

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

**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département d'Automatique**

**Mémoire de Master en Automatique**

Intitulé

**Commande adaptative par les modes  
glissants de la puissance d'une chaine  
éolienne à base d'une MADA : Cas d'un  
réseau sain ou déséquilibré en tension.**

Réalisé par :

**AYADI Mehdi Mohamed Lamine**

Proposé et dirigé par :

**Pr H. CHEKIREB**

**Promotion : Juin 2015**

**الملخص :** في هذا العمل، نحن نركز على تحسين أداء نظام تحويل الطاقة الهوائية باستعمال ماكينة لامتزامنة ذات تغذية مزدوجة، و هذا باستخدام تقنية التحكم بالتكيف الانزلاقي ، ذلك في غياب أو وجود اضطرابات في الشبكة الكهربائية.  
**كلمات مفتاحية :** توربينات الرياح , ماكينة لامتزامنة ذات تغذية مزدوجة , النمط الانزلاق بالتكيف , خلل في 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 adaptative par les modes glissants, et ceci en absence ou présence de perturbations dans le réseau électrique.

**Mots clés :** Éolienne, MADA, adaptative, mode glissant, déséquilibre en tension.

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

**Key words:** Wind turbine, doubly-fed induction generator, adaptive, sliding mode, voltage unbalance.

**Table des matières**

Table des matières.....	1
Table des illustrations.....	3
Nomenclatures .....	4
Introduction générale .....	8
Chapitre I Généralités et modélisation de la chaîne de conversion éolienne ...	10
1. Introduction.....	11
2. Matériel utilisé .....	11
2.1 L'éolienne .....	11
2.2 Génératrice électrique .....	13
3. Energie cinétique du vent et conversion en énergie mécanique .....	14
4. Modélisation du dispositif .....	14
4.1 Partie mécanique.....	14
4.2 Partie électrique .....	18
5. Conclusion .....	26
Chapitre II Contrôle de la puissance de la MADA par mode de glissement avec terme d'adaptation.....	27
1. Introduction.....	28
2. Principe et conception de la commande.....	28
2.1 Mode de glissement.....	28
2.2 Commande adaptative.....	30
3. Synthèse de la loi de commande.....	31
4. Contrôle du convertisseur 'Back to back' .....	34
4.1 Contrôle du CCR.....	34
4.2 Contrôle du CCM.....	35
5. Stratégie de la maximisation de puissance avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure.....	36
6. Test de robustesse paramétrique .....	40

7. Conclusion .....	41
Chapitre III Influence du Déséquilibre en tension du Réseau Electrique .....	42
1. Introduction.....	43
2. Les perturbations électriques en BT .....	43
3. Déséquilibre du réseau électrique en tension .....	43
3.1 Définitions et normes.....	43
4. Simulation et interprétation des résultats .....	44
5. Conclusion .....	50
Conclusion générale et perspectives .....	51
Annexe A : Transformation Tri_Bi .....	53
Annexe B : Paramètres de la chaine éolienne .....	61
Bibliographie .....	63

## Liste des Figures

### Chapitre I Généralités et modélisation de la chaîne de conversion éolienne

Fig. 1.1 Principaux composants d'une centrale éolienne .....	11
Fig. 1.2 Eoliennes à axe horizontal .....	12
Fig. 1.3 Puissance en fonction de la vitesse de rotation de l'arbre de la machine .....	13
Fig. 1.4 Schéma d'une turbine éolienne .....	16
Fig. 1.5 Schéma bloc du modèle de la turbine .....	17
Fig. 1.6 Circuit double alimentation de la machine asynchrone .....	18
Fig. 1.7 Onduleur à deux niveaux à base de transistors IGBT .....	19
Fig. 1.8 Repère (d q) lié au vecteur tension du réseau $V_s$ .....	21
Fig. 1.9 Schéma fonctionnel du système étudié .....	25

### Chapitre II Contrôle de la puissance de la MADA par mode de glissement avec terme d'adaptation

Fig. 2.1 Principe du mode glissant .....	28
Fig. 2.2 Schéma de régulation du CCR .....	35
Fig. 2.3 Schéma de régulation du CCM .....	35
Fig. 2.4 Caractéristique d'une voilure .....	36
Fig. 2.5 Caractéristique de la turbine éolienne .....	37
Fig. 2.6 Vitesse du vent .....	38
Fig. 2.7 Test de l'éolienne dans le cas idéal .....	39
Fig. 2.8 Test de l'éolienne en présence des variations paramétriques .....	41

### Chapitre III Influence du déséquilibre en tension du réseau électrique

Fig. 3.1 Test de l'éolienne dans le cas d'une tension du réseau déséquilibrée en phase .....	46
Fig. 3.2 Test de l'éolienne dans le cas d'une tension du réseau déséquilibrée en amplitude... ..	49

## NOTATION

<b><i>MADA</i></b>	Machine à double alimentation
$\rho$	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
$P_r$	La puissance extraite du vent
$P_t$	La puissance totale théorique
$P_{are}$	La puissance aérodynamique de l'éolienne
$C_p$	Le coefficient de puissance
$\beta$	L'angle d'orientation des pales
$\lambda$	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
$V_v$	Vitesse du vent
$V_{est}$	Vitesse du vent estimé
$\Omega_{turb}$	Vitesse de rotation de la turbine
<b><i>G</i></b>	Gain du multiplicateur
$\Omega_{mec}$	Vitesse mécanique
$f$	Le coefficient de frottement visqueux
$J_{t1}$	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
$[\mathbf{v}_s]_{abc}$	Vecteurs de tensions triphasés statorique
$[\mathbf{v}_r]_{abc}$	Vecteurs de tensions triphasés rotorique
$[\mathbf{v}_s]_{dq}$	Vecteur de tension biphasé statorique
$[\mathbf{v}_r]_{dq}$	Vecteur de tension biphasé rotorique
$[\mathbf{i}]_{abc}$	Vecteurs de courants triphasés statorique
$[\mathbf{i}]_{dq}$	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 pôle
$T_s$	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
$\theta$	Vecteur des paramètres
$P_{ref}$	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 consommation mondiale de l'énergie a connue une augmentation énorme ces dernières années, à cause de l'industrialisation massive qui a tendance de s'amplifier de plus en plus. Les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, dénotent encore une fois l'importance des énergies renouvelables.

Dans ce contexte, notre étude porte sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique qui est devenue compétitive grâce aux trois facteurs essentiels : la nature motivante de cette énergie, le développement de l'industrie des éoliennes, l'évolution de la technologie des semi-conducteurs, ainsi que les nouvelles méthodes de contrôle des turbines à vitesse variable

Les turbines éoliennes basées sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) sont aujourd'hui plus largement utilisées notamment dans les grands parcs éoliens. La principale raison de la popularité de ces générateurs est leur capacité à fournir de la puissance à tension et fréquence constante, tandis que la vitesse du rotor varie.

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.

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, est présenté le matériel utilisé. Puis une partie est dédiée 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 deuxième chapitre est consacré à la commande adaptative 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 ainsi que la commande adaptative. Par la suite, nous établissons la loi de commande des puissances au stator par la technique. Nous simulons le comportement de la MADA sous la conduite de cette loi de commande pour le cas où la caractéristique de la voilure est connue, puis nous testerons la robustesse de notre commande envers les variations paramétriques.

Le chapitre III 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 intéressons surtout à l'effet d'un déséquilibre de tension du réseau sur les performances de la MADA, que ce soit en phase ou bien en amplitude. 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 et modélisation de la chaîne de conversion éolienne

## 1. Introduction

Le vent est une source d'énergie propre, renouvelable quasi instantanément, et quasi infinie à l'échelle humaine et terrestre. Il doit ses caractéristiques à sa nature même : le vent naît de processus cycliques (rotation terrestre, convection chaud/froid, etc.) appliqués à l'atmosphère puis à l'air dans un contexte topographique défini, d'où notre intérêt à l'énergie éolienne.

Dans ce présent chapitre, les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés. Ensuite, celui-ci sera modélisé.

Vu les avantages incontestés de la machine asynchrone à double alimentation pour la conversion éolienne, elle sera brièvement présentée puis modélisée.

## 2. Matériel utilisé

### 2.1 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.

Par conséquent, 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-F-07].

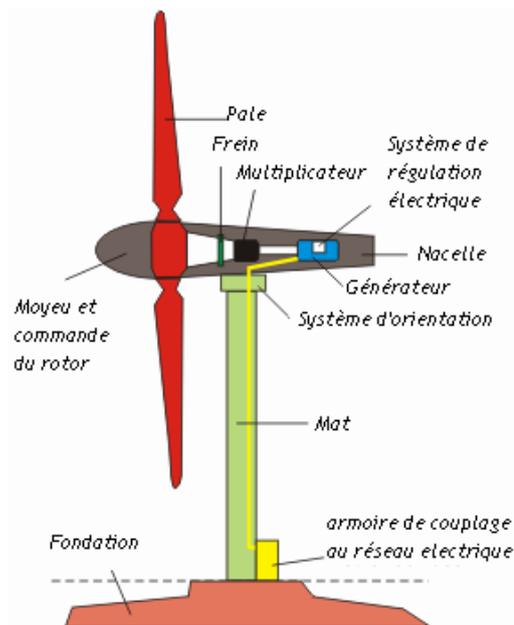


Fig. 1.1 Principaux composants d'une centrale éolienne

Plusieurs types d'éolienne sont à distinguer, on peut les classer selon leur vitesse ou bien leur structure.

Les éoliennes à axe vertical, éoliennes à axe horizontal, éolienne rapide (turbo-éolienne) et éolienne lente sont les structures les plus couramment utilisées.

Le choix le plus adapté à notre but principal est l'éolienne à axe horizontal, car celle-ci présente plus d'avantages en termes de production d'énergie.



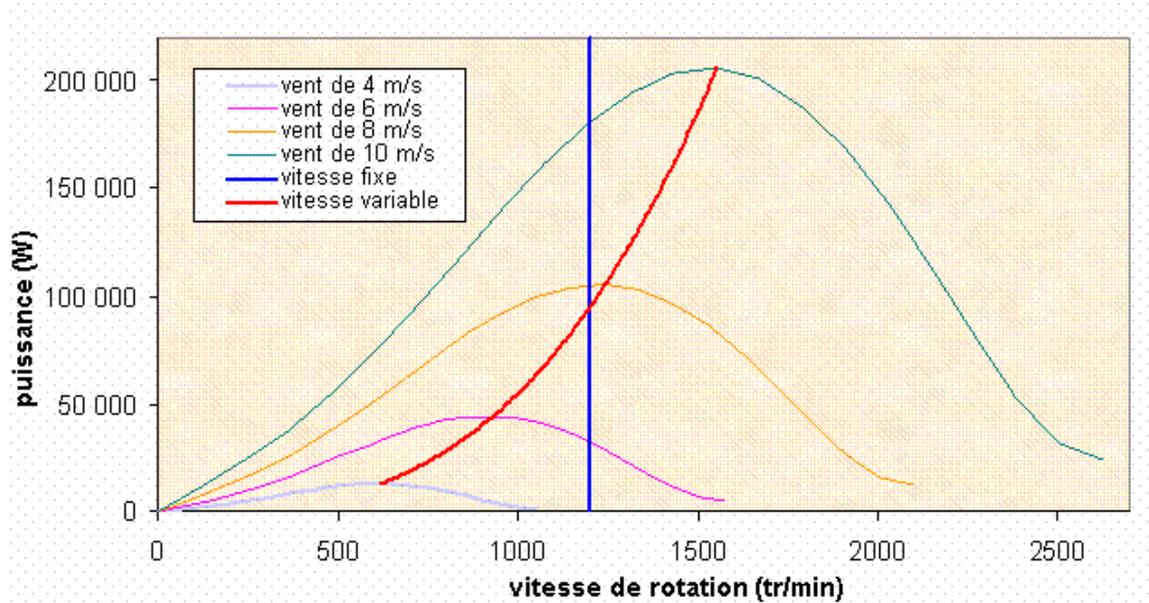
**Fig. 1.2 Eoliennes à axe horizontal.**

Les éoliennes à axe horizontal [S.I] 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 n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais plutôt pour générer un couple moteur entraînant la rotation.

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.



**Fig. 1.3 Puissance en fonction de la vitesse de rotation de l'arbre de la machine.**

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.

## 2.2 Génératrice électrique

La génératrice électrique est une machine asynchrone à double alimentation (MADA) à rotor bobiné, car c'est la plus adaptée pour les éoliennes à vitesse variable, et présente plusieurs d'avantages, qui sont mentionnés dans ce sous chapitre.

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, cependant la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. 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 d'un fonctionnement générateur de la MADA en hyper ou hypo synchronisme [MER-F-07].

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 permet de faire fonctionner le stator à une fréquence fixe même si la vitesse du rotor varie [BENM SS-11].

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

D'autres avantages [M.P-99] peuvent lui être attribués :

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

### 3. Energie cinétique du vent et conversion en énergie mécanique

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

$$P_r = C_p P_t = \frac{1}{2} C_p \rho S V^3 \quad (1.1)$$

Avec

$P_t$  la puissance théorique de la turbine.

$V$  la vitesse du vent.

$C_p$  est le facteur de puissance, qui présente un maxima de 16/27 soit 0,59 .

### 4. Modélisation du dispositif

On s'intéresse dans cette partie à la modélisation mécanique de la turbine éolienne, ainsi à la modélisation de la MADA, du réseau et des convertisseurs.

#### 4.1 Partie mécanique :

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

### • Modélisation de la turbine

La **figure (1.4)** montre le schéma d'une turbine éolienne. La puissance cinétique, d'un vent de vitesse  $V$  à travers une section droite  $S$ , est déterminée par :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (1.2)$$

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

$$P_{aer} = C_p P_t = C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (1.3)$$

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

$$C_p = (0,44 - 0,0167\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda-3)}{15-0,3\beta}\right) - 0,00184(\lambda-3)\beta \quad (1.4)$$

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

$$\lambda = \frac{R\Omega_{turb}}{V} \quad (1.5)$$

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

Le couple aérodynamique est donné par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turb}} = \frac{1}{2} \frac{C_p \rho S V^3}{\Omega_{turb}} \quad (1.6)$$

### • 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.A]. Pour la composante lente du vent et en régime permanent on peut écrire:

$$J_{t1} \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_D = 0 \quad (1.7)$$

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 :

$$C_D = C_{mec} - C_{em} - C_{vis} \quad (1.8)$$

$C_{mec}$  désigne le couple produit par la turbine au niveau de l'arbre de la génératrice et  $C_{em}$  le couple électromagnétique de la MADA.

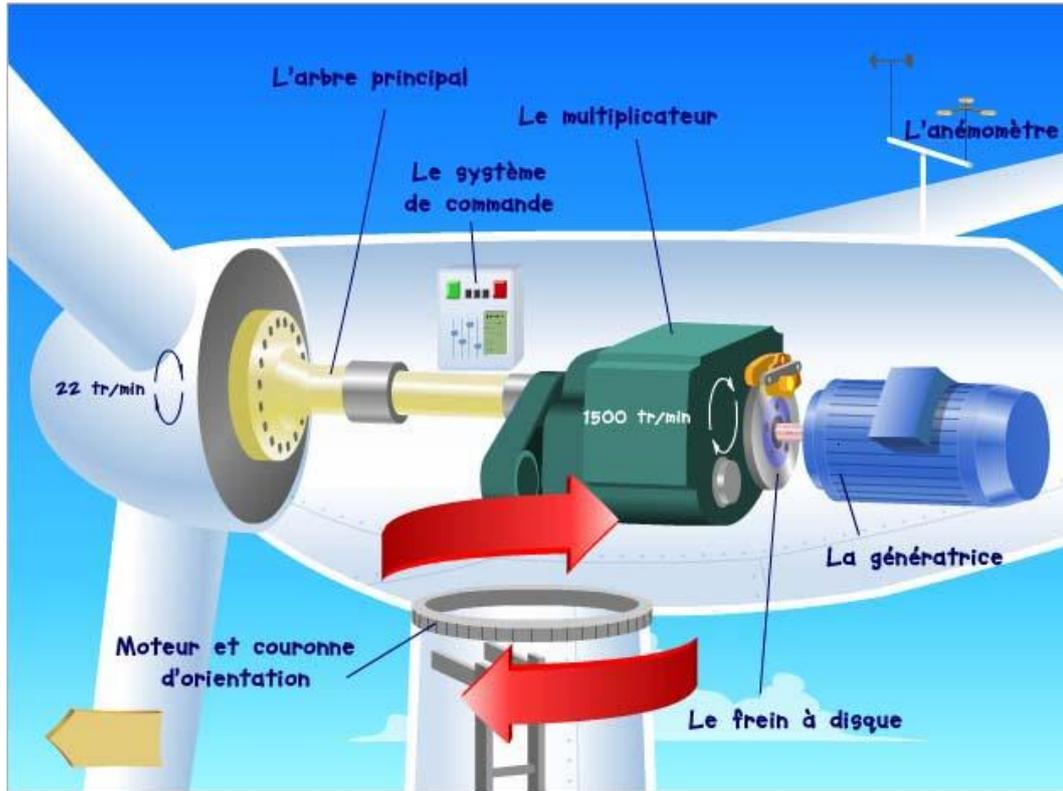


Fig. 1.4 Schéma d'une turbine éolienne.

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

$$C_{em} = C_{mec} \quad (1.9)$$

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turb}} = \frac{1}{2} \frac{C_p \rho S V_{est}^3}{\Omega_{turb}} \quad (1.10)$$

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

$$V_{est} = \frac{R \Omega_{turb}}{\lambda} \quad (1.11)$$

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 :

$$\Omega_{mec} = \frac{\Omega_{turb}}{G} \tag{1.12}$$

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 :

$$C_{mec} = \frac{C_{aer}}{G} \tag{1.13}$$

En substituant  $V_{est}$  par son expression (1.11) dans (1.10) et en tenant compte de (1.12) et (1.13), l'expression (1.9) conduit au couple de référence que doit développer la génératrice donné par :

$$C_{ref} = C_{em} = \frac{1}{2} \frac{\pi \rho C_p R^5}{\lambda_{max}^3 G^3} \Omega_{mec}^2 \tag{1.14}$$

Ce dernier est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice. Il est à noter que dans (1.14),  $\lambda_{max}$  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.

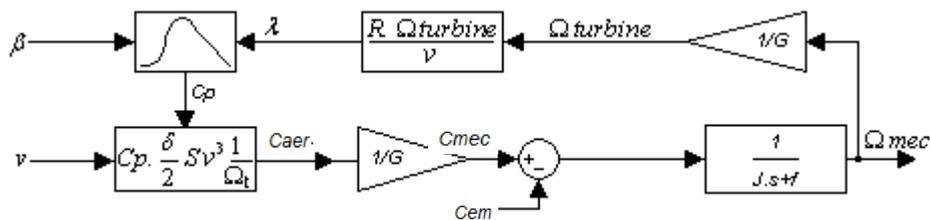
• **Equation dynamique de l'arbre.**

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

$$J_{t2} \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} - C_{em} - f \Omega_{mec} \tag{1.15}$$

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 (1.5)**.



**Fig. 1.5 Schéma bloc du modèle de la turbine.**

## 6.2 Partie électrique

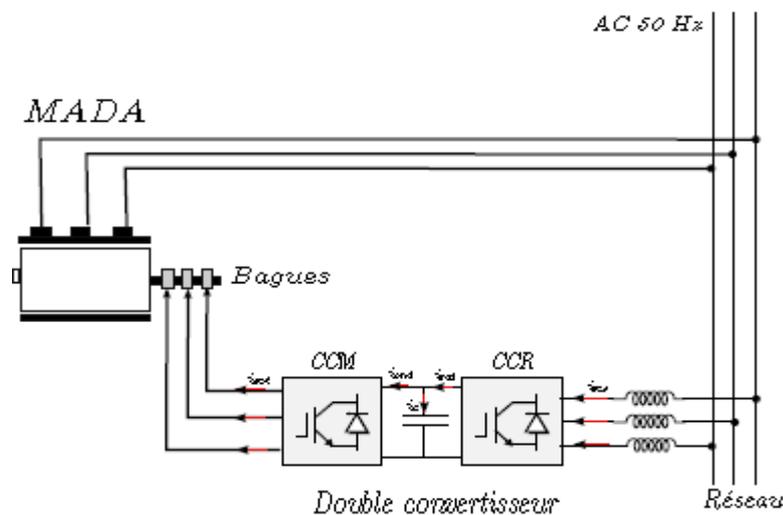
### • Modélisation du convertisseur « back to back »

La **figure (1.6)** 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) sont obtenus de l'asservissement de la tension du bus continu et du facteur de puissance au rotor.

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 réglée 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 » [DJ Abd-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.

La **figure (1.7)** 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



**Fig. 1.6** Circuit double alimentation de la machine asynchrone.

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 :

**Bras 1 :**

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

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

**Bras 2 :**

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

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

**Bras 3 :**

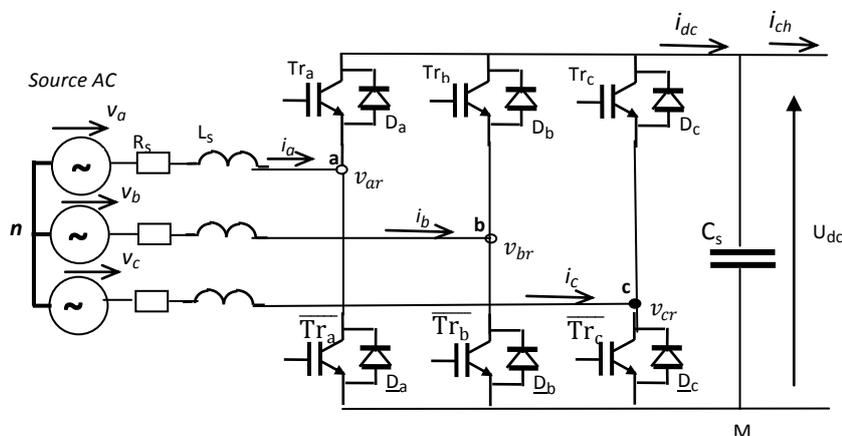
$$VM_c = 0 \Rightarrow \text{si } Tr_c \text{ Off et } \overline{Tr}_c \text{ On } (S_c = 0 \ \& \ \overline{S}_c = 1)$$

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

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

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

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



**Fig. 1.7 Onduleur à deux niveaux à base de transistors IGBT.**

$$\begin{cases} u_{ab} = VM_a - VM_b = U_{cd}(S_a - S_b) \\ u_{bc} = VM_b - VM_c = U_{cd}(S_b - S_c) \\ u_{ca} = VM_c - VM_a = U_{cd}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (1.16)$$

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 :

$$\begin{cases} v_{an} = \frac{1}{3}(u_{ab} - u_{ca}) \\ v_{bn} = \frac{1}{3}(u_{bc} - u_{ab}) \\ v_{cn} = \frac{1}{3}(u_{ca} - u_{bc}) \end{cases} \quad (1.17)$$

En exploitant (1.16), les tensions simples, données par (1.17), peuvent alors s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{pmatrix} = \frac{U_{cd}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \quad (1.18)$$

**Remarque :** Il est à noter que la simulation du fonctionnement du convertisseur est basée sur la relation (1.18) 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-F-07] .

### • Modèle de la source dans le référentiel de Park

#### ➤ 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 :

$$[v_s]_{abc} = [R_s][i]_{abc} + [L_s] \frac{d}{dt} [i]_{abc} + [v_r]_{abc} \quad (1.19)$$

Avec

$$\begin{aligned} [v_s]_{abc} &= \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, [i]_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, [L_s] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix}, [R_s] = \\ &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} [v_r]_{abc} = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.20)$$

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-F-07].

La transformation de Park [BENM SS-11] ramène les équations triphasées (1.19) 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 11, 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 :

$$\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{V_\beta}{V_\alpha}\right) \quad (1.21)$$

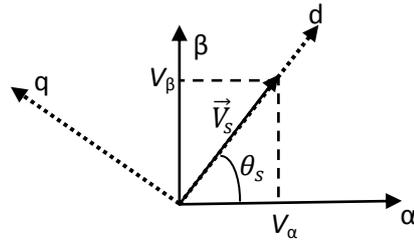


Fig. 1.8 Repère  $(d q)$  lié au vecteur tension du réseau  $\vec{V}_s$

En appliquant la transformation de Park au système (1.19), on obtient :

$$\begin{aligned} [v_s]_{dq} &= [P(\theta_s)]^{-1}[v_s]_{abc} = \\ [P(\theta_s)]^{-1}[R_s][i]_{abc} + [P(\theta_s)]^{-1}[L_s]\frac{d}{dt}[i]_{abc} + [P(\theta_s)]^{-1}[v_r]_{abc} \end{aligned} \quad (1.22)$$

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 (1.22) conduit à :

$$[v_s]_{dq} = [P(\theta_s)]^{-1}[R_s][P(\theta_s)][i]_{dq} + \alpha + [v_r]_{dq} \quad (1.23)$$

Avec :

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

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

$$[P(\theta_s)]^{-1}[R_s][P(\theta_s)] = [R_s]' \text{ et } [P(\theta_s)]^{-1}[L_s][P(\theta_s)] = [L_s]' \quad (1.24)$$

De plus,

$$[P(\theta_s)]^{-1}\left(\frac{d}{dt}[P(\theta_s)]\right) = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

Tenant compte de (1.24) et (1.25), la relation (1.23) conduit aux équations de Park sous la forme vectoriellesuivante **[S.D-05]** :

$$[v_s]_{dq} = [R_s]' [i]_{dq} + [L_s]' \frac{d}{dt} [i]_{dq} + \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} [L_s]' [i]_{dq} + [v_r]_{dq} \quad (1.26)$$

Avec :

$$[v_s]_{dq} = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}, [R_s]' = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix}, [L_s]' = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix}, [i]_{dq} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, [v_r]_{dq} = \begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

$$[v_s]_{dq} = [R_s][i]_{dq} + [L_s] \left[ \frac{di}{dt} \right]_{dq} + L_s \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} [i]_{dq} + [v_r]_{dq} \quad (1.28)$$

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

$$R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} = v_{ds} + L_s \omega_s i_q - v_{dr} \quad (1.29)$$

$$R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} = -L_s \omega_s i_d - v_{qr} \quad (1.30)$$

- **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 **[A.S-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**).

➤ **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 **[S.D-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 diphasé sera plus simple.

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

$$\begin{cases} (X_{dq})_s = P(\theta_s)(X_{abc})_s \\ (X_{dq})_r = P(\theta_r)(X_{abc})_r \end{cases} \quad (1.31)$$

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

Ceci permet d'aboutir au modèle de Park de la MADA donné par les équations (1.32) à (1.36)

- Équations électriques :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \end{cases} \quad (1.32)$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \psi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \psi_{dr} \end{cases} \quad (1.33)$$

- Équation magnétique :

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (1.34)$$

$$\begin{cases} \psi_{dr} = L_s i_{dr} + M i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_s i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (1.35)$$

- Équation mécanique :

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{p^2}{J} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) - \frac{K_f}{J} \omega_r + \frac{p}{J} C_g \quad (1.36)$$

➤ **Equations d'état du système :**

Le model d'état est comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = -a_1 i_{ds} + (\omega_a - \omega_m) i_{qs} + a_2 \psi_{ds} + a_3 \psi_{qs} \omega_m + a_3 v_{ds} - a_4 v_{dr} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -(\omega_a - x_5) i_{ds} - a_1 i_{qs} - a_3 \psi_{ds} \omega_m + a_2 \psi_{qs} + a_3 v_{qs} - a_4 v_{qr} \\ \frac{d\psi_{ds}}{dt} = -b_1 i_{ds} + \omega_a \psi_{qs} + v_{ds} \\ \frac{d\psi_{qs}}{dt} = -b_1 i_{qs} - \omega_a \psi_{ds} + v_{qs} \\ \frac{d\omega_m}{dt} = c_1 (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) - c_2 \omega_m + c_3 C_{mec} \end{cases} \quad (1.37)$$

Celui ci est établi en choisissant comme vecteur d'état le vecteur défini par :

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5]^t = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \psi_{ds} \quad \psi_{qs} \quad \omega_m]^t \quad (1.38)$$

Le modèle d'état de la MADA s'écrit alors sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_1 x_1 + a_2 x_3 + (\omega_a - x_5) x_2 + a_3 x_4 x_5 + a_3 v_{ds} - a_4 v_{dr} \\ \dot{x}_2 = -a_1 x_2 + a_2 x_4 - (\omega_a - x_5) x_1 - a_3 x_3 x_5 + a_3 v_{qs} - a_4 v_{qr} \\ \dot{x}_3 = -b_1 x_1 + \omega_a x_4 + v_{ds} \\ \dot{x}_4 = -b_2 x_2 - \omega_a x_3 + v_{qs} \\ \dot{x}_5 = c_1 (x_2 x_3 - x_1 x_4) - c_2 x_5 + c_3 C_{mec} \end{cases} \quad (1.39)$$

Où les coefficients du système sont définis en fonction des paramètres de la MADA tels que :

$$a_1 = \frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1}{\sigma T_r}, \quad a_2 = \frac{1}{\sigma T_s L_s}, \quad a_3 = \frac{1}{\sigma L_s} \quad (1.40)$$

$$a_4 = \frac{1-\sigma}{\sigma M}, \quad b_1 = R_s, \quad c_1 = \frac{p^2}{J}, \quad c_2 = \frac{p}{J}$$

$T_s$ ,  $T_r$  et  $\sigma$  désignent respectivement la constante de temps du stator, celle du rotor et le coefficient de dispersion. Ces coefficients sont donnés par :

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}, \quad T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad \text{et} \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad (1.41)$$

On peut réécrire le modèle d'état (1.39) sous la forme compacte suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x) - a_4 v_{dr} \\ \dot{x}_2 = f_2(x) - a_4 v_{qr} \\ \dot{x}_3 = f_3(x) \\ \dot{x}_4 = f_4(x) \\ \dot{x}_5 = f_5(x) + c_3 C_{mec} \end{cases} \quad (1.42)$$

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

$$\begin{cases} f_1(x) = -a_1 x_1 + a_2 x_3 + (\omega_a - x_5) x_2 + a_3 x_4 x_5 + a_3 v_{ds} \\ f_2(x) = -a_1 x_2 + a_2 x_4 - (\omega_a - x_5) x_1 - a_3 x_3 x_5 + a_3 v_{qs} \\ f_3(x) = -b_1 x_1 + \omega_a x_4 + v_{ds} \\ f_4(x) = -b_2 x_2 - \omega_a x_3 + v_{qs} \\ f_5(x) = c_1 (x_2 x_3 - x_1 x_4) - c_2 x_5 \end{cases} \quad (1.43)$$

le vecteur de sortie posé  $y = [y_1 \ y_2]^T$  représente la puissance active  $P_s(t)$  et celle réactive  $Q_s(t)$  au niveau du stator :

$$\begin{cases} y_1 = P_s(t) \\ y_2 = Q_s(t) \end{cases} \quad (1.44)$$

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

$$\begin{cases} u_1 = v_{dr} \\ u_2 = v_{qr} \end{cases} \quad (1.45)$$

Ainsi, le commande de la puissance active et réactive de la MADA s'effectuera selon la **figure (1.9)**.

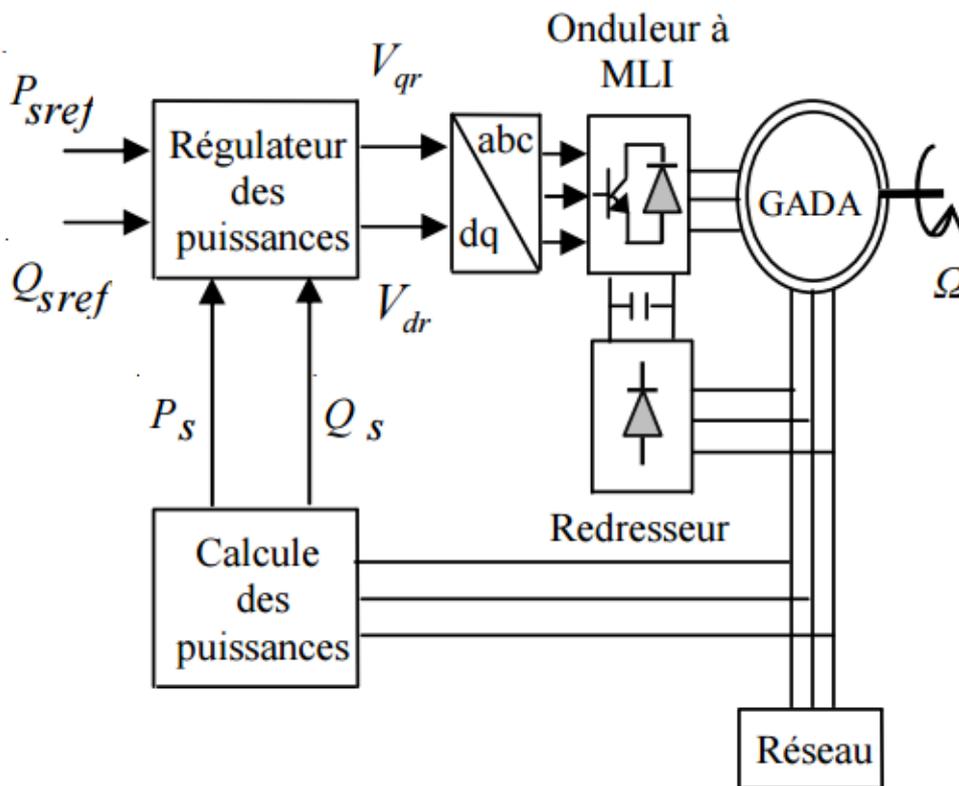


Fig. 1.9 Schéma fonctionnel du système étudié.

## 5. 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.

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 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 présenté 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.

# Chapitre II

## Contrôle de la puissance de la MADA par mode de glissement avec terme d'adaptation

## 1. Introduction

L'objet de ce chapitre est de synthétiser la commande de puissance active et réactive de la MADA entraîné par une turbine éolienne. Vue la structure fixée de la chaîne l'éolienne, l'action sur la MADA se fait par les tensions du rotor. Nous envisageons d'exploiter la technique des modes glissants avec ajout d'un terme adaptatif pour la synthèse de la commande des puissances au stator, afin d'améliorer la robustesse de notre commande. Pour cela, nous présentons tout d'abord un bref rappel théorique sur la commande, puis nous appliquons cette méthode dans le cas du réglage de la puissance active et réactive de la MADA, les résultats de simulation du comportement dynamique du système étudié seront 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.

## 2. Principe et conception de la commande.

### 2.1 Mode de glissement.

La commande par mode glissant consiste à ramener la trajectoire d'état vers une surface de glissement, et de le faire évoluer dessus avec une certaine dynamique jusqu'au point d'équilibre [MA-11]. La conception de la commande par mode glissant se fait principalement en trois étapes :

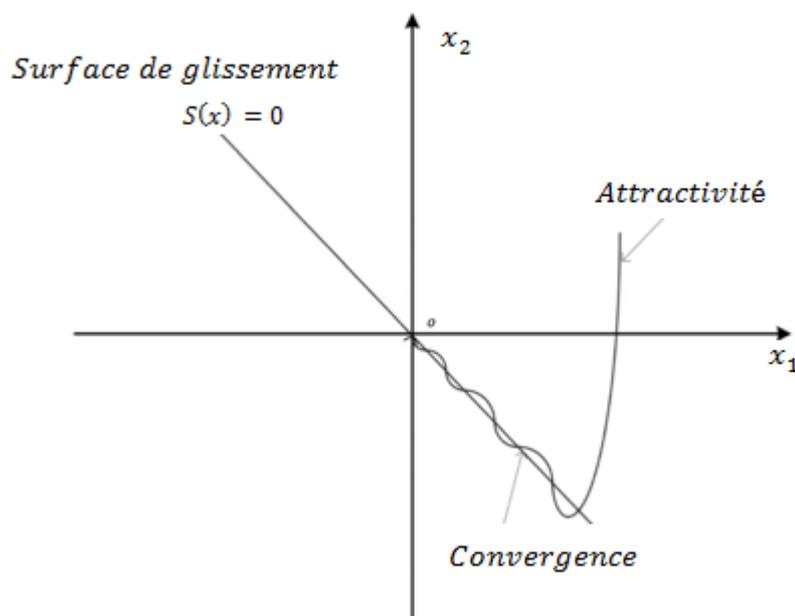


Fig. 2.1 Principe du mode glissant

- **Choix des surfaces de glissement.**

On considère le système non linéaire suivant :

$$\dot{x} = F(x, t) + G(x, t)u(x, t) \quad (2.1)$$

$$y(x) = h(x, t)$$

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

F et G sont deux fonctions non linéaires continues et incertaines, supposées bornées.

Le nombre de surfaces de glissement est généralement pris égal à la dimension du vecteur de sortie.

La forme d'équation générale proposée par J.J.Slotine pour déterminer la surface de glissement est donnée par [JS -98] :

$$S(x) = \left( \frac{d}{dt} + \delta \right)^{r-1} e(x) \quad (2.2)$$

Où  $\delta$ ,  $e(x)$  et  $r$  sont respectivement un coefficient positif, l'erreur de la grandeur à régler et le degré relatif.

- **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 (ou équation de Lyapunov), 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.*

- $S(x)\dot{S}(x) < 0$  est la condition de convergence
- $S(x) = 0$  est la condition de maintien

- **Calcul de la commande :**

La commande est calculée de façon à satisfaire les conditions (2.3).

De ce fait, plusieurs commandes sont proposées.

Les plus utilisées étant calculées de façon à imposer une dynamique de la surface comme suit :

$$\dot{S}(x) = -k \text{Sign}[S(x)] \quad (2.4a)$$

Ou encore :

$$\dot{S}(x) = -k \text{Sign}[S(x)] - \lambda S(x) \quad (2.4b)$$

Avec  $k$  et  $\lambda$  des gains strictement positifs.

Où la fonction signe est donné comme suit :

$$\text{Sign}[S(x)] = \begin{cases} -1 & \text{si } S(x) < 0 \\ 0 & \text{si } S(x) = 0 \\ 1 & \text{si } S(x) > 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

D'autres approches suggèrent d'utiliser la fonction saturation à la place de signe, pour éviter l'effet broutement.

La fonction Saturation est défini comme suit :

$$\text{Sat}[S(x)] = \begin{cases} \text{Sign}[S(x)] & \text{si } |S| > \varepsilon \\ S(x)/\varepsilon & \text{si } |S| < \varepsilon \end{cases} \quad (2.6)$$

Avec  $\varepsilon$  : Largeur du seuil de la fonction saturation.

## 2.2 Commande adaptative :

On considère le système non linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = F(x, u, \theta) \\ y = h(x) \end{cases} \quad (2.7)$$

Où  $X$  est le vecteur d'état,  $u$  la commande et  $\theta$  le vecteur des paramètres du système (exemple : résistance, inductance, masse, ...).

Pour commander le système, nous avons besoin de connaître exactement le vecteur des paramètres  $\theta$ . Ceci peut être fait avant l'implémentation de la loi de commande (identification des paramètres)

La loi de commande développée réalise les objectifs tant que les paramètres sont exactement connus. Malheureusement lors du fonctionnement du système de commande, les paramètres peuvent varier en fonction du temps. En effet, une résistance augmente sous l'effet de la température et la température peut augmenter avec le temps de fonctionnement, de même une inductance diminue sous l'effet de la saturation. La commande devient alors inefficace devant ces variations et on doit réactualiser la commande (adapter la commande) pour les nouvelles valeurs du vecteur des paramètres  $\theta$ . [LD - 96]

La commande adaptative appartient à la classe de commande à base d'observateur où celui-ci est chargé d'estimer le vecteur des paramètres (Algorithme d'adaptation paramétrique AAP).

Il existe deux types de commande adaptative : indirecte et directe. [KA – 88]

Dans le cas d'une commande adaptative indirecte, l'algorithme d'adaptation paramétrique est chargé d'estimer les paramètres  $\theta_s$  du système. Cette estimation est alors utilisée pour actualiser (adapter) les paramètres du régulateur  $\theta_r$ .

Dans le cas d'une commande adaptative directe, l'algorithme d'adaptation estime directement les paramètres  $\theta_r$  du régulateur sans passer par l'estimation des paramètres  $\theta_s$ . En effet l'objectif est de maintenir les performances et non pas de connaître les paramètres du système.

Dans cette étude, nous utilisons la commande adaptative indirecte.

### 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 :

$$\begin{cases} P_s = V_d i_{ds} + V_q i_{qs} \\ Q_s = -V_d i_{qs} + V_q i_{ds} \end{cases} \quad (2.8)$$

Avec  $V_d = v_{ds}$  et  $V_q = v_{qs}$

La dynamique des sorties est déduite de (2.8) par conséquent on a :

$$\begin{cases} \dot{P}_s = V_d (f_1(x) - a_4 v_{dr}) + V_q (f_2(x) - a_4 v_{qr}) \\ \dot{Q}_s = -V_d (f_2(x) - a_4 v_{qr}) + V_q (f_1(x) - a_4 v_{dr}) \end{cases} \quad (2.9)$$

Nous considérons que les termes  $f_{10}(x)$ ,  $f_{20}(x)$ , et  $a_{40}$  sont connus, et  $\Delta_1$  et  $\Delta_2$  sont les termes inconnus dus à la variation des paramètres et/ou la présence des perturbations.

De ce fait,  $\dot{P}_s$  et  $\dot{Q}_s$  peuvent se mettre sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{P}_s = V_d (f_{10}(x) - a_{40} v_{dr}) + V_q (f_{20}(x) - a_{40} v_{qr}) + \Delta_1 \\ \dot{Q}_s = -V_d (f_{20}(x) - a_{40} v_{qr}) + V_q (f_{10}(x) - a_{40} v_{dr}) + \Delta_2 \end{cases} \quad (2.10)$$

De plus, on considère que  $\Delta_1$  et  $\Delta_2$  peuvent se mettre sous la forme régressive suivante :

$$\begin{cases} \Delta_1 = Z^t \theta_1 + \varepsilon_1 \\ \Delta_2 = Z^t \theta_2 + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (2.11)$$

Avec :

$$Z^t = [1 \quad i_{ds} \quad i_{qs} \quad \psi_{ds} \quad \psi_{qs} \quad vd] \quad (2.12)$$

$Z$  : Le vecteur régressif.

$\theta_1, \theta_2$  : les vecteurs des paramètres idéaux.

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  : les erreurs de prédiction.

On pose

$$\begin{cases} F_{10}(x) = V_d f_{10}(x) + V_q f_{20}(x) \\ F_{20}(x) = V_q f_{10}(x) - V_d f_{20}(x) \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\begin{cases} u_1 = -V_d a_{40} v_{dr} - V_q a_{40} v_{qr} \\ u_2 = V_d a_{40} v_{qr} - V_q a_{40} v_{dr} \end{cases} \quad (2.14)$$

En exploitant (2.11), (2.13) et (2.14), la relation (2.10) devient :

$$\begin{cases} \dot{P}_s = F_{10}(x) + u_1 + Z^t \theta_1 + \varepsilon_1 \\ \dot{Q}_s = F_{20}(x) + u_2 + Z^t \theta_2 + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (2.15)$$

On définit les surfaces de glissement suivantes:

$$\begin{cases} S_1 = e_1 = P_s - P_{ref} \\ S_2 = e_2 = Q_s - Q_{ref} \end{cases} \quad (2.16)$$

On choisit la fonction de Lyapunov suivante :

$$V_i = \frac{1}{2} S_i^2 - \frac{1}{2\eta_i} \tilde{\theta}_i^t \tilde{\theta}_i \quad (2.17)$$

Avec  $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \hat{\theta}_i$  et  $i = 1, 2$

Où  $\hat{\theta}_i$  est le vecteur prédicateur du vecteur des paramètres inconnus  $\theta_i$ .

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = S_1 \dot{S}_1 - \frac{1}{\eta_1} \tilde{\theta}_1^t \dot{\hat{\theta}}_1 \\ \dot{V}_2 = S_2 \dot{S}_2 - \frac{1}{\eta_2} \tilde{\theta}_2^t \dot{\hat{\theta}}_2 \end{cases} \quad (2.18)$$

En développant (2.18), on obtient :

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = S_1 (F_{10}(x) + u_1 + Z^t \theta_1 + \varepsilon_1) - \frac{1}{\eta_1} \tilde{\theta}_1^t \dot{\hat{\theta}}_1 \\ \dot{V}_2 = S_2 (F_{20}(x) + u_2 + Z^t \theta_2 + \varepsilon_2) - \frac{1}{\eta_2} \tilde{\theta}_2^t \dot{\hat{\theta}}_2 \end{cases} \quad (2.19)$$

On propose les commandes virtuelles suivantes :

$$\begin{cases} u_1 = -K_{d1} S_1 - K_{s1} \text{Sign}(S_1) - F_{10}(x) - Z^t \hat{\theta}_1 \\ u_2 = -K_{d2} S_2 - K_{s2} \text{Sign}(S_2) - F_{20}(x) - Z^t \hat{\theta}_2 \end{cases} \quad (2.20)$$

En introduisant les lois de commande (2.20) dans (2.19), on obtient :

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = S_1(-K_{d1}S_1 - K_{s1}Sign(S_1) - Z^t\hat{\theta}_1 + Z^t\theta_1 + \varepsilon_1) - \frac{1}{\eta_1}\tilde{\theta}_1^t\dot{\hat{\theta}}_1 \\ \dot{V}_2 = S_2(-K_{d2}S_2 - K_{s2}Sign(S_2) - Z^t\hat{\theta}_2 + Z^t\theta_2 + \varepsilon_2) - \frac{1}{\eta_2}\tilde{\theta}_2^t\dot{\hat{\theta}}_2 \end{cases} \quad (2.21)$$

La relation (2.21) peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = -K_{d1}S_1^2 - K_{s1}|S_1| + S_1Z^t\tilde{\theta}_1 + S_1\varepsilon_1 - \frac{1}{\eta_1}\tilde{\theta}_1^t\dot{\hat{\theta}}_1 \\ \dot{V}_2 = -K_{d2}S_2^2 - K_{s2}|S_2| + S_2Z^t\tilde{\theta}_2 + S_2\varepsilon_2 - \frac{1}{\eta_2}\tilde{\theta}_2^t\dot{\hat{\theta}}_2 \end{cases} \quad (2.22)$$

On impose à  $\hat{\theta}_1$  et  $\hat{\theta}_2$  les lois d'adaptation suivantes :

$$\begin{cases} S_1\tilde{\theta}_1^tZ = \frac{1}{\eta_1}\tilde{\theta}_1^t\dot{\hat{\theta}}_1 & \Rightarrow & \dot{\hat{\theta}}_1 = \eta_1S_1Z \\ S_2\tilde{\theta}_2^tZ = \frac{1}{\eta_2}\tilde{\theta}_2^t\dot{\hat{\theta}}_2 & \Rightarrow & \dot{\hat{\theta}}_2 = \eta_2S_2Z \end{cases} \quad (2.23)$$

Avec les lois d'adaptation (2.23), la relation (2.22) se réduit à :

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = -K_{d1}S_1^2 - K_{s1}|S_1| + S_1\varepsilon_1 \\ \dot{V}_2 = -K_{d2}S_2^2 - K_{s2}|S_2| + S_2\varepsilon_2 \end{cases} \quad (2.24)$$

Dans l'hypothèse où  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$  sont bornées telle que :

$$\begin{cases} |\varepsilon_1| \leq \bar{\varepsilon}_1 \\ |\varepsilon_2| \leq \bar{\varepsilon}_2 \end{cases} \quad (2.25)$$

Alors les dynamique (2.24) peuvent être bornées telles que :

$$\begin{cases} \dot{V}_1 \leq -K_{d1}S_1^2 - K_{s1}|S_1| + |S_1|\bar{\varepsilon}_1 \\ \dot{V}_2 \leq -K_{d2}S_2^2 - K_{s2}|S_2| + |S_2|\bar{\varepsilon}_2 \end{cases} \quad (2.26)$$

Si les coefficients de réglage  $K_{s1}$  et  $K_{s2}$  sont imposés tels que :

$$\begin{cases} K_{s1} \geq \bar{\varepsilon}_1 \\ K_{s2} \geq \bar{\varepsilon}_2 \end{cases} \quad (2.27)$$

Alors la relation (2.26) se réduit à :

$$\begin{cases} \dot{V}_1 \leq -K_{d1}S_1^2 \\ \dot{V}_2 \leq -K_{d2}S_2^2 \end{cases} \quad (2.28)$$

La relation (2.28) implique que  $S_1$  et  $S_2 \rightarrow 0$  et que tous les signaux du système sont bornés. De plus, l'application du lemme de Barbalat permet de déduire la convergence respectivement de  $\hat{\theta}_1$  et  $\hat{\theta}_2$  vers  $\theta_1$  et  $\theta_2$ .

La relation (2.15) des commandes virtuelles peut se mettre sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -V_d a_{40} & -V_q a_{40} \\ -V_q a_{40} & V_d a_{40} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

L'inversion de (2.29) permet de déduire les commandes réelles ( $v_{dr}$  et  $v_{qr}$ ) suivantes :

$$\begin{cases} v_{dr} = \frac{-(V_d u_1 + V_q u_2)}{a_{40}^2 (V_d^2 + V_q^2)} \\ v_{qr} = \frac{(V_d u_2 - V_q u_1)}{a_{40}^2 (V_d^2 + V_q^2)} \end{cases} \quad (2.30)$$

Dans le cas d'une orientation parfaite du repère (d,q) sur le vecteur de la tension du réseau  $\vec{V}_s$  on a  $V_d = V_s$  et  $V_q = 0$  de ce fait, les commandes ( $v_{dr}$  et  $v_{qr}$ ) sont déterminées par :

$$\begin{cases} v_{dr} = \frac{-u_1}{a_{40}^2 V_d} \\ v_{qr} = \frac{u_2}{a_{40}^2 V_d} \end{cases} \quad (2.31)$$

Les gains de régulations sont donnés dans l'Annexe B.

#### 4. Contrôle du convertisseur 'back to back'

Dans le cadre de notre application, le contrôle du convertisseur 'back to back' [BM BK-12] [R.R] 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.

##### 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 I que la dynamique des courants du réseau peut s'écrire dans le repère (d,q) lié au vecteur tension du réseau sous la forme :

$$R_s i_{dr} + L_s \frac{di_{dr}}{dt} = V_s + L_s \omega_s i_{qr} - v_{dr} \quad (2.33)$$

$$R_s i_{qr} + L_s \frac{di_{qr}}{dt} = -L_s \omega_s i_{dr} - v_{qr} \quad (2.34)$$

Le contrôle du CCR est basé sur le schéma de la **Figure (2.2)**. En effet, 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  $\cos\phi_r^*$  au niveau de la connexion rotor-réseau ; dans notre cas le facteur de puissance est unitaire et donc  $i_{qr}^*$  est prise nulle ( $i_{qr}^* = 0$ ). 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 compensation on obtient les commandes réelles  $v_{dr}^*$  et  $v_{qr}^*$  telles que :

$$v_{dr}^* = -u_{dr}^* + V_s + L_s \omega_s i_{qr} \text{ et } v_{qr}^* = -(u_{qr}^* + L_s \omega_s i_{dr}) \quad (2.35)$$

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.

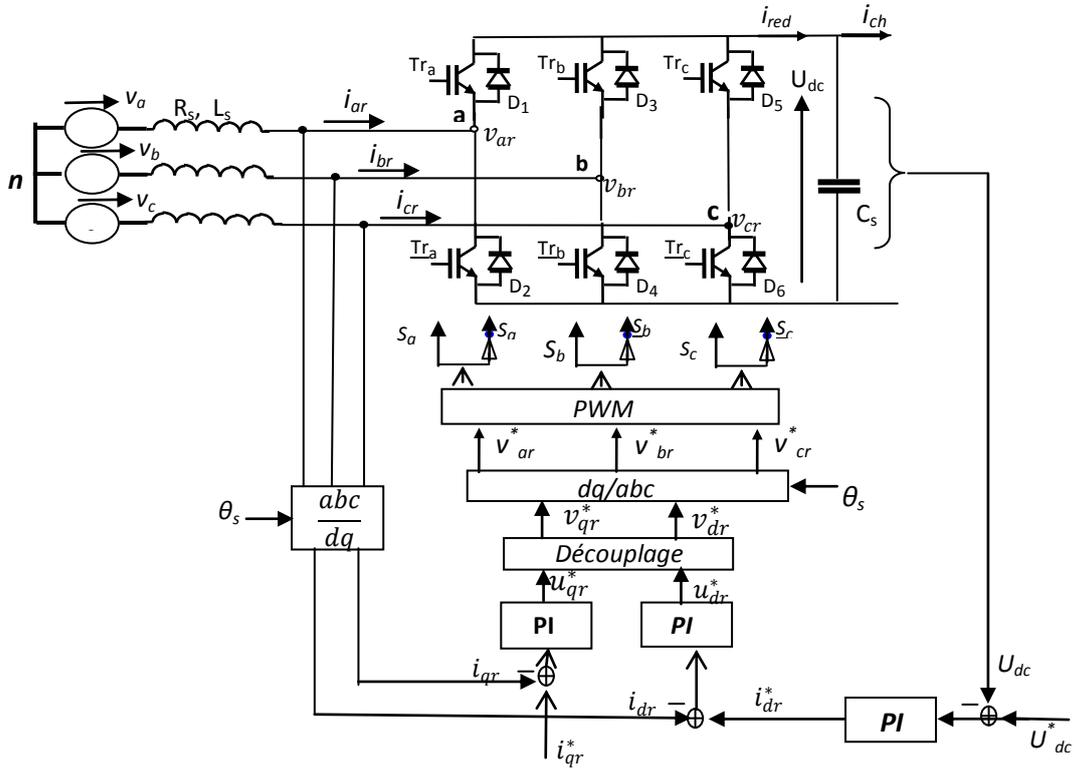


Fig. 2.2 Schéma de régulation du CCR.

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 (2.3).

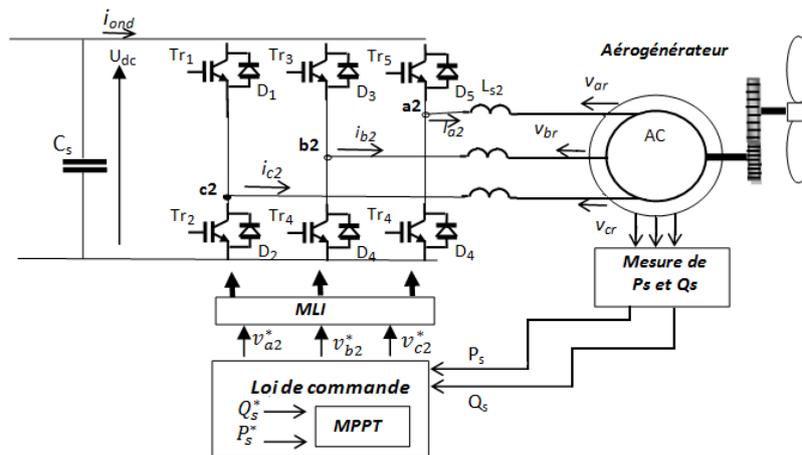
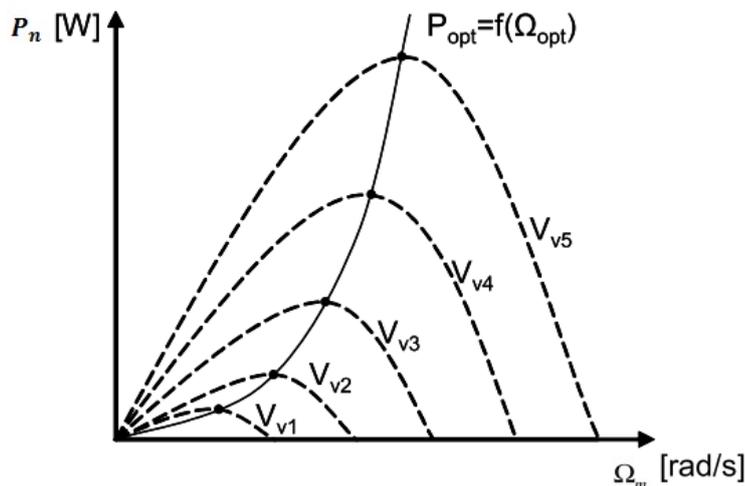


Fig. 2.3 Schéma de régulation du CCM.

## 5. Stratégie de la maximisation de puissance avec 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 (2.4)**.

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 (2.4)**). Pour chaque vitesse du vent, la puissance maximale correspond à une vitesse de rotation optimale ou encore à un couple de charge strictement défini.



**Fig. 2.4** Caractéristique d'une voilure

Idéalement, cette courbe doit être suivie à tout instant du fonctionnement du système éolien.

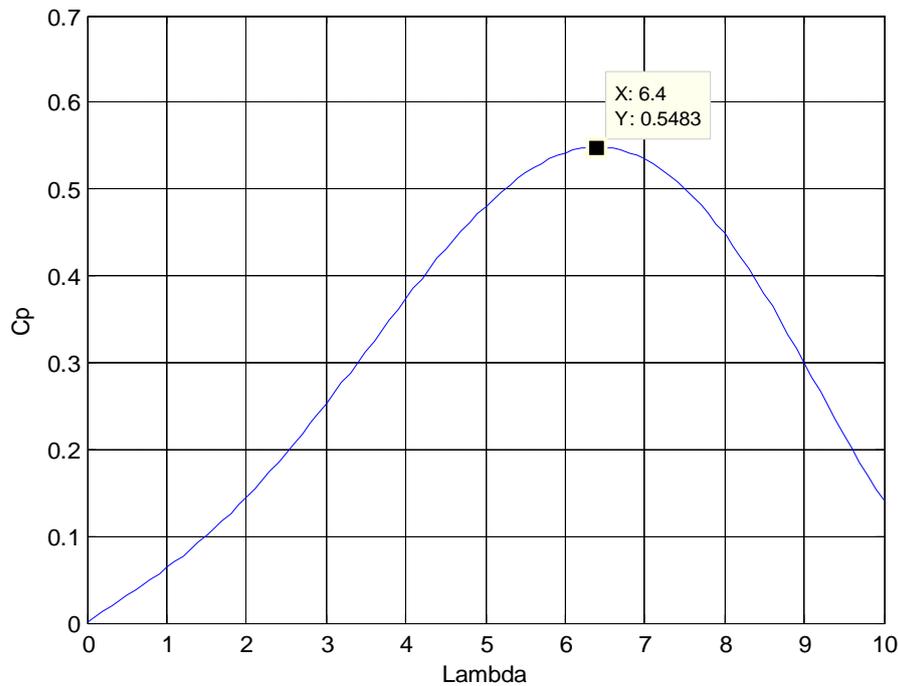
$$P_{opt} = \frac{1}{2} \rho C_p^{opt} S V_v^3 \quad (2.36)$$

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 sont semblables à la nôtre, la caractéristique du  $C_p$  ( $\lambda$  est donnée par la relation) **[R.R]** :

$$C_p = 7.9563 \left(\frac{\lambda}{10}\right)^5 - 17.375 \left(\frac{\lambda}{10}\right)^4 + 9.86 \left(\frac{\lambda}{10}\right)^3 - 9.4 \left(\frac{\lambda}{10}\right)^2 + 6.32 \cdot 10^{-2} \lambda + 0.001 \quad (2.37)$$

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



**Fig. 2.5** Caractéristique de la turbine éolienne

faire fonctionner l'éolienne autour de ce point permet de prélever la puissance maximale afin de garantir un coefficient de puissance optimal. Ce point optimal, dans notre cas est donné par :

$$\begin{cases} \lambda_{opt} = 6.41 \\ C_{p_{opt}} = 0.5483 \end{cases} \quad (2.38)$$

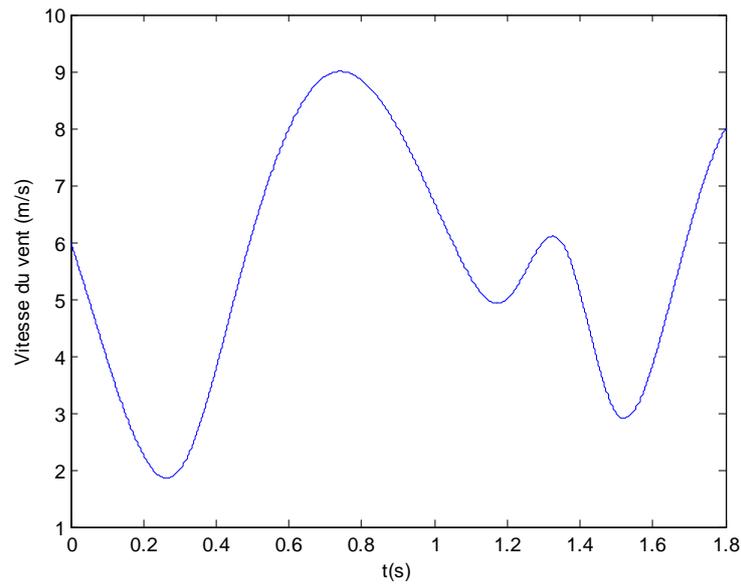
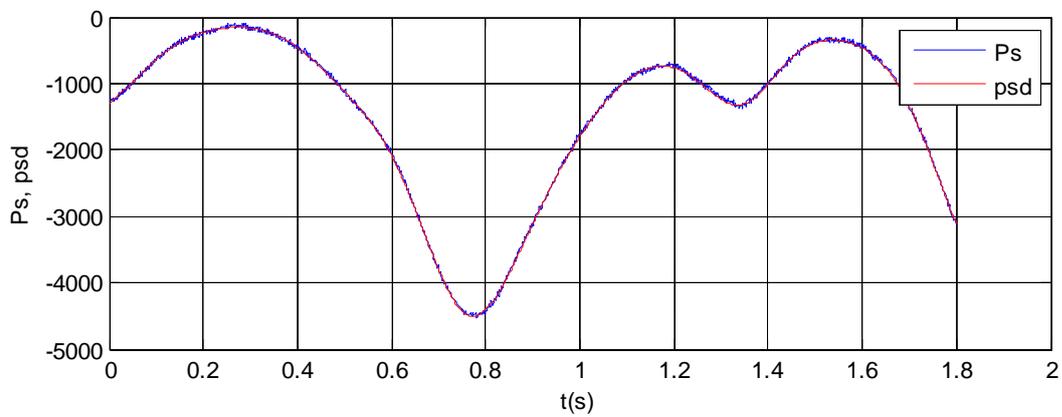
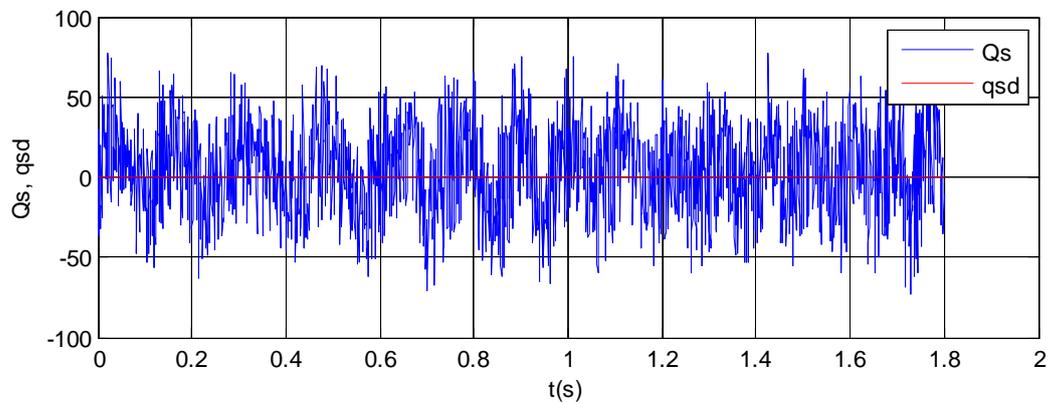
- **Simulation de la chaîne éolienne.**

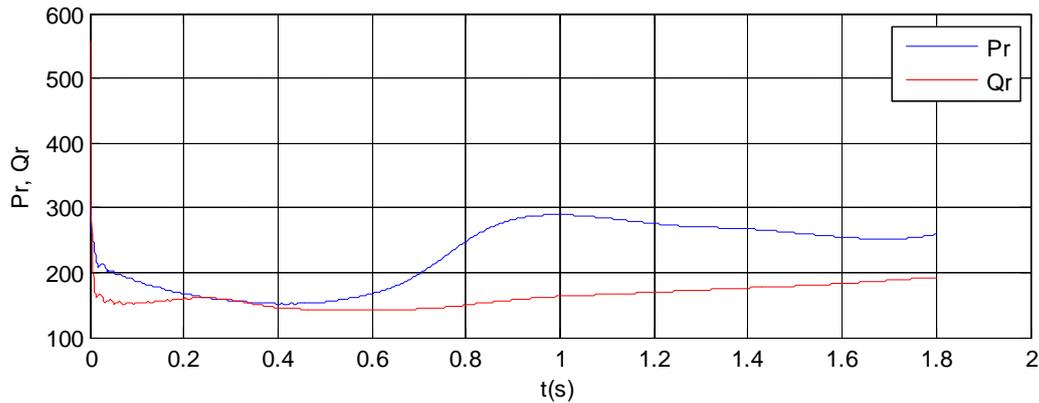
Dans cette section, nous simulons le fonctionnement de la chaîne éolienne dont les paramètres sont fournis en **Annexe B**. Ce test, noté 'test1', est réservé au cas idéal : en absence de variations paramétriques du modèle et une bonne connaissance de la caractéristique de la voilure. De plus, on utilise un profil de vent réel, prélevé dans la région de l'Atlas tellien en Algérie(**Figure 2.6**).

Les résultats de cette simulation sont présentés à la **Figure (2.7)**. L'analyse de ces résultats montre que :

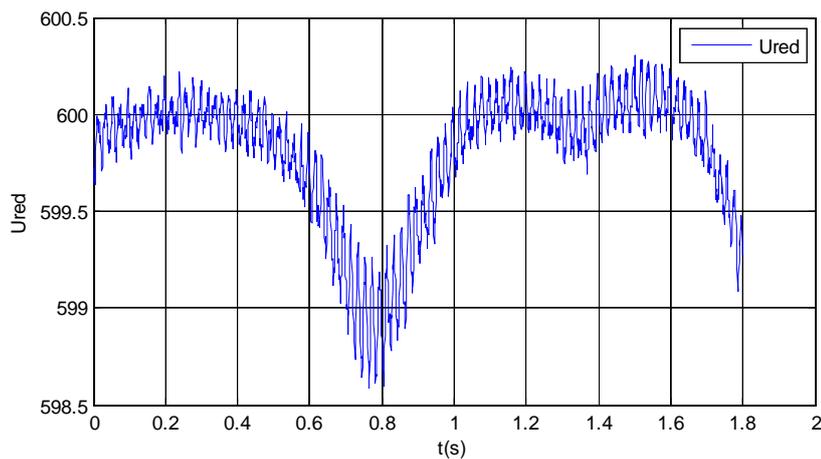
La puissance active au stator  $P_s$  suit la puissance désirée  $P_{sd}$  (**Figure (2.7a)**), tout en suivant le profil du vent, avec une erreur quasi nulle. Cette puissance est négative, car elle est fournie par le système éolien au réseau.

La puissance réactive  $Q_s$  du stator oscille autour de sa valeur de référence, sans pour autant dépassé les limites tolérables (**Figure (2.7b)**).

**Fig. 2.6** Vitesse du vent.**a) Puissance active statorique et sa référence****b) Puissance réactive statorique et sa référence**



c) Puissance rotorique active et réactive



d) Tension du bus continue

Fig. 2.7 Test de l'éolienne dans le cas idéal.

La puissance instantanée active rotorique (**Figure (2.7c)**) 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 quant à la puissance réactive rotorique, elle est positive aussi, et ne dépasse pas 300Var.

La **Figure (2.7.d)** illustre la tension du bus continue, on peut remarquer que celle-ci reste assez constante (autour de 600V), de légères fluctuations sont notées, ceci est dû à la variation de la vitesse du vent.

Au vu de ses résultats, on peut dire que notre commande a atteint son objectif principal, qui est d'optimiser la puissance active et d'imposer la puissance réactive désirée au niveau de la connexion stator réseau.

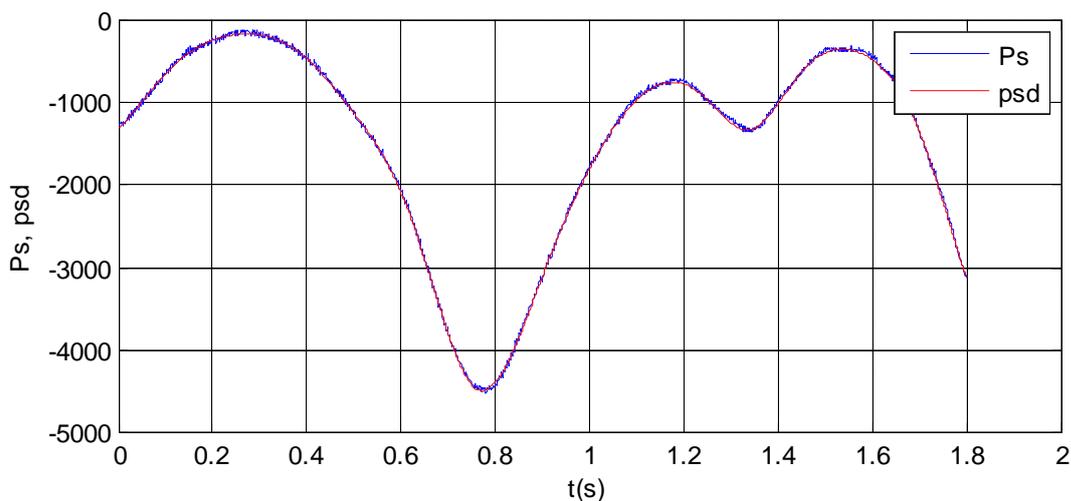
## 6. Test de robustesse paramétrique.

Pour ce test2, 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  $t = 1s$  et sur une durée de  $0.8s$ , des variations affectant les paramètres électriques du modèle de la MADA. Ces variations sont imposées telles que :

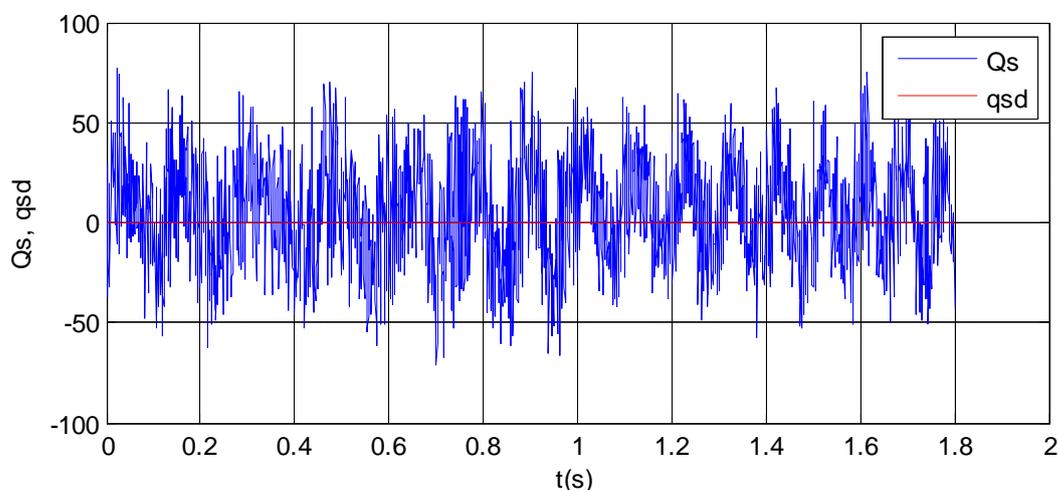
✓ La variation des résistances au stator et au rotor est respectivement de  $\Delta R_s = +25\%$  et  $\Delta R_r = +50\%$ .

✓ La variation des inductances au stator, au rotor et mutuelle est respectivement de  $\Delta L_s = -15\%$ ,  $\Delta L_r = -30\%$  et  $\Delta M = -22\%$

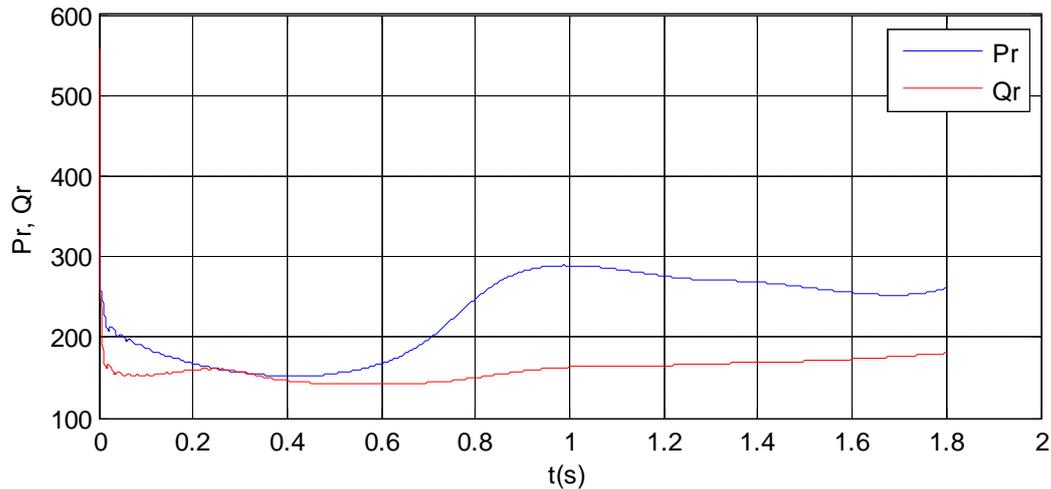
### • Résultat de simulation



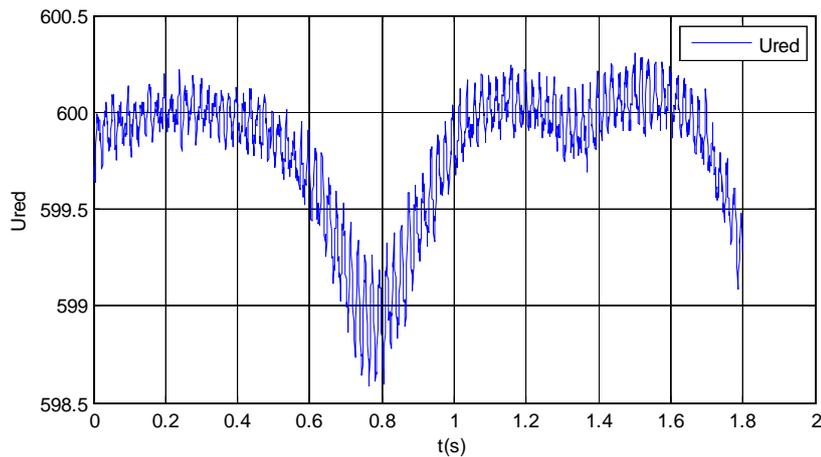
### a) Puissance active statorique et sa référence



### b) Puissance réactive statorique et sa référence



c) Puissance rotorique active et réactive



d) Tension du bus continue

**Fig. 2.8** Test de l'éolienne en présence des variations paramétriques.

L'analyse de ces résultats montre qu'on peut conclure que notre commande reste robuste aux variations paramétriques, car l'objectif de commande est toujours atteint.

## 8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons brièvement expliqué la commande utilisée, qui est une commande adaptative par les modes de glissement, pour le contrôle de la puissance active et réactive de la MADA entraîné par la turbine.

Ensuite, nous avons simulé cette commande sur notre système en absence puis en présence de variations paramétriques. Les résultats obtenus ont montré que la commande proposée a permis d'atteindre les objectifs assignés, de plus, elle s'est révélée insensible aux variations paramétriques affectant le modèle de la MADA.

# Chapitre III

## Influence du déséquilibre en tension du Réseau Electrique

## 1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons brièvement les perturbations du réseau électrique, puis nous nous intéressons plus particulièrement au déséquilibre de tension en phase et en amplitude. Ensuite, nous évaluons les performances de la commande adaptative par les modes de glissement de la puissance face à ce type de perturbations du réseau électrique.

## 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].

Les paramètres et leurs principales « anomalies » caractérisant une alimentation électrique sont classés tels que :

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

## 3. Déséquilibre en tension du réseau électrique

### 3.1 Définition et normes

Le phénomène de déséquilibre de tension est la situation où les trois tensions du système triphasé ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas décalées normalement les unes par rapport aux autres de  $120^\circ$ .

Le taux de déséquilibre est habituellement défini, en utilisant la méthode des composantes symétriques, par le rapport du module de la composante inverse (ou homopolaire) à celui de la composante directe. Les tensions inverses d'un réseau (ou homopolaire) résultent pour l'essentiel de la circulation des courants inverses (ou homopolaire) produit par des charges déséquilibrées.

La cause majeure de déséquilibre est liée à la présence de charges monophasées réparties de façon non équilibrée sur les trois phases du réseau. Dans les réseaux basses tension, c'est

particulièrement le cas puisque la grande majorité des charges sont connectées entre phase et neutre. Dans les réseaux moyennes tension, les charges monophasées peuvent être connectées entre phases ou entre phase et neutre. Des charges monophasées importantes sont constituées par les sous-stations des chemins de fer à courant alternatif et les fours à induction monophasés.

Les redresseurs polyphasés pour lesquels chacune des tensions d'alimentation participe à la sortie continue sont sensibles à une alimentation déséquilibrée. Celle-ci provoque une ondulation non souhaitée de la tension continue et des harmoniques de courant non caractéristiques côté alternatif. Cependant l'effet principal du déséquilibre est l'échauffement des enroulements des machines. En effet, la réactance inverse d'une machine synchrone est beaucoup plus faible que la réactance directe. La composante inverse du champ tournant induite par le déséquilibre va provoquer la circulation de courants importants qui vont venir se combiner aux courants "normaux" dans les phases. Ces courants supplémentaires provoquent un échauffement de la machine et sa possible destruction. [EL – 05]

Suivant la norme EN50160 en basse tension, le déséquilibre peut atteindre 2% au maximum pendant 95% d'une semaine sur la valeur efficace moyenne en 10 min. [VQE-99]

## 4. Simulation et interprétation des résultats

### a) Déséquilibre de tension en phase

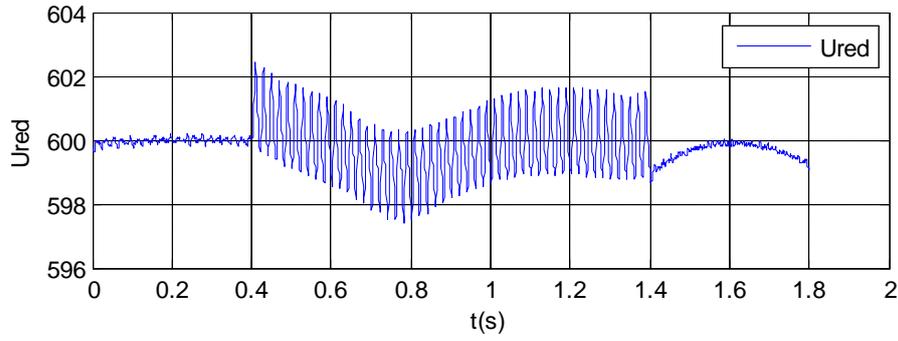
Dans ce test3, nous simulons le fonctionnement de l'éolienne dont les paramètres sont données en Annexe A et dans les mêmes conditions que celle du test1 à l'exception que dans l'intervalle de temps [ $t = 0.4s$  à  $t = 1.4s$ ], les tensions du réseau électrique subissent un déséquilibre des phases. Ce dernier affecte la phase 1 par un écart du déphasage de  $(+\pi/150)$  et la phase 2 par un écart du déphasage de  $(+\pi/75)$ . Dans ce cas, les tensions triphasées du réseau s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} v_1(t) = V_m \sin\left(\omega_s t + \frac{\pi}{150}\right) \\ v_2(t) = V_m \sin\left(\omega_s t - \left(\frac{2\pi}{3}\right) + \frac{\pi}{75}\right) \\ v_3(t) = V_m \sin\left(\omega_s t + \left(\frac{2\pi}{3}\right)\right) \end{cases} \quad (3.1)$$

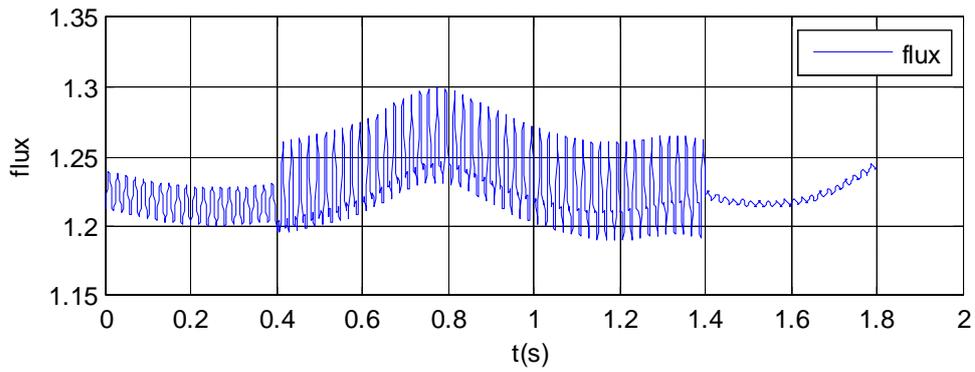
Où pour le réseau considéré l'amplitude  $V_m$  de la tension et sa pulsation  $\omega_s$  sont tels que :

$$V_m = 220\sqrt{2} \text{ V et } \omega_s = 100\pi \text{ rad/s}$$

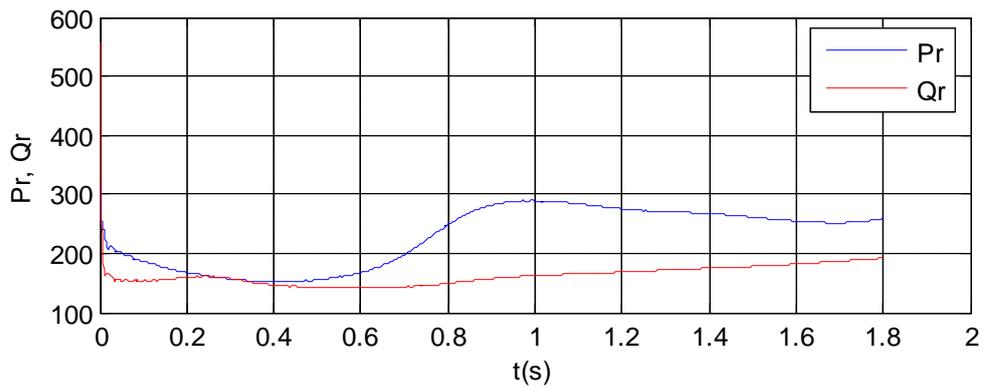
Les résultats de cette simulation sont présentés à la **Figure (3.1)**. L'analyse des résultats obtenus montre que :



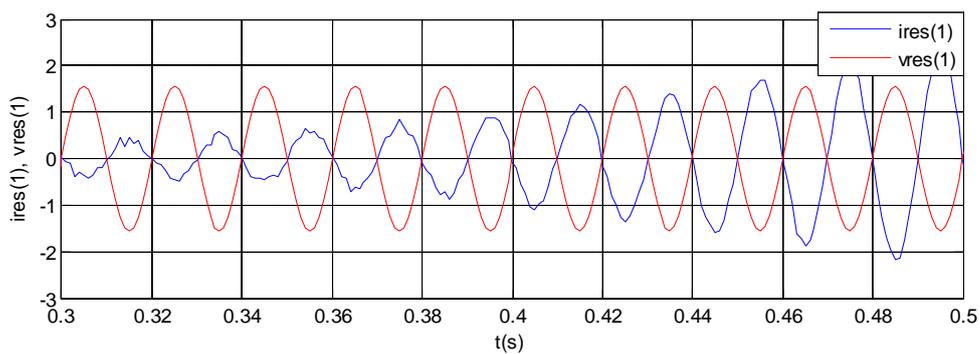
a) Variation de tension du bus continu.

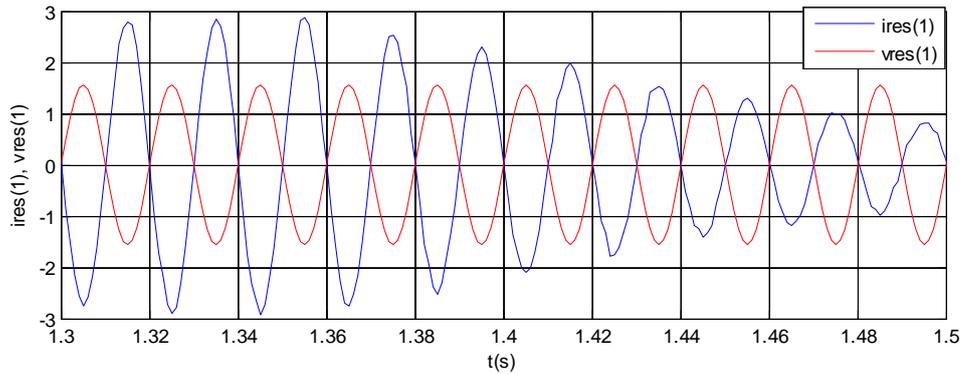


b) Variation du flux.

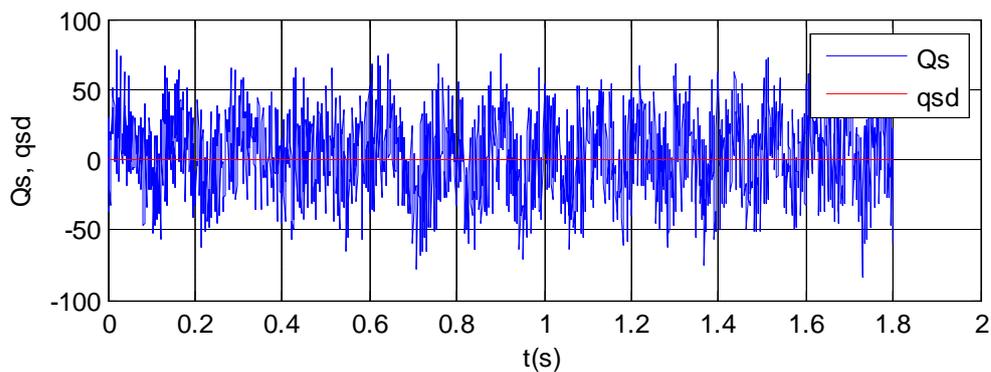


c) Puissance active et réactive du rotor.

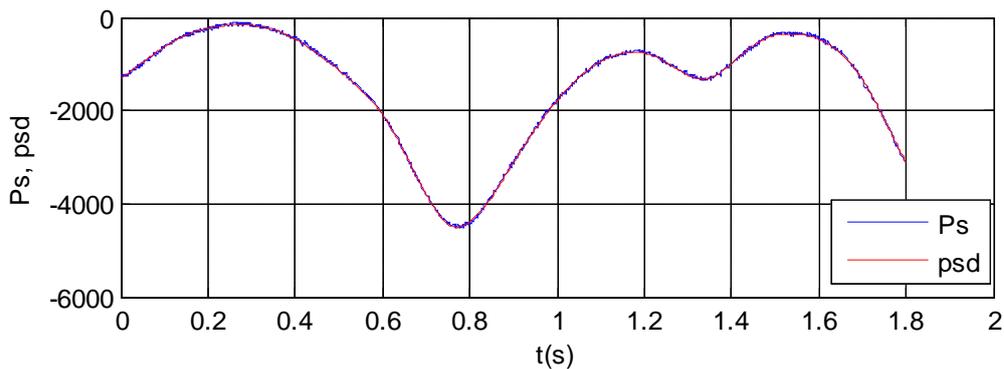




d) Courant et tension sur une phase du réseau.



e) Puissance réactive du stator.



f) Puissance active au stator.

**Fig. 3.1** Test de l'éolienne dans le cas d'une tension du réseau déséquilibrée en phase

A l'instant où apparaît le déséquilibre (à  $t = 0.4s$ ), la tension du bus continu (**Figure (3.1a)**) subit une faible variation de prêt de 2V ( $\Delta U_{dc}=0.33\%$ ) puis dès la disparition de la perturbation elle revient rapidement à sa valeur de référence (600V). On peut donc affirmer que le réglage de la tension du bus continu est peu sensible au déséquilibre en phase de la tension.

De la **Figure (3.1b)**, nous remarquons qu'à l'instant  $t = 0.4s$  les oscillations du flux augmentent brusquement de près de 2% puis, le flux revient à sa valeur initiale après  $t = 1.4s$ , avec moins de fluctuations.

De la **Figure (3.1c)**, on constate que la puissance active et réactive au rotor évoluent dans la plage admissible malgré la présence du déséquilibre.

La tension et le courant d'une phase de la MADA restent pratiquement en opposition de phase (**Figure (3.1d)**) 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 déséquilibre en phase des tensions du réseau.

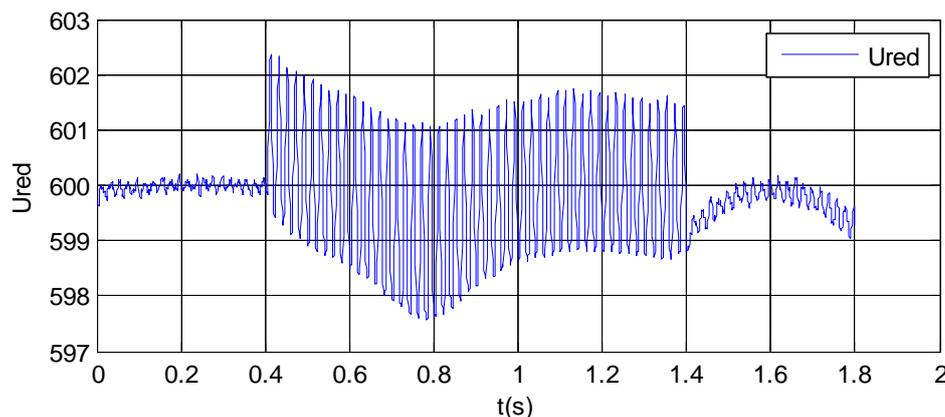
La puissance active et celle réactive au stator (**Figures (3.1e) & (3.1f)**) suivent leurs références avec un faible écart autour de leurs valeurs de référence. On peut donc affirmer que l'objectif de commande est bien réalisé. En effet, la puissance active présente des faibles oscillations autour de sa valeur de référence et que la puissance réactive évolue pratiquement de la même manière sur tout l'intervalle de simulation.

### b) Déséquilibre en amplitude de la tension

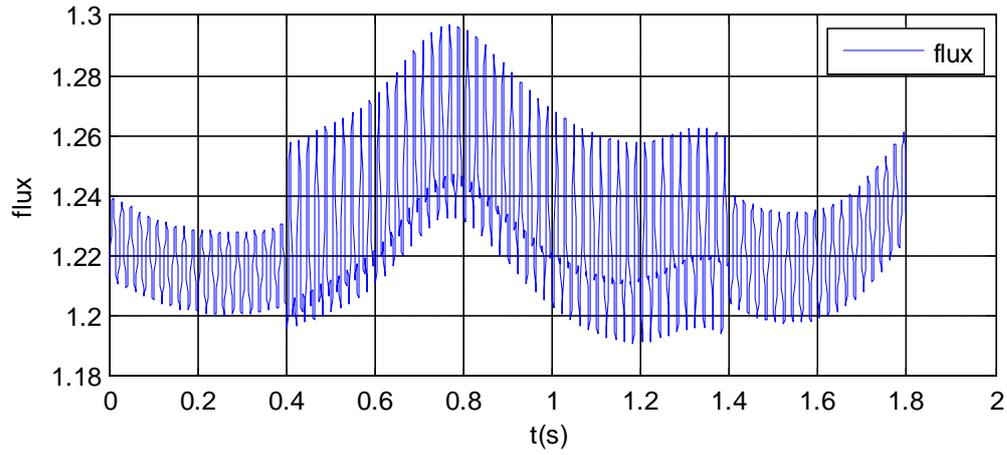
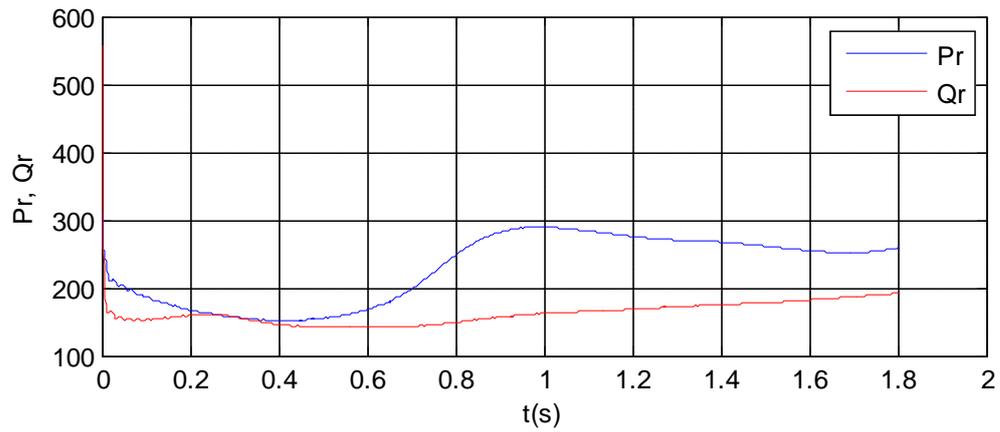
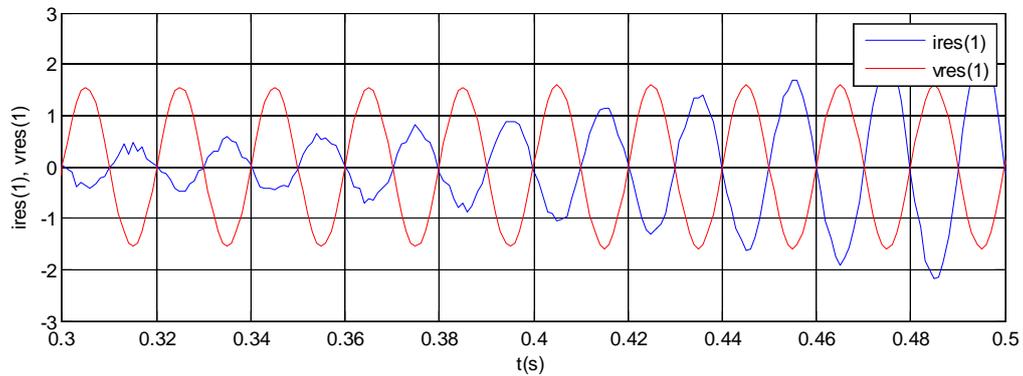
Dans ce test4, nous simulons le fonctionnement de l'éolienne dont les paramètres sont données en Annexe A et dans les mêmes conditions que celle du test1 à l'exception que dans l'intervalle de temps  $[t = 0.4s \text{ à } t = 1.4s]$ , les tensions du réseau électrique subissent un déséquilibre en amplitude. Ce dernier affecte l'amplitude de la phase 1 par une augmentation de  $0.02V_m$  et l'amplitude de la phase 3 par une diminution de  $0.02V_m$ . Dans ce cas, les tensions triphasées du réseau s'écrivent comme suit :

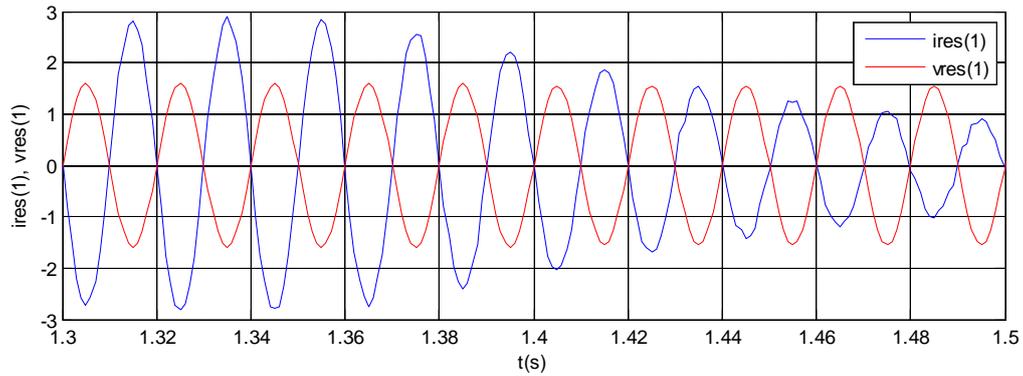
$$\begin{cases} v_1(t) = 1.02V_m \sin(\omega_s t) \\ v_2(t) = V_m \sin\left(\omega_s t - \left(\frac{2\pi}{3}\right)\right) \\ v_3(t) = 0.98V_m \sin\left(\omega_s t + \left(\frac{2\pi}{3}\right)\right) \end{cases} \quad (3.2)$$

Les résultats de cette simulation sont présentés à la **Figure (3.2)**.

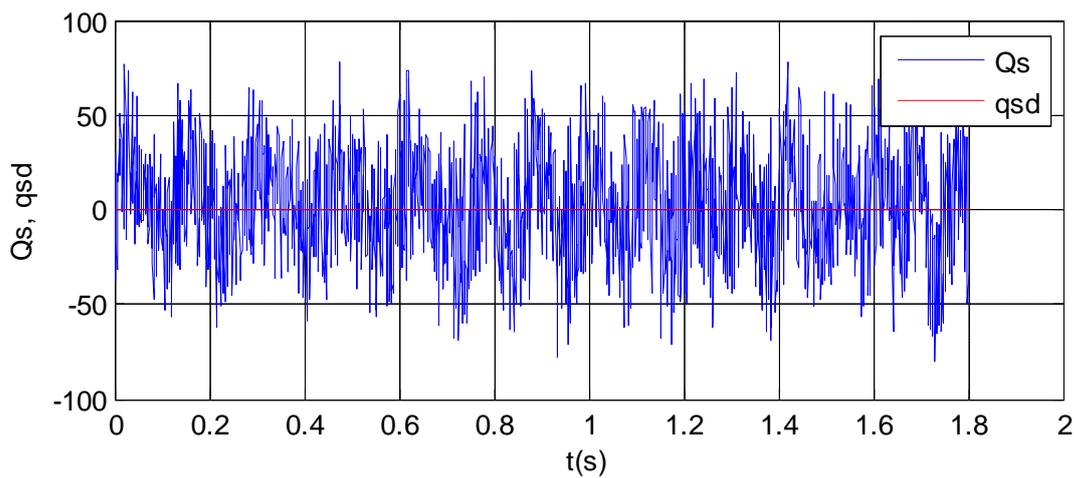


### a) Tension du bus continu.

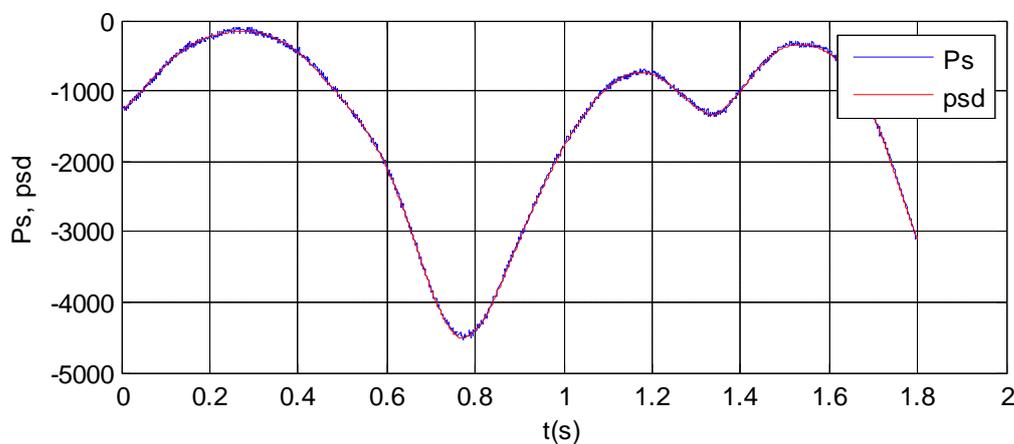
**b) Flux au stator****c) Puissance active et réactive du rotor**



d) Courant et tension sur une phase du réseau.



e) Puissance réactive du stator et sa référence.



f) Puissance active au stator et sa référence

Fig. 3.2 Test de l'éolienne dans le cas d'une tension du réseau déséquilibrée en amplitude.

L'analyse de ces résultats montre qu'on peut faire la même interprétation pour un déséquilibre de tension, que ça soit en phase ou en amplitude.

On peut ainsi conclure que la commande adaptative par les modes de glissement de la puissance active et celle réactive de la MADA reste robuste en présence d'un déséquilibre de tension. En effet, les tests effectués ont révélés que les grandeurs physiques restent tolérables en présence de la perturbation, tout en respectant l'objectif de commande.

## 5. Conclusion

Pour achever ce mémoire, nous avons simulé le fonctionnement de la chaîne éolienne lorsque le réseau subit des perturbations, à savoir un déséquilibre de tension, ceci 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 ce genre de perturbations, tout en maintenant la tension du bus continu proche de sa référence et les états du système tolérables.

## Conclusions générale et perspectives

L'objectif, préalablement défini dans ce travail, consacré à la commande adaptative par les modes glissants de la puissance d'une chaîne éolienne à base d'une MADA, et ceci en présence d'un réseau sain ou déséquilibré en tension. 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 le matériel utilisé. Ainsi, nous avons tout d'abord présenté la partie mécanique : l'éolienne à axe verticale, quelques notions théoriques sur la turbine. Ensuite, nous avons présenté la partie électrique : la MADA et l'alimentation de son rotor par un convertisseur du type « back to back », puis on s'est intéressé 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 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 deuxième 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 ainsi que la commande adaptative. 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 I. 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. 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 ce mémoire, dans le chapitre trois, 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, un bref rappel sur les perturbations en basse tension, on s'est intéressé par la suite au déséquilibre de tension, que ce soit en phase ou bien en amplitude. En second lieu, nous avons testé notre système de conversion d'énergie en présence de déséquilibre de tension en phase, puis en amplitude. Les

résultats de simulation nous ont permis de conclure que la commande adaptative par les modes glissants proposée a permis d'atteindre notre objectif principal. De ce fait, la commande proposée reste robuste et performante 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, ou bien la commande par logique flou, qui reste une commande assez performante.

## 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 :

⇒  $C_{mec}$  et  $C_f$  sont des grandeurs positives

⇒  $C_{em}$  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 :

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

Or :

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

Avec :

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

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

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

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

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 :

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

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 :

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

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

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

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 :

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

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<sup>2</sup>)
- 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 :  $\Rightarrow \begin{cases} K_p = 20 \\ K_I = 5 \end{cases}$

- **Gains de la commande:**

$$K_{d1}= 1.72; \quad K_{s1} = 0.01; \quad \varepsilon=10$$

$$K_{d2} =1.72; \quad K_{s2} =0.01 ; \quad \varepsilon=10$$

# Bibliographie

## -A-

[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

**-E -**

**[EL – 05] : Éric Labouré, François Costa, Lionel Pichon** « Compatibilité électromagnétique », 2005.

**-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.

**-J-**

**[JS -98] : J.J.E.Slotine, W.Li**, Applied nonlinear control, Prentice Hall, USA, 1998.

**-K-**

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

**[KA – 88] : K.J. ASTROM / B. WITTENMARK** , Adaptive Control Addison-Wesley, 1988

**[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.

**[LD - 96] : Landau. I.D. et Dugard. L,** "Commande adaptative aspects pratiques et théoriques", Editions Masson, Parie, 1996.

**[LEC-99] :L. Leclercq** « Apport du stockage inertiel associé `a 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.

**[MA-11] : S-El-M.Ardjoun, M.Abid, A-G.Aissaoui, A.Naceri,**“A robust fuzzy sliding mode control applied to the double fed induction machine”, International Journal Of Circuits, Systems And Signal Processing, Issue 4, 5, pp. 315-321, NAUN, USA, 2011.

**[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 , Djamila Rékioua et Djamal 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 orienté 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.