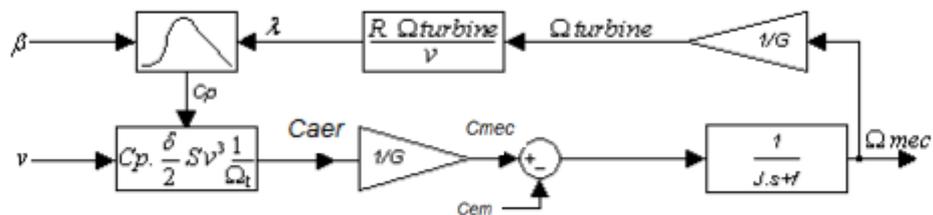


Fig. II.2 Schéma bloc du modèle de la turbine.

**II.3 Partie électrique**

**II.3.1 Modélisation du convertisseur « back to back »**

La **Figure (II.3)** représente la cascade de deux convertisseurs de faible puissance, interposée entre le rotor de la MADA et le réseau. Ces deux convertisseurs, bidirectionnels en puissance et à deux niveaux, sont commandés par la technique MLI. Par ailleurs, les signaux

de commande du convertisseur connecté au rotor de la MADA (CCM) sont issus de la commande de la puissance active et réactive générées par la MADA au niveau du stator. Par contre, les signaux de commande du convertisseur connecté au réseau (CCR), possédant la même structure que le CCM, sont obtenus de l'asservissement de la tension du bus continu et du facteur de puissance au niveau de la connexion rotor-réseau.

Dans cas d'un régime hyper-synchrone de la MADA, le convertisseur CCM fonctionne en redresseur à MLI, et le CCR fonctionne en onduleur à MLI. Ceci permet de récupérer la puissance électrique, disponible au niveau du rotor, à travers les contacts glissants et de la réinjecter dans le réseau. Dans un régime hypo-synchrone de la MADA, le convertisseur CCM fonctionne en onduleur, et le CCR fonctionne en redresseur et c'est le réseau qui envoie une faible puissance électrique aux enroulements du rotor. La cascade assure un fonctionnement à vitesse variable et donc peut faire tourner le rotor de la génératrice à une vitesse différente de celle synchrone.

Par ailleurs, la tension du bus continu d'un redresseur à MLI doit être fixée à une valeur supérieure à la valeur maximale que peut fournir le pont à diodes afin d'éviter que le redresseur à MLI ne fonctionne comme un vulgaire redresseur à diodes. De plus, cette tension doit être régulée à sa valeur de référence pour assurer un fonctionnement correct de la cascade. Dans le cas de la cascade utilisée, la tension continue de référence est fixée à une valeur de 600V.

L'application de la commande MLI du convertisseur « back to back » [DJO -08] permet le réglage de la puissance active et réactive au niveau du stator de la MADA et donc le facteur de puissance de la MADA connectée au réseau. De plus, cette commande MLI permet aussi le réglage de la tension du bus continu à sa valeur de référence. La commande MLI conduit à une bonne qualité du signal (forme des courants proche de la sinusoïde) du fait que les harmoniques sont repoussées vers des fréquences élevées ce qui facilite leur filtrage.

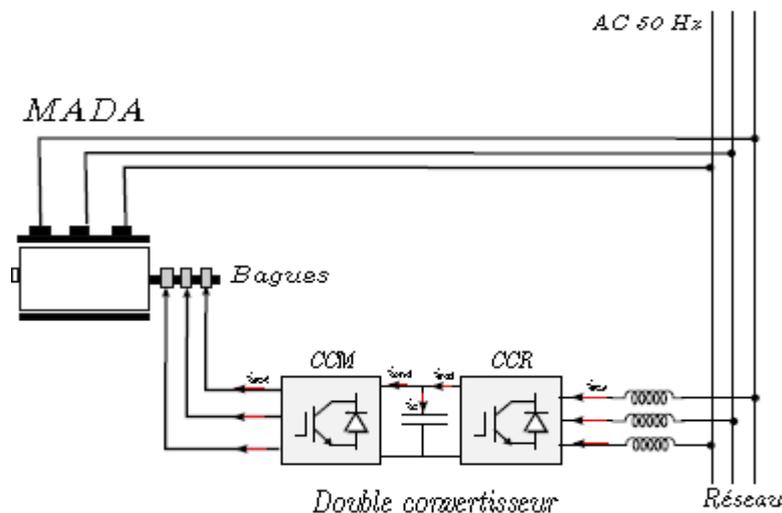


Fig. II.3 Circuit double alimentation de la machine asynchrone.

La **Figure (II.4)** donne la structure à base de transistor IGBT de l'onduleur et du redresseur à MLI. Les transistors supérieurs connectés aux phases (a,b,c) sont notés respectivement  $Tr_a, Tr_b$  et  $Tr_c$  et dont les ordres de commandes sont désignés respectivement par  $S_a, S_b$  et  $S_c$ . Ceux inférieurs connectés aux mêmes phases sont notés  $\overline{Tr}_a, \overline{Tr}_b$  et  $\overline{Tr}_c$ . Le point de référence M des tensions de bras est placé sur le bus bar (-) de la tension continue  $U_{dc}$ . En fonction de la commutation des transistors, les tensions de bras  $VM_k$  ( $k=a,b,c$ ) prennent les états indiqués ci-dessous :

**Branche 1 :**

$$VM_a = 0 \Rightarrow \text{si } Tr_a \text{ Off et } \overline{Tr}_a \text{ On } (S_a = 0 \ \& \ \overline{S}_a = 1)$$

$$VM_a = U_{dc} \Rightarrow \text{si } Tr_a \text{ On et } \overline{Tr}_a \text{ Off } (S_a = 1 \ \& \ \overline{S}_a = 0)$$

**Branche 2 :**

$$VM_b = 0 \Rightarrow \text{si } Tr_b \text{ Off et } \overline{Tr}_b \text{ On } (S_b = 0 \ \& \ \overline{S}_b = 1)$$

$$VM_b = U_{dc} \Rightarrow \text{si } Tr_b \text{ On et } \overline{Tr}_b \text{ Off } (S_b = 1 \ \& \ \overline{S}_b = 0)$$

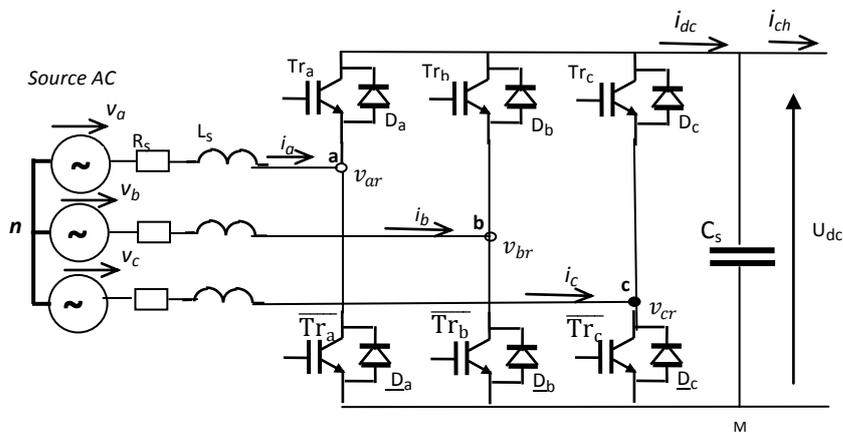
**Branche 3 :**

$$VM_c = 0 \Rightarrow \text{si } Tr_c \text{ Off et } \overline{Tr}_c \text{ On } (S_c = 0 \ \& \ \overline{S}_c = 1)$$

$$VM_c = U_{dc} \Rightarrow \text{si } Tr_c \text{ On et } \overline{Tr}_c \text{ Off } (S_c = 1 \ \& \ \overline{S}_c = 0)$$

En analysant ces tensions de bras, on peut écrire d'une façon générale :

$$VM_k = S_k U_{dc} \text{ et } k=(a,b,c)$$



**Fig. II.4 Onduleur à deux niveaux à base de transistors IGBT.**

Les tensions composées, à la sortie du convertisseur, peuvent être exprimées en fonction des tensions des bras comme suit :

$$\begin{cases} u_{ab} = VM_a - VM_b = U_{cd}(S_a - S_b) \\ u_{bc} = VM_b - VM_c = U_{cd}(S_b - S_c) \\ u_{ca} = VM_c - VM_a = U_{cd}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

En considérant que les tensions composées forment un système triphasé équilibré, on peut déduire les tensions simples à partir de ces tensions composées comme suit :

$$\begin{cases} v_{an} = \frac{1}{3}(u_{ab} - u_{ca}) \\ v_{bn} = \frac{1}{3}(u_{bc} - u_{ab}) \\ v_{cn} = \frac{1}{3}(u_{ca} - u_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

En exploitant (II.15), les tensions simples, données par (II.16), peuvent alors s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{pmatrix} = \frac{U_{cd}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \quad (\text{II.17})$$

**Remarque :** Il est à noter que la simulation du fonctionnement du convertisseur est basée sur la relation (II.17) où les ordres de commande ( $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$ ) sont issus de la technique MLI appliquée pour la commande du convertisseur [MER-07].

## II.3.2 Modèle de la source dans le référentiel de Park

### II.3.2.1 Mise en équation de la source triphasée

Le redresseur est branché au réseau triphasé de tension  $[v_s]_{abc}$  à travers trois bobines d'inductance cyclique par phase  $L_s$  et de résistance  $R_s$ . Les tensions triphasées en MLI du redresseur sont notées  $[v_r]_{abc}$ . Les courants triphasés  $[i]_{abc}$  de la source vérifient l'équation suivante :

$$[v_s]_{abc} = [R_s][i]_{abc} + [L_s] \frac{d}{dt} [i]_{abc} + [v_r]_{abc} \quad (\text{II.18})$$

Avec

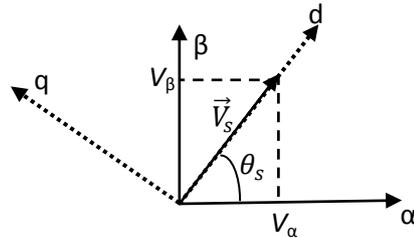
$$\begin{aligned} [v_s]_{abc} &= \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, [i]_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, [L_s] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix}, [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \\ [v_r]_{abc} &= \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{II.19})$$

Dans le but de traiter des grandeurs continues à la place de grandeurs alternatives, on utilise la transformation de Park (**Annexe A**), qui appliquée aux grandeurs triphasées (tensions, courants et flux), permet d'obtenir des grandeurs continues appelées les composantes (*dq0*) [**MER-07**].

La transformation de Park [**BEN-11**] ramène les équations triphasées (**II.18**) dans un référentiel mobile (*dq0*). Du fait que les tensions  $v_{abc}$  forment un système triphasé aussi le vecteur  $\vec{V}_s$ , représentant les tensions  $v_{abc}$  est un vecteur tournant à la vitesse  $\omega_s$ .

Le repère (*dq*) est choisi lié au vecteur tension de la source  $\vec{V}_s$  tel que l'axe (*d*) soit confondu avec le vecteur tension  $\vec{V}_s$  et l'axe (*q*) est en quadrature avance. De la **Figure (II.5)**, il est clair que la composante  $V_q$  est nulle de plus la position  $\theta_s$  du vecteur tension  $\vec{V}_s$  peut être déterminée simplement par :

$$\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{V_\beta}{V_\alpha}\right) \quad (\text{II.20})$$



**Fig. II.5** Repère (*d q*) lié au vecteur tension du réseau  $\vec{V}_s$

En appliquant la transformation de Park au système (**II.18**), on obtient :

$$[v_s]_{dq} = [P(\theta_s)][v_s]_{abc} = [P(\theta_s)][R_s][i]_{abc} + [P(\theta_s)][L_s] \frac{d}{dt} [i]_{abc} + [P(\theta_s)][v_r]_{abc} \quad (\text{II.21})$$

Les courants  $[i_{abc}]$  sont supposés formant un système triphasé équilibré d'où :  $i_a + i_b + i_c = 0$ . Ainsi, la composante homopolaire est nulle et les développements de la relation (**II.21**) conduit à :

$$[v_s]_{dq} = [P(\theta_s)][R_s][P(\theta_s)]^{-1}[i]_{dq} + \alpha + [v_r]_{dq} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$\alpha = [P(\theta_s)][L_s][P(\theta_s)]^{-1} \frac{d}{dt} [i]_{dq} + [P(\theta_s)] \left( \frac{d}{dt} [P(\theta_s)]^{-1} \right) [L_s] [i]_{dq}$$

Du fait que les matrices  $[R_s]$  et  $[L_s]$  sont diagonales, on a alors :

$$[P(\theta_s)]^{-1} [R_s] [P(\theta_s)] = [R_s] \text{ et } [P(\theta_s)]^{-1} [L_s] [P(\theta_s)] = [L_s] \quad (\text{II.23})$$

De plus,

$$[P(\theta_s)]^{-1} \left( \frac{d}{dt} [P(\theta_s)] \right) = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Tenant compte de (II.23) et (II.24), la relation (II.22) conduit aux équations de Park **[SAL-05]** sous une forme vectorielle :

$$[v_s]_{dq} = [R_s]' [i]_{dq} + [L_s]' \frac{d}{dt} [i]_{dq} + \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} [L_s]' [i]_{dq} + [v_r]_{dq} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$$[v_s]_{dq} = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}, [R_s]' = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix}, [L_s]' = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix}, [i]_{dq} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, [v_r]_{dq} = \begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

$$[v_s]_{dq} = [R_s] [i]_{dq} + [L_s] \left[ \frac{di}{dt} \right]_{dq} + L_s \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} [i]_{dq} + [v_r]_{dq} \quad (\text{II.27})$$

Du fait que l'axe (d) est aligné avec le vecteur de la tension du réseau aussi  $v_{qs} = 0$  d'où on a:

$$R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} = v_{ds} + L_s \omega_s i_q - v_{dr} \quad (\text{II.28})$$

$$R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} = -L_s \omega_s i_d - v_{qr} \quad (\text{II.29})$$

### II.3.3 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :

Le modèle triphasé (a, b, c) de la machine est établi en exploitant les équations électriques, magnétiques et mécaniques issues de son propre fonctionnement. Ce modèle triphasé est assez complexe en raison de la dimension des matrices intervenant dans ces équations. De plus, il est pratiquement impossible d'obtenir une solution analytique du fait que ces équations sont à coefficients variables puisque ces matrices sont dépendantes implicitement du temps.

Pour y remédier, il est nécessaire de passer par une transformation mathématique qui permet de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à

coefficients constants. Cette transformation [AMS-09] est obtenue par un changement de repère qui doit rendre l'écriture des équations de la machine plus simple à exploiter. Cette transformation n'est autre que celle dite de Park (Annexe A).

### II.3.3.1 Modèle de Park de la MADA

Dans le but de synthétiser la commande de la MADA, nous établissons tout d'abord son modèle dans un repère (d, q) tournant à une vitesse arbitraire  $\omega_a$ .

Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en une machine diphasée équivalente [SAL-05]. En général, cette transformation permet le passage du système triphasé au système biphasé, en faisant correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires, directes et en quadrature.

A l'aide de cette dernière, la dynamique des grandeurs du stator et du rotor de la génératrice dans le repère biphasé sera plus simple.

La transformation est appliquée tour à tour aux grandeurs du stator et à celles du rotor telle que :

$$\begin{cases} (X_{dq})_s = P(\theta_s)(X_{abc})_s \\ (X_{dq})_r = P(\theta_r)(X_{abc})_r \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Où  $P(\theta)$  désigne la matrice de passage du système triphasé (abc) ou système biphasé tournant (d q).

Ceci permet d'aboutir au modèle de Park de la MADA donné par les équations (II.31) à (II.35)

- Équations électriques :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_a \psi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_a \psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_m) \psi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_a - \omega_m) \psi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

- Équation magnétique :

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

$$\begin{cases} \psi_{dr} = L_s i_{dr} + M i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_s i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

- Équation mécanique :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_e - K_f \Omega_m + C_{mec} \quad (\text{II.35})$$

### II.3.3.2 Equations d'état du système :

Le modèle d'état de la MADA est établi en choisissant comme vecteur d'état le vecteur défini par :

$$X = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \psi_{ds} \quad \psi_{qs} \quad \omega_m]^T \quad (\text{II.36})$$

De l'équation (II.31) on extrait  $\dot{\psi}_{ds}$  et  $\dot{\psi}_{qs}$  d'où il devient :

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{ds} = v_{ds} - R_s i_{ds} + \omega_a \psi_{qs} \\ \dot{\psi}_{qs} = v_{qs} - R_s i_{qs} - \omega_a \psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

A partir de l'équation (II.32), on tire directement la dynamique du flux au rotor, donc on a :

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{dr} = v_{dr} - R_r i_{dr} + (\omega_a - \omega_m) \psi_{qr} \\ \dot{\psi}_{qr} = v_{qr} - R_r i_{qr} - (\omega_a - \omega_m) \psi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

De la relation (II.33) on détermine les expressions de  $i_{dr}$  et  $i_{qr}$  :

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{\psi_{ds}}{M} - \frac{L_s}{M} i_{ds} \\ i_{qr} = \frac{\psi_{qs}}{M} - \frac{L_s}{M} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

On remplace dans la relation (II.34), les courants du rotor par leurs expressions (II.39), il vient :

$$\begin{cases} \psi_{dr} = L_r \left( \frac{\psi_{ds}}{M} - \frac{L_s}{M} i_{ds} \right) + M i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r \left( \frac{\psi_{dr}}{M} - \frac{L_s}{M} i_{qs} \right) + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

Ce qui conduit à la forme finale du flux rotorique en fonction des courants et flux statorique comme suit :

$$\begin{cases} \psi_{dr} = \frac{L_r}{M} \psi_{ds} + M \left( 1 - \frac{L_r L_s}{M^2} \right) i_{ds} \\ \psi_{qr} = \frac{L_r}{M} \psi_{qs} + M \left( 1 - \frac{L_r L_s}{M^2} \right) i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Le coefficient de dispersion  $\sigma$  étant défini par :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad (\text{II.42})$$

On note alors par :

$$\bar{\sigma} = 1 - \frac{L_s L_r}{M^2} \quad (\text{II.43})$$

On introduit le coefficient  $\bar{\sigma}$  dans la relation (II.41), celle-ci s'écrit alors :

$$\begin{cases} \psi_{dr} = \frac{L_r}{M} \psi_{ds} + M \bar{\sigma} i_{ds} \\ \psi_{qr} = \frac{L_r}{M} \psi_{qs} + M \bar{\sigma} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

La dérivée temporelle de la relation (II.42) conduit à

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{dr} = \frac{L_r}{M} \dot{\psi}_{ds} + M \bar{\sigma} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \dot{\psi}_{qr} = \frac{L_r}{M} \dot{\psi}_{qs} + M \bar{\sigma} \frac{di_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

De la relation (II.45), on tire la dynamique des courants au stator en fonction de celle des flux :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{M \bar{\sigma}} \dot{\psi}_{dr} - \frac{L_r}{M^2 \bar{\sigma}} \dot{\psi}_{ds} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{M \bar{\sigma}} \dot{\psi}_{qr} - \frac{L_r}{M^2 \bar{\sigma}} \dot{\psi}_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

En tennant compte des (II.44), (II.38) devient :

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{dr} = v_{dr} - R_r i_{dr} + (\omega_a - \omega_m) \frac{L_r}{M} \psi_{qs} + (\omega_a - \omega_m) M \bar{\sigma} i_{qs} \\ \dot{\psi}_{qr} = v_{qr} - R_r i_{qr} - (\omega_a - \omega_m) \frac{L_r}{M} \psi_{ds} - (\omega_a - \omega_m) M \bar{\sigma} i_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

on substitue l'expression des courants rotoriques données dans (II.39), la relation (II.47) devient

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{dr} = v_{dr} + R_r \frac{L_s}{M} i_{ds} - R_r \frac{\psi_{ds}}{M} + (\omega_a - \omega_m) \frac{L_r}{M} \psi_{qs} + (\omega_a - \omega_m) M \bar{\sigma} i_{qs} \\ \dot{\psi}_{qr} = v_{qr} + R_r \frac{L_s}{M} i_{qs} - R_r \frac{\psi_{qs}}{M} - (\omega_a - \omega_m) \frac{L_r}{M} \psi_{ds} - (\omega_a - \omega_m) M \bar{\sigma} i_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{dr} = \frac{R_r L_s}{M} i_{ds} + (\omega_a - \omega_m) M \bar{\sigma} i_{ds} - \frac{R_r}{M} \psi_{ds} + (\omega_a - \omega_m) \frac{L_r}{M} \psi_{qs} + v_{dr} \\ \dot{\psi}_{qr} = -(\omega_a - \omega_m) M \bar{\sigma} i_{ds} + \frac{R_r L_s}{M} i_{qs} - \frac{R_r}{M} \psi_{qs} - (\omega_a - \omega_m) \frac{L_r}{M} \psi_{ds} + v_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

En tenant compte de (II.49) , (II.46) devient après quelques réarrangement on obtient:

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{R_s L_r + R_r L_s}{M^2 \bar{\sigma}} i_{ds} + (\omega_a - \omega_m) i_{qs} - \frac{R_r}{M^2 \bar{\sigma}} \psi_{ds} - \frac{\omega_m L_r}{M^2 \bar{\sigma}} \psi_{qs} - \frac{L_r}{M^2 \bar{\sigma}} V_{ds} + \frac{1}{M \bar{\sigma}} v_{dr} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -(\omega_a - \omega_m) i_{ds} + \frac{R_s L_r + R_r L_s}{M^2 \bar{\sigma}} i_{qs} + \frac{\omega_m L_r}{M^2 \bar{\sigma}} \psi_{ds} - \frac{R_r}{M^2 \bar{\sigma}} \psi_{qs} - \frac{L_r}{M^2 \bar{\sigma}} V_{qs} + \frac{1}{M \bar{\sigma}} v_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

On deduit la relation qui relie  $\bar{\sigma}$  avec  $\sigma$  :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \Rightarrow \frac{M^2}{L_s L_r} = 1 - \sigma, \text{ d'où } \frac{L_s L_r}{M^2} = \frac{1}{1-\sigma} \quad (\text{II.51})$$

En remplaçant (II.51) dans (II.43),on obtient :

$$\bar{\sigma} = 1 - \frac{1}{1-\sigma} = \frac{1-\sigma-1}{1-\sigma} = \frac{-\sigma}{1-\sigma}$$

En tennat compte de l'expression de  $\sigma$  donné dans (II.42) :

$$\bar{\sigma} = -\frac{\sigma}{1-\sigma} = -\frac{1 - \frac{M^2}{L_s L_r}}{1 - 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}} = -\frac{L_s L_r - M^2}{L_s L_r} \frac{L_s L_r}{M^2}$$

$$\bar{\sigma} = -\frac{L_s L_r - M^2}{M^2} = -\frac{L_s L_r}{M^2} \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right)$$

De ce fait :

$$\bar{\sigma} = -\sigma \frac{L_s L_r}{M^2}$$

$$\text{D'où } M^2 \bar{\sigma} = -\sigma L_s L_r \text{ et } M \bar{\sigma} = -\frac{L_s L_r}{M}$$

D'où

$$\left\{ \begin{array}{l} \gg \frac{R_s L_r}{M^2 \bar{\sigma}} + \frac{R_r L_s}{M^2 \bar{\sigma}} = \frac{R_s L_r}{\sigma L_s L_r} + \frac{R_r L_s}{\sigma L_s L_r} = -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1}{\sigma T_r}\right) \\ \gg \frac{R_r}{M^2 \bar{\sigma}} = \frac{R_r}{\sigma L_s L_r} = -\frac{1}{\sigma L_s T_r} \\ \gg \frac{L_r}{M^2 \bar{\sigma}} = \frac{L_r}{\sigma L_s L_r} = -\frac{1}{\sigma L_s} \\ \gg \frac{1}{M \bar{\sigma}} = -\frac{M}{\sigma L_s L_r} = -\frac{1-\sigma}{\sigma M} \end{array} \right. \quad (\text{II.52})$$

Dans l'équation (II.52),  $T_s$  et  $T_r$  désignent les constantes de temps du stator et du rotor définies par :

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

D'où la dynamique des courants statorique est donnée comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1}{\sigma T_r}\right) i_{ds} + (\omega_a - \omega_m) i_{qs} + \frac{1}{\sigma T_s L_s} \psi_{ds} + \frac{\omega_m}{\sigma L_s} \psi_{qs} + \frac{v_{ds}}{\sigma L_s} - \frac{1-\sigma}{\sigma M} v_{dr} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -(\omega_a - \omega_m) i_{ds} - \left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1}{\sigma T_r}\right) i_{qs} - \frac{\omega_m}{\sigma L_s} \psi_{ds} + \frac{1}{\sigma T_s L_s} \psi_{qs} + \frac{v_{qs}}{\sigma L_s} - \frac{1-\sigma}{\sigma M} v_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.53})$$

On pose :

$$a_1 = \frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1}{\sigma T_r}, \quad a_2 = \frac{1}{\sigma T_s L_s}, \quad a_3 = \frac{1}{\sigma L_s}$$

$$a_4 = \frac{1-\sigma}{\sigma M}, \quad b_1 = R_s,$$

Les équations, définissant le modèle d'état, sont donc les équations (II.35), (II.37) et (II.53) donné comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = -a_1 i_{ds} + (\omega_a - \omega_m) i_{qs} + a_2 \psi_{ds} + a_3 \psi_{qs} \omega_m + a_3 v_{ds} - a_4 v_{dr} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -(\omega_a - \omega_m) i_{ds} - a_1 i_{qs} - a_3 \psi_{ds} \omega_m + a_2 \psi_{qs} + a_3 v_{qs} - a_4 v_{qr} \\ \frac{d\psi_{ds}}{dt} = -b_1 i_{ds} + \omega_a \psi_{qs} + v_{ds} \\ \frac{d\psi_{qs}}{dt} = -b_1 i_{qs} - \omega_a \psi_{ds} + v_{qs} \\ J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_e - K_f \Omega_m + C_{mec} \end{cases} \quad (\text{II.54})$$

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_e = p(\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.55})$$

$$\text{Avec : } \quad \Omega_m = \frac{\omega_m}{p}$$

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega_m}{dt} = p(\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) - \frac{K_f}{p} \omega_m + C_{mec}$$

D'où

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{p^2}{J} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) - \frac{K_f}{J} \omega_m + \frac{p}{J} C_{mec} \quad (\text{II.56})$$

On pose :

$$c_1 = \frac{p^2}{J}, \quad c_2 = \frac{K_f}{J}, \quad c_3 = \frac{p}{J}$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = c_1 (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) - c_2 \omega_m + c_3 C_{mec} \quad (\text{II.57})$$

Le vecteur de sortie est défini comme suit :

$$\begin{cases} y_1 = P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ y_2 = Q_s = -v_{ds} i_{qs} + v_{qs} i_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.58})$$

Comme les composantes du vecteur d'état  $X$  correspondent à :

$$[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T = [i_{ds} \ i_{qs} \ \psi_{ds} \ \psi_{qs} \ \omega_m]^T \quad (\text{II.59})$$

Par conséquent le modèle d'état de la MADA peut alors s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_1 x_1 + (\omega_a - x_5) x_3 + a_2 x_3 + a_3 x_4 x_5 + a_3 v_{ds} - a_4 v_{dr} \\ \dot{x}_2 = -(\omega_a - x_5) x_1 - a_1 x_2 - a_3 x_3 x_5 + a_2 x_4 + a_3 v_{qs} - a_4 v_{qr} \\ \dot{x}_3 = -b_1 x_1 + \omega_a x_2 + v_{ds} \\ \dot{x}_4 = -b_1 x_2 - \omega_a x_3 + v_{qs} \\ \dot{x}_5 = c_1 (x_2 x_3 - x_1 x_4) - c_2 x_5 + c_3 C_{mec} \end{cases} \quad (\text{II.60})$$

On peut réécrire le modèle d'état (II.54) sous la forme compacte suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x) - a_4 v_{dr} \\ \dot{x}_2 = f_2(x) - a_4 v_{qr} \\ \dot{x}_3 = f_3(x) \\ \dot{x}_4 = f_4(x) \\ \dot{x}_5 = f_5(x) + c_3 C_{mec} \end{cases} \quad (\text{II.61})$$

Où les fonctions  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ ,  $f_3(x)$ ,  $f_4(x)$  et  $f_5(x)$  correspondent à :

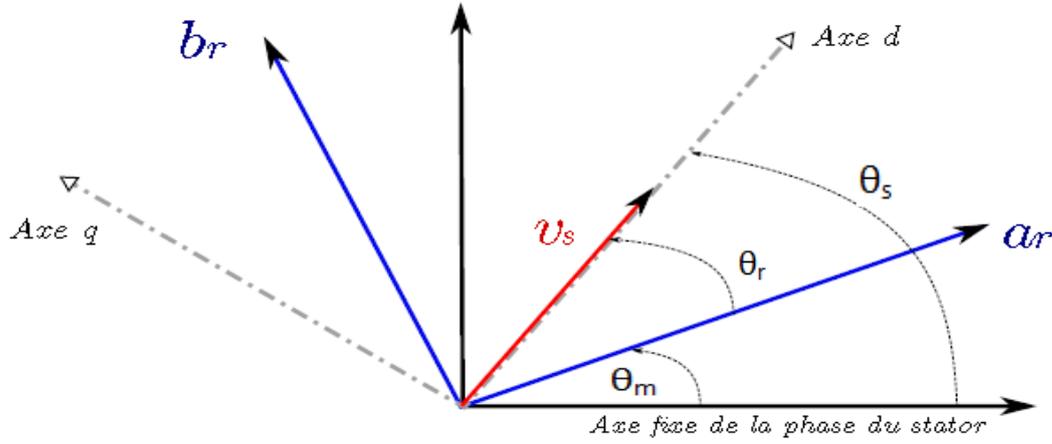
$$\begin{cases} f_1(x) = -a_1 x_1 + (\omega_a - x_5) x_3 + a_2 x_3 + a_3 x_4 x_5 + a_3 v_{ds} \\ f_2(x) = -(\omega_a - x_5) x_1 - a_1 x_2 - a_3 x_3 x_5 + a_2 x_4 + a_3 v_{qs} \\ f_3(x) = -b_1 x_1 + \omega_a x_2 + v_{ds} \\ f_4(x) = -b_1 x_2 - \omega_a x_3 + v_{qs} \\ f_5(x) = c_1 (x_2 x_3 - x_1 x_4) - c_2 x_5 \end{cases} \quad (\text{II.62})$$

Avec les sorties qui suit :

$$\begin{cases} y_1 = P_s = v_{ds} x_1 + v_{qs} x_2 \\ y_2 = Q_s = -v_{ds} x_2 + v_{qs} x_1 \end{cases} \quad (\text{II.63})$$

- **Le référentiel de travail :**

Nous projetons de déterminer les lois de commande en se basant sur le modèle de la MADA établi dans un repère diphasé (d,q) lié au vecteur  $\vec{V}_s$  de la tension du réseau (tension au stator) tel que l'axe (d) coïncide avec ce vecteur comme indiqué à la **Figure (II.6)**.



**Fig. II.6 Orientation de l'axe d sur le vecteur tension au stator**

Dans la condition où le repère (d, q) est pris tel que son axe d coïncide avec le vecteur de la tension au stator [HAM-08] [BEN-11], il vient:

$$\begin{cases} \omega_a = \omega_s \\ v_{ds} = V_s \\ v_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.64})$$

D'où le modèle d'état donné dans l'équation (II.60) peut s'écrire sous la forme compacte suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_{10}(x) - a_4 v_{dr} \\ \dot{x}_2 = f_{20}(x) - a_4 v_{qr} \\ \dot{x}_3 = f_{30}(x) \\ \dot{x}_4 = f_{40}(x) \\ \dot{x}_5 = f_{50}(x) + c_3 C_{mec} \end{cases} \quad (\text{II.65})$$

Où les fonctions  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ ,  $f_3(x)$ ,  $f_4(x)$  et  $f_5(x)$  correspondent à :

$$\begin{cases} f_{10}(x) = -a_1 x_1 + (\omega_s - x_5) x_3 + a_2 x_3 + a_3 x_4 x_5 + a_3 V_s \\ f_{20}(x) = -(\omega_s - x_5) x_1 - a_1 x_2 - a_3 x_3 x_5 + a_2 x_4 \\ f_{30}(x) = -b_1 x_1 + \omega_a x_2 + V_s \\ f_{40}(x) = -b_1 x_2 - \omega_a x_3 \\ f_{50}(x) = c_1 (x_2 x_3 - x_1 x_4) - c_2 x_5 \end{cases} \quad (\text{II.66})$$

Comme on s'intéresse à la commande de la puissance active  $P_s(t)$  et réactive  $Q_s(t)$  au niveau du stator par conséquent le vecteur de sortie  $y = [y_1 \ y_2]^T$  est tel que :

$$\begin{cases} y_1 = P_s(t) \\ y_2 = Q_s(t) \end{cases} \quad (\text{II.67})$$

Dans le cas d'une orientation parfaite du repère (d,q) sur le vecteur  $\vec{V}_s$  l'expression des puissances se réduit à :

$$\begin{cases} P_s(t) = V_s i_{ds} \\ Q_s(t) = -V_s i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.68})$$

Le vecteur de commande  $u = [u_1 \ u_2]^T$  est constitué des composantes (d,q) des tensions au rotor, donc on a :

$$\begin{cases} u_1 = v_{dr} \\ u_2 = v_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.69})$$

## II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons brièvement exposé la modélisation des différentes parties (mécaniques et électriques) de la chaîne éolienne utilisée. Nous avons tout d'abord établi un modèle simplifié de la turbine en partant de l'énergie cinétique du vent. Comme la MADA est alimentée au rotor via un convertisseur « back to back » par conséquent, nous avons présenté d'une part le modèle de ce convertisseur basé sur les états de commutation des composants de puissance et d'autre part le modèle dynamique de la tension du bus continu. Nous avons également développé le modèle d'état de la MADA dans un repère (d,q) où le vecteur d'état est formé par les grandeurs électriques du stator et la vitesse du rotor. Il est à noter que le repère (d,q) a été imposé tel que son (d) coïncide avec le vecteur de la tension du réseau (tension au stator).

# Chapitre III

## Commande par les modes glissants de la puissance active et celle réactive de la MADA

### III.1 Introduction :

Les méthodes classiques de commande des systèmes non linéaires à paramètres variables, peuvent s'avérer défailtantes (non robustes) surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques des systèmes sont strictes. Dans ce cas, le recours à des méthodes de commande robustes par essence, face aux variations des paramètres et aux perturbations, est incontournable. Pour réaliser cet objectif, la méthode de commande à structure variable (CSV) est la plus couramment utilisée. Par ailleurs, la théorie des systèmes à structures variable (SSV) et les modes glissants associées ont fait l'objet d'études intensives au cours de ces dernières décennies.

La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriés autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement [BOU-91].

L'objet de ce chapitre est de synthétiser la commande de puissance active et réactive de la MADA entraînée par une turbine éolienne. Vu la structure fixée de la chaîne éolienne (chap1), l'action sur la MADA se fait par les tensions du rotor. Nous envisageons d'exploiter la technique des modes glissants pour la synthèse de la commande des puissances au stator. Pour cela, nous présentons tout d'abord un bref rappel théorique sur la commande par les modes de glissement des systèmes à structure variable puis nous appliquons cette méthode dans le cas de la commande de la puissance active et réactive de la MADA. En second lieu, nous mettons en œuvre un algorithme du type 'MPPT' pour l'extraction du maximum de puissance en se basant sur un profil réel du vent. Enfin les résultats de simulation du comportement dynamique du système étudié sont présentés, ce qui nous permettra de juger de la viabilité du modèle proposé et de la commande élaborée. Enfin nous testerons la robustesse de cette commande en modifiant les paramètres de notre système.

### III.2 Principe de la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable.

Etant un cas particulier de la commande à structure variable, la commande par les modes glissants (CMG) a été largement utilisée dans la littérature. Ce succès est dû à la simplicité de sa mise en œuvre et à sa robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations externes. Il s'agit de définir d'abord une surface dite de glissement qui représente la dynamique désirée de l'état du système, puis de synthétiser une loi de commande qui doit agir sur le système en deux phases. Dans la première, l'état du système est ramené rapidement sur cette surface, et dans la seconde phase, l'état du système va glisser le long de cette surface jusqu'à atteindre l'origine du plan de phase comme indiqué à la **Figure (III.1)**.

Comme mentionné dans l'introduction, la technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriés autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre [HAM-08].

La trajectoire dans le plan de phase est donc constituée de trois parties distinctes [DJO - 08] [BEN-11] [HUS-09].

- **Le mode de convergence (MC)**: durant lequel la variable à réguler se déplace à partir de n'importe quel point du plan de phase vers la surface de commutation  $S(x) = 0$ , (**Figure (III.1)**), et l'atteint en un temps fini. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.

- **Le mode de glissement (MG)** : durant lequel la variable d'état a atteint la surface glissante et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement  $S(x)$  (**Figure (III.1)**).

- **Le mode du régime permanent (MRP)** : il est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre. Il caractérise la qualité et la performance de la commande. Il est utilisé spécialement pour l'étude des systèmes non linéaires.

La conception de cette commande peut être divisée en trois étapes principales très dépendantes

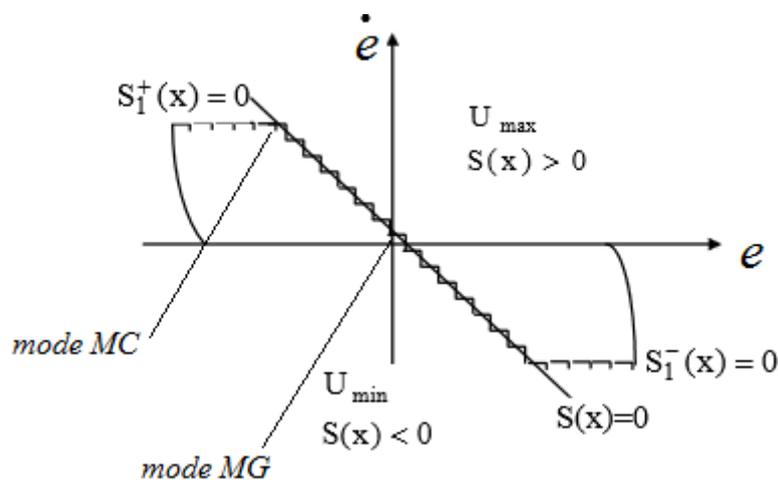


Fig. III.1 Modes de fonctionnement dans le plan de phase.

### III.2.1 Choix des surfaces de glissement.

On considère le système non linéaire séparable en la commande représenté par le modèle d'état suivant :

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

$$y(x) = h(x)$$

Où  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$  et  $y \in R^m$  ( $n > m$ ) sont respectivement le vecteur d'état, de commande et le vecteur de sortie.

Généralement, le nombre de surfaces de glissement est pris égal à la dimension du vecteur de sortie.

Afin de simplifier, on fera le développement de la commande pour une seule sortie, vu que la procédure reste la même pour l'autre sortie

Plusieurs travaux exploitent comme surface de glissement la forme proposée par J.J. Slotine, qui est donnée par l'équation générale suivante :

$$S(x) = \left( \frac{d}{dt} + \delta \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III.2})$$

Où  $\delta$ ,  $e(x)$  et  $r$  sont respectivement un gain positif, l'erreur de réglage et le degré relatif.

Il est à rappeler que le degré relatif est le plus petit entier positif représentant le nombre de fois qu'il faut dériver la sortie afin de faire apparaître la commande, avec les conditions :

- $\frac{\partial S}{\partial u} \neq 0$  ce qui assure la contrôlabilité.
- $S(x)$  est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse  $e(x)$  tend vers zéro pour un choix approprié du gain  $\delta$  et c'est d'ailleurs l'objectif de la commande.

### III.2.2 Condition d'existence du mode de glissement :

Les conditions de convergence permettent aux dynamiques du système de converger vers les surfaces de glissement. Nous retenons de la littérature une condition nécessaire et suffisante, appelée condition d'attractivité, et qui s'énonce ainsi : ***pour qu'une surface de glissement  $S(x)$  tende vers 0 il est nécessaire que sa dérivée temporelle soit définie négative et qu'elle le demeure indépendamment de la perturbation.*** Pour assurer ce mode de convergence [KHA - 06] de l'état du système, il est donc nécessaire de satisfaire les deux conditions suivantes:

$$- S(x)\dot{S}(x) < 0 \quad \text{est la condition de convergence} \quad (\text{III.3})$$

$$- S(x) = 0 \quad \text{est la condition de maintien} \quad (\text{III.4})$$

La condition (III.3) est aussi équivalente à exiger que la dérivée de  $S(x)$  change de signe de part et d'autre de la surface de commutation.

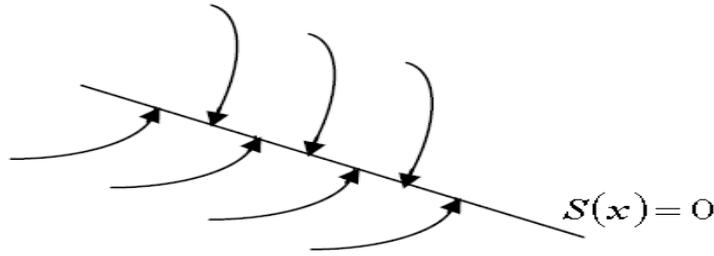


Fig. III.2 Trajectoire du vecteur l'état vis-à-vis de la surface.

### III.3 Synthèse de la loi de commande

Etant donné que l'objectif est de réguler les puissances par conséquent nous rappelons que, dans un repère (d,q) arbitraire, la puissance active et celle réactive sont exprimées par :

$$\begin{cases} P_s = v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs} \\ Q_s = v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs} \end{cases} \quad (III.5)$$

Dans notre cas, le repère (d,q) est choisi tel que son axe  $d$  coïncide le vecteur de la tension du réseau de ce fait on obtient :

$$\begin{cases} v_{ds} = V_s \\ v_{qs} = 0 \end{cases} \quad (III.6)$$

Dans ce repère (d,q), l'expressions (III.5) des puissances se réduit à :

$$\begin{cases} P_s = V_s i_{ds} \\ Q_s = -V_s i_{qs} \end{cases} \quad (III.7)$$

La dynamique des sorties est déduite de (III.7) par conséquent on a :

$$\begin{cases} \dot{P}_s = V_s(f_1(x) - a_4 v_{dr}) \\ \dot{Q}_s = -V_s(f_2(x) - a_4 v_{qr}) \end{cases} \quad (III.8)$$

La MADA est contrôlé dans le but de produire au stator la puissance active et réactive désirées. Comme le vecteur de sortie est constitué de deux grandeurs il est donc nécessaire, pour déterminer la commande par la méthode des modes glissants, de définir deux surfaces de glissement  $S_1$  et  $S_2$ .

La relation (III.8) montre que les deux sorties sont de degrés relatifs d'ordre un ( $r=1$ ), en conséquence chaque surface peut être définie par l'erreur de réglage de la sortie correspondante. D'où on a :

$$\begin{cases} S_1 = e_1 = P_s - P_{ref} \\ S_2 = e_2 = Q_s - Q_{ref} \end{cases} \quad (III.9)$$

La dérivée temporelle de (III.9) conduit à :

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = \dot{e}_1 = \dot{P}_s - \dot{P}_{ref} \\ \dot{S}_2 = \dot{e}_2 = \dot{Q}_s - \dot{Q}_{ref} \end{cases} \quad (III.10)$$

Dans la relation (III.10),  $\dot{P}_s$  et  $\dot{Q}_s$  sont remplacés par leur expression (III.8), il vient :

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = V_s (f_1 - a_4 u_1) - \dot{P}_{ref} \\ \dot{S}_2 = -V_s (f_2 - a_4 u_2) - \dot{Q}_{ref} \end{cases} \quad (III.11)$$

La condition de convergence (III.3) est assurée, dans notre cas, en imposant une dynamique du type relais aux surfaces  $S_1$  et  $S_2$  d'où on peut écrire :

$$\dot{S}_j = -k_j \text{sign}(S_j) \text{ et } j=(1,2) \quad (III.12)$$

Où  $k_j$  est un gain positif et  $\text{sign}(\cdot)$  désigne la fonction mathématique *signe*.

La commande par les modes glissants est déduite directement en égalisant la relation (III.11) à celle (III.12), il vient :

$$\begin{cases} V_s (f_1 - a_4 u_1) - \dot{P}_{ref} = -k_1 \text{sign}(S_1) \\ -V_s (f_2 - a_4 u_2) - \dot{Q}_{ref} = -k_2 \text{sign}(S_2) \end{cases} \quad (III.13)$$

Finalement les commandes  $u_1$  et  $u_2$  sont déterminées telles que :

$$\begin{cases} u_1 = \frac{1}{a_4 V_s} [k_1 \text{sign}(S_1) + V_s f_1 - \dot{P}_{ref}] \\ u_2 = \frac{1}{a_4 V_s} [-k_2 \text{sign}(S_2) + V_s f_2 + \dot{Q}_{ref}] \end{cases} \quad (III.14)$$

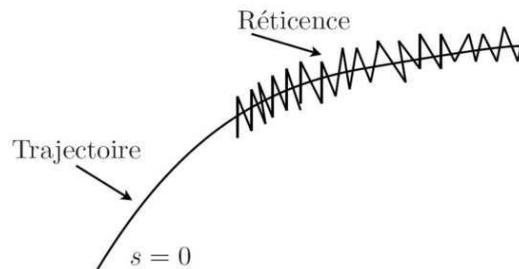
Avec :

$$\begin{cases} f_1 = -a_1 x_1 + a_2 x_3 + (\omega_s - x_5) x_2 + a_3 x_4 x_5 + a_3 V_s \\ f_2 = -a_1 x_2 + a_2 x_4 - (\omega_s - x_5) x_1 - a_3 x_3 x_5 \end{cases} \quad (III.15)$$

Les relations (III.14) montrent que la commande n'existe que si le terme  $a_4 V_s$  est non nul ( $a_4 V_s \neq 0$ ) ; puisque la tension  $V_s$  est celle du réseau et elle est considérée comme constante ( $V_s \neq 0$ ) et donc, il suffit que  $a_4 \neq 0$ .

- **Réduction du broutement**

Il est bien établi que les fortes commutations caractérisant la commande par les modes de glissement induisent le phénomène de broutement, appelé aussi réticence ou "chattering" en anglais. Celui-ci se manifeste par une forte oscillation de la trajectoire des états du système autour de la surface de glissement (**Figure (III.3)**). Ces oscillations sont dues principalement aux limitations des actionneurs et/ou aux retards au niveau des dispositifs de commande. Ces commutation vont donc influencer la précision de la commande et peuvent s'avérer néfastes pour l'organe de commande en provoquant une détérioration prématurée Des systèmes mécaniques et une élévation de température dans les systèmes électriques (perte d'énergie non négligeable).



**Fig. III.3 : Le phénomène de broutement.**

Le broutement peut être atténué en imposant une solution, connue sous le nom de "boundary layer solution", qui consiste à remplacer, uniquement dans un voisinage de la surface, la fonction signe par une approximation continue du type grand gain. Dans notre cas, nous utilisons la fonction de saturation représentée à la **Figure (III.4)**. Cette fonction est donc définie comme suit :

$$Sat(S_j) = \begin{cases} S_j / \varepsilon_j & \text{si } |S_j| \leq \varepsilon_j \\ 1 & \text{si } S_j > \varepsilon_j \\ -1 & \text{si } S_j < -\varepsilon_j \end{cases} \quad \text{avec } \varepsilon_j > 0 \text{ et } j=(1,2) \quad (\text{III.16})$$

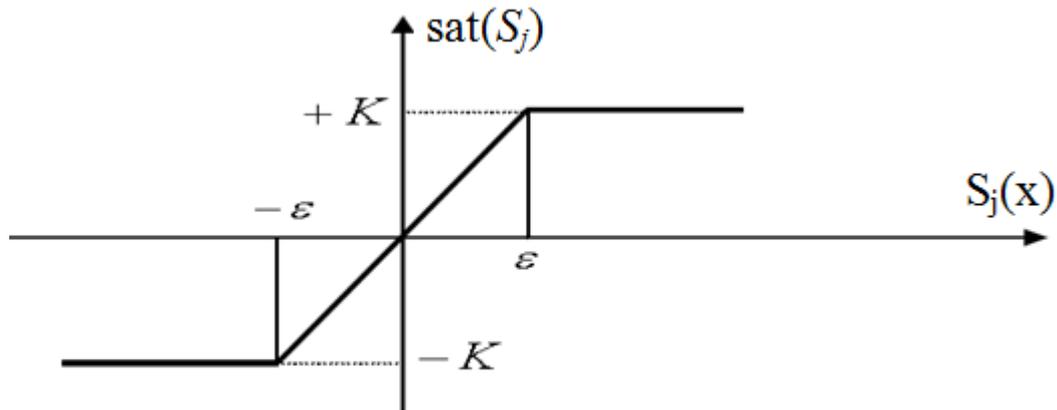


Fig. III.4 Fonction saturation.

### III.4 Contrôle du convertisseur ‘back to back’

Dans le cadre de notre application, le contrôle du convertisseur ‘back to back’ [BAT - 12] [ROU - 12] est utilisé pour le réglage de la puissance active  $P_s$  et celle réactive  $Q_s$  au niveau du stator de plus il est également utilisé pour le réglage de la tension continue intermédiaire  $U_{dc}$  et de la puissance réactive  $Q_r$  au niveau de la connexion rotor-réseau.

#### III.4.1 Contrôle du CCR.

Le convertisseur CCR sert à l’asservissement de la tension du bus continu  $U_{dc}$  à une valeur de référence constante et au contrôle du facteur de puissance au niveau de la connexion rotor-réseau.

Nous avons établi au chapitre II que la dynamique des courants du réseau peut s’écrire dans le repère (d,q) lié au vecteur tension du réseau sous la forme :

$$R_s i_{dr} + L_s \frac{di_{dr}}{dt} = V_s + L_s \omega_s i_{qr} - v_{dr} \quad (\text{III.17})$$

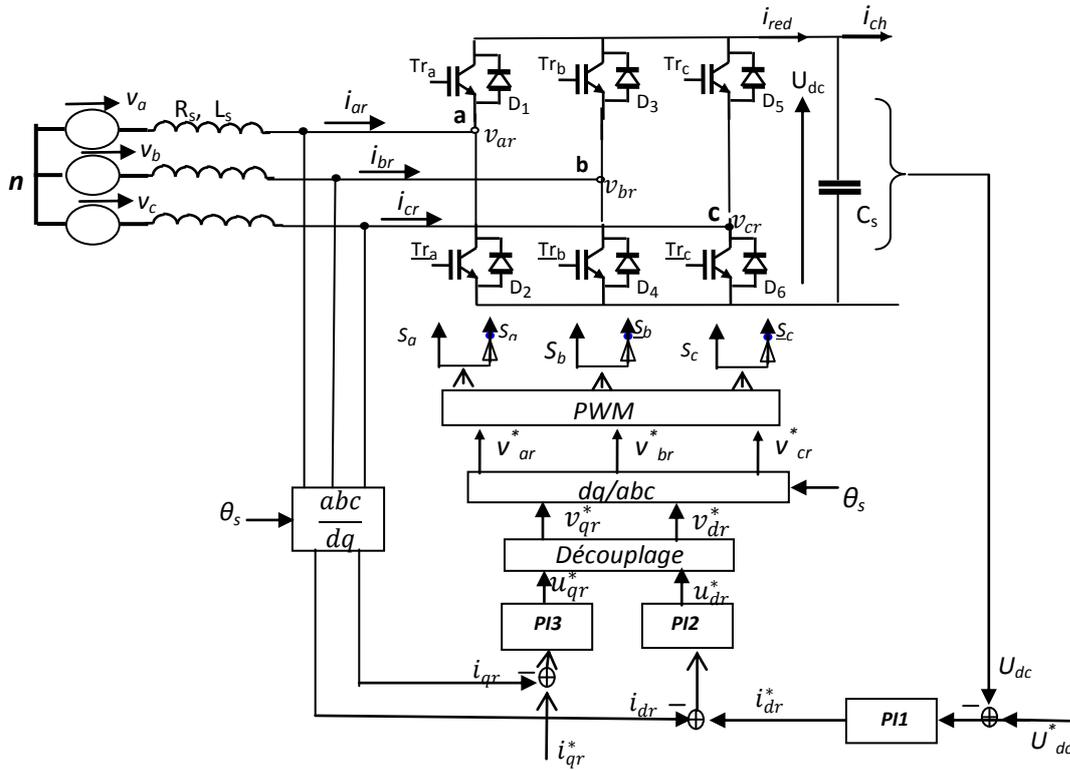
$$R_s i_{qr} + L_s \frac{di_{qr}}{dt} = -L_s \omega_s i_{dr} - v_{qr} \quad (\text{III.18})$$

La puissance active au niveau de la source triphasée et du bus continu sont respectivement données par :

$$P_s = V_s i_{dr} \text{ et } P_{dc} = U_{dc} i_{dc} \quad (\text{III.19})$$

Si on néglige les pertes dans les résistances des trois bobines et dans le redresseur PWM cette puissance se retrouve au niveau du bus continu par conséquent, la variation de la puissance continue se répercute directement sur la variation de la composante  $i_{dr}$  car la tension  $V_s$  est supposée constante. Ainsi, il est possible de contrôler  $U_{dc}$  par la composante  $i_{dr}$  du courant de la source du réseau. De la **Figure (III.5)**, le réglage de la tension  $U_{dc}$  par un régulateur PI, fournit la référence  $i_{dr}^*$  de la composante  $i_{dr}$ . La référence  $i_{qr}^*$  de la composante  $i_{qr}$  est déterminée en fonction du facteur de puissance désiré  $\cos\varphi_r^*$  au niveau de la connexion rotor-réseau:

$$|i_{qr}^*| = |i_{dr}^*| \operatorname{tg}(|\varphi_r^*|) \text{ et } \begin{cases} i_{qr}^* = |i_{qr}^*| \text{ si } \cos(\varphi_r^*) \text{ AR} \\ i_{qr}^* = -|i_{qr}^*| \text{ si } \cos(\varphi_r^*) \text{ AV} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$



**Fig. III.5** Schéma de régulation du CCR.

Les régulateurs PI des courants  $i_{dr}$  et  $i_{qr}$  fournissent les signaux de commande  $u_{dr}^*$  et  $u_{qr}^*$  qui après intervention du bloc de découplage on obtient les commandes réelles  $v_{dr}^*$  et  $v_{qr}^*$  telles que :

$$v_{dr}^* = -u_{dr}^* + V_s + L_s \omega_s i_{qr} \text{ et } v_{qr}^* = -(u_{qr}^* + L_s \omega_s i_{dr}) \quad (\text{III.21})$$

La transformation des grandeurs  $v_{dr}^*$  et  $v_{qr}^*$  donne les tensions triphasées de référence  $v_{ar}^*$ ,  $v_{br}^*$  et  $v_{cr}^*$  nécessaires à la génération des ordres de commande ( $S_a, \bar{S}_a, S_b, \bar{S}_b, S_c$  et  $\bar{S}_c$ ) du

redresseur PWM et aussi l'obtention des tensions PWM adéquates  $v_{ar}$ ,  $v_{br}$  et  $v_{cr}$  à l'entrée du redresseur.

### III.4.2 Contrôle du CCM.

Le convertisseur CCM est utilisé pour le réglage de la puissance active  $P_s$  et celle réactive  $Q_s$  au niveau du stator de la MADA. Pour ce besoin, le schéma du convertisseur est tel indiqué à la Figure (III.6).

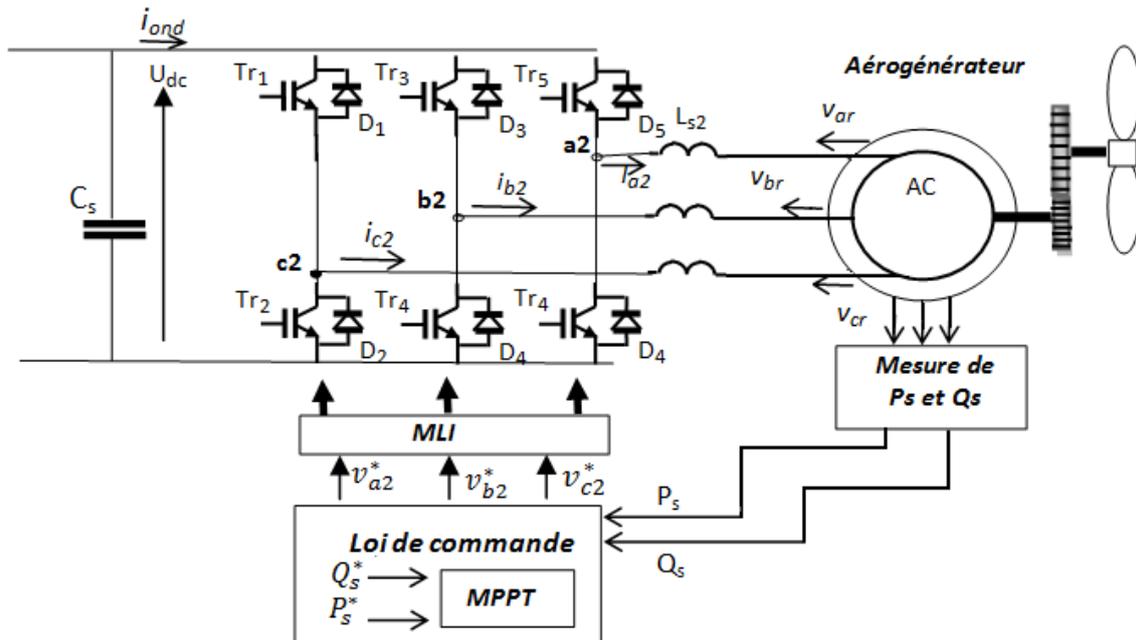


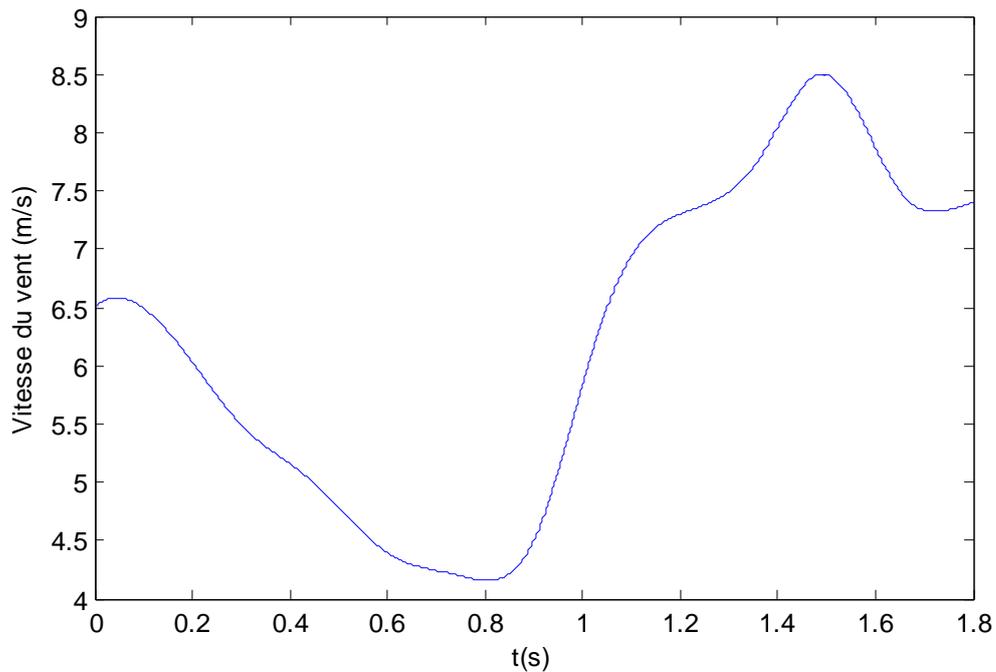
Fig. III.6 Schéma de régulation du CCM.

### III.5 Modèle du vent.

Le profil réel du vent étant aléatoire par conséquent un modèle aléatoire semble plus approprié pour sa modélisation. La méthode d'interpolation est la plus adéquate pour concevoir un modèle exploitable à partir d'un relevé sur site. En effet, à partir d'un ensemble de mesures de la vitesse du vent, la caractéristique de la vitesse du vent peut être déterminée en exploitant un algorithme d'interpolation.

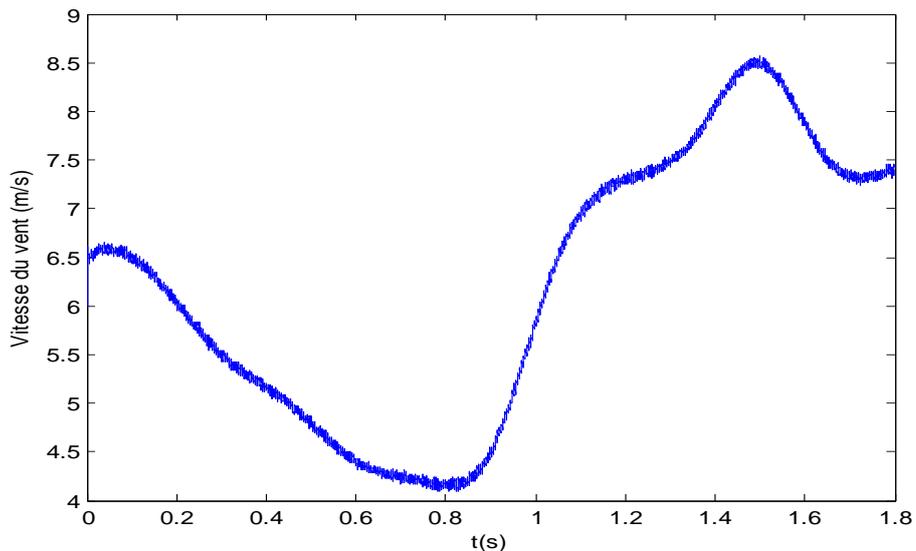
Le relevé des mesures sur site est relatif à la vitesse du vent au niveau de l'Atlas Tellien (en Algérie) sur des périodes aléatoires afin de tenir compte de la nature aléatoire du comportement de la vitesse du vent.

Ce travail a conduit à l'obtention de la courbe de la Figure (III.7) relative à la composante lente du vent.



**Fig. III.7** Composante lente de la vitesse du vent

Le résultat ci-dessus ne représente que la composante lente du vent [BOU-99], cependant, on peut ajouter la composante rapide comme étant une variation aléatoire à chaque instant, le résultat est donné à la **Figure (III.8)**.



**Fig. III.8** Vitesse du vent tenant compte de la composante rapide.

### III.6 Maximisation de la puissance extraite

Notre objectif principal est de maximiser la puissance délivrée par la chaîne éolienne, cette puissance maximale est prise comme étant la référence de la puissance active du stator lors de la commande.

La puissance capturée par la turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient  $C_p$ . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice, l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet alors de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. Pour cela, on peut distinguer deux approches (types) possibles :

- La première approche, plus répandue, suppose que cette caractéristique de voilure est connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale comme caractéristique de charge pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.
- La seconde façon d'agir, la moins classique, considère que la caractéristique  $C_p$  n'est pas connue, l'utilisation d'un algorithme MPPT est primordiale.

#### III.6.1 Stratégie de la maximisation de puissance dans le cas d'une connaissance de la courbe caractéristique de la voilure.

Cette stratégie consiste à l'asservissement de la vitesse de rotation de la turbine. En effet, pour chaque vitesse du vent, nous chercherons à faire fonctionner le tout sous vitesse optimale en exploitant la caractéristique de la **Figure (III.9)**.

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire car elle est en forme de « cloche » dans le plan puissance-vitesse (**Figure (III.9)**). Pour chaque vitesse

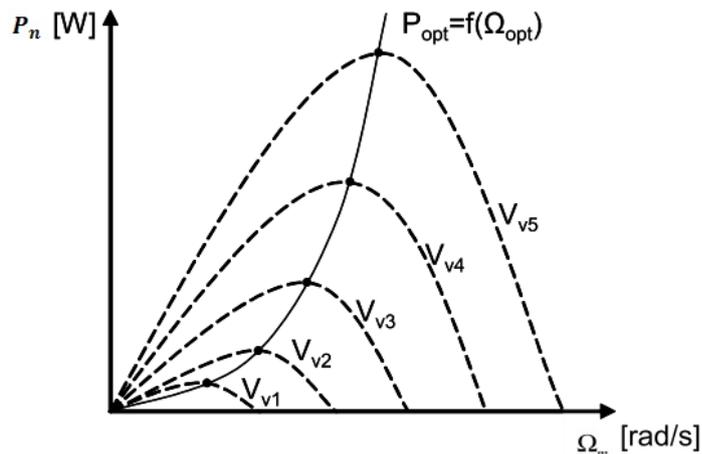


Fig. III.9 Caractéristique d'une voilure

du vent, la puissance maximale correspond à une vitesse de rotation optimale ou encore à un couple de charge strictement défini.

Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse du vent donnée. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, trace une courbe dite de puissance optimale de forme cubique, laquelle est déterminée par l'équation (III.26). Idéalement, cette courbe doit être suivie à tout instant du fonctionnement du système éolien.

$$P_{opt} = \frac{1}{2} \rho C_p^{opt} S V_v^3 \quad (III.22)$$

Dans notre cas ici, avec la supposition que cette caractéristique est connue, il nous suffit tout simplement de suivre la courbe de la puissance optimale pour faire fonctionner l'éolienne aux conditions optimales.

Pour les éoliennes dont la puissance nominale et les caractéristiques son semblables à la nôtre, la caractéristique du  $C_p(\lambda)$  [ROU-12] est donnée par la relation :

$$C_p = 7.9563 \left(\frac{\lambda}{10}\right)^5 - 17.375 \left(\frac{\lambda}{10}\right)^4 + 9.86 \left(\frac{\lambda}{10}\right)^3 - 9.4 \left(\frac{\lambda}{10}\right)^2 + 6.32 \cdot 10^{-2} \lambda + 0.001 \quad (III.23)$$

Cette caractéristique en forme de cloche nous montre qu'il existe un point où l'éolienne peut être exploitée dans les conditions optimales (à puissance maximale). Ainsi faire fonctionner l'éolienne autour de ce point permet de prélever la puissance maximale afin de garantir un coefficient de puissance optimal.

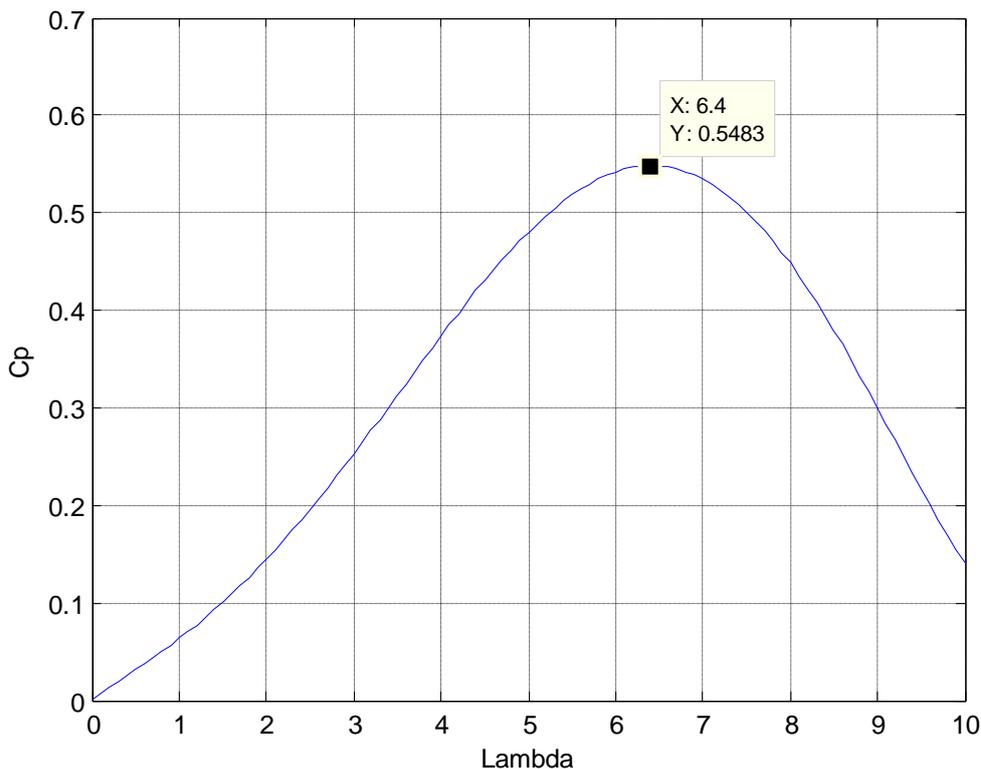


Fig. III.10 Caractéristique de la turbine éolienne

Ce point optimal, dans notre cas est donné par :

$$\begin{cases} \lambda_{opt} = 6.41 \\ C_{p_{opt}} = 0.5483 \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

C'est la méthode, la plus utilisée, permet de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide de mesures simples. Mais elle présente des inconvénients de taille : l'installation d'un capteur de la vitesse du vent et l'exigence du constructeur de la voilure des essais de caractérisation (en extérieur ou en soufflerie) ou des simulations du profil des pales, ce qui n'est pas une chose facile surtout pour les éoliennes de forte puissance.

Pour palier à ces problèmes, une autre stratégie plus simple et efficace a été proposée, c'est celle sans connaissance de cette caractéristique.

### • Résultats de Simulation

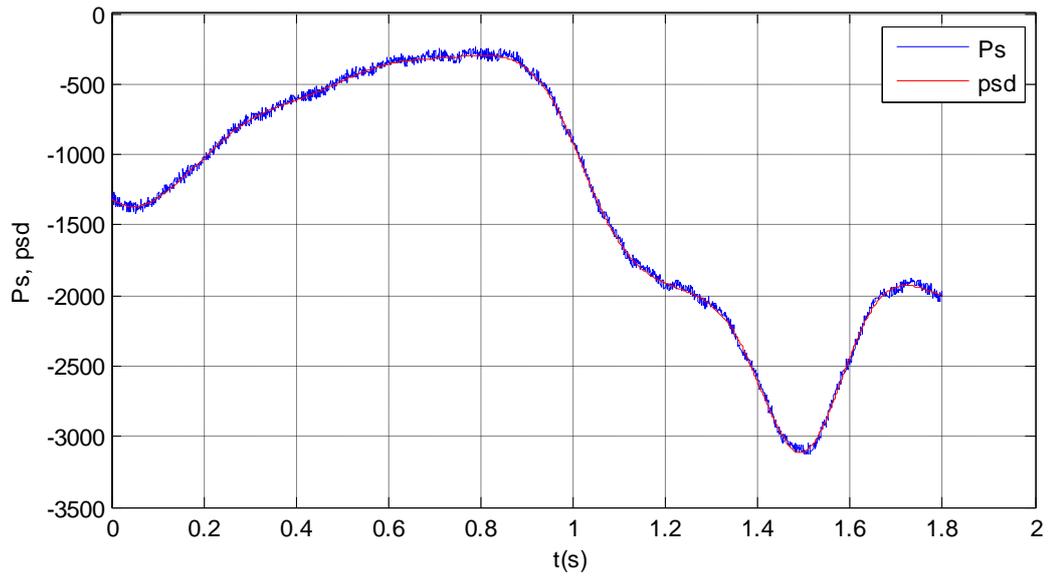
Dans cette section, nous simulons le fonctionnement de la chaîne éolienne dont les paramètres sont fournis en **Annexe B**. Pour ce test noté 'test1', nous considérons que la turbine est soumise à un vent dont le profil de vitesse est donné à la **Figure (III.7)** et que sa caractéristique, supposée connue, est celle représentée à la **Figure (III.10)**. Pour ces données du test, les résultats de la simulation sont montrés à la **Figure (III.11)**. L'analyse de ces résultats montrent que :

La puissance active au stator  $P_s$  suit la puissance désiré  $P_{sd}$  (**Figure (III.11a)**), ayant le même profil que le modèle du vent utilisé, avec une erreur qui ne dépasse pas 80W, car le modèle du vent comporte une composante rapide (modélisée par un terme aléatoire). Il est à noter que cette puissance est négative, car elle est fournie par le système éolien au réseau.

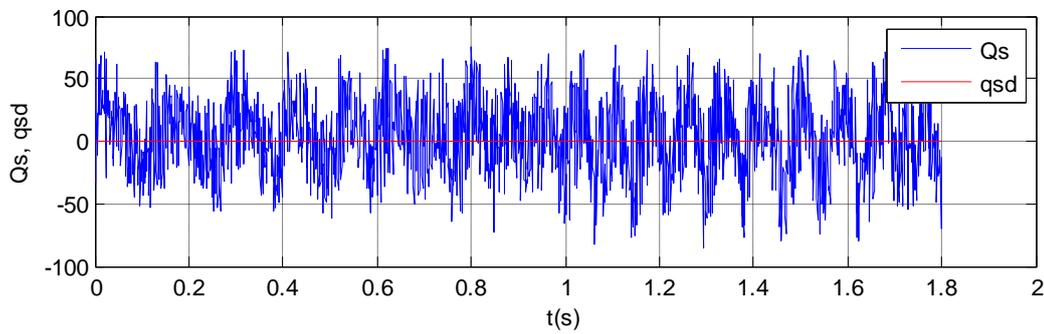
La puissance réactive  $Q_s$  du stator oscille autour de la valeur de référence, sans pour autant dépasser les limites tolérables (**Figure (III.11b)**).

La tension du stator (tension du réseau) est déphasé avec le courant statorique, ceci confirme que le facteur de puissance au stator est bien unitaire, et la puissance active statorique est toujours négative car elle est fournie au réseau (**Figure (III.11c)**), sachant qu'on a changé l'échelle de la tension afin de bien illustrer le déphasage avec le courant statorique.

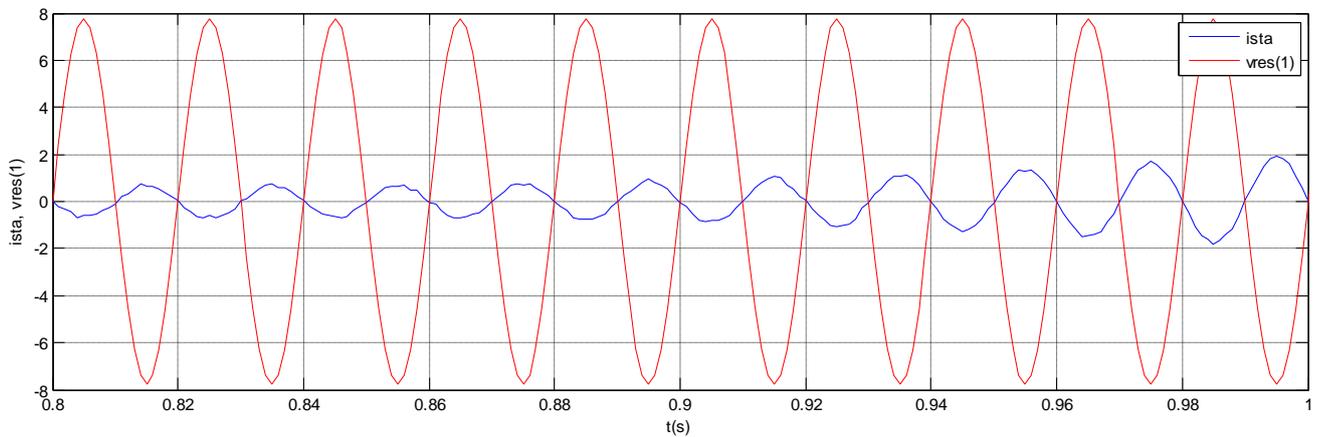
La puissance instantanée active rotorique (**Figure (III.11d)**) ne dépasse pas 30% de la puissance nominale (4kW) donc elle reste dans les limites tolérables d'exploitation. Cette puissance est positive donc pour ce test, la MADA fonctionne en hypo-synchrone.



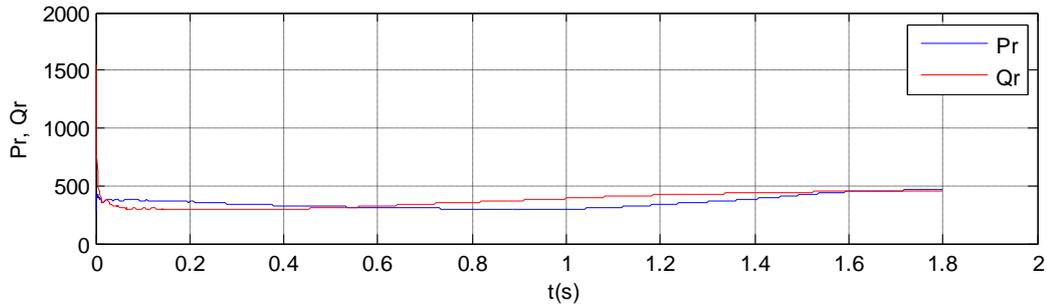
a) Puissance active statorique et sa référence



b) Puissance réactive statorique et sa référence



c) Courant et tension statoriques



**d) Puissance rotorique active et réactive**

**Fig. III.11 Test de l'éolienne dans le cas où la voilure est connue**

**III.6 .2 Stratégie de la maximisation de puissance sans connaissance de la courbe caractéristique de la voilure**

**• Procédure MPPT**

La recherche du point optimal de puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique s'effectue généralement en exploitant un algorithme du type 'maximum power point tracking, MPPT'. Suite à un incrément positif de la référence de la puissance active imposé à l'instant k, la méthode MPPT dite 'observer-perturber' est basée sur les règles indiquées au tableau 1.

Pour mieux éclaircir l'obtention de ce tableau, nous donnons les détails relatifs à l'établissement de la règle. Si à l'instant (k) on impose un incrément positif de la référence de la puissance active et on relève à l'instant (k+1) une augmentation de la puissance ( $\Delta P > 0$ ) et une augmentation de la vitesse ( $\Delta \Omega$ ) cela voudrait dire que le point de fonctionnement se trouve sur le versant de gauche de la courbe caractéristique et qu'il faudrait alors accélérer la machine pour que ce point de fonctionnement puisse converger vers l'optimum. Par conséquent, on impose pour l'instant (k+1) les références suivantes :

$$\Delta \Omega_{ref} (k + 1) > 0 \text{ et } \Delta P_{ref} (k + 1) > 0 \tag{III.25}$$

Etant donné que :

$$\Delta P (k) = P (k) - P (k - 1) \tag{III.26}$$

$$\Delta \Omega (k) = \Omega (k) - \Omega (k - 1) \tag{III.27}$$

On obtient alors :

$$\Omega_{ref} (k + 1) = \Omega_{ref} (k) + \Delta \Omega_{ref} (k + 1) \tag{III.28}$$

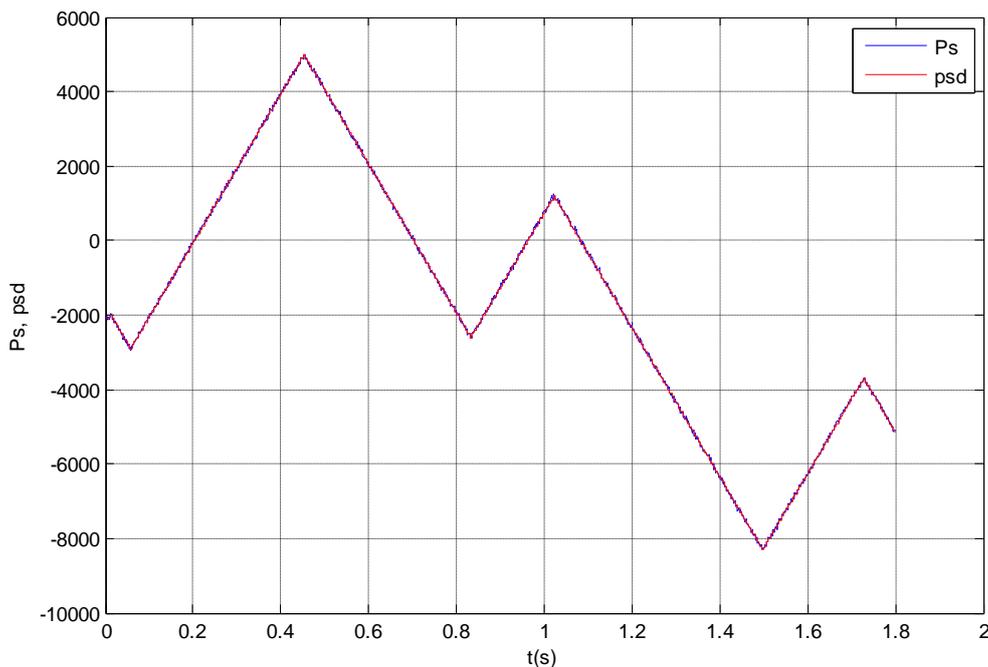
$$P_{ref}(k + 1) = P_{ref}(k) + \Delta P_{ref}(k + 1) \tag{III.29}$$

La règle 2 est relative à un point de fonctionnement situé à l’instant ( $k$ ) sur le versant de droite de la caractéristique. La règle 3 et la règle 4 correspondent, à un dépassement de l’optimum, pour une trajectoire du point de fonctionnement venant respectivement par le versant de gauche et par le versant de droite. L’algorithme basé sur les règles du tableau 1 permet de rechercher la paire  $\Delta\Omega_{ref}(k+1), \Delta P_{ref}(k+1)$ .

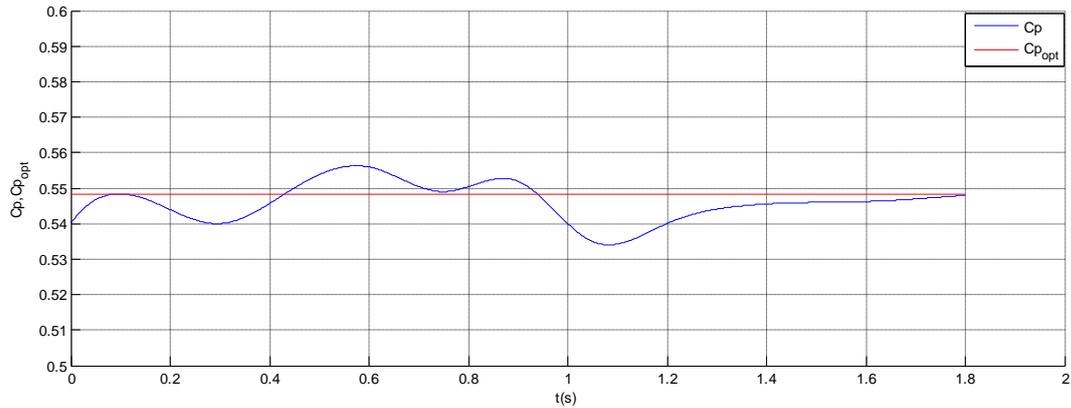
Dans notre cas, l’utilisation de cet algorithme, au niveau du programme de simulation, permet de déterminer uniquement la référence de la puissance active au stator  $P_{ref}$ .

Règle	Si on observe	alors
1	$\Delta P(k + 1) > 0$ et $\Delta\Omega(k + 1) > 0$	$\Delta P_{ref}(k + 1) > 0$ et $\Delta\Omega_{ref}(k + 1) > 0$
2	$\Delta P(k + 1) > 0$ et $\Delta\Omega(k + 1) < 0$	$\Delta P_{ref}(k + 1) > 0$ et $\Delta\Omega_{ref}(k + 1) < 0$
3	$\Delta P(k + 1) < 0$ et $\Delta\Omega(k + 1) > 0$	$\Delta P_{ref}(k + 1) < 0$ et $\Delta\Omega_{ref}(k + 1) > 0$
4	$\Delta P(k + 1) < 0$ et $\Delta\Omega(k + 1) < 0$	$\Delta P_{ref}(k + 1) < 0$ et $\Delta\Omega_{ref}(k + 1) < 0$

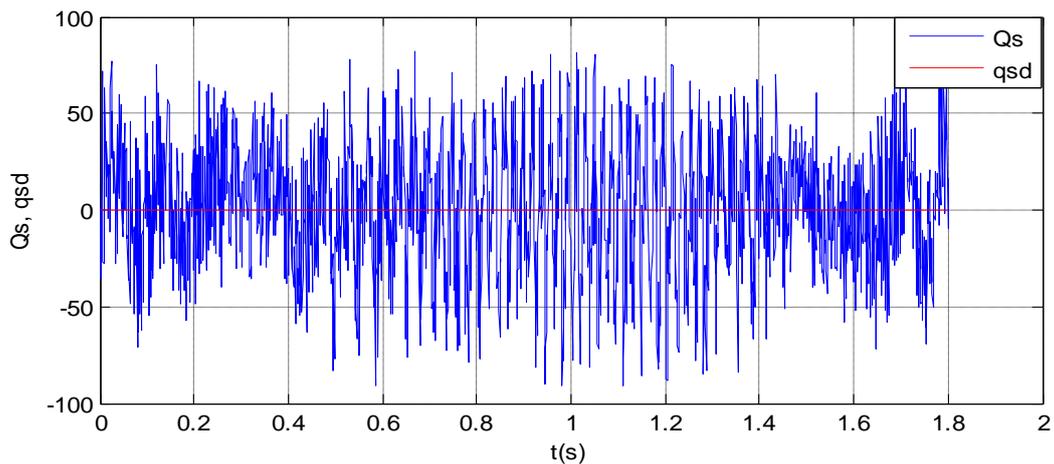
**Tableau 1 : Règles issues de la méthode ‘perturber-observer’**



**a) Puissance active au stator et sa référence**



b) Coefficient de puissance



c) Puissance réactive au stator et sa référence

Fig. III.12 Test de l'éolienne dans le cas de l'utilisation d'un algorithme du type 'MPPT'

- Résultats de la Simulation

Pour ce test dit 'test2', nous simulons le fonctionnement de l'éolienne dans les mêmes conditions que celles du test1 sauf que pour ce test la référence de la puissance active est fournie par l'algorithme 'MPPT'. Dans ces conditions, les résultats obtenus sont représentés à la **Figure (III.12)**. L'analyse de ces résultats révèle que :

La procédure 'MPPT', utilisée dans notre programme, donne des résultats assez satisfaisants. En effet, la puissance délivrée s'approche de la puissance optimale (**Figure (III.12a)**). Il est à noter que les pointes, apparaissant sur la figure, sont dues au choix du pas d'incrémentation relatif à la procédure MPPT.

Le coefficient de puissance obtenu grâce à l'algorithme MPPT est assez proche de  $C_p^{opt}$ , sa variation reste faible autour de celui-ci (**Figure (III.12b)**).

La puissance réactive statorique oscille autour sa référence (zéro), sans pour autant dépasser les limites tolérables (**Figure (III.12c)**).

Grace à l'algorithme MPPT, on a pu élaborer une stratégie de commande sans connaissance de la caractéristique de la voilure, et aboutir à des résultats assez satisfaisants.

### III.7 Test de robustesse

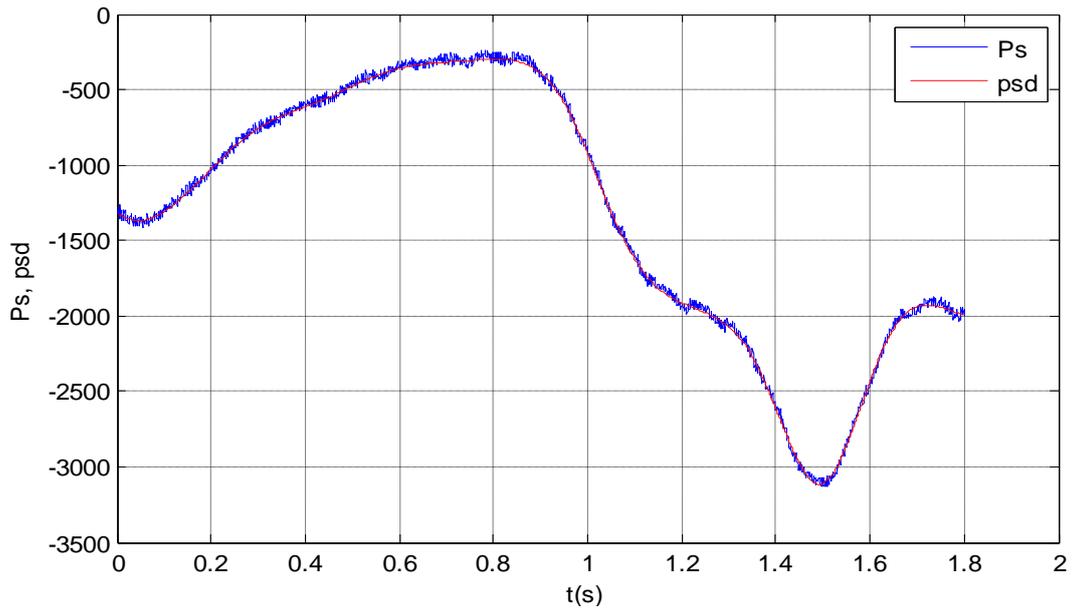
Pour ce '**test3**', nous considérons que la chaîne éolienne est dans les mêmes conditions que celles du test1 sauf que cette fois-ci, le modèle de la MADA est affecté par les variations paramétriques. En effet, lors des simulations, nous avons introduit, à l'instant  $t = 1.2 s$  et sur une durée de  $0.6s$ , des variations affectant les paramètres électriques du modèle de la MADA. Ces variations sont imposées telles que :

✓ La variation des résistances au stator et au rotor est respectivement de  $\Delta R_s = +25\%$  et  $R_r = +50\%$ .

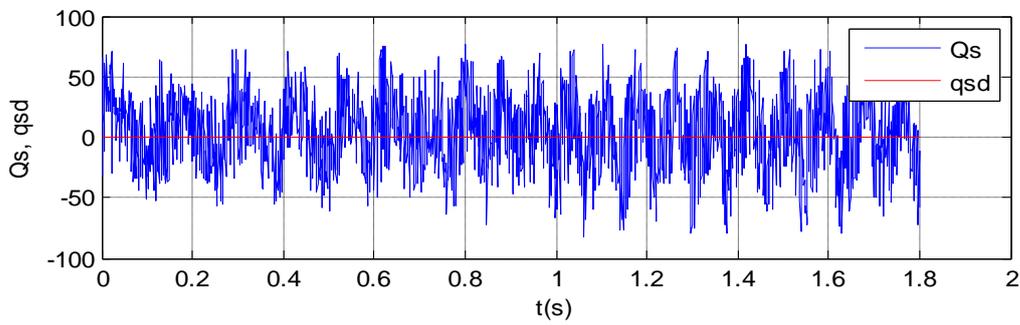
✓ La variation des inductances au stator, au rotor et mutuelle est respectivement de  $\Delta L_s = -15\%$ ,  $\Delta L_r = -30\%$  et  $\Delta M = -21\%$

#### • Résultats de Simulation

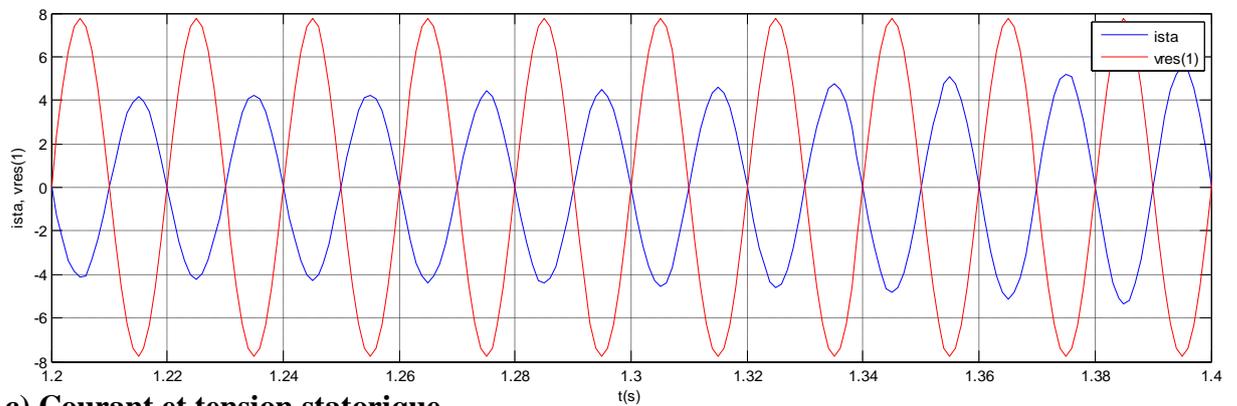
Des résultats de la **Figure (III.13)**, on remarque que l'évolution des grandeurs électriques n'a pas été affectée par les variations paramétriques considérées. En effet, ces grandeurs évoluent similairement à celles de la **Figure (III.11)** obtenues dans les mêmes conditions mais en absence de variations paramétriques.



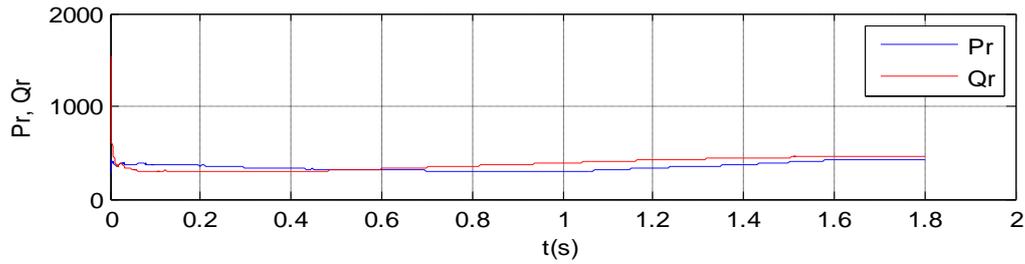
a) Puissance active statorique et sa référence



b) Puissance réactive statorique et sa référence



c) Courant et tension statorique



**d) Puissance rotorique active et réactive**

**Fig. III.13 Test de l'éolienne dans le cas où la voilure est connue en présence des variations paramétriques**

On peut alors conclure que la technique des modes glissants appliquées à la commande des puissances au stator de la MADA est robuste vis-à-vis des variations paramétriques pouvant affectées la modèle de la MADA.

**Remarque :** les résultats et les simulations ont été obtenus pour tous les cas traiter en paramétrant les régulateurs ainsi :

$$\begin{cases} K_{s1} = 0.05 & k_{i1} = 0.01 & K_1 = 1.72 & \mu_1 = 10 \\ K_{s2} = 0.05 & k_{i2} = 0.01 & K_2 = 1.72 & \mu_2 = 10 \end{cases} \quad (II.30)$$

**III.8 Conclusion.**

Dans ce chapitre et après un bref rappel sur la technique de commande par les modes glissants, nous avons appliqué cette même technique pour établir la loi de commande de la puissance active et celle réactive au stator de la MADA. Cette commande a été synthétisée sur la base du modèle non linéaire de la MADA présenté au chapitre 1. La mise en œuvre de cette commande pour la chaine éolienne a été effectuée dans le cas où la caractéristique de la voilure est parfaitement connue et dans le cas où celle-ci est inconnue. Pour ce dernier cas, nous avons exploité un algorithme du type 'MPPT' pour extraire la référence de la puissance active au niveau du stator de la MADA. Les simulations de la chaine éolienne ont été effectuées pour un profil de la vitesse du vent relatif à la région de l'Atlas Tellien et dans le cas d'une caractéristique de la voilure connue ou inconnue. Les résultats obtenus ont permis de valider la méthode utilisée pour la commande de la puissance active et réactive au stator de la MADA. En effet, ces résultats sont satisfaisants dans les deux cas et même en présence des variations paramétriques pouvant affecter le modèle de la MADA.

# **Chapitre IV**

# **Influence des Perturbations du Réseau Electrique**

## IV.1 Introduction

L'énergie électrique est un produit et, comme tous les produits, doit satisfaire à des exigences de qualité bien définies. Pour qu'un équipement fonctionne correctement, il est nécessaire que sa tension d'alimentation reste dans une plage définie autour de sa valeur nominale. Une part significative des équipements utilisés aujourd'hui, en particulier les équipements électroniques et informatiques, nécessitent une bonne qualité d'énergie.

Cependant, ces mêmes équipements sont également à l'origine de distorsion de la tension distribuée dans l'installation, du fait de leurs caractéristiques non linéaires, c'est-à-dire que le courant consommé par ces équipements n'a pas la même forme sinusoïdale que la tension qui les alimente.

Notre objectif principal est d'améliorer le rendement d'une éolienne à base d'une MADA connectée au réseau électrique, vu que ce dernier est souvent soumis à des perturbations non négligeables, nous devons nous assurer que notre système fonctionne de façon optimale en présence de ce genre de problème.

De ce fait, dans ce chapitre, nous allons tout d'abord présenter les différentes perturbations aux quelles est soumis le fonctionnement du réseau électrique puis, tester le comportement de la commande de la puissance par les modes de glissement à ce genre de perturbation.

## IV.2 Les perturbations électriques en BT

Les réseaux BT sont très pollués et soumis à de multiples agressions. Les matériels électrotechniques, mais surtout les appareils électroniques qui sont de plus en plus nombreux et traitent des signaux de plus en plus bas, doivent résister à un environnement électromagnétique sévère. Et dans le même temps les exigences de disponibilité, que ce soit pour la production, la gestion ou le commerce, sont de plus en plus fortes. Pour améliorer la qualité du « produit électricité » et éviter les dysfonctionnements voire des destructions de composants du réseau électrique et / ou de récepteurs sensibles, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et d'en apprécier les risques **[RUN-81]**.

Dans cette partie, nous traiterons tous les paramètres et leurs principales « anomalies » qui permettent de caractériser une alimentation électrique :

- Amplitude : variations - coupures - creux – surtensions.
- Fréquence : variations.
- Forme d'onde : harmoniques.
- Phase : déséquilibre.

### IV.2.1 Tensions industrielles BT

Tous les réseaux subissent, ou sont à l'origine, des perturbations. Or, des récepteurs, mais aussi les appareils de contrôle-commande et de protection, sont sensibles à la qualité de la tension qui leur est appliquée. La connaissance et la prise en compte de ces contraintes d'alimentation en énergie électrique s'avèrent donc bien nécessaires :

- les constructeurs de matériels électrotechniques et électroniques destinés à un marché mondial doivent prendre en compte des tolérances qui varient selon les pays.
- les bureaux d'études et les installateurs doivent aussi prendre en compte ces phénomènes dès la conception des réseaux, et selon les besoins de leurs clients trouver des solutions techniques au niveau des schémas de distribution et de l'appareillage.
- Les installations Basse Tension sont soumises à la norme CEI 60364 (en France la NF C 15-100).

### IV.2.2 Les tensions nominales

Le domaine de la BT concerne les tensions :

- alternatives :  $\leq 1\ 000$  V (fréquence  $\leq 10$  kHz),
- continues  $\leq 1\ 500$  V.

Aussi appelées « tensions assignées », elles sont définies dans la publication CEI 60038 de 1983. La plus usitée des tensions de la BT est « 230/400 V », en France elle a été officialisée par l'arrêté du 29/05/86.

Dans le monde, et jusqu'en 2003, on trouvera encore diverses tensions nominales :

- Européenne : 220/380 V, 50 Hz,
- Anglaise : 240/415 V, 50 Hz,
- USA : 120/240 V et 480 V, 60 Hz,
- Japon : 100/200 V, 50 et 60 Hz.

Mais ces tensions varient autour de la tension nominale en fonction de la structure et de la charge du réseau (longueur des conducteurs et variation de la charge) et des systèmes régulateurs du réseau public (ou privé).

En Europe, la norme EN 50160 indique qu'en exploitation normale, pour chaque période d'une semaine, 95 % des valeurs efficaces moyennées  $U_n$  sur 10 minutes doivent se situer dans la plage de  $\pm 10$  %. A titre d'exemple, en France, EDF annonce une plage de variation de  $\pm 10$  % mais admet, que temporairement, les tensions puissent s'écarter de plus de 20 % de la tension nominale.

De plus ces variations sont à associer à la notion de durée, exemples :

- permanent  $U_n \pm 10$  %,
- cinq minutes  $U_n \pm 20$  %.

Dans les pays en voie de développement, il est possible d'observer fréquemment des variations plus fortes que  $\pm 20\%$ .

### IV.2.3 La fréquence

En ce qui concerne la fréquence, les variations lentes autour de la valeur nominale 50Hz ou 60 Hz sont généralement faibles. Dans les pays européens, dont les réseaux sont interconnectés, la norme EN 50160 précise 50 Hz  $\pm 1\%$  pendant 95 % de la durée d'une semaine, et dans la plage [+ 4 %, - 6 %] en cas de perturbation sévère. Ces variations peuvent être bien plus importantes pour des réseaux autonomes, par exemple sur une île.

### IV.2.4 Les perturbations d'amplitude

Les réseaux sont perturbés, par des variations de charge en exploitation normale, mais surtout par des phénomènes aléatoires dont l'origine est accidentelle, court-circuit par exemple.

Un réseau BT est soumis à ces deux causes de perturbations quelle que soit leur origine (BT, MT, ou HT).

Les deux principales perturbations de l'amplitude sont :

- les creux de tension et coupures brèves,
- les surtensions.

## IV.3 Norme EN 50160

L'EN 50160 donne les principaux paramètres de tension, et leurs plages de variation acceptables, au point de raccordement du client au réseau public de distribution en basse tension (BT) et en moyenne tension (MT), dans des conditions normales de fonctionnement. Dans ce contexte, la basse tension correspond à une tension nominale efficace *rms* entre phases ne dépassant pas 1000 V, et la moyenne tension correspond à une tension nominale efficace entre phases *rms* comprise entre 1000 V et 35 kV [VQE-99].

La comparaison entre les exigences de l'EN 50160 et celles des normes CEM EN 61000, présentées dans les **tableaux 1 et 2**, montre des différences significatives pour certains paramètres. Il y a deux raisons majeures pour justifier ces différences :

Les normes CEM concernent la tension d'utilisation, selon la CEI 038, alors que l'EN 50160 traite de la tension d'alimentation. La différence entre ces tensions est due à la chute de tension dans l'installation et aux perturbations provenant du réseau et des autres équipements connectés à l'installation. C'est pourquoi, dans la plupart des normes de la Série EN 61000 le

courant consommé est un paramètre important alors que le courant de charge n'est pas traité par l'EN 50160.

L'EN 50160 indique seulement des limites générales, qui sont techniquement et économiquement possibles au fournisseur de maintenir dans un réseau public de distribution. Lorsque des conditions plus rigoureuses sont nécessaires.

N°	Paramètres	Caractéristiques de la tension d'alimentation selon la norme EN 50160	Caractéristiques de la basse tension selon la norme CEM EN 61000	
			EN 61000-2-2	Autres parties
1	Fréquence	BT, MT : valeur moyenne de la fréquence fondamentale mesurée par période de 10 s $\pm 1\%$ (49,5 – 50,5 Hz) pendant 99.5% d'une semaine -6%/+4% (47 – 52 Hz) pendant 100% du temps	2%	
2	Variations de la tension fournie	BT, MT : $\pm 10\%$ pendant 95% d'une semaine, valeurs efficaces moyennée sur 10 minutes		$\pm 10\%$ pendant 15 minutes
3	Variations rapides de la tension	BT : 5% en conditions normales 10% dans certaines circonstances $Plt \leq 1$ pendant 95% d'une semaine MT : 4% en conditions normales 6% dans certaines circonstances $Plt \leq 1$ pendant 95% d'une semaine	3% en conditions normales 8% dans certaines circonstances $Pst \leq 1$ $Plt \leq 0,8$	3% en conditions normales 4% dans certaines circonstances $Pst \leq 1,0$ $Plt \leq 0,65$ (EN 61000-3-3) 3% (CEI 61000-1-12)
4	Creux de tension	En général : durée < 1s, profondeur < 60% Dans certains endroits, du fait de commutations de charge : BT : 10 – 50%, MT : 10 – 15%	En milieu urbain : 1 à 4 par mois	Jusqu'à 30% pendant 10 ms ; Jusqu'à 60% pendant 100 ms (EN 61000-6-1, 6-2) Jusqu'à 60 % pour 1000 ms (EN 61000-6-2)
5	Coupures brèves de la tension fournie	BT, MT : (jusqu'à 3 minutes) Quelques dizaines à quelques centaines par an Durée de 70% d'entre elles < 1 s		95% de baisse de tension pendant 5 s (EN 61000-6-1, 6-2)

6	Coupures longues de la tension fournie	BT, MT : (plus de 3 minutes) < 10 – 50 par an		
7	Surtensions temporaires sur le réseau entre phase et terre	BT: < 1,5 kV efficace MT : 1,7 Uc (neutre à la terre ou impédant) 2,0 Uc (neutre isolé ou résonnant)		
8	Surtensions transitoires entre phase et terre	BT : généralement < 6kV, Occasionnellement plus importante, temps de montée en ms- μs MT : non défini		± 2 kV entre phase et terre ± 1 kV entre phases 1,2/50 (8/20) Tr/Th μs (EN 61000-6-1, 6-2)
9	Déséquilibre de la tension fournie	BT, MT : jusqu'à 2% pendant 95% d'une semaine, valeurs efficaces moyennée sur 10 minutes, Jusqu'à 3% dans certaines régions	2%	2% (CEI 61000-2-12)
10	Tensions harmoniques	BT, MT : voir le tableau 2	6% : 5 <sup>ème</sup> 5% : 7 <sup>ème</sup> 3,5% : 11 <sup>ème</sup> 3% : 13 <sup>ème</sup> , THD < 8%	5% : 3 <sup>ème</sup> 6% : 5 <sup>ème</sup> 5% : 7 <sup>ème</sup> 1,5% : 9 <sup>ème</sup> 3,5% : 11 <sup>ème</sup> 3% : 13 <sup>ème</sup> , 0,3% : 15 <sup>ème</sup> 2% : 17 <sup>ème</sup> (EN 61000-3-2)
11	Tensions inter harmoniques	BT, MT : à l'étude	0,2%	

**Tableau IV.1 Comparaison des exigences de la tension d'alimentation selon l'EN50160 et les normes CEM EN 61000.**

Lorsque des conditions plus rigoureuses sont nécessaires, arrangement séparé et détaillé entre le fournisseur et le client doit être négocié. Il est à noter que les mesures pour améliorer la qualité de l'énergie nécessitent des coûts et des matériels supplémentaires et sont traités dans d'autres parties de ce guide.

L'EN 50160 a des limitations supplémentaires. En effet, elle ne s'applique pas dans des conditions anormales d'exploitation, incluant les cas suivants :

- Situations résultant d'une avarie ou d'une condition temporaire d'alimentation,
- Dans le cas d'une non-conformité de l'installation ou des équipements du client aux normes applicables ou aux règles techniques pour le raccordement des charges,

- Dans le cas d'une non-conformité de l'installation ou des équipements du client aux normes applicables ou aux règles techniques pour le raccordement au réseau de distribution électrique,
- Dans des situations exceptionnelles non maîtrisables par le distributeur d'électricité, telles que :
  - conditions climatiques exceptionnelles et autres catastrophes naturelles
  - Faits provenant de tiers
  - Décisions officielles
  - Faits de grève (assujettis aux exigences légales)
  - Cas de force majeure
  - Coupures résultant d'événements extérieurs.

Comme le montre l'analyse des données présentées dans le tableau 1, ces exigences ne sont pas particulièrement contraignantes pour le fournisseur. Les nombreuses situations pour lesquelles la norme ne s'applique pas permettent de justifier la plupart des coupures ou des perturbations de tension qui surviennent en pratique. Ainsi, de nombreux fournisseurs interprètent les exigences de l'EN 50160 comme principalement informatives et n'acceptent aucune responsabilité lorsque les tolérances sont dépassées [VQE-99].

D'un côté, le point de vue des consommateurs est totalement différent. Ils considèrent les tolérances données par l'EN 50160 comme étant des exigences qui doivent être garanties par le fournisseur. Cependant, comme cela est mentionné précédemment, pour la plupart des consommateurs, même la conformité aux exigences de l'EN 50160 ne permet pas de garantir un niveau satisfaisant de la qualité de l'énergie. En pareils cas, le niveau de qualité d'énergie demandé doit être défini dans un contrat séparé entre le fournisseur et le client.

Harmoniques impaires				Harmoniques paires	
Non multiples de 3		multiples de 3		Ordre $h$	Tension relative %
Ordre $h$	Tension relative %	Ordre $h$	Tension relative %		
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.5	6...24	0.5
13	3	21	0.5		
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

**Tableau IV.2 Valeurs des tensions harmoniques individuelles aux points de fourniture, jusqu'au rang 25, exprimées en pourcentage de  $U_n$ .**

## IV.4 Problèmes du réseau électrique traité

### IV.4.1 Surtension

Augmentation soudaine de la valeur efficace de la tension sur l'ensemble des trois phases (10 % de la tension nominale) pour une durée variant de 8 ms à 1s (**Figure (IV.1)**).

Mis à part les élévations accidentelles de tension, par exemple branchement d'un transformateur 230 V en 400 V, les seules élévations de tension qui peuvent dépasser la plage nominale de variation  $U_n + 10\%$  s'observent lorsque le réseau BT n'est pas chargé.

Mais les transformateurs des postes sources sont généralement équipés de régleurs en charge qui permettent au distributeur d'énergie de maintenir la BT dans la plage  $U_n + 7\%$ .

D'autre raison notable : fusion de fusible, enclenchement de condensateur, coupure de contacteur...etc. [**QAE-90**].

### IV.4.2 Baisse de tension

Un 'défaut réseau' est, physiquement, un court-circuit se produisant quelque part dans le réseau, un creux de tension étant la répercussion de ce défaut sur la tension.

La baisse de tension est généralement définie comme une diminution brusque de la tension de fourniture à une valeur inférieure de 10 % à près de 100 % de la valeur nominale de la tension pendant un temps compris entre 10 ms et quelques secondes (**Figure (IV.1)**). Lorsque la tension est absente (baisse de tension de 100 %) pendant 1 s à 1 mn on parle de « coupure brève », et entre 10 ms et 1 s de « coupure très brève ». Lorsque la durée est inférieure 10 ms, la coupure est généralement due à des « phénomènes transitoires » ou volontaires, par exemple à l'emploi de gradateurs.

L'origine de ce phénomène est un important appel de courant sur le réseau, démarrage de récepteur à forte puissance, défaut sur le réseau : court-circuit, défaut de terre, commutation de charge...etc.

Ce problème engendre quelques désagrément, en effet, il peut perturber les appareils raccordés au réseau d'alimentation et provoquer un dysfonctionnement momentané ou dans le pire des cas, permanent [**QAE-90**].

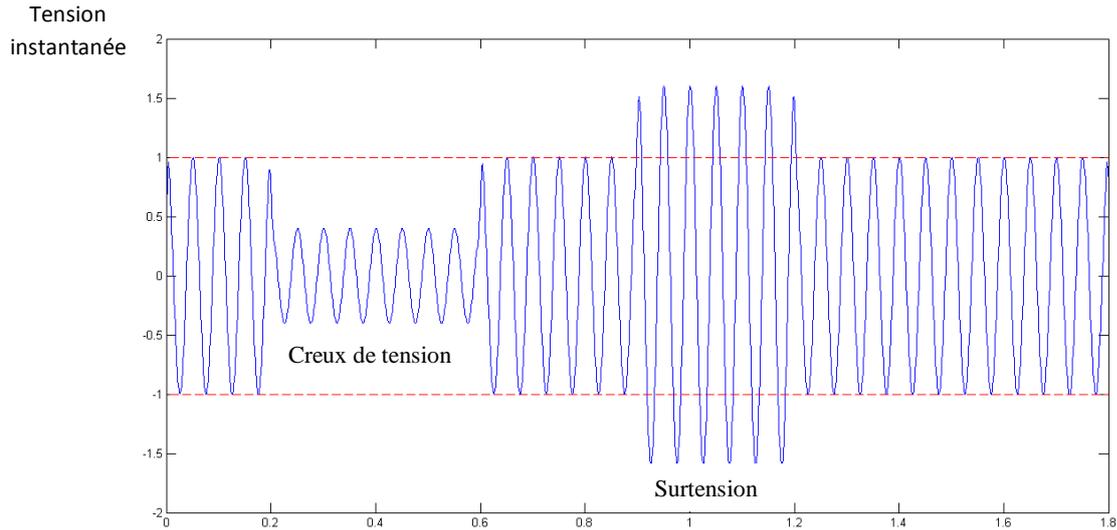
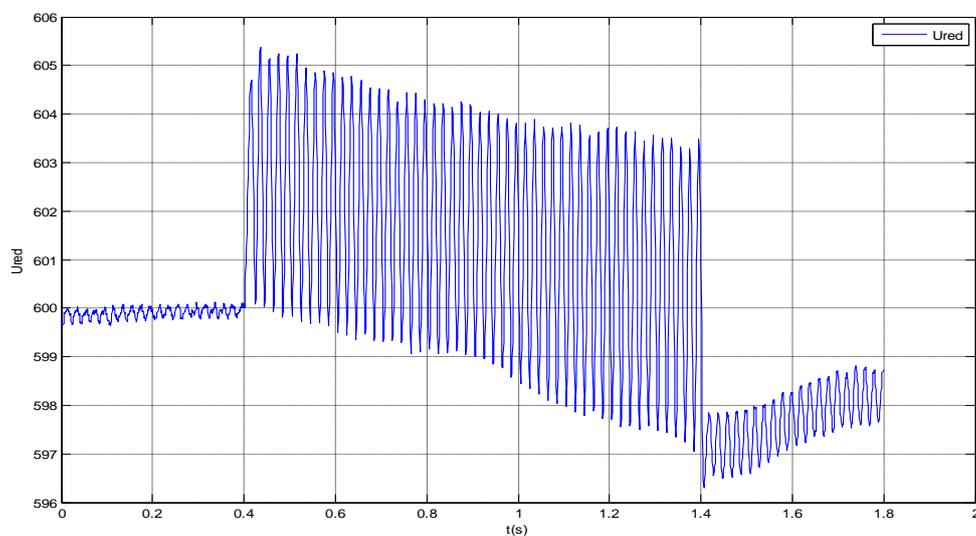


Fig. IV.1 Surtension et creux de tension.

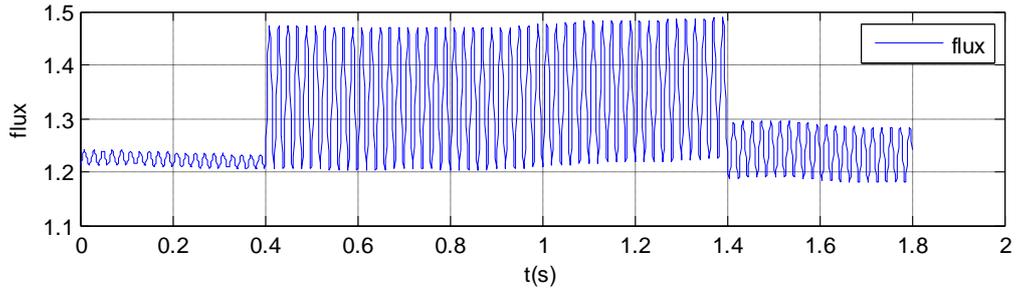
## IV.5 Simulation et interprétation

### IV.5.1 Surtension

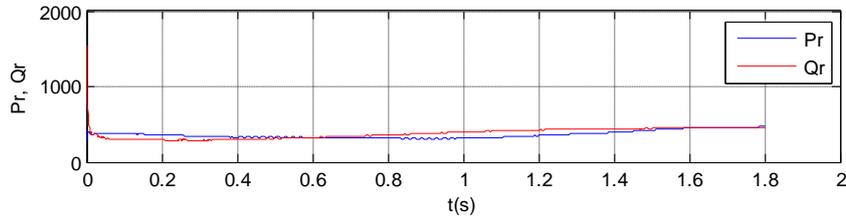
Dans le 'test4', nous simulons le fonctionnement de l'éolienne dans les mêmes conditions que celles du « test1 » sauf que le réseau électrique subit une surtension de 10 % dans l'intervalle de temps  $t = 0.4s$  à  $t = 1.4s$ . Les résultats de cette simulation sont présentés à la **Figure (IV.2)**.



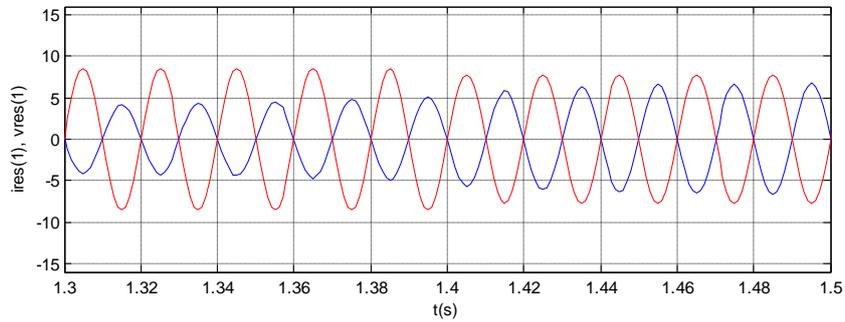
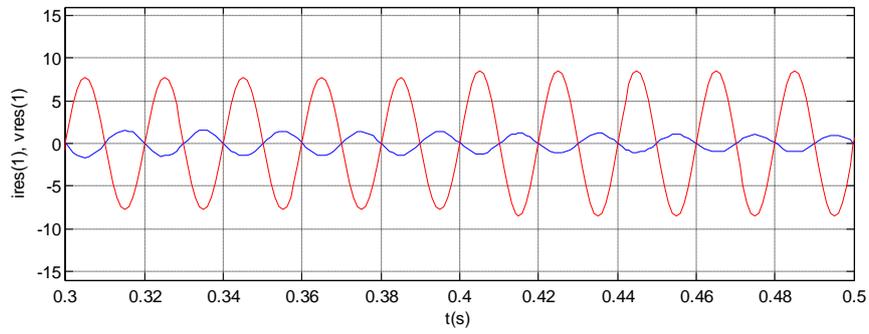
#### a) Variation de tension du bus continu.



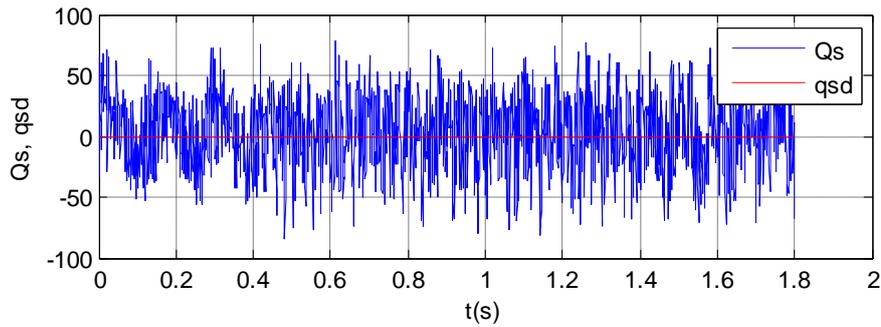
**b) Variation du flux.**



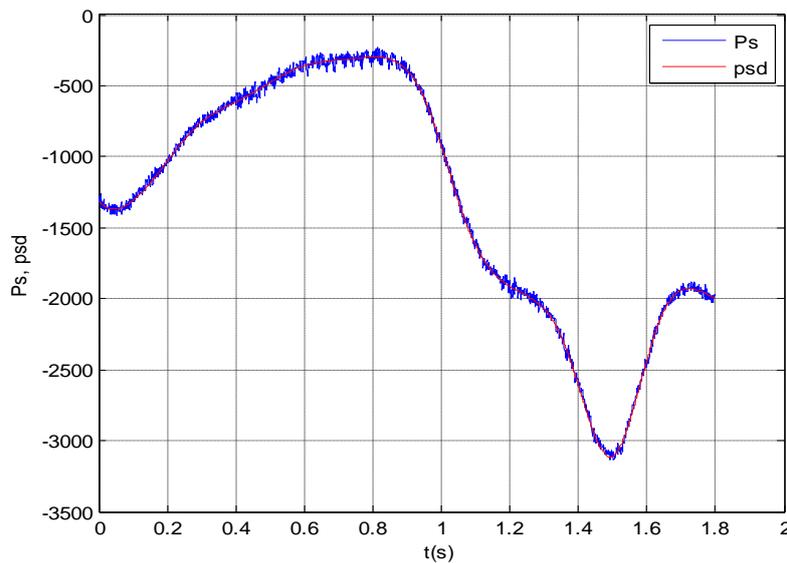
**c) Puissance active et réactive du rotor.**



**d) Courant et tension sur une phase du réseau.**



e) **Puissance réactive du stator.**



f) **Puissance active au stator.**

**Fig. IV.2** Test de l'éolienne dans le cas où le réseau subit une surtension.

L'analyse de ces figures montrent que :

La tension du bus continue (**Figure (IV.2a)**) subit une faible variation ( $\Delta U_{dc} < 0.85\%$ ) due à la surtension. En effet, cette tension varie faiblement autour de la référence (600V) puis, à  $t = 0.4s$  elle subit une variation de près de 5V qui diminue de plus en plus pour atteindre -3V à l'instant  $t = 1.4s$  (à la fin de la surtension). A partir de  $t=1.4s$ , la tension  $U_{dc}$  commence à augmenter pour normalement atteindre la valeur de référence au-delà de  $t=1.8s$ .

Le flux (**Figure (IV.2b)**) ondule faiblement dans l'intervalle  $t < 0.4s$  avec une variation de ( $\Delta\psi_s = 1\%$ ) puis ses fluctuations s'accroissent à partir de  $t = 0.4s$  pour atteindre une valeur maximale de ( $\Delta\psi_s = 21\%$ ) par la suite, une fois la perturbation disparue, ces mêmes fluctuations s'atténuent ( $\Delta\psi_s = 8\%$ ) sans pour autant revenir à la valeur d'avant la perturbation.

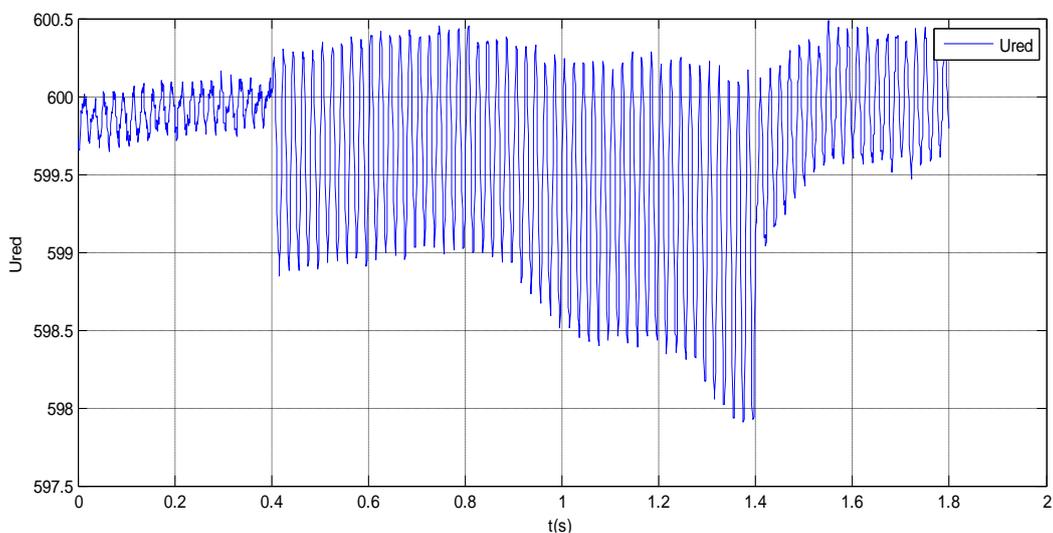
La puissance active et celle réactive au niveau du rotor (**Figure (IV.2c)**) restent compatibles avec le fonctionnement admissible de la machine de plus ce fonctionnement est en hypo- synchrone.

La **Figure (IV.2d)** montre que la surtension n'affecte pas le déphasage entre la tension et le courant du réseau. Le facteur de puissance reste pratiquement unitaire tout le long de l'essai de l'instant initial à l'instant final.

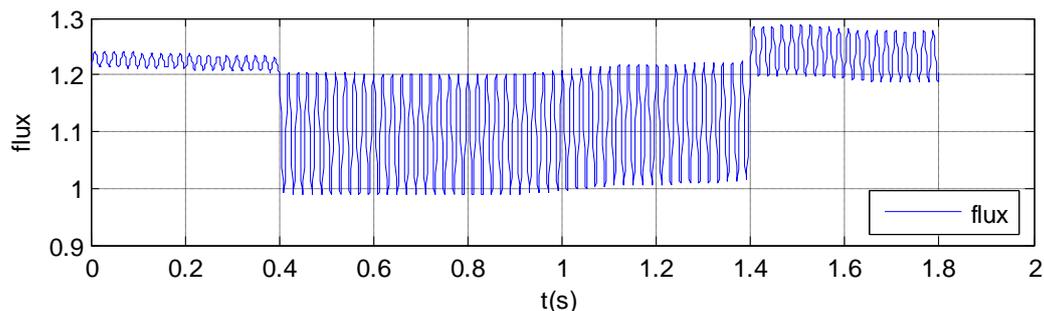
A partir des (**Figures (IV.2e) & (IV.2f)**), on remarque que l'objectif de commande est réalisé. En effet, la puissance active suit sa référence malgré quelques perturbations minimales enregistrées à partir de  $t = 0.4s$ , et la puissance réactive varie autour de zéro sans dépasser les limites tolérables.

### IV.5.2 Creux de tension

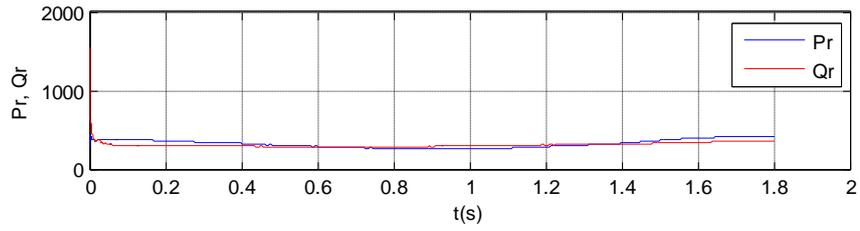
Dans ce '**test5**', nous simulons le fonctionnement de l'éolienne sur un horizon de 1.8s, le réseau électrique est assujéti à une baisse de tension de 10% dans l'intervalle de temps  $[0.4s \text{ } 1.4s]$ . La **Figure (IV.3)** fournit les résultats obtenus.



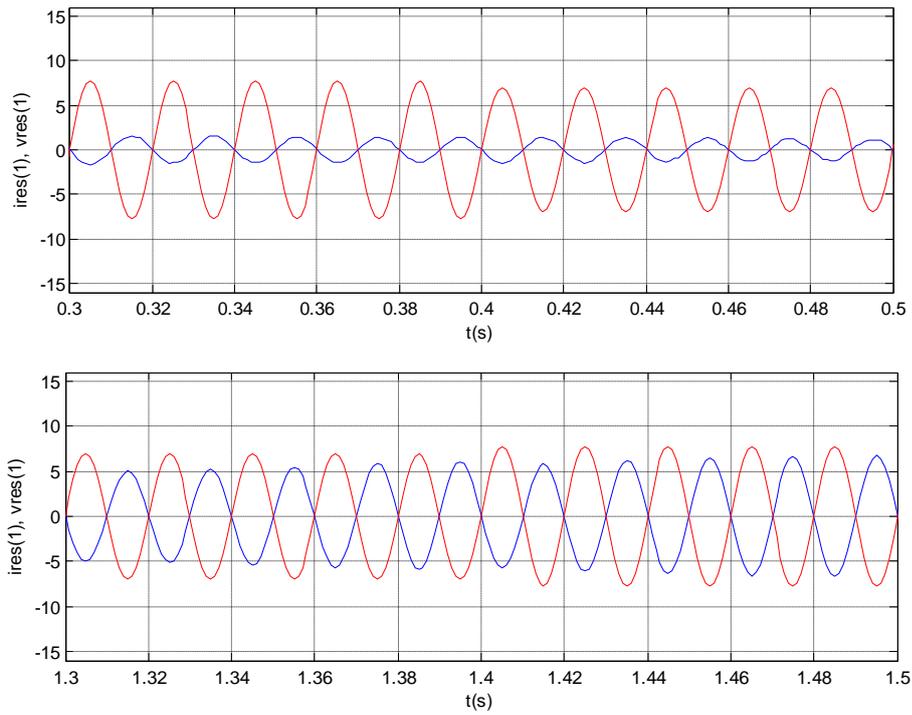
a) Variation de la tension du bus continu.



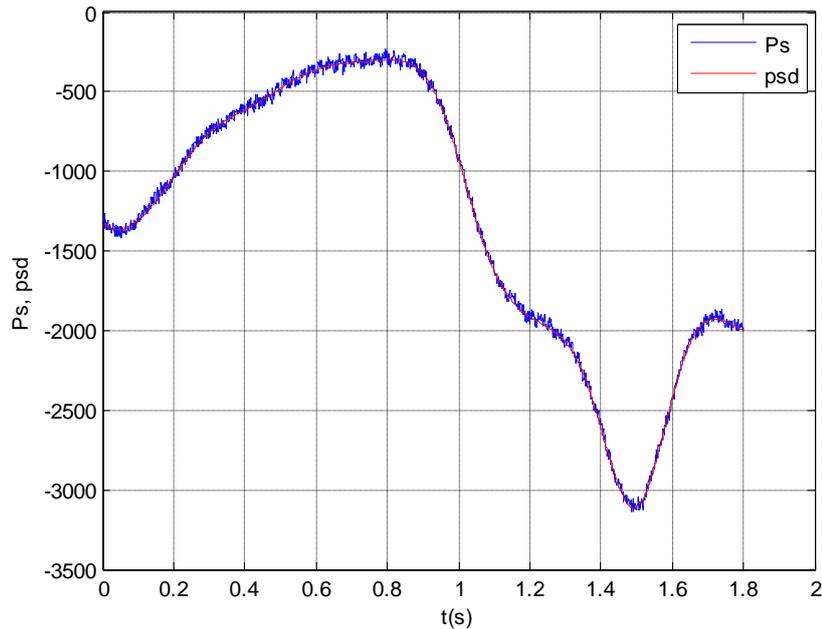
b) Variation du flux.



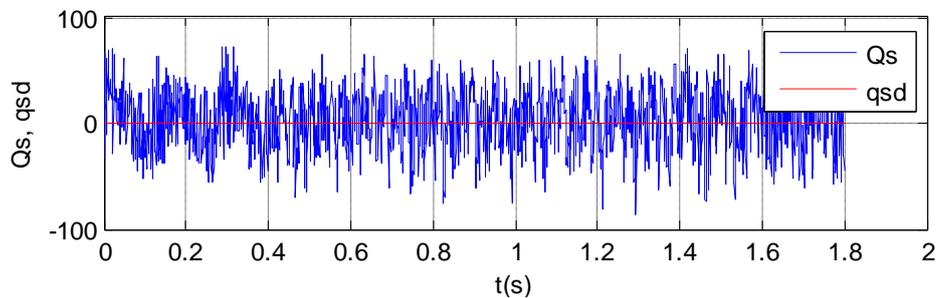
**c) Puissance active et réactive du rotor.**



**d) Courant et tension sur une phase du réseau.**



e) Puissance active du stator.



f) Puissance réactive du stator.

Fig. IV.3 Test de l'éolienne dans le cas où le réseau subit une baisse de tension.

L'analyse de ces résultats montre que :

En présence du creux de tension, la tension du bus continu (**Figure (IV.3a)**) subit une faible diminution de 2.1V ( $\Delta U_{dc}=0.35\%$ ) puis dès la disparition de la perturbation elle revient rapidement autour de sa valeur de référence (600V) en présentant une ondulation maximale de 0.5V. Il est à noter qu'avant l'instant  $t=0.4s$ , cette même ondulation était très faible de 0.13V. On peut donc affirmer que le réglage de la tension du bus continu est peu sensible au creux de tension considéré.

De la **Figure (IV.3b)**, nous remarquons que le module du flux diminue brusquement de 0.2Wb à l'instant  $t = 0.4s$ . Ceci est tout à fait conforme au fonctionnement d'une machine asynchrone puisque le module du flux est pratiquement proportionnel à la tension dans le cas où la chute de tension résistive est négligeable. De plus, le module du flux revient à sa valeur initiale après  $t = 1.4s$ .

On constate de la **Figure (IV.3c)** des petites variations sur la puissance active et réactive rotorique, les deux puissances subissent des oscillations négligeables de  $t = 0.4s$  jusqu'à  $t = 1.4s$ , et restent dans une plage admissible.

La tension et le courant d'une phase de la MADA restent pratiquement en opposition de phase (**Figure (IV.3d)**) ce qui correspond à un facteur de puissance unitaire. Par conséquent, on peut affirmer que notre commande maintient un fonctionnement de la MADA à un facteur de puissance désirée malgré la présence du creux de tension considéré.

La puissance active et celle réactive au stator (**Figures (IV.3e) & (IV.3f)**) suivent leurs références avec une faible variation ; on peut donc affirmer que l'objectif de commande est bien réalisé. En effet, la puissance active présente des petites oscillations autour de sa valeur de référence et que la puissance réactive évolue pratiquement de la même manière sur tout l'intervalle de simulation.

On peut ainsi conclure que la commande de la puissance active et celle réactive de la MADA par la technique des modes de glissement reste robuste en présence d'une surtension ou d'une baisse de tension. En effet, les tests effectués ont révélés que les grandeurs de mesure restent tolérables en présence de la perturbation, tout en respectant l'objectif de commande.

## IV.6 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté les problèmes que subit le réseau électrique en BT dans le but d'étudier leurs influences sur le fonctionnement de la chaîne de conversion.

Ensuite, nous avons présenté les normes **EN 50160** et **CEM EN 61000**, qui définissent les plages de variation tolérables pour chaque type d'aléas affectant le réseau électrique. Par la suite, nous nous sommes particulièrement intéressés aux perturbations dues à une surtension et une baisse de tension. Ces dernières ont été définies tout en expliquant leurs causes et leurs conséquences sur les dispositifs branchés au réseau.

Et pour achever ce chapitre, nous avons simulé le fonctionnement de la chaîne éolienne lorsque le réseau subit ce type de perturbations dans le but d'évaluer les performances de la commande proposée. Les tests effectués ont montré que la commande de la puissance active et celle réactive est robuste face à ces perturbations tout en maintenant la tension du bus continu proche de sa référence et les états du système tolérables.

---

## Conclusions générale

L'objectif, préalablement défini dans ce travail, consistait en la commande par les modes glissants de la puissance d'une chaîne de conversion éolienne et en l'amélioration de ces performances de production d'énergie en présence des perturbations affectant le réseau électrique. A la lumière de l'étude effectuée, nous avons vu les étapes successives permettant d'élaborer une stratégie de commande pour une génératrice éolienne jusqu'à sa mise en œuvre, et ceci en tenant compte de quelques perturbations du réseau électrique.

Dans le premier chapitre, nous avons brièvement présenté quelques généralités sur l'éolienne. Ainsi, nous avons tout d'abord présenté la partie mécanique : l'éolienne à axe verticale, quelques notions théoriques sur la turbine et la caractéristique de la voilure. Ensuite, nous avons présenté la partie électrique : la MADA et l'alimentation de son rotor par un convertisseur du type « back to back ». Nous avons également expliqué l'intérêt d'un fonctionnement de la génératrice à vitesse variable dans la production de l'énergie et nous avons donné les raisons du choix de la MADA comme génératrice de la chaîne de conversion.

Le chapitre deux est essentiellement dédié à la modélisation de notre système éolien, en effet, deux parties sont à distinguer, la partie mécanique et la partie électrique, la première est consacrée à la modélisation de la turbine ainsi, nous avons explicité le couple mécanique produit par la turbine et l'équation dynamique de l'arbre. Dans la deuxième partie, nous nous sommes intéressés à la partie électrique du système de conversion éolien. En effet, nous avons principalement établi le modèle d'état de la MADA basé sur les grandeurs électriques du stator. De plus, nous avons modélisé le fonctionnement du convertisseur CCM et celui CCR et nous avons également développé le modèle  $(d,q)$  de la source du réseau connectée au CCR.

Le troisième chapitre est surtout consacré à la commande de la partie électrique de la chaîne de conversion pour la production de l'énergie électrique. Ainsi, nous avons tout d'abord présenté un bref rappel sur la technique de commande par les modes glissants. Puis nous avons appliqué cette méthode pour commander la puissance active et celle réactive au stator de la MADA connectée au réseau. La synthèse de commande s'est effectuée sur la base du modèle non linéaire déjà établi au chapitre II. Les simulations du fonctionnement de la chaîne éolienne ont été menées pour un profil du vent relatif à la région de l'Atlas Tellien et dans le cas où la caractéristique de la voilure est connue ou inconnue. Dans le cas inconnu nous avons recouru à un algorithme du type « MPPT » pour générer la référence de la puissance optimale. De plus, lors de ces simulations, nous avons testé le comportement du système lorsque le modèle de la MADA est affecté par des variations paramétriques. Les résultats obtenus ont révélé que la commande proposée a permis le suivi de la puissance optimale (la référence) avec une précision satisfaisante même en présence des perturbations paramétriques. Il faut noter que ces performances ont été établies tout en maintenant les grandeurs physiques du système dans leurs plages admissibles.

Pour finir notre mémoire, dans le chapitre quatre, nous nous sommes intéressés aux perturbations qui affectent le réseau électrique et leurs influences sur le comportement de notre système de conversion. De ce fait, nous avons présenté, en premier lieu, les normes utilisées en basse tension et les perturbations électriques survenant occasionnellement. Il y a lieu de préciser que ces perturbations sont définies selon des normes internationales, notre choix s'est orienté vers la norme européenne **EN 50160**. En second lieu, nous avons testé notre système de conversion d'énergie en présence de surtension et de baisse de tension. Les résultats de simulation nous ont permis de conclure que la commande par les modes de glissement proposée a permis d'atteindre notre objectif principale. De ce fait, la commande proposée reste robuste en présence des perturbations affectant la tension du réseau électrique.

Comme perspective, il serait intéressant d'appliquer la technique par les modes glissants d'ordre supérieure, afin de réduire encore plus le broutement dû aux modes glissants classiques, tout en assurant la même robustesse. Il serait aussi possible d'améliorer le rendement de la MADA en orientant la recherche vers l'élaboration d'algorithmes « MPPT » plus performant. Notre souhait serait d'expérimenter nos travaux de simulations sur un site réel de production d'énergie éolienne, et de pouvoir ainsi implémenter les commandes proposées.

## Annexe A : Transformation Tri-Bi

Equations électriques :

➤ Pour le Stator

$$[v_s]_{abc} = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt} [\Psi_s]_{abc} \quad (\text{A.1})$$

➤ Pour le Rotor

$$[v_r]_{abc} = [R_r][i_r]_{abc} + \frac{d}{dt} [\Psi_r]_{abc} \quad (\text{A.2})$$

Equations magnétiques :

➤ Pour le Stator

$$[\Psi_s]_{abc} = [L_s][i_s]_{abc} + [M_{sr}][i_r]_{abc} \quad (\text{A.3})$$

➤ Pour le Rotor

$$[\Psi_r]_{abc} = [L_r][i_r]_{abc} + [M_{sr}]^t [i_s]_{abc} \quad (\text{A.4})$$

Avec

$$[v_s]_{abc} = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; [i_s]_{abc} = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [\Psi_s]_{abc} = \begin{bmatrix} \Psi_{as} \\ \Psi_{bs} \\ \Psi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix}; [R_s] = R_s [I]_{3 \times 3} \quad (\text{A.6})$$

$$[v_r]_{abc} = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}; [i_r]_{abc} = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; [\Psi_r]_{abc} = \begin{bmatrix} \Psi_{ar} \\ \Psi_{br} \\ \Psi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}; [R_r] = R_r [I]_{3 \times 3} \quad (\text{A.8})$$

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

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - C_f + C_{mec} \quad (\text{A.10})$$

Avec :

$\Rightarrow C_{mec}$  et  $C_f$  sont des grandeurs positives

$\Rightarrow C_{em}$  est une grandeur algébrique.

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [i_{qs} \Psi_{ds} - i_{ds} \Psi_{qs}]$$

**Transformation de Park-Clark :**

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

$$\text{Avec } P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

d'ou :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = P(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

Avec

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix}$$

En appliquant la transformation de Park sur les équations électriques et magnétiques du stator ainsi que du rotor, on obtient :

### Equations électriques :

#### ➤ Pour le Stator

A partir de l'équation (A.1), on a :

$$P(\theta_s)[v_s]_{abc} = P(\theta_s)[R_s][i_s]_{abc} + P(\theta_s) \frac{d}{dt} [[\Psi_s]_{abc}] \quad (A.13)$$

Or :

$$\begin{aligned} [i_s]_{abc} &= P(\theta_s)^{-1}[i_s]_{dqo}, [\Psi_s]_{abc} = P(\theta_s)^{-1}[\Psi_s]_{dqo}, \\ [v_s]_{abc} &= P(\theta_s)^{-1}[v_s]_{dqo} \end{aligned} \quad (A.14)$$

Avec :

$$[i_s]_{dqo} = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \end{bmatrix}, [\Psi_s]_{dqo} = \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{os} \end{bmatrix}, [v_s]_{dqo} = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{os} \end{bmatrix} \quad (A.15)$$

En remplaçant (A.14) dans (A.13) on obtient :

$$[v_s]_{dqo} = P(\theta_s)[R_s]P(\theta_s)^{-1}[i_s]_{dqo} + P(\theta_s) \frac{d(P(\theta_s)^{-1}[\Psi_s]_{dqo})}{dt} \quad (A.16)$$

$$= P(\theta_s)[R_s]P(\theta_s)^{-1}[i_s]_{dqo} + P(\theta_s) \frac{dP^{-1}(\theta_s)}{dt} [\Psi_s]_{dqo} + P(\theta_s)P(\theta_s)^{-1} \frac{d[\Psi_s]_{dqo}}{dt} \quad (A.17)$$

Sachant que :

$$P(\theta_s)P(\theta_s)^{-1} = I_{3 \times 3} \quad (\text{A.18})$$

On simplifie le terme suivant:

$$\begin{aligned} P(\theta_s) \frac{dP^{-1}(\theta_s)}{dt} [\Psi_s]_{dqo} &= P(\theta_s) \frac{d\theta_s}{dt} \frac{dP^{-1}(\theta_s)}{d\theta_s} [\Psi_s]_{dqo} \\ &= \frac{d\theta_s}{dt} P(\theta_s) \frac{dP^{-1}(\theta_s)}{d\theta_s} [\Psi_s]_{dqo} \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

Avec :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s, \quad P(\theta_s) \frac{dP^{-1}(\theta_s)}{d\theta_s} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P(\theta_s)[R_s]P(\theta_s)^{-1} = [R_s] \quad (\text{A.20})$$

On obtient finalement:

$$[v_s]_{dqo} = [R_s][i_s]_{dqo} + \omega_s \begin{bmatrix} -\Psi_{qs} \\ \Psi_{ds} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} [\Psi_s]_{dqo} \quad (\text{A.21})$$

Donc :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs} \\ v_{os} = R_s i_{os} + \frac{d}{dt} \Psi_{os} \end{cases} \quad (\text{A.22})$$

### ➤ Pour le Rotor

De la même manière, on retrouve les équations du **rotor**, à partir de l'équation (A.2) on a :

$$P(\theta_r)[v_r]_{abc} = P(\theta_r)[R_r][i_r]_{abc} + P(\theta_r) \frac{d}{dt} [[\Psi_r]_{abc}] \quad (\text{A.23})$$

Avec :

$$\theta_r = \theta_a - \theta_m \quad (\text{A.24})$$

$$\theta_m(t) = \int_0^t \omega_m(t) dt \quad (\text{A.25})$$

Or :

$$\begin{aligned} [i_r]_{abc} &= P(\theta_r)^{-1} [i_r]_{dqo}, [\Psi_r]_{abc} = P(\theta_r)^{-1} [\Psi_r]_{dqo}, \\ [v_r]_{abc} &= P(\theta_s)^{-1} [v_r]_{dqo} \end{aligned} \quad (\text{A.26})$$

Avec :

$$[i_r]_{dqo} = \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix}, [\Psi_r]_{dqo} = \begin{bmatrix} \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \\ \Psi_{or} \end{bmatrix}, [v_r]_{dqo} = \begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \\ v_{or} \end{bmatrix} \quad (\text{A.27})$$

En remplaçant (A.26) dans (A.23) on obtient :

$$[v_r]_{dqo} = P(\theta_r) [R_r] P(\theta_r)^{-1} [i_r]_{dqo} + P(\theta_r) \frac{d(P(\theta_r)^{-1} [\Psi_r]_{dqo})}{dt} \quad (\text{A.28})$$

$$= P(\theta_r) [R_r] P(\theta_r)^{-1} [i_r]_{dqo} + P(\theta_r) \frac{dP^{-1}(\theta_r)}{dt} [\Psi_r]_{dqo} + P(\theta_r) P(\theta_r)^{-1} \frac{d[\Psi_r]_{dqo}}{dt} \quad (\text{A.29})$$

Sachant que :

$$P(\theta_r) P(\theta_r)^{-1} = I_{3 \times 3} \quad (\text{A.30})$$

On simplifie le terme suivant:

$$\begin{aligned} P(\theta_r) \frac{dP^{-1}(\theta_r)}{dt} [\Psi_r]_{dqo} &= P(\theta_r) \frac{d\theta_r}{dt} \frac{dP^{-1}(\theta_r)}{d\theta_r} [\Psi_r]_{dqo} \\ &= \frac{d\theta_r}{dt} P(\theta_r) \frac{dP^{-1}(\theta_r)}{d\theta_r} [\Psi_r]_{dqo} \end{aligned} \quad (\text{A.31})$$

Sachant que :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = \omega_a - \omega_m, P(\theta_r) \frac{dP^{-1}(\theta_r)}{d\theta_r} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, P(\theta_r)[R_r]P(\theta_r)^{-1} = [R_r] \quad (\text{A.32})$$

On obtient finalement :

$$[v_r]_{dqo} = [R_r][i_r]_{dqo} + (\omega_a - \omega_m) \begin{bmatrix} -\Psi_{qr} \\ \Psi_{dr} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} [\Psi_r]_{dqo} \quad (\text{A.33})$$

Donc :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_a - \omega_m) \Psi_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_a - \omega_m) \Psi_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} \\ v_{or} = R_r i_{or} + \frac{d}{dt} \Psi_{or} \end{cases} \quad (\text{A.34})$$

**Equations magnétique :**

➤ **Pour le Stator**

De l'équation (A.3) on a :

$$[\Psi_s]_{abc} = [L_s][i_s]_{abc} + [M_{sr}][i_r]_{abc} \quad (\text{A.35})$$

$$P(\theta_s)[\Psi_s]_{abc} = P(\theta_s)[L_s][i_s]_{abc} + P(\theta_s)[M_{sr}][i_r]_{abc} \quad (\text{A.36})$$

$$[\Psi_s]_{dqo} = P(\theta_s)[L_s]P(\theta_s)^{-1}[i_s]_{dqo} + P(\theta_s)[M_{sr}]P(\theta_r)^{-1}[i_r]_{dqo} \quad (\text{A.37})$$

Après calcul on trouve :

$$P(\theta_s)[L_s]P^{-1}(\theta_s) = \begin{bmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - m_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s + 2m_s \end{bmatrix} = [L_s]_{dqo} \quad (\text{A.38})$$

On pose :

$$L_s = l_s - m_s \text{ et } L_{os} = l_s + 2m_s \quad (\text{A.39})$$

Et on trouve :

$$P(\theta_s)[M_{sr}]P^{-1}(\theta_r) = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} m_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} m_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [M_{sr}]_{dqo} \quad (\text{A.40})$$

$$\text{On pose : } \frac{2}{3} m_{sr} = M \quad (\text{A.41})$$

On obtient finalement :

$$[\Psi_s]_{dqo} = [L_s]_{dqo} [i_s]_{dqo} + [M_{sr}]_{dqo} [i_r]_{dqo} \quad (\text{A.42})$$

On aura donc :

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Psi_{os} = L_{os} i_{os} \end{cases} \quad (\text{A.43})$$

➤ **Pour le Rotor**

De l'équation (A.4), on a :

$$[\Psi_r]_{abc} = [L_r][i_r]_{abc} + [M_{sr}][i_s]_{abc} \quad (\text{A.44})$$

$$P(\theta_r)[\Psi_s]_{abc} = P(\theta_s)[L_r][i_r]_{abc} + P(\theta_r)[M_{sr}][i_s]_{abc} \quad (\text{A.45})$$

$$[\Psi_r]_{dqo} = P(\theta_r)[L_r]P(\theta_r)^{-1}[i_r]_{dqo} + P(\theta_r)[M_{sr}]P(\theta_s)^{-1}[i_s]_{dqo} \quad (\text{A.46})$$

Après calcul on trouve :

$$P(\theta_r)[L_r]P^{-1}(\theta_r) = \begin{bmatrix} l_r - m_r & 0 & 0 \\ 0 & l_r - m_r & 0 \\ 0 & 0 & l_r + 2m_r \end{bmatrix} = [L_r]_{dqo} \quad (\text{A.47})$$

On pose :

$$L_r = l_r - m_r \quad \text{et} \quad L_{or} = l_r + 2m_s \quad (\text{A.48})$$

Et on trouve :

$$P(\theta_r)[M_{sr}]P^{-1}(\theta_s) = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} m_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} m_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [M_{sr}]_{dqo} \quad (\text{A.49})$$

$$\text{On pose : } \frac{2}{3} m_{sr} = M \quad (\text{A.50})$$

On obtient finalement :

$$[\Psi_r]_{dqo} = [L_r]_{dqo} [i_r]_{dqo} + [M_{sr}]_{dqo} [i_s]_{dqo} \quad (\text{A.51})$$

On aura donc :

$$\begin{cases} \Psi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Psi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \\ \Psi_{or} = L_{or} i_{or} \end{cases} \quad (\text{A.52})$$

Enfin, le résultat final est comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs} \\ v_{os} = R_s i_{os} + \frac{d}{dt} \Psi_{os} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_a - \omega_m) \Psi_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} - (\omega_a - \omega_m) \Psi_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} \\ v_{or} = R_r i_{or} + \frac{d}{dt} \Psi_{or} \end{cases} \quad (\text{A.53})$$

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Psi_{os} = L_{os} i_{os} \\ \Psi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Psi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \\ \Psi_{or} = L_{or} i_{or} \end{cases} \quad (\text{A.54})$$

## Annexe B : Paramètres de la chaîne éolienne

### Caractéristiques de la MADA:

- Puissance nominale :  $p_n=4$  (KW)
- Nombre de paire de pôle :  $P=2$
- La résistance statorique :  $R_S=1.2$  ( $\Omega$ )
- L'inductance statorique:  $L_{res}=0.1554$  (H)
- La résistance rotorique:  $R_r=1.8$  ( $\Omega$ )
- L'inductance rotorique:  $L_r=0.1568$  (H)
- La mutuelle inductance :  $M= 0.15$  (H)
- Coefficient de viscosité :  $K_f=0.001$

### Caractéristiques de la turbine:

- Nombre de pâles : 03
- L'inertie totale :  $J_{in}=0.2$  ( $kg.m^2$ )
- Le Rayon de la turbine : 2.4 m
- Le gain du multiplicateur : 8.23
- Densité de l'air : 1.225
- Lambda optimal : 6.41
- Coefficient de puissance optimal : 0.5483

### Caractéristiques du réseau:

- La tension d'alimentation : 220/380 (V)
- La fréquence du réseau  $f=50$  (Hz)
- La résistance du réseau :  $R_{res} = 0.25$  ( $\Omega$ )
- L'inductance du réseau :  $L_{res} = 0.045$  (H)

**Caractéristiques du bus continu:**

- Capacité de filtrage :  $C_f=0.05$  (F)
- La tension du bus continu :  $U_f= 600$  (V)

**Caractéristiques du transformateur:**

- Le rapport de transformation :  $mtr=1$

**Gains des régulateurs PI:**

- PI 1 :  $\Rightarrow \begin{cases} K_p = 1.125 \\ K_I = 0.835 \end{cases}$
- PI 2 :  $\Rightarrow \begin{cases} K_p = 20 \\ K_I = 7.5 \end{cases}$
- PI 3 :  $\Rightarrow \begin{cases} K_p = 20 \\ K_I = 5 \end{cases}$

# Bibliographie

## -A-

[ABD-07] : **A. Abdelli** « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive »,  
Thèse préparée au Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie »  
Unité Mixte CNRS-INPT-UPS N°5213, Octobre 2007.

[AIM-01] : **S. EL-Aimani** « Modélisation de Différentes Technologies éoliennes Intégrées  
dans un Réseau de Moyenne Tension »,  
Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL),  
2005.

[AMS-09] : **Ameziane Sadek** « implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de  
génération hybride solaire-éolien »,  
Thèse de magister, université de Batna, 2009.

## -B-

[BAT -12] : **BATOUCHE. Mohamed Monir, BESSADI Karim** « Commande de la vitesse  
optimale d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une MADA »,  
Mémoire d'ingénieur, l'école nationale polytechnique d'Alger, 2012.

[BEH-12] : **Brahim BENAMIRA – Asma BEHLOULI** « commande Non-linéaire d'une  
éolienne basée sur une MADA »  
Mémoire d'ingénieur de l'école nationale polytechnique d'Alger, 2012

[BEN-11] : **BENLAHRACHE. Mohamed et SADOUD. Sofiane** « Commande Non-linéaire  
d'une éolienne basée sur une MADA »,  
Mémoire d'ingénieur de l'école nationale polytechnique d'Alger, 2011.

**[BEI-08] : B. BELTRAN** « Maximisation de la Puissance Produite par une Génératrice Asynchrone Double Alimentation d'une Eolienne par Mode Glissant d'Ordre Supérieur », Université de Brest, EA 4325 LBMS, IUT de Brest – Rue de Kergoat – CS 93837, 29238 Brest Cedex 03. JCGE'08 LYON, 16 et 17 décembre 2008,

**[BEN-12] : Bennour Cherif** « Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation », thèse de magister de Université Mohamed Khider – Biskra ,2012.

**[BOU-99] : C. Bourillon.** « Wind Energy-Clean Power for Generations. Renewable Energy », Vol 16. Pp. 948-953, 1999.

**[BOU-91] : Fares Boudjema** «commande par mode de glissement application aux convertisseurs électriques»,  
Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 1991

**-C-**

**[CAM-03] : H. CAMBLONG** « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable ». Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers ,18/12/2003.

**-D-**

**[DJO -08] : DJOUDI Abdelhak** « Commandes Non Linéaires d'une Eolienne à Base d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Pilotée Par un Convertisseur Matriciel »,  
Thèse de magister de l'école nationale polytechnique d'Alger, 2008

**-H-**

**[HAM-08] : HAMZAOUI Ihssen** « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur »,  
Thèse de magister de l'école nationale polytechnique d'Alger, 2008

**[HER-01] : Herve Heamart Joseph et Martin** « Conception d'une éolienne (HAWT) par approche aérodynamique »,  
INCI 3101-22, Octobre, 2001.

**[HEI-98] : S. Heier** «Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, Publications »,  
John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998

**[HUS-09] : Ayman Hussain** « contribution a la commande adaptative robuste par modes glissants »,  
Thèse de doctorat ; Université de Reims Champagne Ardenne, 2009.

**-K-**

**[KHA -06] : Khaldi Abderrahmane**, « diagnostic et commande d'une machine synchrone a aimants permanents »,  
Mémoire de magister, ENP Alger, 2006.

**[KOU] : KOUADRIA Mohamed Abdeldjabbar, ALLAOUI Tayeb, KOUADRIA Selmane** « Control flou d'une MADA intégrée dans une éolienne »,  
Laboratoire de génie électrique et génie informatique, université de TIARET.

**-L-**

**[LEC] :P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi** « Eolienne »

Technique de l'ingénieur traité de Génie mécanique, pp.BM 4 640 21.

**[LEC-99] :L. Leclercq** « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes »,

Thèse de doctorat. Ecole doctorale sciences pour l'ingénieur, Université des Sciences et Technologie de Lille, 2004.

**-M-**

**[MAR-99] : J. Martin**, « Energies éoliennes »,

Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique », pp. B 8 585 1- B 8 585 21.

**[MEG -09] : Meghlaoui Issam** « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal »,

Mémoire de Magister BADJI Y UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA 2009

**[MER-07] : MERRAHI Farid** « Alimentation et commande d'une Machine Asynchrone à double alimentation (application à l'énergie Éolienne) »

Mémoire de Magister de l'école nationale polytechnique d'Alger ,2007

**[MIG-07] : Miguel Lopez** « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée »,

Thèse de doctorat, université de Paris, 2007.

**[MIN-10] : Ling PENG**, « Reconfiguration du dispositif de commande d'une éolienne en cas de creux de tension »,

Thèse de doctorat, université de Lille, 2010.

**[MIR-05] : A. Mirecki** « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance »,

Thèse INP Toulouse, 2005.

**[YAM-91]: M. Yamamoto et O. Motoyoshi**, « Active and reactive power control for doubly-fed wound rotor induction generator, Power Electronics », IEEE Transactions on, vol. 6, 1991, p. 624-629.

**-N-**

**[NOU-01]: S. Noui** « Etude et réalisation d'un redresseur à MLI commandé par DSP. Application à l'alimentation d'un onduleur à 3 niveaux, Mémoire de magister. Ecole Militaire Polytechnique d'Alger », 2001.

**-P-**

**[PIN-04]: M. Pinard** « Commande Électronique des Moteurs Électriques », DUNOD, Série EEA , 2004.

**[POI-03]: F. Poitiers** « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne »,  
Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, décembre 2003

**-Q-**

**[QAE-90]:** Qualité de l'alimentation électrique. EDF, 09-90, Cahiers de l'ingénierie.

**-R-**

**[ROU-12]: ROUABHI Riyadh** « Étude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Application : Energie éolienne »,  
Thèse de magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS —SETIF UFAS (ALGERIE) Faculté de Technologie.

**[RUN-81]** : Caractéristique de la tension d'alimentation BT. Rapport UNIPEDE (Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Electricité) 1981.

**-S-**

**[SAC-10]** : **Saci Taraft , Djamilia Rékioua et Djamel Aouzellag** « Commande en mode glissant de la MADA dans une éolienne à vitesse variable connectée au réseau », Laboratoire de Technologie Industrielle et de l'Information, Département d'Electrotechnique Université A. Mira, Route de Targa Ouzemour, Bejaia, Algérie. Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismaïl Tipaza (2010) 337 – 346.

**[SAL-05]** : **Georges Salloum**, «contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux oriente avec optimisation de la structure d'alimentation : théorie et expérimentation », Thèse de doctorat, université de Batna, 2005.

**[SI]** : **Site Internet** de l'Association Danoise de l'Industrie Eolienne.  
<http://www.windpower.org/fr/core.htm>.

**-V-**

**[VQE-99]** : EN 50160, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution Systems, 1999.