

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 la méthode de Lyapunov de la puissance d'une MADA intégrée dans une chaîne éolienne : cas d'un réseau sain ou pollué par les harmoniques.

Réalisé par :

➤ **MESSALI Amir**

Proposé et dirigé par :

Pr H.CHEKIREB

Promotion : Juin 2015

Nous dédions ce travail à :

Nos très chers parents et grands parents

A toutes nos familles

A tous nos amis

A toute la promotion 2015

A tous ceux qui ont partagé nos joies et peines

Remerciements

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

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre cher **promoteur Pr M. chkireb** pour avoir proposé ce sujet, ses précieux conseils et son aide tout au long de notre travail.

Arrivant au terme de ce travail, je tiens à exprimer dans ces lignes ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont participé d'une manière ou d'une autre à son aboutissement

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

Enfin, tous nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

Je ne pourrai pas terminer cet espace sans remercier mes collègues avec lesquels j'ai passé des moments agréables à l'école polytechnique d'Alger

ملخص: يعرض هذا العمل تقنية التحكم هذا هو السيطرة على التكيف من خلال طريقة يابونوف تطبيقها على الرياح نظام تحويل الطاقة مجهزة مولد متزامن ثنائي تغذية: مجردة. يحدث هذا التبرير الأكثر التقني لمشاكل عدم اليقين نموذج باستخدام قانون الرقابة غير الخطية. والهدف من ذلك هو تطبيق هذا الأمر للسيطرة على تبادل الطاقة النشطة والمتفاعلة التي تم إنشاؤها بواسطة آلة غير متزامن مع شبكة صحية أو ملوثة التوافقيات من خلال العمل على إشارات الدوار عن طريق تحويل ثنائي الاتجاه. نتائج المحاكاة العددية التي تم الحصول عليها تظهر اهتماما متزايدا من مثل عنصر تحكم في الشبكات الكهربائية.

كلمات البحث : مولد تقرا مزدوجا تغذيها غير متزامن ونظام التحكم، والسيطرة على السلطة، والتوافقيات

Résumé : Ce travail présente une technique de commande qui est la Commande adaptative par la méthode de Lyapunov appliquée au système de conversion d'énergie éolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation. Cette technique trouve sa plus forte justification aux problèmes d'incertitudes du modèle par l'utilisation d'une loi de commande non linéaire. L'objectif est d'appliquer cette commande pour contrôler l'échange des puissances active et réactive générées par la machine asynchrone avec le réseau sain ou pollué par les harmoniques en agissant sur les signaux rotoriques via un convertisseur bidirectionnel. Les résultats de simulations numériques obtenus montrent l'intérêt croissant d'une telle commande dans les systèmes électriques.

Mots clés : génératrice asynchrone à double alimentation, commande adaptative, contrôle des puissances, les harmoniques.

Abstract: This work presents a control technique that is adaptive control by the Lyapunov method applied to wind energy conversion system equipped with a dual-feed asynchronous generator. This occurs most technical justification for the model uncertainties problems by using a non-linear control law. The goal is to apply this command to control the exchange of active and reactive power generated by the asynchronous machine with healthy network or polluted by harmonics by acting on the rotor signals via a bidirectional converter. The results of numerical simulations obtained show the growing interest of such a control in electric systems.

Keywords: double-fed asynchronous generator, adaptive control , control of power, harmonics.

Table des matières	
Remerciements.....	I
Table des matières	III
Table des illustration	V
Nomenclatures	VI
Introduction générale.....	1
Chapitre I Modélisation de la chaine éolienne	3
I.1 Introduction	4
I.2 Partie mécanique	4
I.2.1 Modélisation de la turbine.....	4
I.3 Partie Electrique	7
I.3.1 Modélisation du convertisseur « back to back »	7
I.3.2 Modèle de la source dans le référentiel de Park	8
I.3.2.1 Mise en équation de la source triphasée	8
I.3.3 Modélisation de la MADA	10
I.3.3.1 Application de la transformation de Park aux équations de la MADA.....	10
I.3.3.2 Equations d'état du système	10
I.4 Conclusion.....	12
Chapitre II Commande adaptative basée sur la méthode de Lyapunov	13
II.1 Introduction.....	14
II.2 Principe et conception de la commande par par la 2eme méthode de Lyaponuv.....	14
II.2.1 Objectif de la commande	15
II.3 Loi de commande adaptative basée sur la méthode de Lyapounov.....	15
II.4 Asservissement du bus continu	20
II.4.1 Asservissement du CCR.	20
II.4.2 Asservissement du CCM	21
II.5 Stratégie d'optimisation de la puissance délivrée	21
II.6 Simulation et interprétation des résultats	22
II.6.1 Cas idéal.....	23
II.6.2 Test en présence des variations paramétriques.....	26
II.7 Conclusion.....	29

Chapitre III Performances de la Commande proposée face à un Réseau Pollué par les Harmoniques	30
III.1 Introduction	31
III.2 Principaux types de défauts dans les réseaux électriques en BT	32
III.2.1 Les Basse tensions industrielles	32
III.2.2 Les tensions nominales	32
III.3 Pollution du réseau par les harmoniques	33
III.3.1 limites normalisé (Norme EN 50160)	33
III.3.2 Les harmoniques	33
III.3.3 Décomposition d'un signal périodique	34
III.3.4 Source de la pollution harmoniques	35
III.3.5 Conséquences de la pollution harmonique du réseau	36
III.4 Simulation et interprétation	36
III.5 Conclusion	41
Conclusion générale	42
Annexe A : transformations tri _bi	44
Annexe B : Paramètres de la chaine éolienne	53
Bibliographie	55

Table des illustrations

Chapitre I Modélisation de la chaîne éolienne

Fig. I.1 Schéma global de la chaîne éolienne utilisée	04
Fig. I.2 : Schéma de principe de la turbine éolienne	05
Fig. I.3 Circuit double alimentation de la machine asynchrone.....	07
Fig. I.4 Onduleur à deux niveaux à base de transistors IGBT.....	08
Fig. I.5 Repère (d, q) lié au vecteur tension du réseau \vec{V}_s	09
Fig. I.6 Orientation de l'axe d sur le vecteur tension au stator	11

Chapitre II

Commande adaptative basée sur la méthode de Lyapunov

Fig. II.1 Schéma de régulation du CCR.....	21
Fig. II.2 Schéma de régulation du CCM.....	21
Fig. II.3 Caractéristique de la turbine éolienne.....	22
Fig. II.4 Le modèle de la vitesse vent.....	23
Fig. II.5 Test de l'éolienne dans le cas idéal	26
Fig. II.6 Test de l'éolienne dans en présence des variations paramétriques.....	28

Chapitre III Performances de la Commande proposée dans le cas d'un Réseau Pollué par les Harmoniques.

Fig. III.1 Onde déformée par le 3 ^{ième} harmonique	34
Fig. III.2 Spectre du signal de la Figure III.1	35
Fig. III.3 Décomposition d'un signal déformé en série d'ordres 5 et 7.....	35
Fig. III.4 Test de l'éolienne dans le cas de présence de la 3 ^{ème} , 5 ^{ème} et la 7 ^{ème} harmonique en niveau de réseau.....	40
Tableau III.1 Valeurs des tensions harmoniques individuel les aux points de fourniture, jusqu'au rang 25, exprimées en pourcentage de U_n	33

NOTATION

<i>MADA</i>	Machine à double alimentation
ρ	La densité d'air
S	La surface active de la voilure
m	La masse d'air en mouvement
P_t	La puissance du vent
P_{aer}	La puissance aérodynamique de l'éolienne
C_p	Le coefficient de puissance
β	L'angle d'orientation des pales
λ	La vitesse relative
<i>CCM</i>	Convertisseur cote MADA
<i>CCR</i>	Convertisseur cote réseau
R	Longueur d'une pale
V_v	Vitesse du vent
V_{est}	Vitesse du vent estimé
Ω_{turb}	Vitesse de rotation de la turbine
G	Gain du multiplicateur
Ω_{mec}	Vitesse mécanique
<i>f</i>	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
C_{aer}	Le couple aérodynamique
$[v_s]_{abc}$	Vecteurs de tensions triphasés statorique
$[v_r]_{abc}$	Vecteurs de tensions triphasés rotorique
$[v_s]_{dq}$	Vecteur de tension biphasé statorique
$[v_r]_{dq}$	Vecteur de tension biphasé rotorique
$[i_{abc}]$	Vecteurs de courants triphasés statorique
$[i_{dq}]$	Vecteur de courant biphasés statorique
$P(\theta)$	Matrice de passage biphasé-triphasé
R_s	Résistances statorique d'une phase
R_r	Résistances rotorique d'une phase
M	Inductance mutuelle
ψ_{ds}	Flux statorique suivant l'axe d
ψ_{qs}	Flux statorique suivant l'axe q
ψ_{dr}	Flux rotorique suivant l'axe d
ψ_{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_{dr}	Courant rotorique suivant l'axe q
ω_s	Vitesse de rotation vu au stator
ω_r	Vitesse de rotation vu au rotor
ω_m	Vitesse machine
p	Nombre de paires de pole
T_s	Constante de temps du stator
T_r	Constante de temps du rotor
P_s	Puissance active statorique
Q_s	Puissance réactive statorique
P_r	Puissance active rotorique
Q_r	Puissance réactive rotorique

$e(x)$	Erreur de réglage
P^*	Puissance active statorique de référence
Q^*	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

Introduction générale

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

Par ailleurs, il est important d'améliorer le rendement de la chaîne de conversion. Ceci peut être obtenu en améliorant le rendement des éléments constitutifs de cette chaîne de conversion : la turbine, le réducteur, le générateur et les convertisseurs. Pour notre part, nous cherchons à préserver la production de la puissance optimale du générateur dans un régime de fonctionnement normal ou perturbé par un réseau électrique pollué par les harmoniques [MIR-05]. Donc, l'objectif est d'assurer une commande robuste de la puissance active et réactive. Ceci peut se concrétiser par une commande qui est d'essence robuste face aux perturbations internes ou externes et face aux variations paramétriques affectant le système sous commande. C'est le cas de la commande basée sur la technique des modes de glissement, néanmoins cette commande présente l'inconvénient de produire un broutement des états du système peut être néfaste à son exploitation.

Dans ce même contexte, il est aussi possible d'exploiter les commandes adaptatives où la partie inconnue du système due à l'effet des perturbations peut être estimée par un algorithme d'adaptation des paramètres.

Dans notre cas, nous allons synthétiser une commande adaptative basée sur la 2^{ème} méthode de Lyapunov dans le but d'assurer la production de la puissance optimale même en présence d'un réseau électrique pollué par les harmoniques.

De ce fait, le travail effectué dans le cadre de ce mémoire est présenté en trois chapitres :

Le chapitre I est consacré à une modélisation des éléments de base de la chaîne éolienne en outre la turbine, le multiplicateur, la MADA et le convertisseur.

Au chapitre II, après un bref rappel sur la technique de commande basée sur la seconde méthode de Lyapunov, nous exploitons celle-ci pour synthétiser une commande

adaptative de la puissance active et réactive de la MADA. Cette loi de commande est établie en exploitant l'expression générale des puissance dans un repère (d,q) arbitraire et le modèle d'état non linéaire de la MADA. Ensuite, nous simulons le fonctionnement de la chaîne éolienne dans le cas d'un régime de fonctionnement idéal et en présence des variations paramétriques affectant le modèle de la MADA.

Le chapitre III est essentiellement réservé à l'influence d'un réseau électrique pollué par les harmoniques. Dans ce contexte, nous rappelons les normes en matière de la pollution des réseaux électriques par les harmoniques. Ensuite, nous simulons le fonctionnement de la chaîne éolienne lorsque le réseau es pollué par le 3^{ième}, le 5^{ième} et le 7^{ième} harmonique.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale qui résume le travail effectué et les principaux résultats obtenus. Nous présentons également quelques perspectives de ce travail.

Chapitre I

Modélisation de la chaîne éolienne

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons effectuer la modélisation des dispositifs les plus importants de la chaîne de conversion éolienne. Dans un premier temps, nous présentons le modèle aérodynamique de la turbine, puis le modèle mécanique de l'éolienne. Ensuite, nous présentons la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique via la machine asynchrone doublement alimentée (MADA). Pour cette dernière, nous établissons son modèle d'état dans le repère de Park ainsi que le modèle du convertisseur interposé entre le rotor de la MADA et le réseau.

Le schéma global, de la chaîne éolienne utilisée dans le cadre cette étude, est montré à la **Figure (I.1)** où apparaissent les dispositifs principaux représentés par :

- la Turbine éolienne,
- le Multiplicateur,
- la MADA,
- le convertisseur,
- et le réseau électrique.

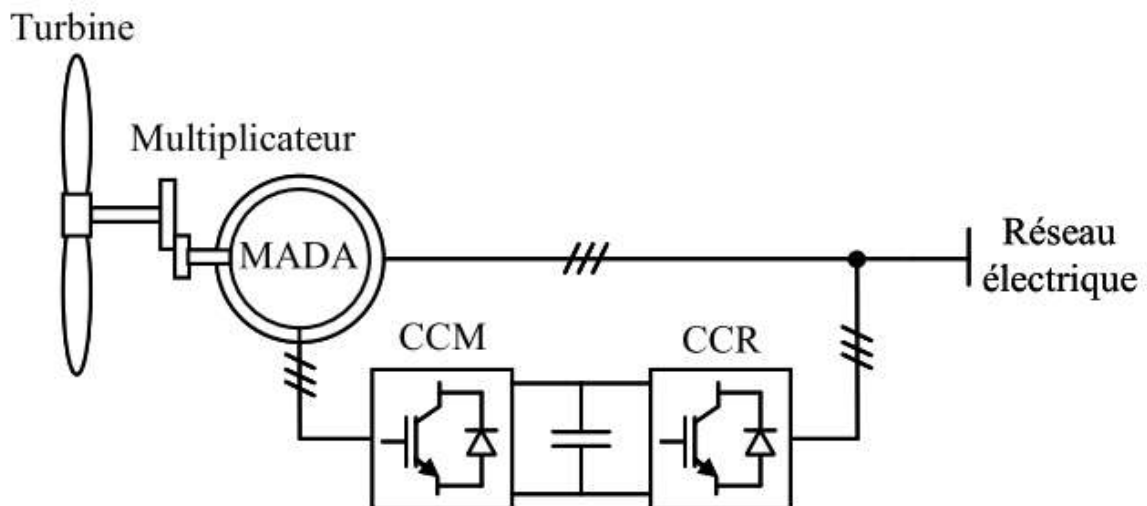


Fig. I.1 Schéma global de la chaîne éolienne utilisée

I.2 Partie mécanique

On s'intéresse dans cette partie à la modélisation mécanique de la turbine éolienne

I.2.1 Modélisation de la turbine

La puissance du vent P_t est définie de la manière suivante :

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

Où :

ρ : est la densité de l'air (presque 1.22 kg/m³ à la pression atmosphérique à 25°C).

S : la surface balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

V : la vitesse du vent

La turbine utilisée est constituée de pales de longueur R entraînant une génératrice électrique couplée à l'arbre de la turbine (Fig.I.2) : [BEH-12]

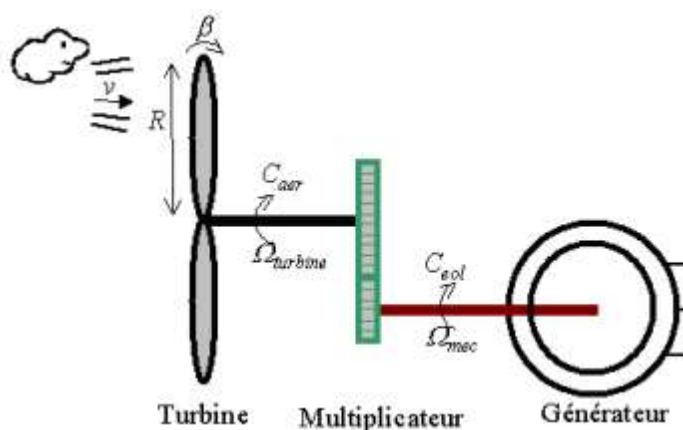


Fig. I.2 : Schéma de principe de la turbine éolienne

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

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

Où le coefficient de puissance C_p [MIR-05] représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient est en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle d'orientation de la pale β . Dans la cas de la turbine utilisée, il est approximé par :

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

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

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

Où Ω_{turb} représente la vitesse de rotation la turbine.

Le couple aérodynamique produit par la turbine est donné par :

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

- **Couple de référence de la génératrice**

L'expression de la référence du couple de la génératrice est établi dans un fonctionnement en régime permanent [MIR-05]. Pour la composante lente du vent et en régime permanent on peut écrire :

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

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

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

Dans la relation (I.7), C_{mec} ($C_{mec} > 0$) désigne le couple produit par la turbine au niveau de l'arbre de la génératrice et C_{em} le couple électromagnétique de la MADA.

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

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

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

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

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

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

La vitesse lente de la turbine Ω_{turb} est amenée à la vitesse d'exploitation de la génératrice via le multiplicateur. Dans le cas d'un multiplicateur idéal, le couple et la vitesse au niveau de l'arbre de la MADA sont tels que :

$$\Omega_{mec} = G \Omega_{turb} \quad (I.11)$$

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

De ce fait, le couple de référence de la génératrice est obtenu en substituant V_{est} par son expression (I.10) dans (I.9) et en tenant compte de (I.11) et (I.12) :

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

Ce dernier est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice. Il est à noter que dans (I.13), λ_{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.

I.3 Partie électrique

I.3.1 Modélisation du convertisseur « back to back »

Les deux convertisseurs de faible puissance, interposée entre le rotor de la MADA et le réseau de la **Figure (I.3)** possèdent une même structure pareille, ils sont tous les deux 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 réglage du facteur de puissance au niveau de la connexion rotor-réseau.

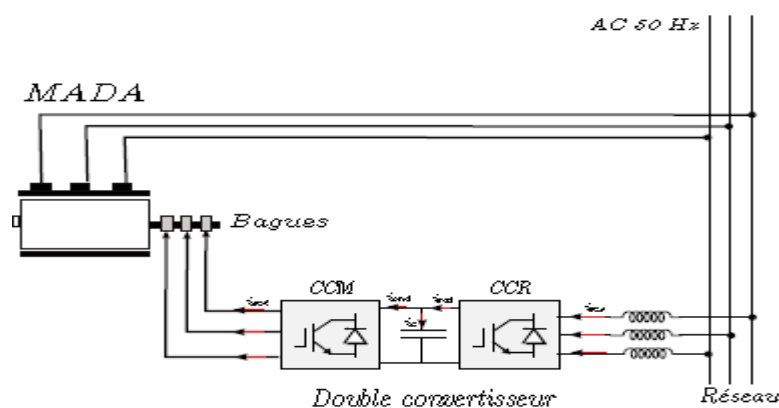


Fig.I.3 Circuit double alimentation de la machine asynchrone

La **Figure (I.4)** donne la structure à base de transistor IGBT de l'onduleur et du redresseur à MLI. Les transistors supérieurs connectés aux phases (a,b,c) sont notés respectivement Tr_a , Tr_b et Tr_c et dont les ordres de commandes sont désignés respectivement par S_a , S_b et S_c . Les tensions de bras VM_a , VM_b et VM_c dépendent des états des interrupteurs telles que :

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 :

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

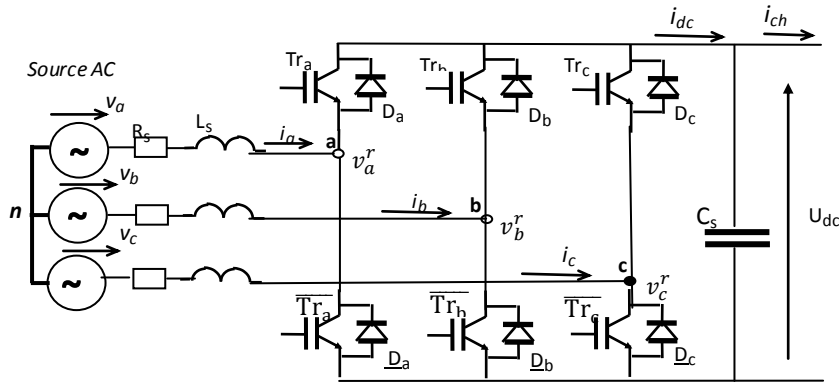


Fig. I.4 Onduleur à deux niveaux à base de transistors IGBT

- Bras 3 :**
- $VM_b = U_{dc} \Rightarrow$ si Tr_b On et $\overline{Tr_b}$ Off ($S_b = 1$ & $\overline{S_b} = 0$)
 - $VM_c = 0 \Rightarrow$ si Tr_c Off et $\overline{Tr_c}$ On ($S_c = 0$ & $\overline{S_c} = 1$)
 - $VM_c = U_{dc} \Rightarrow$ si Tr_c On et $\overline{Tr_c}$ Off ($S_c = 1$ & $\overline{S_c} = 0$)

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

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

Les tensions simples peuvent être exprimées en fonction des ordres de commande des switchs par la relation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{pmatrix} = \frac{U_{cd}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \tag{I.14}$$

Remarque : Il est à noter que la simulation du fonctionnement du convertisseur est basée sur la relation (I.14) où les ordres de commande (S_a , S_b et S_c) sont issus de la technique MLI appliquée pour la commande du convertisseur [MER-07].

I.3.2 Modèle de la source dans le référentiel de Park

I.3.2.1 Mise en équation de la source triphasée

Le CCR 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 :

$$[v_s]_{abc} = [R_s][i]_{abc} + [L_s] \frac{d}{dt} [i]_{abc} + [v_r]_{abc} \tag{I.15}$$

Avec

$$\begin{aligned}
 [v_s]_{abc} &= \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, [i]_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, [L_s] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix}, [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \\
 [v_r]_{abc} &= \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{I.16}$$

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

Le repère (dq) est orienté sur le vecteur de la tension du réseau ainsi l'axe (d) est confondu avec le vecteur tension \vec{V}_s du réseau et l'axe (q) est en quadrature avance. De la **Figure (I.5)**, il est clair que la composante V_q est nulle de plus la position θ_s du vecteur tension \vec{V}_s peut être déterminée simplement par :

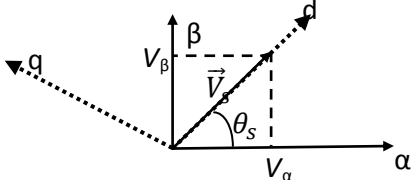
$$\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{V_\beta}{V_\alpha}\right) \tag{I.17}$$


Fig. I.5 Repère (dq) lié au vecteur tension du réseau \vec{V}_s

En appliquant la transformation de Park au système (I.15), on obtient :

$$[v_s]_{dq} = [P(\theta_s)]^{-1}[R_s][i]_{abc} + [P(\theta_s)][L_s]\frac{d}{dt}[i]_{abc} + [P(\theta_s)][v_r]_{abc} \tag{I.18}$$

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 (I.18) conduit à :

$$[v_s]_{dq} = [P(\theta_s)][R_s][P(\theta_s)]^{-1}[i]_{dq} + \alpha + [v_r]_{dq} \tag{I.19}$$

Avec :

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

Le développement de la relation (I.19) dans la condition où $v_{qs} = 0$ conduit à :

$$R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} = v_{ds} + L_s \omega_s i_q - v_{dr} \tag{I.20}$$

$$R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} = -L_s \omega_s i_d - v_{qr} \tag{I.21}$$

I.3.3 Modélisation de la MADA

Nous constatons la complexité des équations électriques et de l'équation mécanique de la machine asynchrone à cause de la dimension des matrices entrant dans les calculs et de la dépendance de la matrice inductance vis à vis de la position de l'axe rotoriques par rapport à l'axe statorique, qui est variable dans le temps. Pour remédier à ce problème, on doit faire un changement de repère dans le but de rendre l'écriture des équations électriques et l'équation mécanique plus simples à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park (**Annexe A**).

I.3.3.1 Application de la transformation de Park aux équations de la MADA

A l'aide de la transformation de Park ,on peut écrit :

$$\begin{cases} (X_{dq})_s = P(\theta_s)(X_{abc})_s \\ (X_{dq})_r = P(\theta_r)(X_{abc})_r \end{cases} \quad (\text{I.22})$$

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

En appliquant cette transformation [**SAL-05**] au niveau du stator et du rotor nous obtenons les équations électriques et magnétiques et mécaniques suivantes :

- Équations électriques :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_a \psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_a \psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{I.23})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_m) \psi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_a - \omega_m) \psi_{dr} \end{cases} \quad (\text{I.24})$$

- Équations magnétiques :

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{I.25})$$

$$\begin{cases} \psi_{dr} = L_s i_{dr} + M i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_s i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{I.26})$$

- Équation mécanique :

$$\frac{d\Omega_m}{dt} = C_e - K_f \Omega_m + C_{mec} \quad (\text{I.27})$$

I.3.3.2 Equations d'état du système :

A partir des équations (I.23) à (I.27) et en utilisant le vecteur d'état :

$$X = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \psi_{ds} \quad \psi_{qs} \quad \omega_m]^T \quad (I.28)$$

Il est possible d'extraire le modèle d'état ci-dessous :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = -a_1 i_{ds} + (\omega_a - \omega_m) i_{qs} + a_2 \psi_{ds} + a_3 \psi_{qs} \omega_m + a_3 V_{ds} - a_4 V_{dr} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -(\omega_a - \omega_m) i_{ds} - a_1 i_{qs} - a_3 \psi_{ds} \omega_m + a_2 \psi_{qs} + a_3 V_{qs} - a_4 V_{qr} \\ \frac{d\psi_{ds}}{dt} = -b_1 i_{ds} + \omega_a \psi_{qs} + V_{ds} \\ \frac{d\psi_{qs}}{dt} = -b_1 i_{qs} - \omega_a \psi_{ds} + V_{qs} \\ \frac{d\omega_m}{dt} = c_1 (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) - c_2 \omega_m + c_3 C_{mec} \end{cases} \quad (I.29)$$

Les coefficients, apparaissant dans ce modèle, sont définis en fonction des paramètres de la MADA par :

$$a_1 = \frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1}{\sigma T_r}, \quad a_2 = \frac{1}{\sigma T_s L_s}, \quad a_3 = \frac{1}{\sigma L_s}, \quad a_4 = \frac{1-\sigma}{\sigma M}, \quad b_1 = R_s, \quad c_1 = \frac{P^2}{J}, \quad c_2 = \frac{P}{J} \quad (I.30)$$

Où σ représente le coefficient de dispersion il est défini comme suit :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad (I.31)$$

- **Le référentiel de travail :**

Nous projetons de commander la MADA en se basant sur le modèle (I.30) établi dans un repère diphasé (d,q) lié au vecteur \vec{V}_s de la tension du réseau (tension au stator) tel que l'axe (d) coïncide avec ce vecteur comme indiqué à la **Figure (I.6)**. Ceci conduit à imposer $\omega_a = \omega_s$ dans le modèle (1.30).

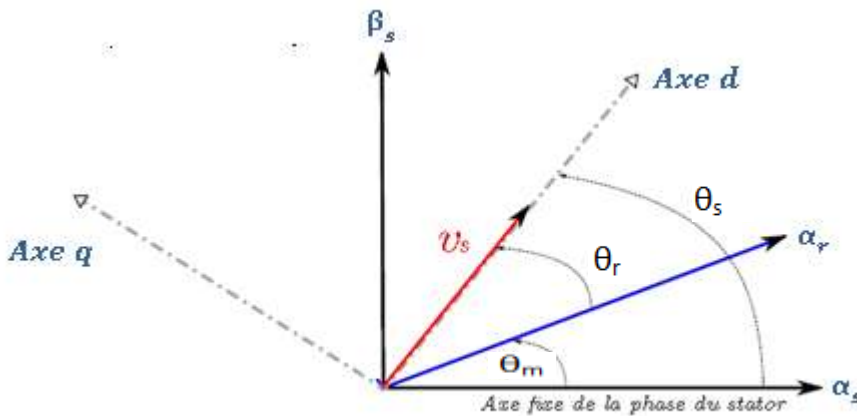


Fig. I.6 Orientation de l'axe d sur le vecteur tension au stator

Dans la condition où le repère (d, q) est pris tel que son axe d coïncide avec le vecteur de la tension au stator il vient:

$$\begin{cases} V_{ds} = V_s \\ V_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{I.32})$$

On peut réécrire le modèle d'état (I.29) sous la forme compacte suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x) - a_4 V_{dr} \\ \dot{x}_2 = f_2(x) - a_4 V_{qr} \\ \dot{x}_3 = f_3(x) \\ \dot{x}_4 = f_4(x) \\ \dot{x}_5 = f_5(x) + c_3 C_{mec} \end{cases} \quad (\text{I.33})$$

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

$$\begin{cases} f_1(x) = -a_1 x_1 + a_2 x_3 + (\omega_s - x_5) x_2 + a_3 x_4 x_5 + a_3 V_s \\ f_2(x) = -(\omega_s - x_5) x_1 - a_1 x_2 + a_2 x_4 - a_3 x_3 x_5 \\ f_3(x) = -b_1 x_1 + \omega_s x_4 + V_s \\ f_4(x) = -b_2 x_2 - \omega_s x_3 \\ f_5(x) = c_1 (x_2 x_3 - x_1 x_4) - c_2 x_5 \end{cases} \quad (\text{I.34})$$

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

$$\begin{cases} y_1 = P_s(t) \\ y_2 = Q_s(t) \end{cases} \quad (\text{I.35})$$

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

$$\begin{cases} P_s(t) = V_s i_{ds} \\ Q_s(t) = -V_s i_{qs} \end{cases} \quad (\text{I.36})$$

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

$$\begin{cases} u_1 = V_{dr} \\ u_2 = V_{qr} \end{cases} \quad (\text{I.37})$$

I.4 Conclusion :

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

Chapitre II

Commande

Adaptative basée sur

la Méthode de

Lyapunov

II.1 Introduction :

Il est établi qu'un système est asymptotiquement stable si la matrice de son linéarisé admet un point singulier et qu'en ce point cette matrice a des valeurs propres à partie réelle négative. Si certaines des valeurs propres ont des parties réelles positives, le point est instable. Mais qu'en est-il des autres cas ? En effet, de nombreuses situations peuvent se produire où il n'existe pas de méthode systématique permettant de conclure clairement de la stabilité ou non du système, mais plutôt un certain nombre de méthodes ad hoc. La méthode de Lyapunov en est une. Elle est très importante parce qu'elle permet de conclure dans de nombreux cas où les autres méthodes échouent. De plus, elle permet d'évaluer la taille du bassin d'attraction d'une singularité, ce que ne permet pas le critère du signe des parties réelles des valeurs propres.

Dans ce chapitre et dans un premier lieu, nous allons appliquer la commande non linéaire dite « la seconde méthode de Lyapunov » pour le contrôle de la puissance active et celle réactive de la MADA connectée au réseau. En effet, il s'agit de synthétiser les tensions du rotor de la MADA.

Pour cela, nous présentons tout d'abord un rappel théorique relatif à la commande par la méthode de Lyapunov. En premier lieu, nous abordons le principe de cette commande, son objectif ainsi que les conditions de convergence. En second lieu, nous explicitons les étapes de conception de la loi de commande sans et avec un terme adaptatif dans le cas d'une expression générale des puissances au stator. En dernier lieu, nous évaluons les performances de cette technique de commande dans le cas de la conduite de l'éolienne dans un fonctionnement idéal ou perturbé. En effet, nous présentons les résultats de simulation du comportement dynamique du système étudié, ce qui nous permettra de conclure de l'intérêt de cette commande.

II.2 Principe et conception de la commande par la seconde méthode de Lyapunov

On considère le modèle d'état suivant :

$$[\dot{X}] = [A] [X] + [B][U] \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- $[X] \in R^n$: Vecteur d'état
- $[U] \in R^m$: Vecteur de commande
- Avec $n > m$.

La théorie de Lyapunov prévoit de calculer une commande non linéaire en forme d'un retour d'état stabilisant $u = -k(x)$.

Son principe est simple, si la fonction de Lyapunov $V(x)$ est une fonction définie positive (FDP) sur R_n , la commande sera celle qui impose à la dynamique $\dot{V}(x)$ d'être une fonction définie négative (FDN). Cependant, trouver une fonction de Lyapunov qui soit FDP n'est généralement pas une tâche aisée.

II.2.1 Objectif de la commande :

L'objectif de la commande étant de ramener les puissances actives et réactives au stator à suivre leurs références, les fonctions de Lyapunov que nous devrions choisir doivent être dépendantes des erreurs de poursuite de ces références.

Il s'agit de choisir une fonction candidate de Lyapunov ($V(x) > 0$) : fonction scalaire positive et radialement non bornée [BEN-12] dépendant des variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui assure la décroissance de cette fonction le long de la trajectoire d'état du système (i.e $\dot{V}(x) < 0$).

En définissant par exemple une fonction candidate de Lyapunov [BEN-12] pour le système comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2}e^2 \Rightarrow \text{fonction FDP et } e(x) \text{ est l'erreur de réglage} \quad (\text{II.2})$$

En dérivant cette dernière, on obtient :

$$\dot{V}(x) = \dot{e}(x)e(x) \Rightarrow \text{fonction FDN} \quad (\text{II.3})$$

Pour que $V(x)$ puisse décroître, il suffit d'assurer que :

$$\dot{e}(x)e(x) < 0 \quad (\text{II.4})$$

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

Les conditions de convergence permettent aux dynamiques du système de converger. Nous retenons de la littérature une condition nécessaire et suffisante, appelée condition d'attractivité, est que la dérivée temporelle de l'erreur $\dot{e}(x)$ soit définie négative pour que $\dot{V}(x)$ soit FDN et d'y rester indépendamment de la perturbation.

II.3 Loi de commande adaptative basée sur la méthode de Lyapunov

L'expression générale des puissances actives et réactives dans un repère (d,q) arbitraire s'écrivent :

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

Rappelons que la dynamique du système étudié peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x) u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5]^T ; f(x) = [f_1(x) \quad f_2(x) \quad f_3(x) \quad f_4(x) \quad f_5(x)]^T$$

$$g(x) = \begin{pmatrix} -a_4 & 0 \\ 0 & -a_4 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} ; u = [V_{dr} \quad V_{qr}]^T ; h(x) = [P_s \quad Q_s]^T$$

Le système étudié (II-6), à 5 variables d'état, présente 2 sorties (P_s et Q_s) et 2 entrées de commande (V_{dr} et V_{qr}) les tensions au rotor. C'est donc un système du type MIMO.

Le contrôle de la MADA a pour objet la commande de la puissance active et celle réactive au stator sur la base des hypothèses introduites au chapitre 1.

Notre but étant le réglage des puissances par conséquent, on définit les erreurs de réglage comme suit :

$$\begin{cases} e_1 = P_s - P_s^* \\ e_2 = Q_s - Q_s^* \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Donc

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{P}_s - \dot{P}_s^* \\ \dot{e}_2 = \dot{Q}_s - \dot{Q}_s^* \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

La dynamique des puissances électriques au stator est déduite de la relation (II.5), d'où on a :

$$\begin{cases} \dot{P}_s = V_{ds} \dot{x}_1 + V_{qs} \dot{x}_2 \\ \dot{Q}_s = V_{qs} \dot{x}_1 - V_{ds} \dot{x}_2 \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

En remplaçant dans la relation (II.9), les dynamiques \dot{x}_1 et \dot{x}_2 par leurs expressions selon (I.36), on obtient :

$$\begin{cases} \dot{P}_s = V_{ds} (f_1 - a_4 u_1) + V_{qs} (f_2 - a_4 u_2) \\ \dot{Q}_s = V_{qs} (f_1 - a_4 u_1) - V_{ds} (f_2 - a_4 u_2) \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Nous proposons de formaliser la dynamique des sorties (II.10), comme étant la somme d'une dynamique connue et d'une dynamique inconnue. La dynamique inconnue peut être due à l'effet des erreurs de modélisation, des variations inconnues des paramètres et éventuellement des perturbations. De ce fait, la relation (II.10) peut s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} \dot{P}_s = V_d f_{10} + V_q f_{20} - V_d a_{40} V_{dr} - V_q a_{40} V_{qr} + \Delta_1 \\ \dot{Q}_s = V_q f_{20} - V_d f_{20} + V_q a_{40} V_{qr} + V_d a_{40} V_{dr} + \Delta_2 \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Où :

- Δ_1 et Δ_2 sont les termes inconnus de la dynamique ;
- $V_d, V_q, a_{40}, f_{10}(x), f_{20}(x)$ sont des termes supposés bien connus de la dynamique ;
- les fonctions f_{10} et f_{20} correspondent aux fonctions f_1 et f_2 déterminées pour les valeurs bien connues des coefficients du système notés a_{10}, a_{20}, a_{30} . D'où on a :

$$\begin{cases} f_{10} = -a_{10}x_1 + a_{20}x_3 + (\omega_a - x_5)x_2 + a_{30}x_4x_5 + a_{30}V_{ds} \\ f_{20} = -(\omega_a - x_5)x_1 - a_{10}x_2 - a_{30}x_3x_5 + a_{20}x_4 + a_{30}V_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

On pose :

$$\begin{cases} F_{10}(x) = V_d f_{10} + V_q f_{20} \\ F_{20}(x) = V_q f_{20} - V_d f_{20} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Et on introduit les commandes virtuelles u_1 et u_2 comme suit :

$$\begin{cases} u_1 = -V_d a_{40} V_{dr} - V_q a_{40} V_{qr} \\ u_2 = -V_q a_{40} V_{qr} + V_d a_{40} V_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

En exploitant (II.13) et (II.14), la relation (II.11) devient :

$$\begin{cases} \dot{P}_s = F_{10}(x) + u_1 + \Delta_1 \\ \dot{Q}_s = F_{20}(x) + u_2 + \Delta_2 \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

On considère que Δ_1 et Δ_2 peuvent se mettre sous la forme :

$$\begin{cases} \Delta_1 = X^t \theta_1 + \varepsilon_1 \\ \Delta_2 = X^t \theta_2 + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Où :

θ_1 et θ_2 sont les vecteurs des paramètres idéaux ;

ε_1 et ε_2 sont les erreurs de prédiction ;

$X^t = [1 \ i_{ds} \ i_{qs} \ \psi_{ds} \ \psi_{qs} \ V_{ds} \ V_{qs}]$ est le vecteur régressif.

En tenant compte de (II.16), la dynamique des erreurs de réglage (II.15) prend la forme

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = F_{10}(x) + u_1 + X^t \theta_1 + \varepsilon_1 - \dot{P}_s^* \\ \dot{e}_2 = F_{20}(x) + u_2 + X^t \theta_2 + \varepsilon_2 - \dot{Q}_s^* \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

A ce stade du développement, à dynamique (II.17) on associe les fonctions de Lyapunov suivantes :

$$V_i = \frac{1}{2} e_i^2 - \frac{1}{2\eta_i} \tilde{\theta}_i^t \hat{\theta}_i \quad (\text{II.18})$$

Où $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \hat{\theta}_i$ avec $i = (1,2)$ et $\hat{\theta}_i$ représente l'estimé du vecteur des paramètres inconnus θ_i .

La dérivée de (II.18) conduit à :

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 - \frac{1}{\eta_1} (\tilde{\theta}_1)^t \dot{\hat{\theta}}_1 \\ \dot{V}_2 = e_2 \dot{e}_2 - \frac{1}{\eta_2} (\tilde{\theta}_2)^t \dot{\hat{\theta}}_2 \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

En tenant compte de l'expression (II.17), la relation (II.19) devient :

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = e_1 (F_{10}(x) + u_1 + X^t \theta_1 + \varepsilon_1 - \dot{P}_s^*) - \frac{1}{\eta_1} (\tilde{\theta}_1)^t \dot{\hat{\theta}}_1 \\ \dot{V}_2 = e_2 (F_{20}(x) + u_2 + X^t \theta_2 + \varepsilon_2 - \dot{Q}_s^*) - \frac{1}{\eta_2} (\tilde{\theta}_2)^t \dot{\hat{\theta}}_2 \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

On propose les commandes virtuelles suivantes:

$$\begin{cases} u_1 = -F_{10}(x) - X^t \hat{\theta}_1 - k_{p1} e_1 - k_{s1} \text{sign}(e_1) + \dot{P}_s^* \\ u_2 = -F_{20}(x) - X^t \hat{\theta}_2 - k_{p2} e_2 - k_{s2} \text{sign}(e_2) + \dot{Q}_s^* \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

En introduisant les commandes virtuelles (II.21) dans (II.20), on obtient :

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = (-k_{p1} e_1^2 - k_{s1} |e_1| + e_1 \cdot \varepsilon_1 + e_1 X^t \tilde{\theta}_1) - \frac{1}{\eta_1} (\tilde{\theta}_1)^t \dot{\hat{\theta}}_1 \\ \dot{V}_2 = (-k_{p2} e_2^2 - k_{s2} |e_2| + e_2 \cdot \varepsilon_2 + e_2 X^t \tilde{\theta}_2) - \frac{1}{\eta_2} (\tilde{\theta}_2)^t \dot{\hat{\theta}}_2 \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

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

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}}_1 = \eta_1 e_1 X \\ \dot{\hat{\theta}}_2 = \eta_2 e_2 X \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Avec ces lois d'adaptation (II.23), les relations (II.22) se réduisent à :

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = -k_{p1}e_1^2 - k_{s1}|e_1| + e_1 \cdot \varepsilon_1 \\ \dot{V}_2 = -k_{p2}e_2^2 - k_{s2}|e_2| + e_2 \cdot \varepsilon_2 \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

On suppose que ε_1 et ε_2 sont bornées telle que :

$$\begin{cases} \lim |\varepsilon_1(t)| \leq \bar{\varepsilon}_1 \\ \lim |\varepsilon_2(t)| \leq \bar{\varepsilon}_2 \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Ainsi, les dynamiques (II.24) vérifient les inégalités suivantes :

$$\begin{cases} \dot{V}_1 \leq -k_{p1}e_1^2 - k_{s1}|e_1| + |e_1| \cdot \bar{\varepsilon}_1 \\ \dot{V}_2 \leq -k_{p2}e_2^2 - k_{s2}|e_2| + |e_2| \cdot \bar{\varepsilon}_2 \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Si les coefficients de réglage k_{p1} et k_{p2} sont imposés tels que :

$$\begin{cases} k_{p1} \geq \bar{\varepsilon}_1 \\ k_{p2} \geq \bar{\varepsilon}_2 \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Par conséquent, la relation (II.26) se réduit à :

$$\begin{cases} \dot{V}_1 \leq -k_{s1}|e_1| \\ \dot{V}_2 \leq -k_{s2}|e_2| \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

La condition (II.28) implique que les deux erreurs e_1 et e_2 se stabilisent et tendent asymptotiquement vers l'origine, ce qui valide notre objectif de réglage et assure la robustesse de la commande quel que soit le type de perturbations affectant le modèle dynamique.

Par ailleurs, les relations (II.14) des commandes virtuelles peuvent se mettre sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -V_d a_{40} & -V_q a_4 \\ -V_q a_{40} & V_d a_{40} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{pmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Par conséquent, les commandes réelles V_{dr} et V_{qr} sont déterminées à partir de u_1 et u_2 comme suit :

$$\begin{pmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{pmatrix} = \frac{-1}{a_4^2(V_d^2 + V_q^2)} \begin{pmatrix} V_d a_{40} & V_q a_{40} \\ V_q a_{40} & -V_d a_{40} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$

Ou encore

$$\begin{cases} V_{dr} = \frac{-V_d u_1 - V_q u_2}{a_4(V_d^2 + V_q^2)} \\ V_{qr} = \frac{V_d u_2 - V_q u_1}{a_4(V_d^2 + V_q^2)} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Remarque : Dans le cas où la composante V_q de la tension du réseau est nulle ($V_q=0$), les lois de commandes (II.30) se réduisent à

$$\begin{cases} V_{dr} = \frac{-u_1}{a_4 V_d} \\ V_{qr} = \frac{u_2}{a_4 V_d} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

En introduisant dans (II.31), l'expression (II.21) de u_1 et u_2 , celle-ci devient :

$$\begin{cases} V_{dr} = \frac{F_{10}(x) + X^t \hat{\theta}_1 + k_{p1} e_1 + k_{s1} \text{sign}(e_1) - \dot{P}_s^*}{a_4 V_s} \\ V_{qr} = \frac{-F_{20}(x) - X^t \hat{\theta}_2 - k_{p2} e_2 - k_{s1} \text{sign}(e_1) + \dot{Q}_s^*}{a_4 V_s} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

II.4 Asservissement du bus continu

Dans le cadre de notre application, le contrôle du convertisseur 'back to back' [BAT - 12] est utilisé à travers le CCM au réglage de la puissance active P_s et celle réactive Q_s au niveau du stator de plus il est également utilisé via le CCR au le réglage de la tension continue intermédiaire U_{dc} et de la puissance réactive Q_r au niveau de la connexion rotor-réseau [BEC-11].

II.4.1 Asservissement du CCR

Les objectifs principaux du contrôle du convertisseur coté réseau (CCR) sont:

- la stabilisation de la tension du bus continu à une valeur de référence constante U_{dc}^* ;
- le contrôle du facteur de puissance au point de connexion du rotor au réseau.

Le schéma de réglage du CCR est donné à la **Figure (II.1)**. De ce schéma, on relève que le régulateur 'Reg1' du type PI, destinée au réglage de la tension U_{dc} à sa valeur de référence $U_{dc}^* = 600V$, fournit la référence du courant d'axe (d) i_{dr}^* . Par contre, la référence du courant d'axe (q) i_{qr}^* est déterminée en fonction du facteur de puissance désirée au niveau de la connexion rotor-réseau. Le réglage des composantes (d, q) du courant rotor-réseau est effectué par les régulateurs Reg2 et Reg3 du type PI avec ajout des termes de compensation. Ceci permet d'obtenir les tensions de commandes v_d et v_q lesquelles sont transformée en tensions triphasées. Ces dernières servent de référence à la technique MLI utilisées pour la génération des impulsions de commande du CCR [BAG-03].

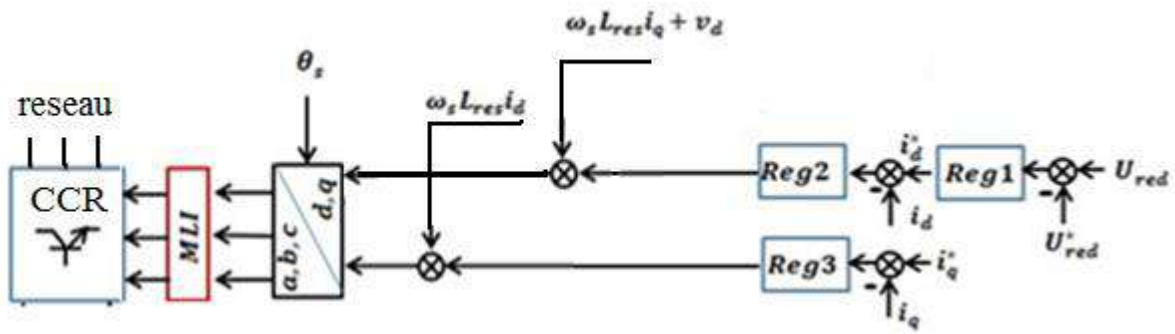


Fig. II.1 Schéma de régulation du CCR

II.4.2 Asservissement 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 bloc de commande est tel indiqué à la Figure (II.2)

A partir du vecteur d'état, du vecteur de sortie (P_s, Q_s) et des référence (P_s^*, Q_s^*), le régulateur non linéaire fournit les tensions de commande et V_{dr} et V_{qr} . La transformation de ces dernières tensions conduit aux tensions triphasées de référence qui vont servir au niveau du bloc MLI à la génération des signaux de commande du CCM.

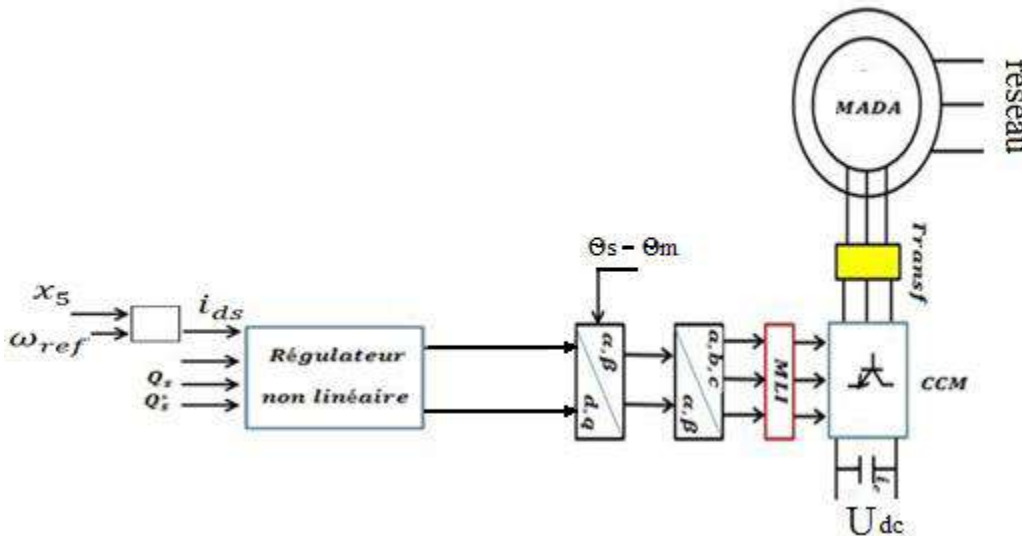


Fig. II.2 Schéma de régulation du CCM

II.5 Stratégie d'Optimisation de la puissance.

L'objectif principal est de maximiser la puissance délivrée par la chaîne éolienne. Pour la commande, cette puissance maximale est imposée comme référence de la puissance active au stator.

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

Dans ce travail, on suppose que la caractéristique de voilure est connue. Dans ce cas, il suffit tout simplement que la puissance de la MADA fournie au réseau suive la courbe de la puissance optimale pour faire fonctionner l'éolienne dans les conditions optimales.

$$P_{opt} = \frac{1}{2} \rho C_p^{opt} S V_v^3 \quad (II.33)$$

Pour les éoliennes dont la puissance nominale et les caractéristiques sont semblables à la nôtre, la caractéristique du $C_p(\lambda)$ est approximée par la relation suivante :

$$C_p = 7.9563 \left(\frac{\lambda}{10}\right)^5 - 17.375 \left(\frac{\lambda}{10}\right)^4 + 9.86 \left(\frac{\lambda}{10}\right)^3 - 9.4 \left(\frac{\lambda}{10}\right)^2 + 6.32 \cdot 10^{-2} \lambda + 0.001 \quad (II.34)$$

Le point optimal de cette voilure est caractérisé par :

$$\begin{cases} \lambda_{opt} = 6.41 \\ C_{p_{opt}} = 0.5483 \end{cases} \quad (II.35)$$

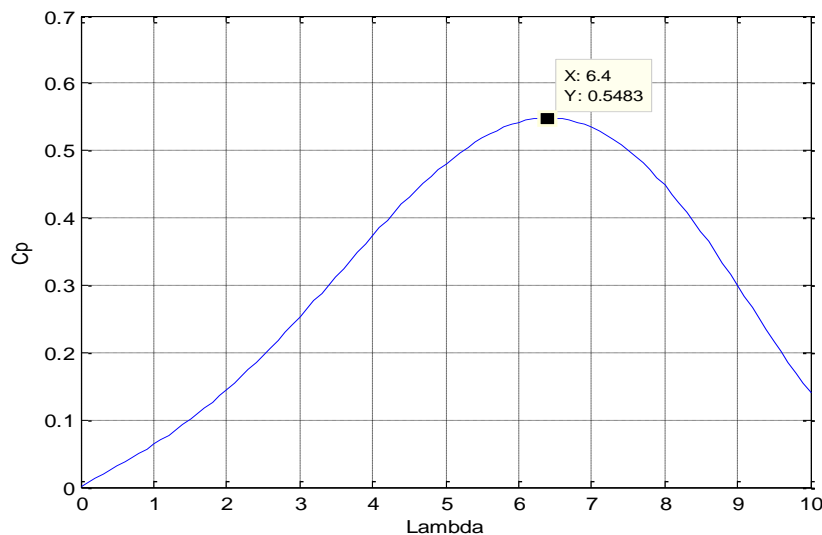


Fig. II.3 Caractéristique de la turbine éolienne

Cette méthode permet de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples. Mais elle présente des inconvénients de taille tel que la demande d'un capteur de la vitesse du vent et l'exigence du constructeur de la voilure des essais de caractérisation

(extérieur, soufflerie) ou des simulations du profil des pales, ce qui n'est pas une chose facile surtout pour les éolienne de forte puissance.

II.6 Simulation et interprétation des résultats

II.6.1 Cas idéal

Le vent doit être modélisé d'une façon aléatoire afin d'en approcher son profil réel. Pour ce faire, on sélectionne aléatoirement un certain nombre de points parmi les points relevé sur le site prévu pour l'emplacement de l'éolienne. Par la suite, un algorithme d'interpolation polynomiale nous permettra de générer à partir de ces points la caractéristique de la vitesse du vent (**Fig.II.3**).

Les points utilisés correspondent aux vitesses du vent mesurées en Algérie dans la région de **l'Atlas Tellien**, pendant des périodes aléatoires, afin d'avoir un modèle du vent viable pour tester les performances de notre commande.

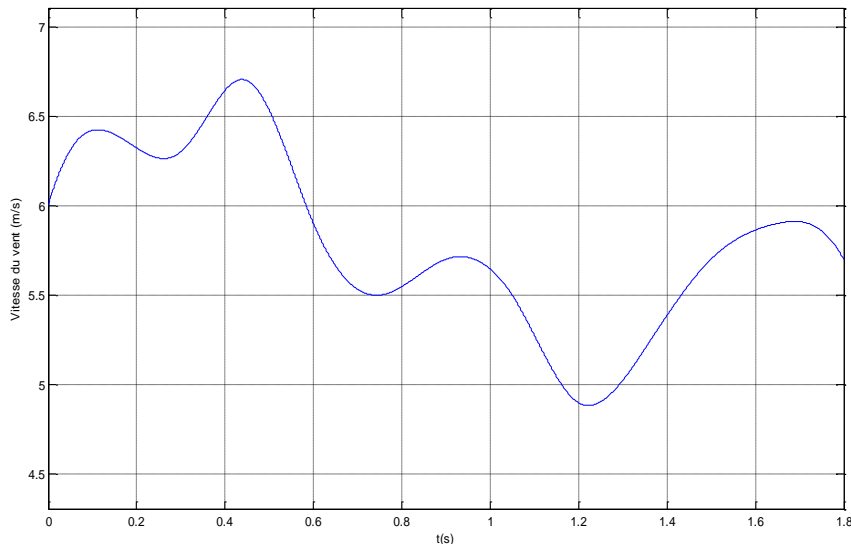


Fig. II.4 Modèle de la vitesse du vent.

Dans cette section, nous simulons le fonctionnement de la chaîne éolienne pour le test noté '**testA**' dans le cas d'une situation idéale. En effet pour ce test, nous considérons que la turbine est soumise à un vent dont le profil de vitesse est donné à la **Figure (II.4)** et que sa caractéristique est supposée connue. Par ailleurs, les tensions triphasées du réseau sont supposées sinusoïdales et équilibrées de plus les coefficients du modèle de la MADA sont supposés bien connus (i.e. la MADA n'est soumise à aucune variation des paramètres ni à aucune perturbation). Quant à la référence de la puissance réactive au stator, elle est maintenue à une valeur nulle afin d'assurer un facteur de puissance unitaire.

Pour ces données du test, nous appliquons la loi de commande (**II.31**), les résultats de la simulation ont été obtenus pour tous les tests effectués en paramétrant les régulateurs comme suit :

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 1.72; k_{i1} = 0.01; \delta_1 = 9; \mu = 10 \\ \lambda_2 &= 1.72; k_{i2} = 0.01; \delta_2 = 9; \mu = 10 \end{aligned} \quad (\text{II.36})$$

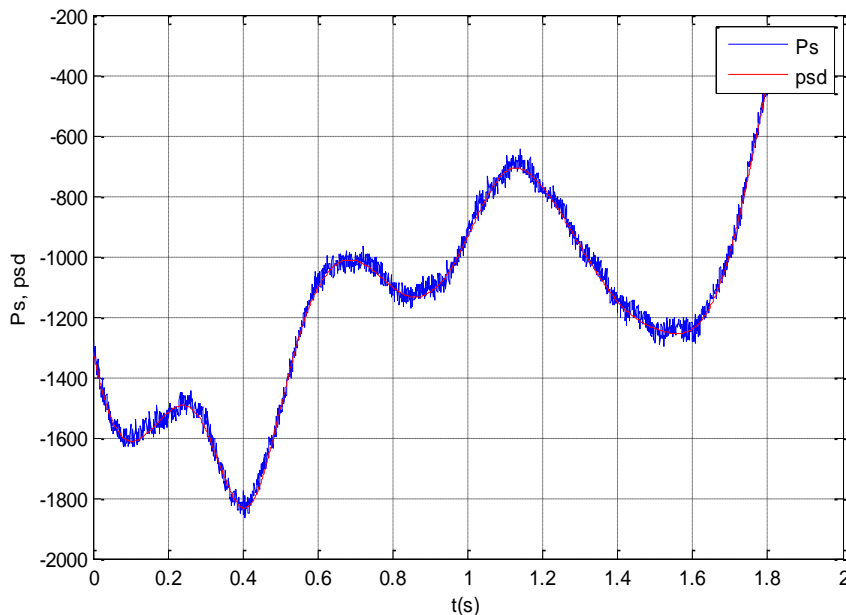
Les simulations, pour le testA, ont conduit aux résultats de la **Figure (II.5)**. L'analyse de ces courbes montrent que :

La puissance active au stator P_s suit la puissance désirée P_s^* (**Fig.II.5a**). Celle-ci évolue selon la dynamique du vent, l'erreur moyenne de poursuite P_s^* est de l'ordre 50w, elle est due au modèle proposé du vent. En effet, ce model comporte une composante rapide (modélisée par un terme aléatoire). Il est à noter que cette puissance est négative, car la MADA fonctionne en génératrice.

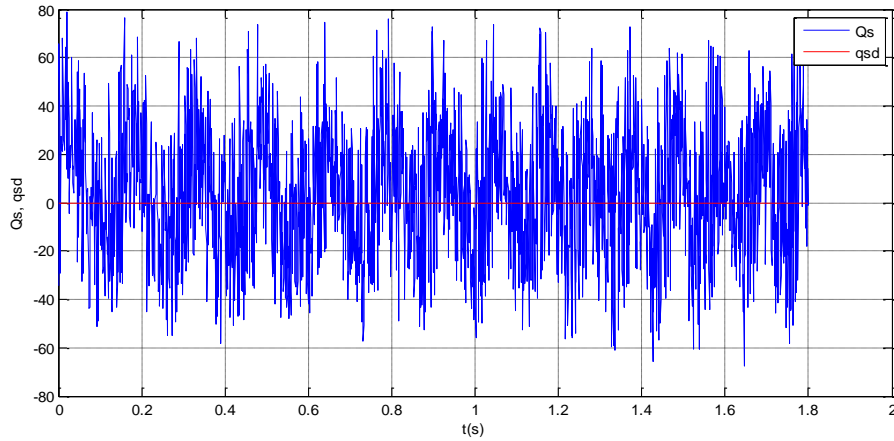
L'évolution de la puissance réactive Q_s du stator oscille rapidement autour de la valeur de référence zéro, l'erreur moyenne de poursuite de la puissance réactive est de l'ordre 50Var (**Fig. II.5b**).

Le courant au stator est en opposition de phase avec la tension du réseau (**Fig.II.5c**). Ceci prouve que le facteur de puissance au stator est bien unitaire et que c'est bien la MADA qui fournit de la puissance active au réseau.

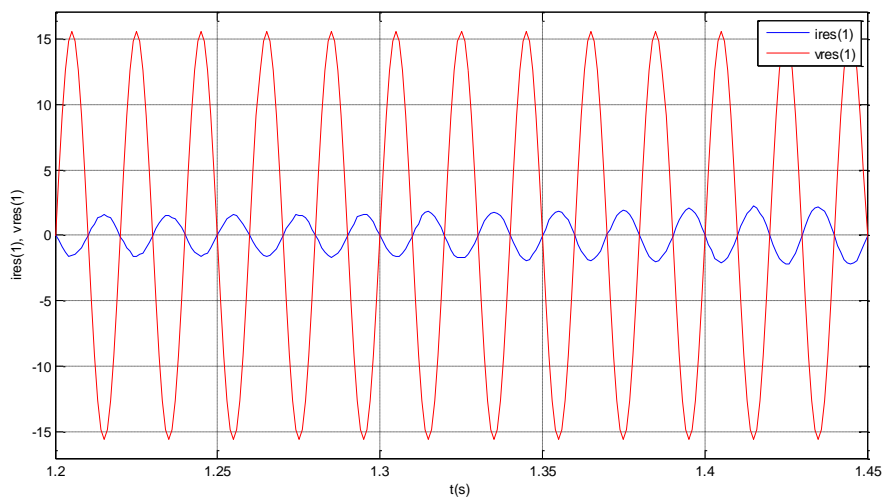
La puissance active au rotor (**Fig.II.5d**) évolue dans la zone admissible ($P_r < 0.33P_n$ où $P_n = 4 \text{ kw}$) donc, elle reste dans les limites tolérables d'exploitation. Cette puissance est positive donc pour ce test, la MADA fonctionne en hypo-synchrone.



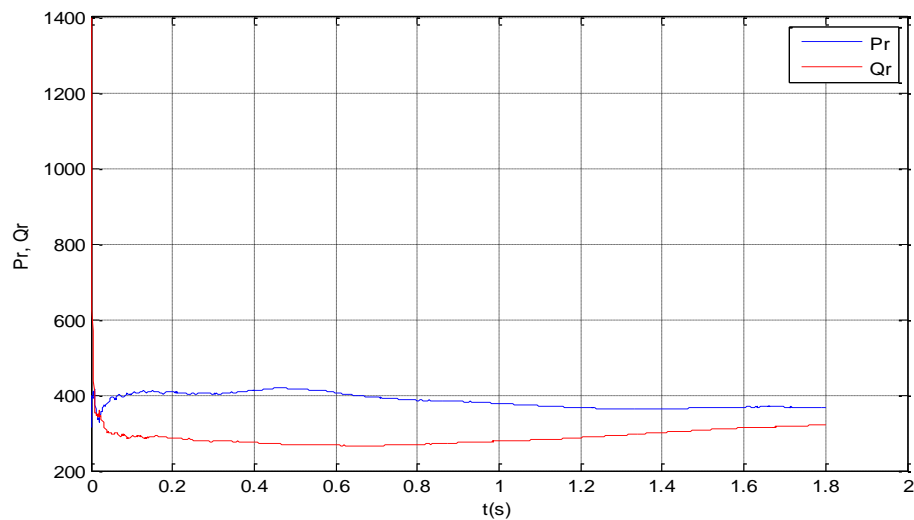
a) Puissance active statorique et sa référence.



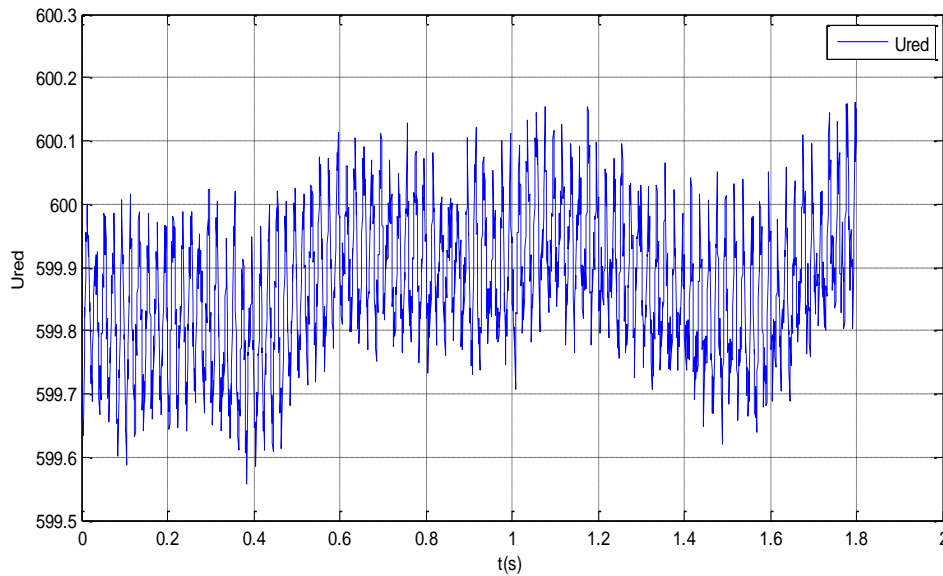
b) Puissance réactive statorique et sa référence.



c) La tension et le courant statorique.



d) Puissance active et réactive rotorique.



e) Tension de bus continu.

Fig. II.5 Test de l'éolienne dans le cas idéal

La tension du bus continu (**Fig. II.5e**) oscille autour de sa valeur de référence de 600V avec une ondulation de 1V (0.5% de la valeur de référence).

II.6.2 Test en présence des variations paramétriques

Dans cet essai de l'éolienne (**Test B**), nous considérons les mêmes conditions que dans le cas du test A sauf que pour cette fois-ci nous supposons qu'à partir de l'instant $t = 1.2s$ le modèle de la MADA est corrompu par des variations paramétriques. Ces variations sont caractérisées par une augmentation des résistances au stator et au rotor respectivement de 25% et 50% ainsi qu'une diminution des inductances au stator et au rotor respectivement de 15% et 30%.

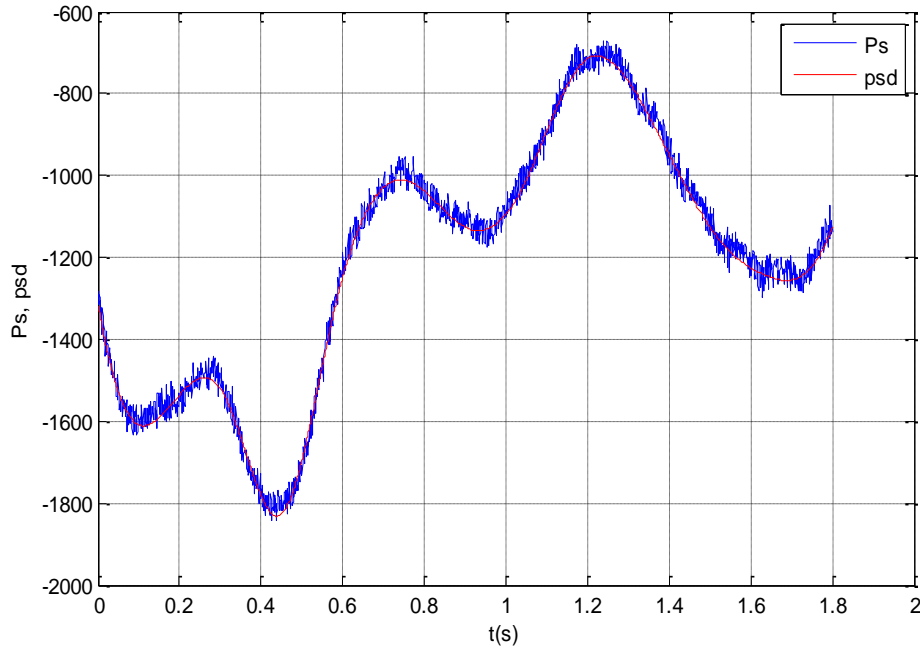
Pour ce **test B**, les résultats de la simulation sont donnés à la **Figure (II.6)**. De cette **Figure**, on remarque que l'évolution des grandeurs électriques est peu affectée par les variations paramétriques considérées.

En effet, des **Figure (II.6a)&(II.6b)**, on constate d'une part que pour $t < 1.2s$, la puissance active et réactive suivent leurs références parfaitement et avec une bonne précision et d'autre part pour $t > 1.2s$ ces puissances oscillent avec une très faible amplitude autour de leurs références. Ce résultat confirme la robustesse de la commande proposée aux variations paramétriques.

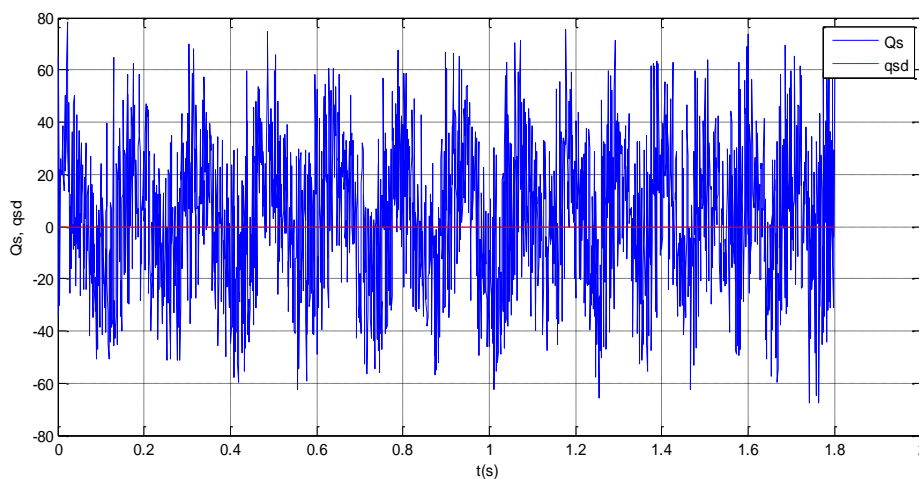
La **Figure (II.6c)** montre que la tension du bus continu subit de petites variations au-delà $t = 1.2s$ comparables à celles décrites à la **Figure (II.5e)**.

De la **Figure (II.6d)**, on remarque que l'évolution de la puissance active rotorique n'est pas affectée par les variations paramétriques considérées et qu'elle reste dans la zone admissible.

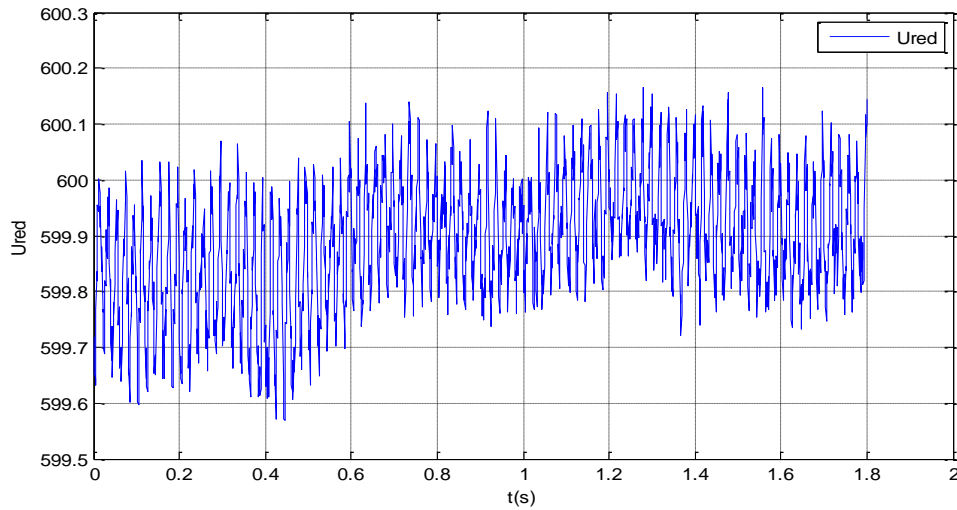
Remarque B : Ces résultats nous permettent de conclure que cette commandes est robuste aux variations paramétriques ceci revient au bon **choix de la méthode** et au bon dimensionnement du **régulateur**.



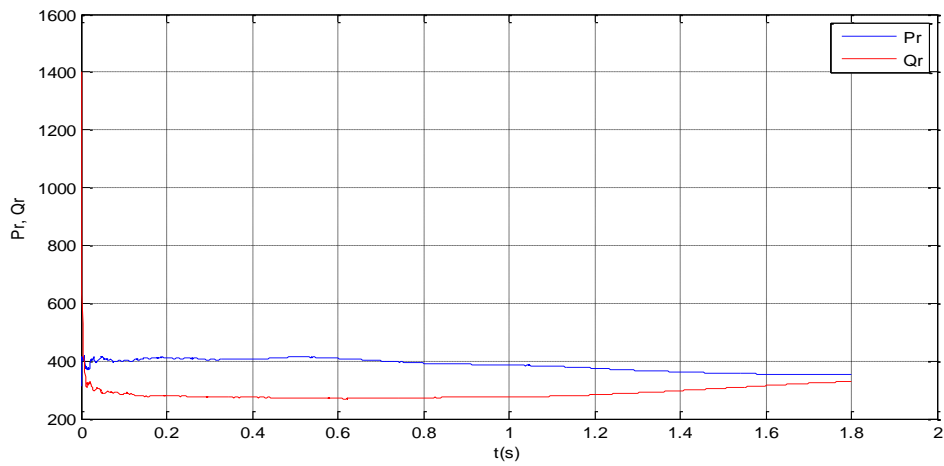
a) Puissance active au stator et sa référence



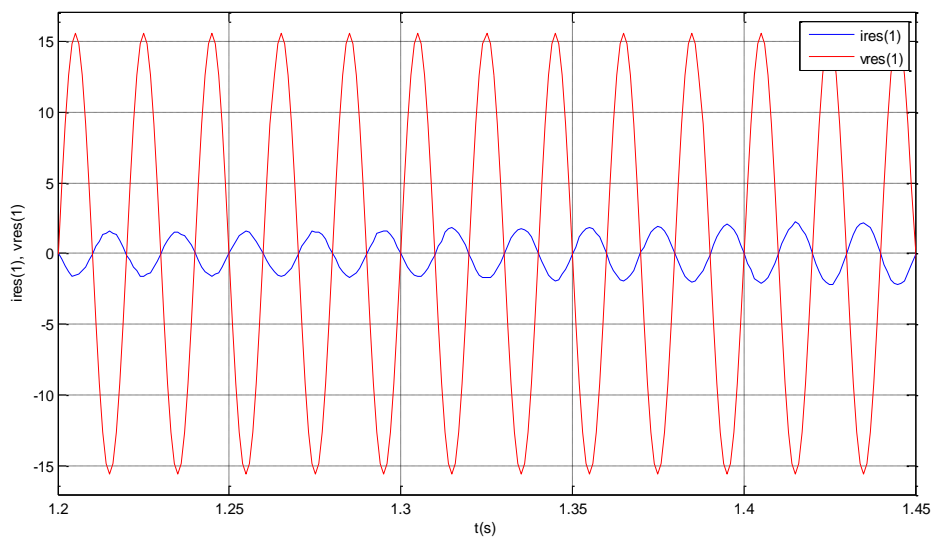
b) Puissance réactive au stator et sa référence



c) Tension du bus continu



d) Puissance réactive et réactive au rotor



e) Tension et courant au stator

Fig. II.6 Test de l'éolienne en présence des variations paramétriques.

Remarque A: la commande synthétisée a permis d'assurer une bonne robustesse tout en compensant la borne supérieure de la perturbation et ceci grâce à la commande synthétisée.

II.7 Conclusion.

Dans ce chapitre et après une modélisation de la chaîne éolienne, nous avons présenté dans un premier temps le principe de la commande par la 2^{ème} méthode de Lyapunov. Puis en exploitant cette méthode, nous avons développé une commande adaptative de la puissance active et celle réactive au stator de la MADA en partant de l'expression générale des puissances. La synthèse de cette commande a été élaborée sur la base du modèle non linéaire de la MADA déjà développé au chapitre précédent. Enfin, nous avons simulé le fonctionnement de la chaîne de conversion sous la conduite de cette commande pour un profil du vent relatif à la région de l'Atlas Tellien.

Lors de ces simulations, nous avons également testé le comportement de la commande proposée face aux variations paramétriques de la MADA.

Les résultats obtenus sont satisfaisants et l'objectif de la commande a été réalisé avec de bonnes performances et une bonne robustesse. Ceci revient à la structure adaptative de la **commande développée** et au **bon choix des coefficients du régulateur**.

Chapitre III

Performances de la Commande proposée dans le cas d'un Réseau Pollué par les Harmoniques

III.1 Introduction

La qualité de l'énergie électrique recouvre trois notions différentes : la continuité d'alimentation (fréquence et durée des coupures d'électricité), la qualité de l'onde de tension (phénomènes perturbant le fonctionnement des appareils connectés au réseau), et la qualité de service (relations avec les gestionnaires des réseaux).

- La **continuité d'alimentation** recouvre les coupures, ou interruptions, subies par les utilisateurs. Il existe un certain nombre de critères pour classer ces coupures, et il est notamment fait distinction entre coupures programmées et coupures non programmées, et entre coupures longues (supérieures à 3 minutes) et coupures brèves (entre 1 seconde et 3 minutes).
- La **qualité de l'onde de tension** recouvre les perturbations liées à la forme de l'onde de tension délivrée par le réseau, susceptibles d'altérer le fonctionnement des appareils électriques raccordés au réseau, voire de les endommager. Différents termes peuvent être utilisés en fonction des caractéristiques de la perturbation : creux de tension, surtensions impulsionnelles, tensions hautes ou basses, variations de fréquence, papillotement, taux d'harmoniques et d'inter-harmoniques, déséquilibre entre phases, etc.
- La **qualité de service** caractérise la relation entre un utilisateur et son gestionnaire de réseau, ainsi qu'éventuellement son fournisseur (délai de (re)mise en service, délai d'intervention d'urgence, délai de raccordement, notification de coupure programmée, tenue des horaires de rendez-vous, etc.)

Dans le présent chapitre, nous allons étudier le fonctionnement de la chaîne éolienne en présence des phénomènes perturbateurs dans le réseau,

Un inconvénient majeur, apparaissant lors du fonctionnement des systèmes de génération d'énergie éolienne connectés à un réseau de distribution, réside en leur sensibilité aux perturbations provenant du réseau.

Une généralité sera présentée dans le premier temps sur les principales perturbations en BT affectant la qualité d'énergie, de leurs origines et des conséquences sur les équipements électriques, nous passerons ensuite à la présentation de la **Norme EN 50160**, cette dernière définit les plages acceptables de variation de tension, au point de raccordement du client au réseau public de distribution en basse tension (BT).

Notre étude sera consacré essentiellement à la perturbation du réseau par les harmoniques (3^{ième}, 5^{ième} et le 7^{ième} harmonique).

Enfin des tests par simulations sont effectués pour évaluer les performances de la production de l'énergie de la chaîne éolienne face à une pollution du réseau par les harmoniques.

III.2 Principaux types de défauts affectant les réseaux électriques BT

Les réseaux BT sont pollués et soumis à de multiples agressions, de ce fait de multiples phénomènes déforment la tension du réseau, ces déformations affectent [RUN-81] :

- l'amplitude (variations - coupures - creux – surtensions) ;
- la fréquence (variations) ;
- la forme d'onde (harmoniques) ;
- la phase (déséquilibre).

III.2.1 Les Basses tensions industrielles

Les récepteurs et les appareils de contrôle-commande et de protection, sont sensibles à la qualité de la tension qui leur est fournie. La connaissance et la prise en compte des contraintes d'alimentation en énergie électrique s'avèrent donc bien nécessaires, plusieurs facteurs doivent être pris en compte :

- des normes, différentes d'un pays à un autre, par les constructeurs de matériels électrotechniques et électroniques destinés à un marché mondial ;
- des besoins des clients et des problèmes de conception des réseaux, par bureaux d'études et les installateurs;
- les installations basse tension sont soumises à la norme CEI 60364 (en France la NF C 15-100).

III.2.2 Tensions Nominales

Le domaine de la BT concerne les tensions :

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

Jusqu'en 2003 Dans le monde, on trouve encore diverses tensions nominales :

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

En fonction de la structure et de la charge du réseau (longueur des conducteurs et variation de la charge) ces tensions varient autour de la tension nominale. La norme européenne **EN 50160** indique qu'en exploitation normale, sur chaque période d'une semaine, 95 % des valeurs efficaces des tensions moyennées sur 10 minutes doivent se situer dans la plage $\pm 10\ %$. En France, EDF annonce une plage de variation de $\pm 10\ %$ mais admet que les tensions puissent s'écarter de plus de 20 % de la tension nominale.

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

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

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

III.3 Pollution du réseau par les harmoniques

III.3.1 limites normalisé (Norme EN 50160)

III.3.1.1 Niveau de compatibilité

La Norme EN 50160 définit les niveaux de comptabilité pour les réseau public basse tension et elle donne les principaux paramètres de tension, et leurs plages de variation acceptables, ces niveaux sont définit par rapport aux déformations des tensions réseau communes à plusieurs équipement, notons que le nombre de source d'harmonique va en augmenter et que la proportion de charges purement résistives (chauffage électrique) qui ont un effet d'amortissement, décroît par rapport à la consommation total :

Les niveaux de compatibilité pour les harmoniques individuel dans les réseaux électrique en basse tension sont donné dans le **tableau III.1**

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

Tableau III.1 : Valeurs des tensions harmoniques individuelles aux points de fourniture, jusqu'au rang 25, exprimées en pourcentage de U_n

III.3.2 Harmoniques

L'objectif du distributeur d'énergie électrique est de fournir à ses clients une énergie électrique propre et de bonne qualité. Par ailleurs, l'onde de tension idéale utilisée dans les réseaux électriques est une onde sinusoïdale d'amplitude et de fréquence constante. En pratique, le transport de l'électricité et l'usage qui en est fait par les utilisateurs provoque la

déformation de la sinusoïde. Cette déformation ou distorsion de l'onde est appelé perturbation harmonique.

La distorsion harmonique [VQE-99] est due, pour une large part, au développement de nouveaux usages (alimentation des équipements électroniques) qui se répandent tant dans l'industrie que dans les ménages.

La nécessité des études harmoniques s'est fait ressentir, au fut et à mesure de l'identification des effets des harmoniques sur les éléments du réseau et sur la qualité du service. On pourrait citer comme effets [QAE-90] : l'échauffement supplémentaires des machines, le claquage des condensateurs, l'apparition des résonances dans les différents harmoniques et des bruits téléphoniques....etc.

III.3.3 Décomposition d'un signal périodique

Il est connu qu'un signal périodique, quelle que soit sa forme d'onde, peut se décomposer en une somme de signaux sinusoïdaux ayant différentes amplitudes et phases et dont la fréquence est un multiple entier du fondamental de fréquence f .

Ceci nous amène tout naturellement à parler des harmoniques, que leurs effets dépendent du rang de l'harmonique provoqué.

Les harmoniques les plus dangereuses [ATT-08], faisant l'objet de notre étude dans ce chapitre, sont la 3^{ème}, 5^{ème} et la 7^{ème} harmonique **Figure. II.1**. Ces harmoniques sont respectivement de fréquence $3f$, $5f$ et $7f$ où f est celle du fondamental et dont l'amplitude, fixée par les normes, ne doit pas dépasser la valeur de $5\%U_n$ où U_n est l'amplitude du fondamental.

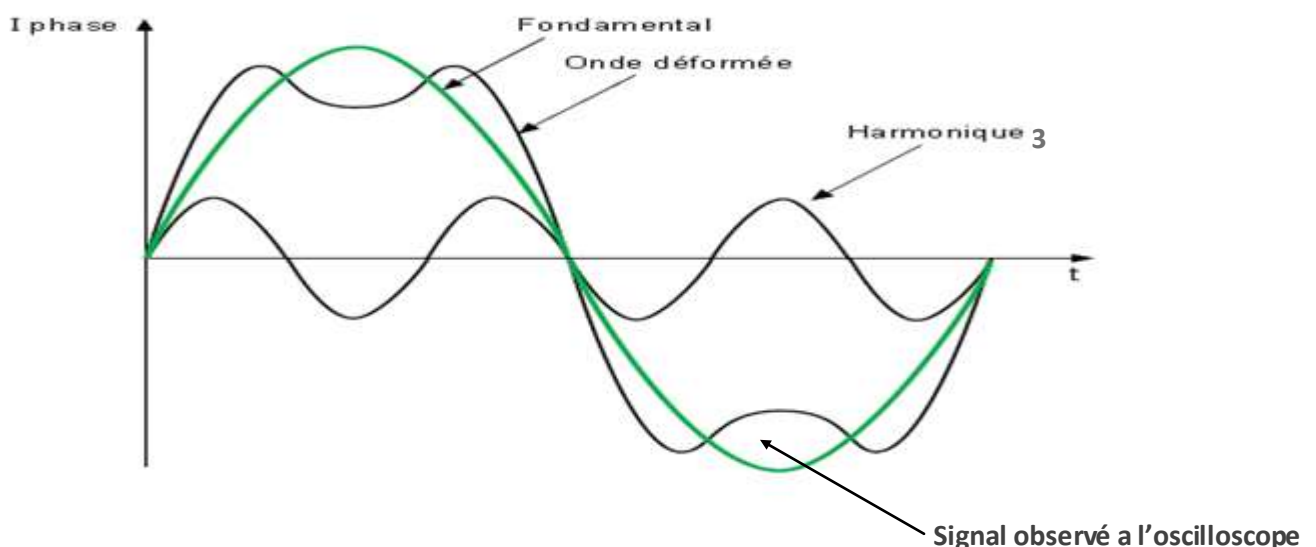


Fig. III.1 Onde déformée par le 3^{ème} harmonique

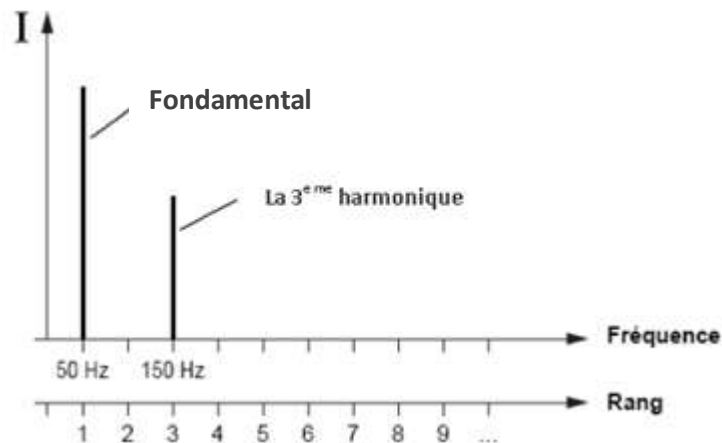


Fig. III.2 Spectre du signal de la Figure III.1

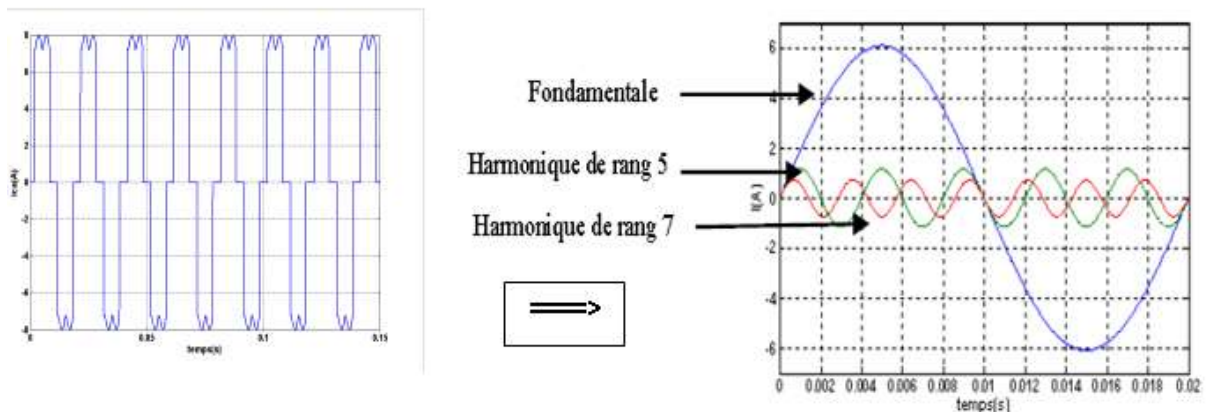


Fig. III.3 Décomposition d'un signal déformé en série d'ordres 5 et 7.

La **Figure (III.1)** donne un exemple de signal déformé par la 3^{ème} harmonique et son spectre apparaît à la **Figure (III.2)**. Le cas d'une pollution par la 5^{ème} et la 7^{ème} harmonique est représenté à **Figure (III.3)**.

III.3.4 Source de la pollution harmoniques

Les harmoniques sont les tensions ou les courants sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du réseau (50 HZ dans notre cas). Les perturbations harmoniques sont généralement créées par des appareils munis de dispositifs à caractéristiques courant/tension non linéaires. Ces appareils peuvent être considérés comme des sources de courants harmoniques.

Les harmoniques de tension et de courant sont toujours présentes dans un réseau de distribution. Elles sont essentiellement provoquées par la présence de charges non-linéaires et de **convertisseurs de puissance [CHA-12]**. Ainsi, par suite du raccordement de charges

capacitives (par exemple les condensateurs de correction de facteur de puissance), l'effet capacitif des câbles, l'utilisation des équipements d'électronique de puissance (redresseurs, onduleurs, variateurs de vitesse, convertisseurs de fréquence).

III.3.5 Conséquences de la pollution harmonique du réseau

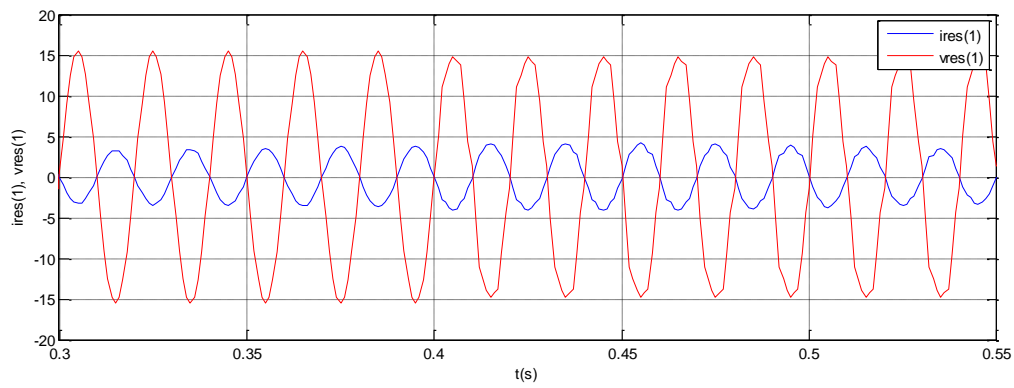
Ces harmoniques provoquent une surchauffe de l'équipement, un fonctionnement defectueux du système de protection [CHA-12], et des interférences dans les circuits de communication.

- **Effets électrodynamiques** [CHA-12]: la présence d'harmoniques entraîne des vibrations et des bruits dans les appareils électromagnétiques. Des couples mécaniques parasites dus aux champs tournants harmoniques produisent des vibrations dans les machines tournantes
- **Télécommunication** : le couplage des courants à haute fréquence des lignes des réseaux électriques avec les lignes de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits importants et nuire à la qualité du signal.
- **Machines électriques** : Ces harmoniques produisent un échauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs [CHA-12]. En effet, l'échauffement est causé par les pertes dans le stator des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, circuit magnétiques) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques.

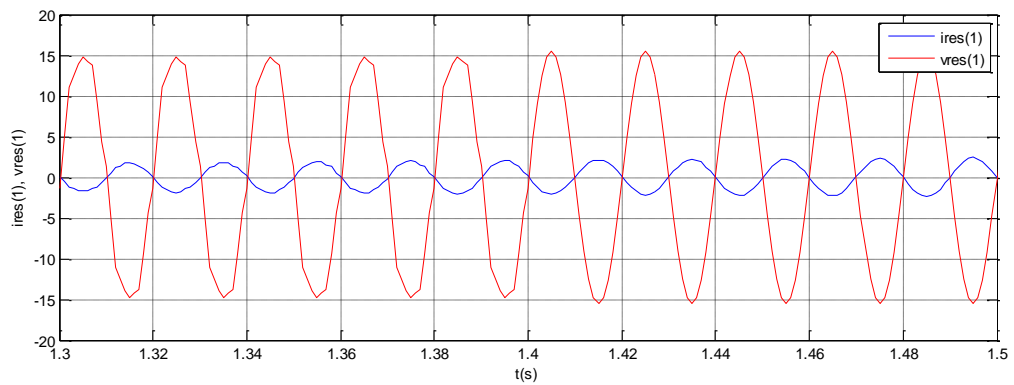
III.4 Simulation et interprétation

Dans ce 'testC', nous simulons le fonctionnement de l'éolienne pour les mêmes conditions que celles du testA, à l'exception que la tension du réseau électrique est polluée par la présence de la 3^{ème}, la 5^{ème} et la 7^{ème} harmonique. Ces harmoniques, chacune d'amplitude égale $0.05U_n$ (U_n tension nominale) viennent affectées (sont ajoutées) la tension sinusoïdale du réseau électrique dans l'intervalle de temps $[0.4s \ 1.4s]$. =.

Les résultats de cette simulation sont présentés à la **Figure(III.4)**.

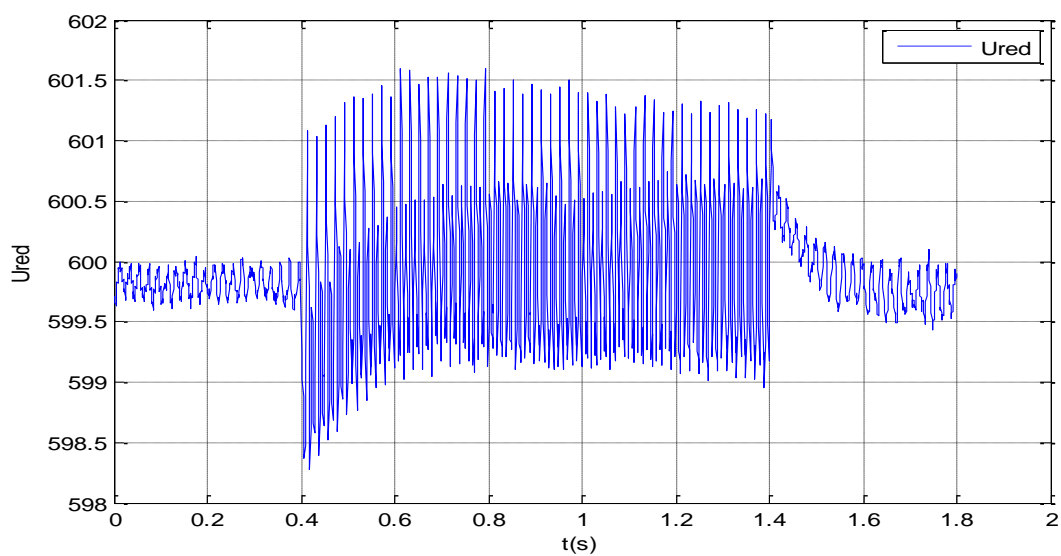


a.1) $0.3 < t < 0.55$

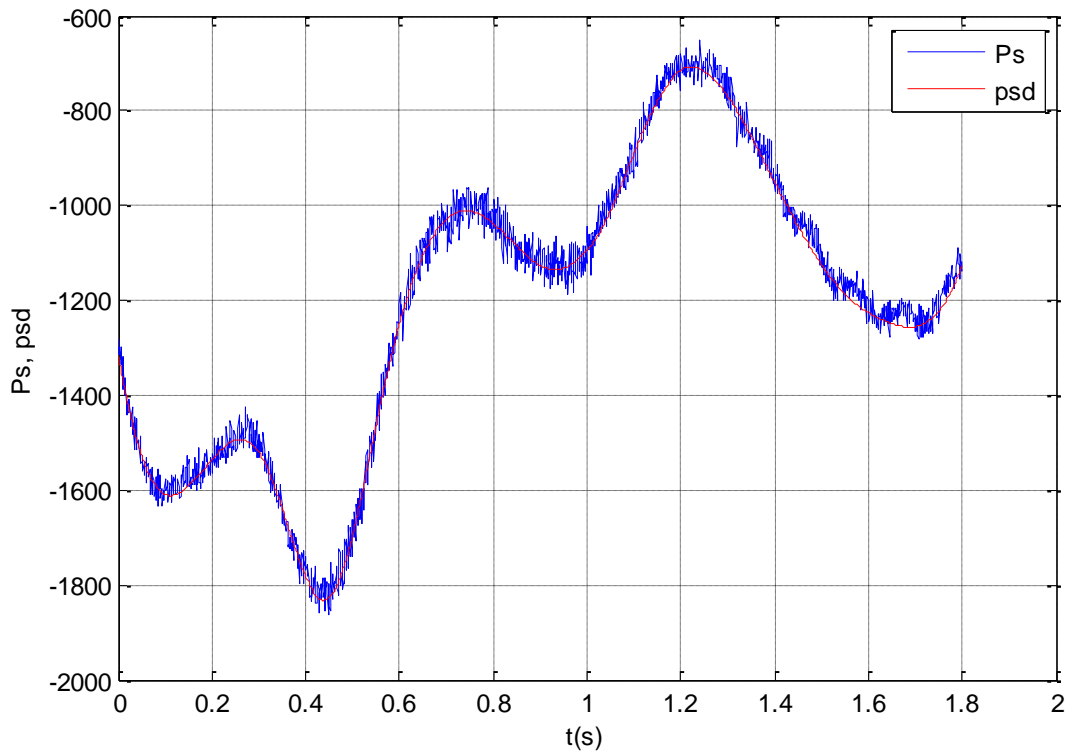


a.2) $1.3 < t < 1.5$

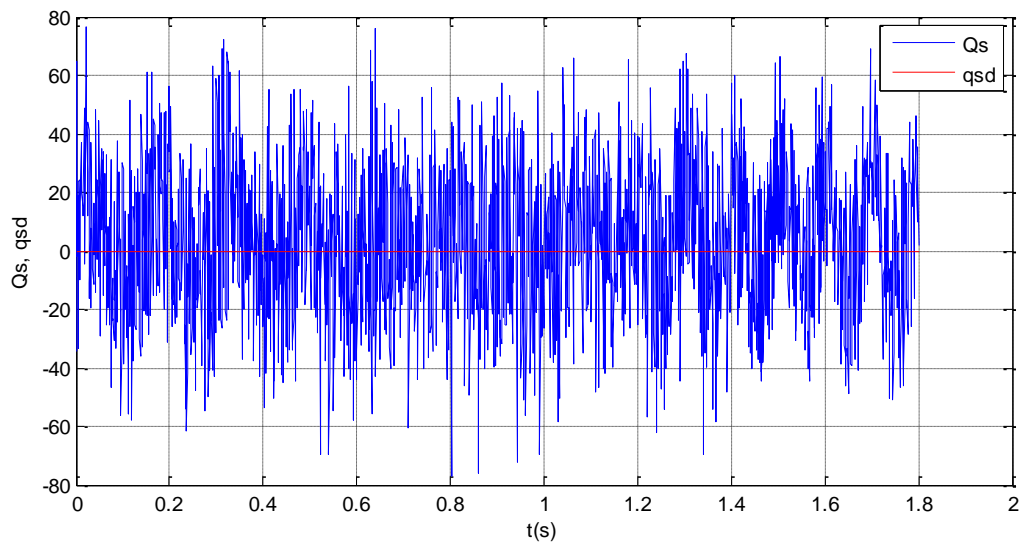
a) déphasage courant statorique tension de réseau (zooome).



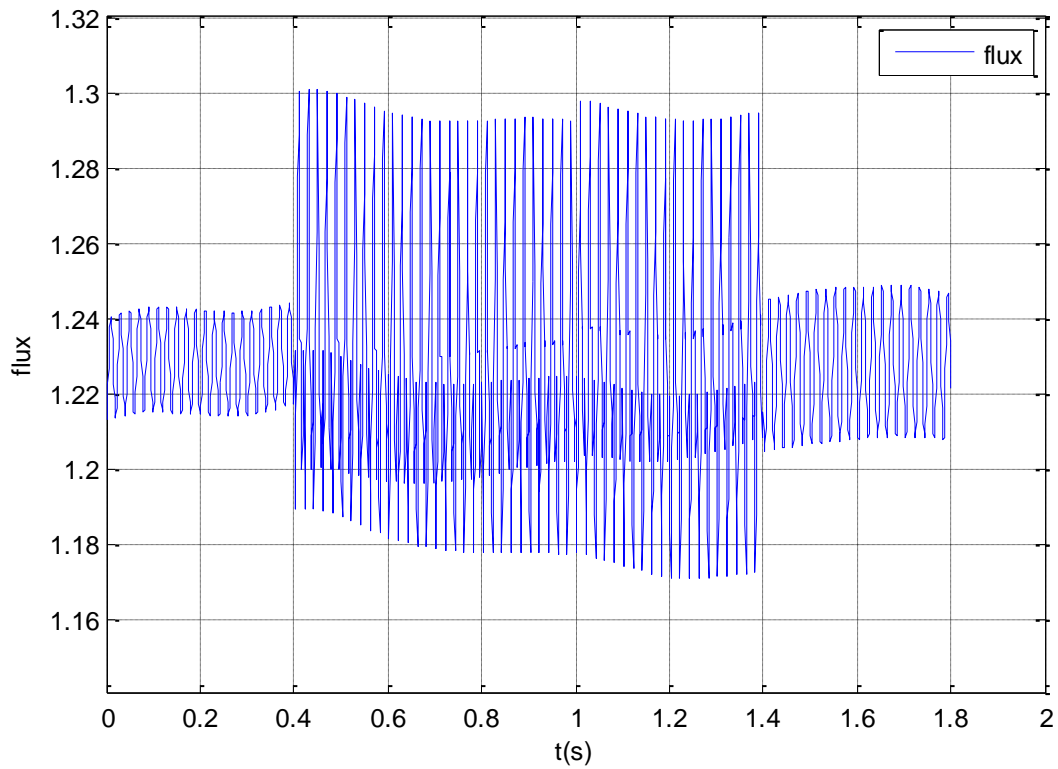
b) La tension de bus continu.



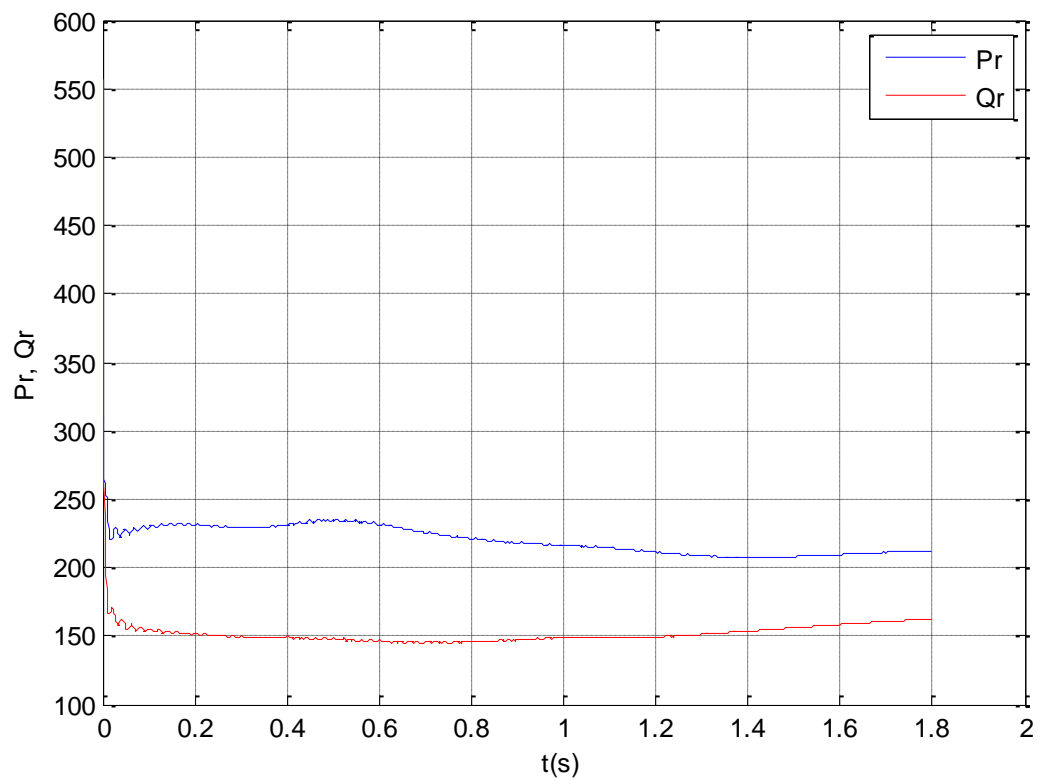
c) La puissance statorique et sa référence.



d) La puissance réactive statorique et sa référence.



e) Le flux.



f) La puissance active et réactive rotorique.

Fig. III .4 Test de l'éolienne dans le cas de présence de la 3^{eme}, 5^{eme} et la 7^{eme} harmonique en niveau de réseau.

Dans ces conditions, les résultats obtenus sont représentés à la **Figure(III.4)**. L'analyse de ces résultats révèle que :

On constate que La puissance active et celle réactive au niveau du rotor (**Figure(III.4f)**) restent compatibles avec le fonctionnement admissible de la machine défini par moins de 30% de la puissance nominale (4 kw), donc elle reste dans les limites tolérables d'exploitation. de plus ce fonctionnement est en hypo- synchrone.

Le flux (**Figure(III.4e)**) ondule faiblement dans l'intervalle $t < 0.4s$ avec une variation de ($\Delta\psi_s=5\%$) puis ses fluctuations s'accroissent à partir de $t = 0.4s$ pour atteindre une valeur maximale de ($\Delta\psi_s =10\%$) à $t=1.35s$ par la suite, une fois la perturbation disparue, ces mêmes fluctuations s'atténuent ($\Delta\psi_s=8\%$) sans pour autant revenir à la valeur d'avant la perturbation.

En présence du la 3^{eme} et la 5^{eme} ainsi la 7^{eme} harmoniques, la tension de bus continu (**Figure(III.4b)**) est également **peu** affecté, elle subit a des variations et des oscillations de l'ordre $\pm 2v$ ($\Delta U_{dc} = \pm 0.17\%$) autour de sa valeur moyenne 600v,

De la **Figure(III.4a)** montre que ces ordres d'harmonique ajoutés n'affecte pas le déphasage entre la tension et le courant du réseau. Ce qui confirme que Le facteur de puissance reste pratiquement unitaire tout le long de l'essai. On constate une légère **détérioration** de la forme sinusoïdale des courants et de la tension, qui reste minimale et ceci de $t = 0.4s$ jusqu'à $t = 1.4s$

La puissance active et réactive du stator échangée avec le réseau (**Fig.III.4c&III.4d**) sont peu affectées par l'effet de ces harmoniques. Chaque une de ces puissances présente des faibles ondulations autour de sa référence de $t = 0.4s$ jusqu'à $t = 1.4s$, ces ondulations sont de l'ordre de **100 w pour P_s , et de l'ordre de 80 VAR pour Q_s .**

Ces résultats montrent que la commande adaptative a permis de maintenir la puissance active à sa valeur maximale malgré en présence d'un réseau pollué par les harmoniques.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, et après une théorie sur les perturbations en BT de réseaux électrique, nous avons présenté la norme **EN 50160**, qui définissent les plages de variation tolérables pour chaque type d'aléas affectant le réseau électrique. Par la suite, nous nous sommes particulièrement intéressés aux perturbations dues aux harmoniques (la 3^{ème}, 5^{ème}, 7^{ème} harmoniques). Ces phénomènes ont été définies tout en expliquant ces causes ainsi ces conséquences sur les dispositifs branchés au réseau.

Nous consacrons par la suite à étudier le comportement de la chaîne en présence de perturbation du réseau.

Et pour achever ce chapitre, nous avons simulé le fonctionnement de la chaîne éolienne lorsque le réseau subit ce type de perturbation dans le but d'évaluer la performance de la commande proposée.

En fin des tests de simulations que vient s'insérer dans le but d'évaluer le but de ce chapitre. Ainsi de juger notre objectif principal qui porte sur la robustesse et les performances de la commande traitée face à harmonique traitée.

Conclusions générale

L'objectif, préalablement défini dans ce travail, consistait en la commande adaptative basée sur la 2^{ème} méthode de Lyapunov de la puissance d'une chaîne de conversion éolienne et en la préservation de ces performances de production d'énergie même présence des perturbations affectant le réseau électrique. A la lumière de l'étude effectuée, nous avons vu les étapes successives permettant d'élaborer une stratégie de commande pour une génératrice éolienne jusqu'à sa mise en œuvre, et ceci en tenant compte un des perturbations du réseau électrique.

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

Le deuxième chapitre est consacré à la commande de la partie électrique de la chaîne de conversion. Tout d'abord, nous avons présenté un bref rappel sur la 2^{ème} méthode de Lyapunov. Puis, en se basant sur cette méthode, nous avons établi la loi de commande adaptative, dans le but de contrôler l'écoulement de la puissance active et réactive au stator de la MADA qui est connectée au réseau. Les simulations du fonctionnement de la chaîne éolienne ont été effectuées avec un profil du vent tiré des mesures relevées dans la région de l'Atlas Tellien. Nous avons testé le comportement du système sous la conduite de la commande proposée, en connaissance de la caractéristique de voilure et dans le cas où le modèle de la MADA est sain ou affecté par des variations paramétriques. Les résultats obtenus de la simulation ont permis à la MADA de produire la puissance optimale (la référence) avec une bonne précision même en présence des perturbations internes. Il faut noter que ces performances ont été établies en maintenant les grandeurs physiques du système dans les plages admissibles.

Pour finir notre mémoire, dans le troisième chapitre, nous nous sommes intéressés aux perturbations qui affectent le réseau électrique et leurs influences sur le comportement de notre système de conversion. De ce fait, nous avons présenté, en premier lieu, les normes utilisées en basse tension et les perturbations électriques survenant occasionnellement. Il y a lieu de préciser que ces perturbations sont définies selon des normes internationales, notre choix s'est orienté vers la norme européenne **EN 50160**. En second lieu, nous avons testé notre système de conversion d'énergie en présence des harmoniques (3^{ème}, 5^{ème} et 7^{ème}). Les résultats de simulation nous ont permis de conclure que la commande adaptative basée sur 2^{ème} de Lyapunov a permis d'atteindre les objectifs recherchés avec des performances

satisfaisantes. De ce fait, la commande proposée reste robuste en présence des perturbations affectant la tension du réseau électrique.

Comme perspective en continuité de ce travail, étudier le comportement de l'écoulement de puissance en présence d'autres types de perturbations qui polluent le réseau électrique ainsi développer les commandes qui garde le même niveau de robustesse.

Annexe

➤ Annexe A : Modèle de Park de la MADA

➤ Annexe B : Paramètres de la chaîne éolienne

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

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

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

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

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

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

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

Avec :

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

Transformation de Park-Clark :

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

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

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = P(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

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 :

$$[i_r]_{abc} = P(\theta_r)^{-1}[i_r]_{dqo}, [\Psi_r]_{abc} = P(\theta_r)^{-1}[\Psi_r]_{dqo},$$

$$[v_r]_{abc} = P(\theta_s)^{-1}[v_r]_{dqo} \quad (\text{A.26})$$

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 :

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

On simplifie le terme suivant:

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

Sachant que :

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

On obtient finalement :

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

Donc :

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

Equations magnétique :

➤ **Pour le Stator**

De l'équation (A.3) on a :

$$[\Psi_s]_{abc} = [L_s] [i_s]_{abc} + [M_{sr}] [i_r]_{abc} \tag{A.35}$$

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

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

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 :

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

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

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

Après calcul on trouve :

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

On pose :

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

Et on trouve :

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

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

On obtient finalement :

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

On aura donc :

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

Enfin, le résultat final sera comme suit :

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

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

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 : $R_s=1.2$ (Ω)
- L'inductance statorique: $L_{res}=0.1554$ (H)
- La résistance rotorique: $R_r=1.8$ (Ω)
- 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.m²)
- 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 : $R_{res} = 0.25$ (Ω)
- 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 : $mtr=1$
- **Les gains des régulateurs PI:**

- Régulateur 01 $\left\{ \begin{array}{l} K_p = 1.125 \\ K_I = 0.835 \end{array} \right.$

- Régulateur 02 $\left\{ \begin{array}{l} K_p = 20 \\ K_I = 7.5 \end{array} \right.$

- Régulateur 03 $\left\{ \begin{array}{l} K_p = 20 \\ K_I = 5 \end{array} \right.$

Bibliographie

-A-

[ATT-08] : **ATT 00254** «Qualité de la tension et Qualité de l'électricité»,
Université de Liège, Novembre 2008.

[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 »,
Thèse de l'ingénieur, l'école nationale polytechnique d'Alger, 2012.

[BEH-12] : **Brahim BENAMIRA – Asma BEHLOULI** « commande Non-linéaire d'une
éolienne basée sur une MADA »
Thèse 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 »,
Thèse d'ingénieur de l'école nationale polytechnique d'Alger, 2011.

[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.

[BAG-03]: L.BAGHLI, «Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone», IUFM de Lorraine, 2003.

-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.

[CHA-12] : M^{elle} CHALAH Samira « Analyse stochastique de la résultante de l'injection de courant harmonique dans un réseau électrique»

Thèse de magister de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 17/05/2012.

-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

-J-

[DOH -02] : DOHAN Drisein & Thierry Van Craenenbroeck « perturbations de tension introduction au déséquilibre »,
khatholieque université leuven, Mai 2002,

-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

-L-

[LEC] :P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi « Eolienne »
Technique de l'ingénieur traité de Génie mécanique, pp.BM 4 640 21.

[LEC-99] :L.Leclercq « Apport du stockage inertiel associée `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-

[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.

-P-

[PIN-04] :M. Pinard « Commande Électronique des Moteurs Électriques »,

DUNOD, Série EEA , 2004.

-Q-

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

-R-

[ROU] : 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 UNIPEDA (Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Electricité) 1981.

-V-

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