

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

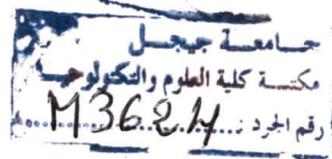
Université Mohamed Seddik Benyahia de Jijel



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Automatique

Mémoire



de Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme de Master en

Automatique et informatique industrielle



Thème

Commande non linéaire d'un aérogénérateur à base de génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

Présenté par :

Benayad Khadidja & Boudergui Nada

Soutenu le 22/06/2017 devant le jury composé de :

Professeur Abdesselem Boulkroune	Président
Docteur Youcef Fafa	Examineur
Docteur Naamane Bounar	Encadrant
Monsieur Hichem Khebbache	Co-encadrant

Promotion 2017

Remerciements

Avant toute chose nos remerciements vont en premier lieu à Allah le tout puissant qui a éclairé notre chemin durant toutes ces années d'étude.

Nous voudrions présenter nos remerciements à notre encadreur Monsieur « Naamane Bounar ». Nous voudrions également lui témoigner notre gratitude pour sa patience et son soutien qui nous a été précieux afin de mener notre travail à bon port.

Nous tenons à remercier également Monsieur « Richeim Khebbache » pour ses précieux conseils et ses orientations.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, nous tenons pareillement à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Zhadidja et Nada

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mon frère Abderraouf.

A mes sœurs Selma, Zineb et Radja.

A mes nièces et neveux : Achwak, Lydia, Abderrahmane, Hachem et Fahia.

A mes amies et plus précisément à mon binôme Nada.

A Junayd.

Khadija

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes frères Fares, Mohammed Seddik, Adem et Loukmen.

A mes sœurs Loukha et Manar.

A ma tante Atidal et mon oncle Ammar.

A mes amies et plus précisément à mon binôme Khadija.

Nada

Tables des matières

Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les aérogénérateurs

I.1. Introduction.....	5
I.2. Aérogénérateur.....	5
I.2.1. Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	5
I.2.2. Différents types d'éoliennes.....	6
I.2.2.1. Selon l'axe de rotation.....	6
I.2.2.2. Selon la puissance nominale.....	8
I.2.2.2. Selon la vitesse de rotation.....	8
I.3. Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal.....	10
I.3.1. Le mât.....	10
I.3.2. La nacelle.....	10
I.3.2. Le rotor.....	11
I.4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	11
I.4.1. Avantages de l'éolienne.....	11
I.4.2. Inconvénients de l'éolienne.....	11
I.5. Machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne.....	11
I.5.1. Machine synchrone (MS).....	11
I.5.2. Machine asynchrone simple (MAS).....	12
I.5.3. Machine asynchrone à double alimentation (MADA).....	12
I.6. Conclusion.....	13

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

II.1. Introduction.....	14
II.2. Modélisation de la chaîne éolienne.....	14
II.2.1. Modèle du vent.....	14
II.2.2. Loi de Betz.....	15
II.2.3. Modèle de la turbine.....	16
II.2.3.1. Modèle des pâles.....	16
II.2.3.2. Modèle du multiplicateur.....	17
II.2.3.3. Equation mécanique de l'arbre.....	17
II.3. Modélisation de la MADA.....	18
II.3.1. Présentation de la MADA.....	18
II.3.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.....	19
II.3.3. Modélisation de la machine à double alimentation (MADA).....	19
II.3.3.1. Hypothèses simplificatrices.....	19
II.3.3.2. Modèle effectif de la MADA.....	19
II.4. Simulation en boucle ouverte.....	24
II.4.1. Mode simple alimentation.....	24
II.4.2. Mode double alimentation (MADA).....	25
II.5. Bref état de l'art sur la commande des aérogénérateurs.....	25
II.6. Conclusion.....	26

Chapitre III : Commande linéaire de l'aérogénérateur « Commande vectorielle à base de régulateurs PI »

III.1. Introduction.....	27
III.2. Stratégie de commande de la chaîne éolienne globale.....	27

III.3. Principe de la commande vectorielle.....	28
III.4. Architecture du dispositif de commande.....	29
III.5. <i>Maximum Power Point Tracking (MPPT)</i>	29
III.5.1. Choix du référentiel dq.....	31
III.5.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	31
III.6. Résultats de simulation.....	35
III.6.1. Test sous les conditions nominales.....	35
III.6.2. Test de robustesse.....	37
III.7. Conclusion.....	39

Chapitre IV : Commande non linéaire de l'aérogénérateur à base de la MADA

IV.1. Introduction.....	40
IV.2. Stratégie de commande de l'aérogénérateur	40
IV.3. Principe de la commande par mode glissant.....	40
IV.3.1. Synthèse de la loi de commande.....	41
IV.3.1.1. Choix de la surface de glissement.....	41
IV.3.1.2. Condition de convergence.....	42
IV.3.1.3. Calcul de la commande.....	42
IV.3.2. Application de la commande par mode glissant à la MADA.....	43
IV.3.2.1. Résultats de simulation.....	45
IV.3.2.1.1. Test sous les conditions nominales.....	45
IV.3.2.1.2. Test de robustesse.....	46
IV.4. Le broutement (chattering).....	48
IV.5. Commande par mode glissant dynamique	48
IV.5.1. Synthèse de la loi de commande.....	48

IV.5.1.1. Surface de glissement.....	48
IV.5.1.2. Loi de commande.....	49
IV.5.2. Application de la commande par mode glissant dynamique à la MADA.....	52
IV.5.2.1. Résultats de simulation.....	55
IV.6. Principe de la commande par backstepping.....	57
IV.6.1. Synthèse de la loi de commande par backstepping.....	57
IV.6.2. Application de la commande par backstepping à la MADA.....	59
IV.6.2.1 Résultats de simulation.....	62
IV.7. Commande par surface dynamique (DSC).....	66
IV.7.1. Commande par DSC avec des filtres non linéaires par mode glissant.....	66
IV.7.2. Application de la commande par surface dynamique à la MADA.....	69
IV.7.2.1 Résultats de simulation.....	71
IV.8. Étude comparative.....	75
IV.9. Conclusion.....	75
Conclusion générale.....	77
Annexe	
Références bibliographiques	

Liste des figures

Liste des figures

Introduction générale

Figure 1 : Carte préliminaire des vents en Algérie.....	3
---	---

Chapitre I

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	5
Figure I.2 : Éolienne à axe vertical. (a) type Darrieus. (b) type Savonius.....	6
Figure I.3 : Éolienne à axe horizontal.....	7
Figure I.4 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	8
Figure I.5 : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.....	9
Figure I.6 : Composants d'une éolienne à axe horizontal.....	10
Figure I.7 : Constitution de la nacelle.....	10
Figure I.8 : Éolienne basée sur la machine synchrone.....	12
Figure I.9 : Éolienne à base de la machine asynchrone.....	12
Figure I.10 : Éolienne utilisant la MADA.....	13

Chapitre II

Figure II.1 : Profil de la vitesse du vent.....	15
Figure II.2 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.....	15
Figure II.3 : Evolution du coefficient de puissance C_p avec la variation de la vitesse spécifique λ	17
Figure II.4 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	18
Figure II.5 : Représentation spatiale des enroulements de la MADA.....	20
Figure II.6 : Différents repères utilisés.....	21
Figure II.7 : Réponses de la machine en mode simple alimentation à vide.....	24
Figure II.8 : Réponses de la MADA avec alimentation du rotor 220 V et 50 Hz et $C_r=50$ N.m.....	25

Chapitre III

Figure III.1 : Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.....	28
Figure III.2 : Principe de commande d'une éolienne à vitesse variable.....	30
Figure III.3 : Schéma de régulation de vitesse.....	30
Figure III.4 : Orientation du repère (dq).....	31
Figure III.5 : Schéma de régulation des courants.....	34
Figure III.6 : Principe de la commande du système éolien.....	34
Figure III.7 : Equation du vent utilisé dans la simulation.....	35
Figure III.8 : Résultats de simulation de la commande vectorielle sous conditions nominales	36
Figure III.9 : Résultats de simulation de la commande vectorielle –test de robustesse.....	38

Chapitre IV

Figure IV.1 : Différents modes de convergence pour la trajectoire d'état.....	41
Figure IV.2 : Résultats de simulation de la commande par mode glissant-test sous conditions nominales.....	46
Figure IV.3 : Résultats de simulation de la commande par mode glissant-test de robustesse..	47
Figure IV.4 : Résultats de simulation de la commande par mode glissant dynamique.....	56
Figure IV.5 : Résultats de simulation de la commande par backstepping.....	63
Figure IV.6 : Résultats de simulation de la commande par backstepping-avec la fonction \tanh	65
Figure IV.7 : Résultats de simulation de la commande par surface dynamique.....	72
Figure IV.8 : Résultats de simulation de la DSC-avec la fonction \tanh	74

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes selon la puissance.....	8
Tableau I.2. : Comparaison entre la vitesse fixe et la vitesse variable.....	9

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Étude comparative entre les lois de commandes présentées.....	75
--	----

Liste des notations et symboles

NOTATIONS ET SYMBOLES

Principaux indices et exposants

- $(\cdot)_{as}, (\cdot)_{bs}, (\cdot)_{cs}$: Composantes (a, b, c) dans un repère triphasé lié au stator.
- $(\cdot)_{ar}, (\cdot)_{br}, (\cdot)_{cr}$: Composantes (a, b, c) dans un repère triphasé lié au rotor.
- $(\cdot)_{\alpha}, (\cdot)_{\beta}$: Composantes (α, β) dans un repère diphasé.
- $(\cdot)_d, (\cdot)_q$: Composantes (d, q) dans un repère diphasé tournant.
- $(\cdot)_s, (\cdot)_r$: Composantes statorique et rotorique.
- $(\cdot)_{ref}$: Grandeur de référence.
- $(\cdot)^T$: Matrice transposée.
- $(\cdot)_n$: Grandeur nominale.
- $(\cdot)_d$: Valeur désirée.
- $(\cdot)_c$: Grandeur de control.

Principaux symboles

- $R_s, (R_r)$: Résistance par phase d'un enroulement au stator (respectivement rotor).
- $l_s, (l_r)$: Inductance propre d'un enroulement stator (respectivement rotor).
- $L_s, (L_r)$: Inductance cyclique du stator (respectivement rotor).
- $M_s, (M_r)$: Inductance mutuelle entre deux phases statoriques (respectivement rotoriques).
- M_{sr} : Inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique.
- σ : Coefficient de dispersion magnétique.
- p : Nombre de paire de pôles.
- f_r : Coefficient de frottement visqueux.
- J : Inertie du moteur chargé.
- $\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$: Des constantes.

ρ	: Densité de l'air.
C_g	: Effet du couple de la turbine sur l'arbre de la génératrice.
R	: Rayon des pales.
G	: Gain du multiplicateur.
C_p	: Coefficient de puissance.
λ	: Vitesse spécifique.
K_p	: Le coefficient de proportionnalité.
K_i	: La constante de temps d'intégration.
η, k, τ	: Constantes strictement positives.
$\Delta(x)$: Matrice modélisant les incertitudes.
V	: Fonction de Lyapunov.
φ	: Déphasage entre le courant et la tension.
Λ	: Fonction strictement positive.



Principales grandeurs

C_{em}	: Couple électromagnétique.
C_r	: Couple résistant.
C_{aer}	: Couple aérodynamique.
C_g	: Couple de la turbine.
\emptyset	: Flux magnétique.
θ	: Angle entre un enroulement rotorique et son homologue statorique.
$\theta_s, (\theta_r)$: Angle entre la phase a du stator (respectivement rotor) et l'axe d .
ω	: Vitesse angulaire électrique.

$\omega_s, (\omega_r)$: Pulsation des grandeurs statoriques (respectivement rotoriques).
Ω	: Vitesse de rotation mécanique du rotor.
Ω_s	: Vitesse de rotation du champ statorique.
Ω_r	: Vitesse de rotation du champ rotorique.
P_s	: Puissance active statorique.
Q_s	: Puissance réactive statorique.

Abréviation

<i>AC</i>	Alternative Current (courant alternatif).
<i>DC</i>	Direct Current (courant continu).
<i>DSC</i>	Dynamic Surface Control.
<i>GADA</i>	Générateur Asynchrone Double Alimentation.
<i>MADA</i>	Machine Asynchrone Double Alimentation.
<i>MAS</i>	Machine Asynchrone Simple.
<i>MPPT</i>	Maximum Power Point Tracking.
<i>MS</i>	Machine Synchrone.
<i>PI</i>	Proportional Integral.
<i>SKTM</i>	Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida.



Introduction générale

Introduction générale

L'énergie est la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, de la lumière ou de la chaleur. L'homme a appris à exploiter les énergies contenues dans la nature pour produire de l'électricité. On distingue deux grands types d'énergie : renouvelable et non renouvelable.

Une énergie non renouvelable est une source d'énergie qui ne se renouvelle pas assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les principales sources d'énergies non renouvelables sont dérivées des hydrocarbures, tels que le pétrole, le gaz naturel, le charbon...

Les énergies non renouvelables sont classées en deux grandes familles [1] :

- Energie fossile : c'est l'énergie stockée dans le sous-sol sous forme d'hydrocarbures. Ceux-ci sont issus de la sédimentation de matière organique et sont enfouis dans le sol depuis 100 à 300 millions d'années en moyenne.
- Energie nucléaire : aussi appelée énergie atomique est produite à partir de la fission d'atomes. Dans les centrales nucléaires, on pratique la fission d'atomes d'uranium. Ceci entraîne un dégagement de chaleur permettant de chauffer de l'eau et de générer de la vapeur, celle-ci fera tourner des turbines pour produire de l'électricité.

Les énergies non renouvelables ont l'avantage d'avoir des simples procédés de production d'une grande quantité d'énergie à faible coût. Au cours de la production, l'extraction et la transformation des énergies fossiles n'entraînent pas non seulement l'émission de grandes quantités de gaz à effet de serre, mais aussi de substances polluantes formant des pluies acides et des dépôts toxiques. De plus, les rejets radioactifs produits par le nucléaire sont très nocifs pour la santé des humains (malformations, maladies, décès...) et l'environnement (contamination).

Une énergie renouvelable est une énergie primaire inépuisable à très long terme, issue directement de phénomènes naturels, réguliers ou constants (vent, soleil, marées).

Les énergies renouvelables sont classées en 5 classes [1] :

- L'énergie hydraulique : La force de l'eau des chutes retenue par des barrages ou celle qui alimente les aménagements "au fil de l'eau" fait tourner les turbines des centrales pour produire de l'électricité.
- L'énergie éolienne : La force du vent fait tourner des éoliennes qui produisent de l'électricité
- L'énergie solaire : Les rayons du soleil chauffent l'eau grâce à des capteurs solaires ou fournissent de l'électricité grâce à des cellules photovoltaïques ou des centrales solaires.
- L'énergie de la géothermie : La chaleur du sous-sol chauffe directement l'eau ou fait tourner les turbines des centrales pour produire de l'électricité.
- L'énergie de la biomasse : La combustion de la matière organique (plantes, arbres, déchets animaux, agricoles ou urbains) produit de la chaleur ou de l'électricité.

De manière générale, les énergies renouvelables sont plus propres que les énergies fossiles et nucléaires actuellement exploitées dans le monde entier, elles sont plus écologiques et de ressources gratuites et disponibles partout. Comme la plupart des choses, les énergies renouvelables ont également leurs petits défauts. On notera en priorité un coût relativement important à l'achat des installations, de plus, une dépendance aux conditions météorologiques et un impact sur la faune et la flore.

Face à une demande croissante d'énergie et à l'épuisement à plus ou moins long terme des énergies fossiles, différentes solutions de substitution ont été envisagées. Suite aux crises pétrolières, certains pays ont mené une politique orientée vers le nucléaire alors que d'autres ont massivement utilisé les énergies renouvelables. Dans notre étude nous nous intéressons à l'énergie éolienne car elle maintient actuellement une croissance de 45 % par ans [2].

Sur l'échelle nationale, la carte du vent de l'Algérie est estimée à 10 m du sol [3]. Les vitesses moyennes annuelles varient de 2 à 6,5 m/s. La région centrale a des vitesses entre 3 et 4 m/s. La vitesse augmente en descendant vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu dans la région d'Adrar pour une valeur moyenne de 6,5 m/s. Cependant, il existe plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme à Tiaret, Tindouf et Oran. La figure montre ce potentiel en Algérie. Le bilan de réalisation présenté par SKTM fait apparaître que la puissance totale installée en éolien est de 10MW (ferme éolienne de Kaberten-Adrar 2014)

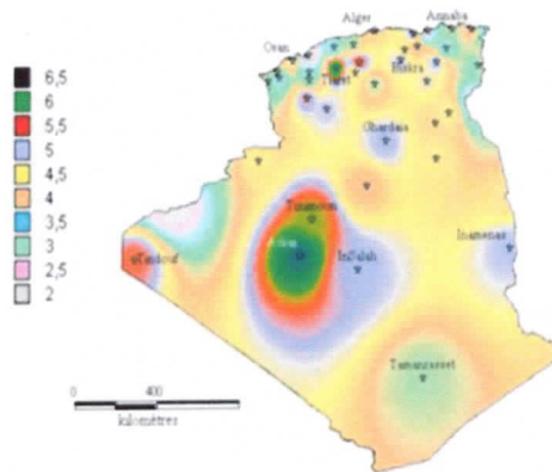


Figure 1 : Carte préliminaire des vents en Algérie [3]

L'objectif principal de notre travail est d'étudier les techniques de commande susceptibles d'optimiser la production d'électricité du système éolien (aérogénérateur) à base de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Ces techniques de commande doivent donc tenir compte du comportement du système dans son ensemble (éolienne et génératrice).

Dans le premier chapitre, nous allons présenter les différents types d'éoliennes ainsi que le principe de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique, par la suite nous allons présenter l'intérêt de l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans les systèmes éoliens par rapport aux autres machines.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter le modèle mathématique du système éolien à base de la MADA. Dans le but d'étudier le comportement de la MADA nous avons intérêt à faire une simulation en boucle ouverte. A la fin du chapitre, nous allons présenter un état de l'art sur la commande des aérogénérateurs.

Le troisième chapitre présentera une loi de commande linéaire de l'aérogénérateur dont le but de maximiser la production, cette commande appelée commande vectorielle est à base des régulateurs PI.

Le quatrième chapitre abordera le problème de robustesse de la stratégie de commande adoptée dans le chapitre précédent. Le principe consiste à remplacer les régulateurs PI utilisés dans la commande vectorielle par des régulateurs plus élaborés, et bien adaptés aux conditions de fonctionnement extrême de l'aérogénérateur et plus particulièrement de la MADA dont le modèle peut être entaché d'incertitudes. Ainsi, quatre types de commande non linéaires

seront présentés, à savoir, la commande par modes glissants, la commande par modes glissants dynamique, la commande par backstepping avec un terme robuste et la commande par surface dynamique. Enfin, Une étude comparative entre ces méthodes de commande sera réalisée.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus, et les perspectives vers lesquelles nous pouvons orienter cette étude.



Chapitre I :

Généralités sur les aérogénérateurs

Chapitre I

Généralités sur les aérogénérateurs

I.1. Introduction

Une source d'énergie est dite renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future, c'est le cas de l'énergie du soleil, du vent...etc. Pour des raisons écologiques, l'homme a exploité l'énergie éolienne pour la production de l'électricité à base du vent. C'est une énergie propre qui ne produit ni pollution atmosphérique (gaz à effet de serre) ni déchets contrairement aux ressources énergétiques fossiles et nucléaire.

I.2. Aérogénérateur

Un aérogénérateur (appelé éolienne) est une machine utilisant la force motrice (énergie cinétique) du vent, cette énergie est ensuite transformée en énergie mécanique, pour produire de l'énergie électrique. L'éolienne commence à produire vers 15 Km/h puis monte progressivement en régime pour fonctionner à pleine puissance entre 50 et 90 Km/h, vitesse à laquelle les machines sont arrêtées et mises en sécurité. La figure ci-dessous montre la conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique.

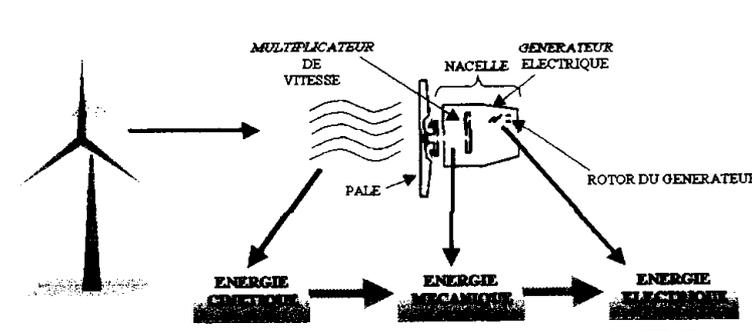


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.2.1. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [4] :

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

I.2.2. Différents types d'éoliennes

I.2.2.1. Selon l'axe de rotation

Selon l'axe de rotation on distingue deux grandes familles d'éoliennes

a. Eolienne à axe vertical

Type d'éolienne dont les pales sont montées autour d'un axe vertical perpendiculaire à la direction du vent. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation :

- Le rotor de Savonius
- Le rotor de Darrieus



Figure I.2 : Éolienne à axe vertical. (a) type Darrieus. (b) type Savonius

- Avantage de la structure à axe vertical

- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.
- Facilité d'accès, son générateur peut ne pas être installé en haut de l'éolienne, au centre des rotors, mais en bas de celle-ci ainsi plus accessible et peut être vérifié et entretenue plus facilement.
- Emet moins de bruit.
- Occupe moins de place.

- Inconvénient de la structure à axe vertical

- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Ceci ne constitue cependant qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne.
- Pour faire tenir l'éolienne, on utilise souvent des haubans ce qui est peu pratique dans des zones agricoles exploitées.

- Elles offrent un rendement médiocre et c'est pour cela qu'elles n'ont pas connu un grand développement.

b. Eolienne à axe horizontal

Le principe de l'éolienne à axe horizontal ou « éolienne à hélice » est simple et rappelle celui du moulin à vent. Les pales sont fixées au sommet d'un mât et sont orientées en face ou dos du vent, ce qui permet des rendements élevés.



Figure I.3 : Éolienne à axe horizontal

Il existe deux familles d'éoliennes à axe horizontal : les éoliennes à marche lente et les éoliennes à marche rapide.

- Eolienne à marche lente

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), Leur rendement est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée. [5]

- Eolienne à marche rapide

Les éoliennes à marche rapide sont généralement bipales ou tripales. La roue bipale est la plus économique et la plus simple, mais elle génère des vibrations qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risques de vibrations, d'où fatigue et bruit plus faible, mais elle est plus compliquée et plus lourde. [6]

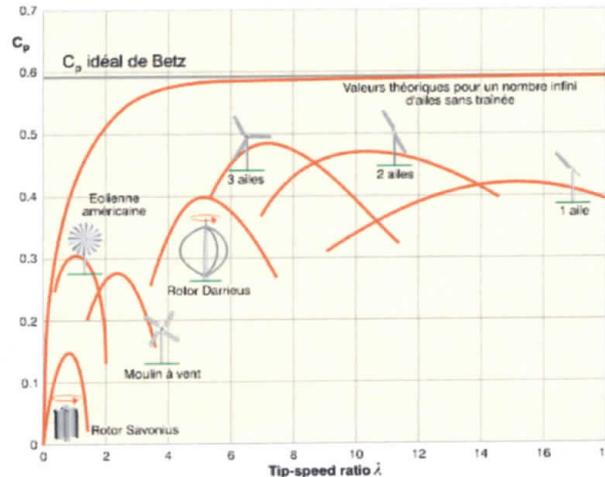


Figure I.4 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

-Avantage de la structure à axe horizontal

- Rendement supérieur à l'autre type d'aérogénérateur.
- Elles sont équipées d'un système qui permet de les orienter en fonction du vent.
- Elles sont plus solides.

-Inconvénient de la structure à axe horizontal

- Elles sont moins simples que les éoliennes à axe vertical.
- Elles font beaucoup de bruit.
- Elles sont moins résistantes aux vents forts que l'éolienne verticale, l'éolienne horizontale doit être renforcée dans les régions où le risque de vents violents existe.

1.2.2.1. Selon la puissance nominale

A titre de comparaison, le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice. [6]

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 KW à 1MW
Grande	46 m et plus	1MW et plus

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes selon la puissance

1.2.2.1. Selon la vitesse de rotation

- Eolienne à vitesse fixe

Le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine asynchrone (Seules les génératrices asynchrones à cage d'écureuil sont utilisées dans ce cas). Sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant

de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système a l'avantage d'être simple et à faible coût.

- Eolienne à vitesse variable

Une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle du réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique[5].

Intérêt de la vitesse variable

Le tableau (I.2) illustre un simple comparatif entre les deux fonctionnements

Fonctionnement à vitesse fixe	Fonctionnement à vitesse variable
<ul style="list-style-type: none"> - Système électrique plus simple. - Plus grande habilité. - Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne. - Pas besoin de système électronique de commande. -faible coût 	<ul style="list-style-type: none"> -Augmentation du rendement énergétique. - Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance. - Réduction des efforts subis par le train de puissance. -Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Tableau I.2. : Comparaison entre la vitesse fixe et la vitesse variable

La courbe typique donnant la puissance aérodynamique d'un aérogénérateur fonctionnant à vitesse variable, en fonction de la vitesse du vent est illustrée sur la figure (I.5)

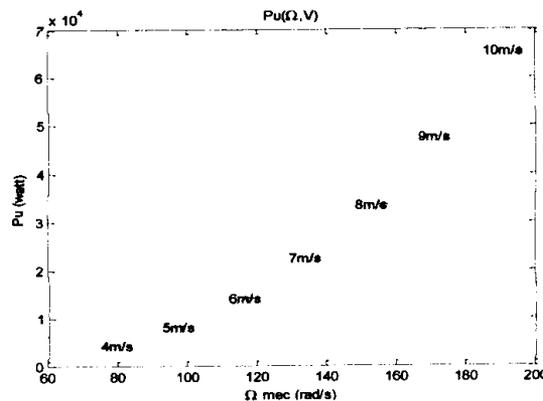


Figure I.5 : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne

I.3. Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

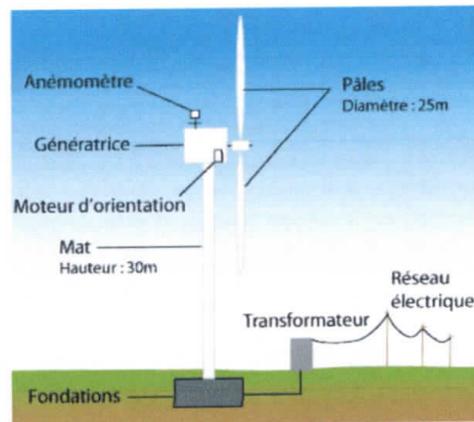


Figure I.6 : Composants d'une éolienne à axe horizontal

I.3.1. Le mât

C'est un tube d'acier, fixé sur une fondation implantée dans le sol, il est en général deux fois plus haut que la longueur des pales (de l'ordre de 100m pour des pales de 50m). Il supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor).

I.3.2. La nacelle

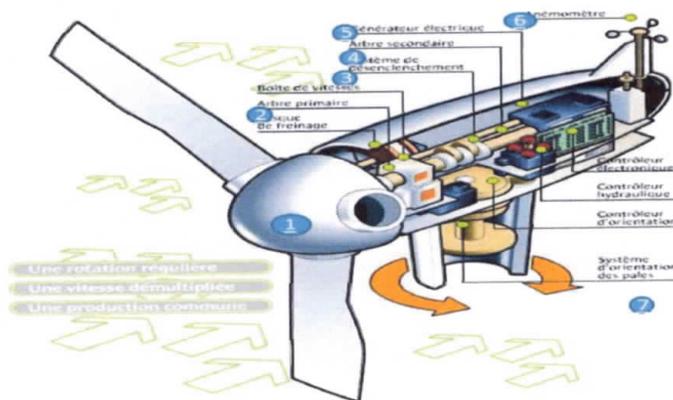


Figure I.7 : Constitution de la nacelle

Les différents composants d'une nacelle :

- **Le multiplicateur** : sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur.
- **La génératrice** : sert à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique, elle peut être une machine synchrone ou asynchrone.
- **Le système de commande** : Il permet de gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/sec), de commander le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de la nacelle face au vent.

- **Le moyeu** : c'est une pièce d'acier moulé. Le moyeu supporte les pâles du rotor et se monte sur l'arbre lent d'entrée du multiplicateur. Il est souvent protégé par une coupe en polyester.
- **L'arbre principal** : relie le moyeu au multiplicateur, qui tourne lentement (de 30 à 40 tours/min). Il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur.
- **L'arbre secondaire** : relie le multiplicateur à la génératrice électrique, sa vitesse de rotation est élevée (de 1000 à 2000 tours/min). Il est équipé d'un frein à disque mécanique (dispositif de sécurité) permettant de limiter la vitesse de rotation en cas de vent violent.
- **Le système d'orientation de la nacelle** : utilise des moteurs électriques pour faire pivoter la nacelle par le biais d'une couronne d'orientation de sorte à placer le rotor face au vent.

I.3.2. Le rotor

Le rotor transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est constitué des pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. [5]

I.4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

I.4.1. Avantages de l'éolienne

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux autres ressources énergétiques fossiles et nucléaires, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu, on peut facilement l'arrêter, contrairement aux autres procédés continus thermiques ou nucléaires.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et ils se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

I.4.2. Inconvénients de l'éolienne

- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor.
- La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel.

I.5. Machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

I.5.1. Machine synchrone (MS)

Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien ont des puissances de 500 kW à 2 MW, et ils sont bien plus chers que les générateurs à induction de mêmes dimensions. De plus,

lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations de couple dans le train de puissance. [6]

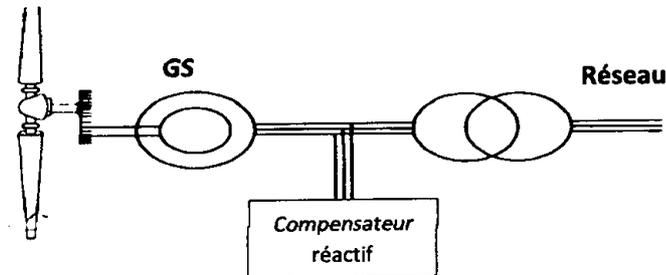


Figure 1.8 : Éolienne basée sur la machine synchrone.

I.5.2. Machine asynchrone simple (MAS)

Le générateur asynchrone connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit statorique. Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et les fréquences à la sortie de générateur ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne. La commande de l'onduleur permet de garder constante la tension du bus continu. [6]

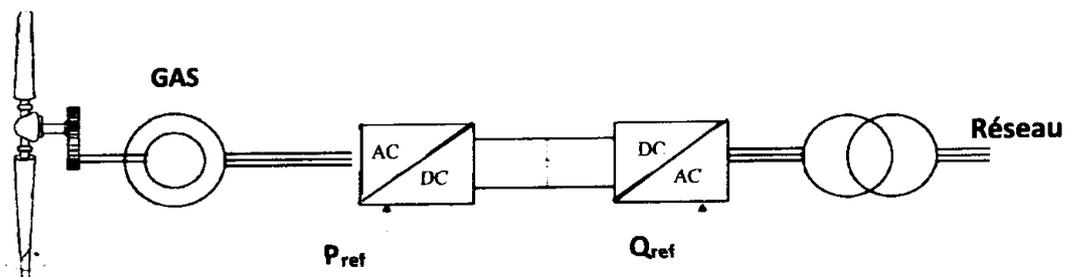


Figure I.9 : Éolienne à base de la machine asynchrone

I.5.3. Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée « machine généralisée » ou encore « machine asynchrone à excitation alternative » car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. [7]

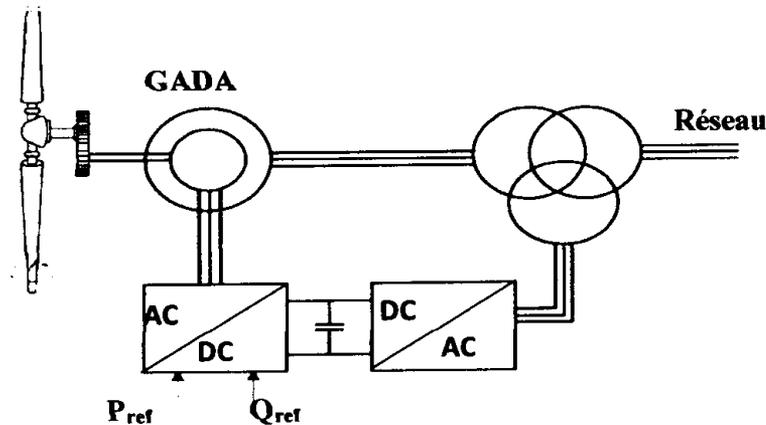


Figure I.10 : Éolienne utilisant la MADA.

-Mode de fonctionnement de la MADA

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machines réside dans le fait que pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. [7]

Étant donné que le champ rotorique d'une MADA peut tourner dans les deux sens grâce à la commande du convertisseur, la machine asynchrone peut produire de l'énergie dans deux modes de fonctionnements différents : [3]

- Hypo-synchrone ($g > 0$)
- Hyper-synchrone ($g < 0$)

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une simple description de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique, ainsi que les différents composants d'un aérogénérateur. Par la suite nous avons présenté les différentes machines utilisées dans les systèmes éoliens tout en montrant l'intérêt de la MADA par rapport aux autres machines.



Chapitre II :

Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

Chapitre II

Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

II.1. Introduction

Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne la simulation du processus est indispensable. Pour ce faire, on a besoin de modéliser la chaîne à étudier. Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation de la turbine éolienne. Notre choix se porte sur la génératrice asynchrone à double alimentation, ce choix a été justifié dans le premier chapitre.

II.2. Modélisation de la chaîne éolienne

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du multiplicateur et du générateur électrique.



II.2.1. Modèle du vent

Le vent est la variable d'entrée du système éolien. Sa mesure exacte à la hauteur du moyeu est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur stochastique définie par des paramètres statistiques. La modélisation du vent a déjà fait l'objet de nombreux travaux et par conséquent, elle ne sera pas détaillée dans ce travail. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

La vitesse du vent peut être modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques [3] :

$$v(t) = A + \sum_{i=1}^n a_i \sin(b_i \omega_v t) \quad (II.1)$$

Tel que :

A : La vitesse moyenne du vent est constante.

a_i et b_i, ω_v : sont respectivement l'amplitude, la pulsation de l'échantillon du vent.

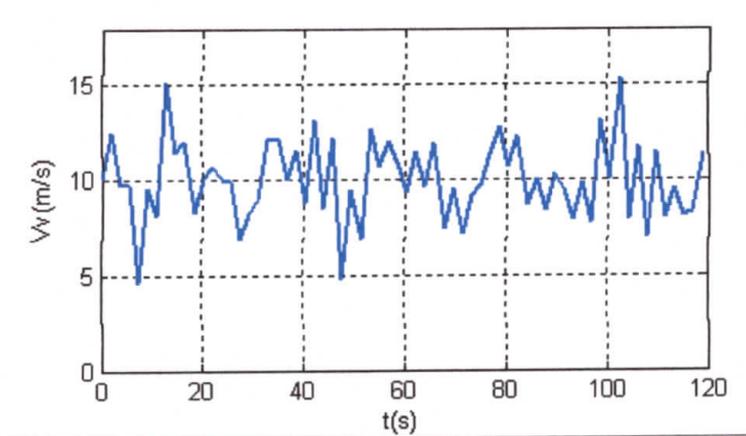


Figure II.1 : Profil de la vitesse du vent.

II.2.2. Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (II.2) sur lequel on a représenté la vitesse du vent v_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse v_2 en aval.

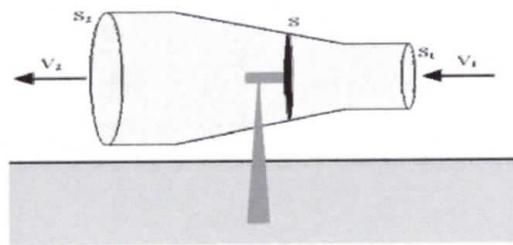


Figure II.2 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne v_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor v_2 soit :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (\text{II.2})$$

La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur d'après le théorème d'EULER :

$$F = \rho s v (v_1 - v_2) \quad (\text{II.3})$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{\text{aéro}} = Fv = \rho s v^2 (v_1 - v_2) \quad (\text{II.4})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface s sans diminution de vitesse, soit à la vitesse v_1 , la puissance P correspondante serait alors :

$$P = \frac{1}{2} \rho s v_1^3 \quad (\text{II.5})$$

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

$$C_p = \frac{P_{aéro}}{P} \quad (\text{II.6})$$

C_p : Le coefficient de puissance de la turbine éolienne.

II.2.3. Modèle de la turbine

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G .

II.2.3.1. Modèle des pâles

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R , est donnée par la relation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho s v^3 = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (\text{II.7})$$

La puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active s de l'éolienne est donnée par la relation suivante :

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho s v^3 \quad (\text{II.8})$$

C_p : Le coefficient de puissance de la turbine éolienne, et sa valeur ne peut pas dépasser (16/27), la limite de Betz.

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (\text{II.9})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.10})$$

où : Ω_t : la vitesse de la turbine. Ω_{mec} : la vitesse mécanique sur l'arbre primaire.

Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 7,5 kW pour notre étude. C'est un modèle tripale dont la longueur d'une pale est de 3 m et le gain de multiplicateur est de 8. L'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine par l'approximation gaussienne suivante [3] :

$$C_p(\lambda) = a * \exp(-((\lambda - b)/c)^2) \quad (\text{II.11})$$

avec : $a = 0.553$ (0.5483, 0.5577), $b = 6.224$ (6.198, 6.25), $c = 3.558$ (3.517, 3.599)

Ainsi, comme il est illustré dans la figure (II.3), le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci ($C_p=0.553$) est atteint pour une valeur de la vitesse relative $\lambda = 6.2$. Avec cette valeur, la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique.

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p \rho S v^3 \quad (\text{II.12})$$

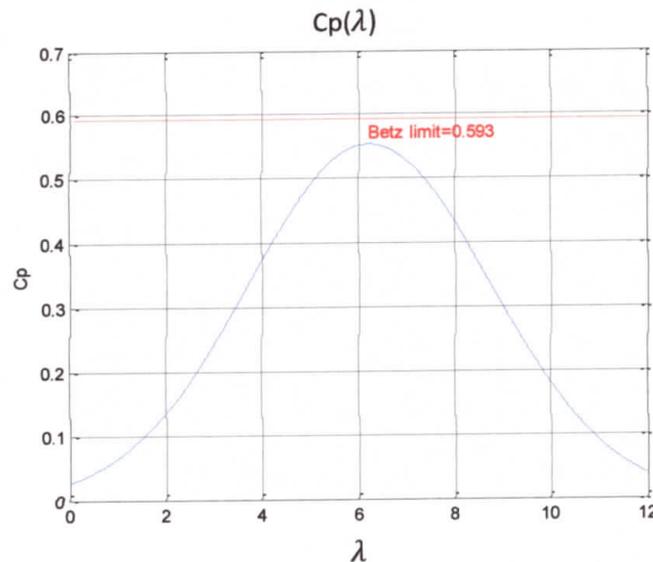


Figure II.3 : Évolution du coefficient de puissance C_p avec la variation de la vitesse spécifique λ .

II.2.3.2. Modèle du multiplicateur

Pour la modélisation du multiplicateur, nous avons supposé que l'élasticité et le frottement du multiplicateur ont été négligés ainsi que les pertes énergétiques.

Ce qui nous permet d'obtenir les relations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{II.13})$$

où :

C_g : est l'effet du couple de la turbine sur l'arbre de la génératrice. G : est le gain du multiplicateur.

II.2.3.3. Equation mécanique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t et comprends la masse des pales et la masse du rotor de la turbine [6].

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (\text{II.14})$$

L'évolution de la vitesse mécanique Ω dépend du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice C_{mec} qui est la résultante d'un couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} d'un couple de frottement visqueux C_{vis} et d'un couple du multiplicateur de vitesse C_g .

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{mec} \quad (II.15)$$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.16)$$

Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux f_r

$$C_{vis} = f_r \Omega \quad (II.17)$$

En remplaçant (II-11) et (II-13) dans (II-12), nous aurons

$$C_g + C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega \quad (II.18)$$

II.3. Modélisation de la MADA

II.3.1. Présentation de la MADA

La première apparition de cette machine date de l'année 1899, il ne s'agit pas d'une nouvelle structure, mais d'un nouveau mode d'alimentation. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures, elle présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone ou synchrone). Son rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [8]. La figure (II.4) représente la structure de la machine asynchrone à double alimentation.

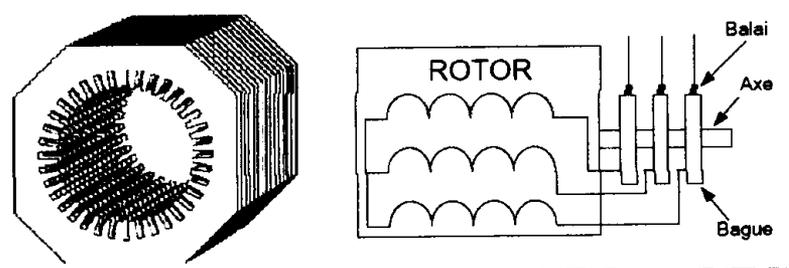


Figure II.4 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général.

II.3.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de fmm des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f$, et le rotor tourne avec la vitesse ω , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des fmm des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse $g\omega_s$ telle que :

$$\omega_s g = \omega_s - \omega \quad (\text{II.19})$$

où : g est le glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme ω_s , les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés [8,9].

II.3.3. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

II.3.3.1. Hypothèses simplificatrices

Pour l'étude de la génératrice asynchrone à double alimentation idéalisée, on introduit les hypothèses simplificatrices suivantes [6, 10,13] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- La force magnétomotrice est à une répartition spatiale sinusoïdale.
- La machine est à une construction symétrique.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau (effet pelliculaire).

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité des flux.
- La constance d'inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

II.3.3.1. Modèle effectif de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation peut être modélisée par six équations électriques et une seule équation mécanique qui concerne la dynamique du rotor.

Les phases sont désignées par S_a, S_b, S_c pour le stator et R_a, R_b, R_c pour le rotor. L'angle électrique θ définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases statoriques et rotoriques. Elle peut être schématisée par la figure (II.5).

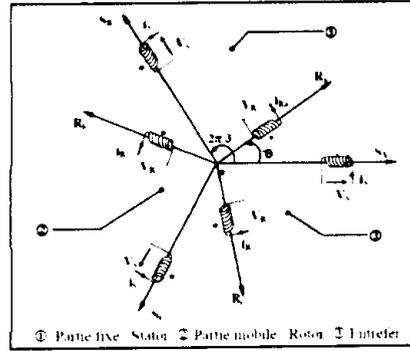


Figure II.5 : Représentation spatiale des enroulements de la MADA.

a. Équations électriques de la MADA

Les enroulements illustrés par la figure (II.5) obéissent aux équations électriques qui s'écrivent sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [R_{sabc}][I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_{rabc}][I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \end{cases} \quad (II.20)$$

où :

R_s et R_r sont respectivement les résistances statoriques et rotoriques.

Les matrices suivantes représentent respectivement :

$[V_s] = [v_{as} v_{bs} v_{cs}]^T$: Le vecteur des tensions statoriques

$[I_s] = [i_{as} i_{bs} i_{cs}]^T$: Le vecteur des courants statoriques

On définit de même, par changement d'indices, les vecteurs rotoriques :

$[V_r] = [v_{ar} v_{br} v_{cr}]^T$: Le vecteur des tensions rotoriques

$[I_r] = [i_{ar} i_{br} i_{cr}]^T$: Le vecteur des courants rotoriques

Les équations des flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques sont données par les expressions suivantes :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_{ss}][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \quad (II.21)$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_{rr}][I_{rabc}] + [M_{rs}][I_{sabc}] \quad (II.22)$$

L_{ss} est la matrice des inductances statoriques, elle est donnée par :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

L_{rr} est la matrice des inductances rotoriques, elle est donnée par :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

Et M_{sr} est la matrice des inductances mutuelles, entre le stator et le rotor, elle est donnée par [11] :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

avec : $[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$

l_s (l_r) C'est l'inductance propre d'une phase statorique (rotorique).

M_s (M_r) C'est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques (rotorique).

M_{sr} C'est l'inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique.

En introduisant les équations (II.21) (II.22) dans l'équation (II.20) respectivement, on obtient :

$$\begin{cases} [V_s] = R_s [I_{sabc}] + L_{ss} \frac{d}{dt} (I_{sabc}) + \frac{d}{dt} (M_{sr} I_{rabc}) \\ [V_r] = R_r [I_{rabc}] + L_{rr} \frac{d}{dt} (I_{rabc}) + \frac{d}{dt} (M_{rs} I_{sabc}) \end{cases} \quad (II.26)$$

b. Équations mathématiques de la MADA dans le repère (dq)

Pour passer du système triphasé abc , au système biphasé (dq), (et réciproquement) il faut utiliser la transformation de Park. La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - biphasée, suivi d'une rotation. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère ($\alpha \beta$) (transforme de Concordia), puis vers le repère (dq). Le repère ($\alpha \beta$) est fixe par rapport au repère (abc), par contre le repère (dq) est mobile il forme avec le repère fixe ($\alpha \beta$) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park. [10].

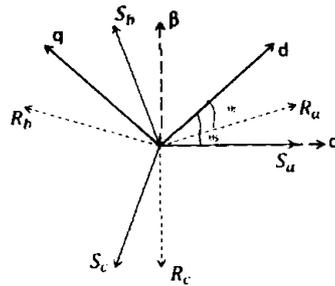


Figure II.6 : Différents repères utilisés

L'angle θ donne la position du rotor par rapport au stator.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{bmatrix} = [P_\theta] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (II.27)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P_\theta]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{bmatrix} \quad (II.28)$$

où :

x_a, x_b, x_c sont les valeurs instantanées des grandeurs triphasées.

x_d, x_q sont les valeurs instantanées des grandeurs biphasées.

x_h la composante homopolaire.

$[P_\theta]$ La matrice de la transformation de Park.

$[P_\theta]^{-1}$ La matrice inverse de Park.

La matrice de Park est donnée par :

$$[P_\theta] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

où : θ est l'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé θ_s pour les grandeurs statoriques et θ_r pour les grandeurs rotoriques).

Les équations électriques de la MADA sont écrites dans le repère (dq).

- Tensions statoriques et rotoriques

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - \omega_r \Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

avec : $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ est la pulsation électrique statorique, $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega$ est la pulsation électrique rotorique.

- Flux statorique et rotorique

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

- Équation mécanique

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (\text{II.33})$$

avec l'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et courants rotoriques :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr}) \quad (\text{II.34})$$

À noter qu'en convention générateur le couple résistant C_r sera remplacé par le couple moteur C_g (issu du multiplicateur dans un système éolien) précédé d'un signe (+) dans l'équation (II.18) et le couple électromagnétique C_{em} sera précédé d'un signe (-).

Ainsi, le fonctionnement de la génératrice est régi par un système d'équations. La résolution analytique de ce système dans le repère (abc) est très difficile. Ce problème se simplifie en adaptant une transformation qui permet le passage d'un système triphasé à un système biphasé.

c. Modèle de la MADA sous forme d'état

Pour obtenir le modèle complet de la MADA, on remplace les expressions des flux dans les équations de tension. On obtient quatre équations électriques en fonction des composantes des courants et/ou flux statoriques et rotoriques. L'association de l'équation mécanique aux quatre équations électriques donne le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park. En choisissant le vecteur d'état $X = (\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \Omega)^T$ et les grandeurs v_{dr} et v_{qr} comme entrées de commande, on obtient le modèle sous forme de représentation d'état :

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \Phi_{ds} + \omega_s \Phi_{qs} + \alpha_s M i_{dr} + v_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \Phi_{qs} - \omega_s \Phi_{ds} + \alpha_s M i_{qr} + v_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r i_{dr} + (\omega_s - \omega) i_{qr} + \alpha_s \beta \Phi_{ds} - \beta \omega \Phi_{qs} - \beta v_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} v_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r i_{qr} - (\omega_s - \omega) i_{dr} + \alpha_s \beta \Phi_{qs} + \beta \omega \Phi_{ds} - \beta v_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} v_{qr} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{C_{em}}{J} - \frac{1}{J} C_r - \frac{f_r}{J} \Omega \end{cases} \quad (II.35)$$

Par ailleurs, les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques sont exprimées par [10] :

$$\text{Puissances statoriques : } \begin{cases} P_s = (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \\ Q_s = (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \end{cases} \quad (II.36)$$

$$\text{Puissances rotoriques : } \begin{cases} P_r = (v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr}) \\ Q_r = (v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr}) \end{cases} \quad (II.37)$$

$i_{ds} i_{qs}$ ($i_{dr} i_{qr}$) Les courants statoriques (rotoriques).

$v_{ds} v_{qs}$ ($v_{dr} v_{qr}$) Les tensions statoriques (rotoriques).

$\Phi_{ds} \Phi_{qs}$ ($\Phi_{dr} \Phi_{qr}$) Flux statoriques et rotoriques diphasés dans un repère tournant.

p Nombre de paires de pôles de la machine.

Ω Vitesse de rotation de la machine.

où $\omega = p\Omega$ est la vitesse angulaire électrique de rotation du rotor, et :

$$\alpha_s = \frac{R_s}{L_s}, \sigma_r = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right), \beta = \frac{M}{\sigma_r L_s} \text{ et } \gamma_r = \left(\frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{\sigma_r L_s^2}\right)$$

II.4. Simulation en boucle ouverte

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation de la MADA en boucle ouverte, le stator étant directement connecté au réseau, tandis que, le rotor est alimenté par une source de tension à amplitude et fréquence variables.

II.4.1. Mode simple alimentation

Dans ce cas le rotor est court-circuité, donc la machine fonctionne en mode asynchrone simple (MAS).

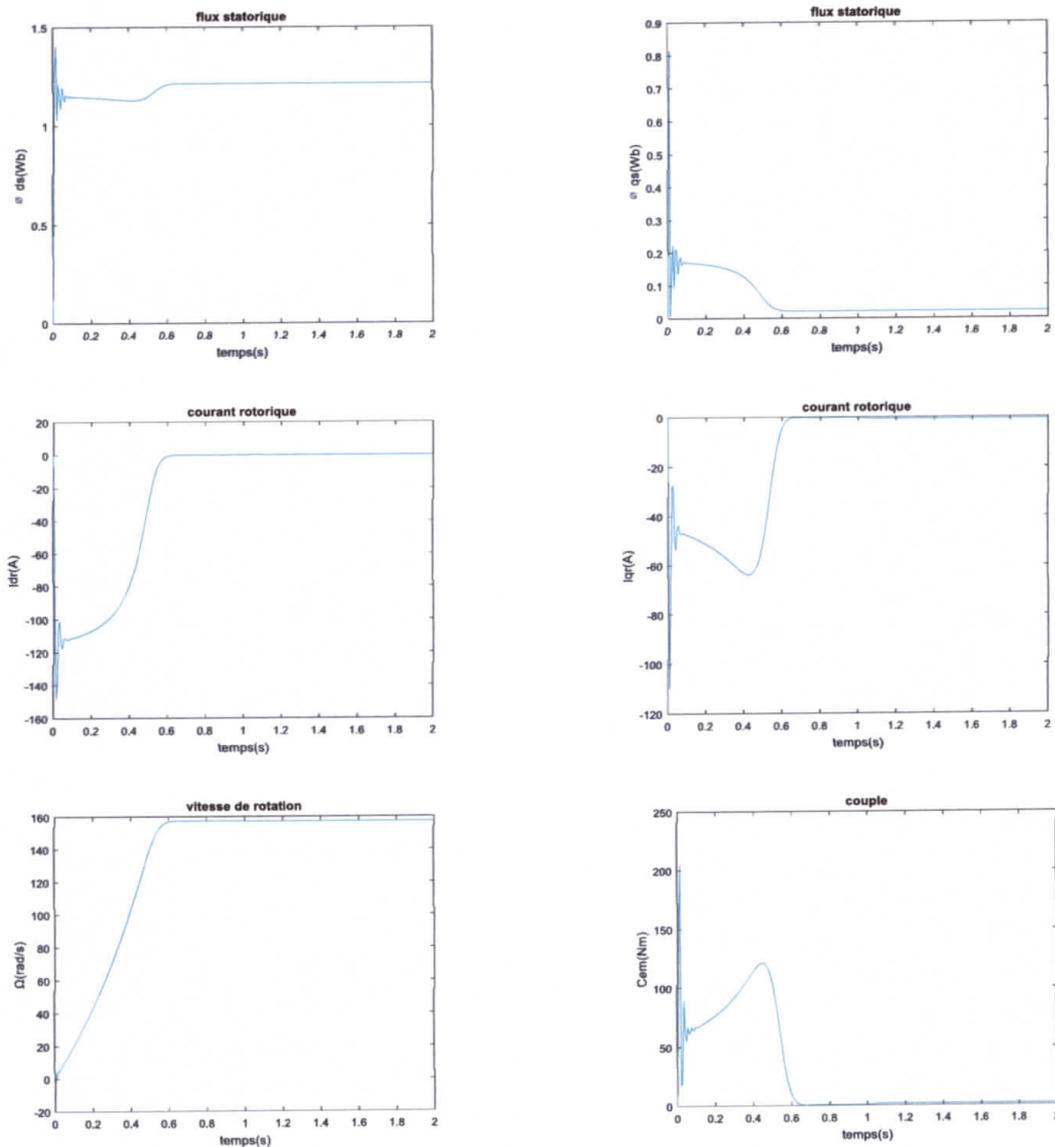


Figure II.7 : Réponses de la machine en mode simple alimentation à vide.

Lors du démarrage à vide, la figure (II.7) montre un comportement stable de la MAS. La vitesse de rotation se stabilise à sa valeur nominale qui est égale à 157 rad/s.

II.4.2. Mode double alimentation (MADA)

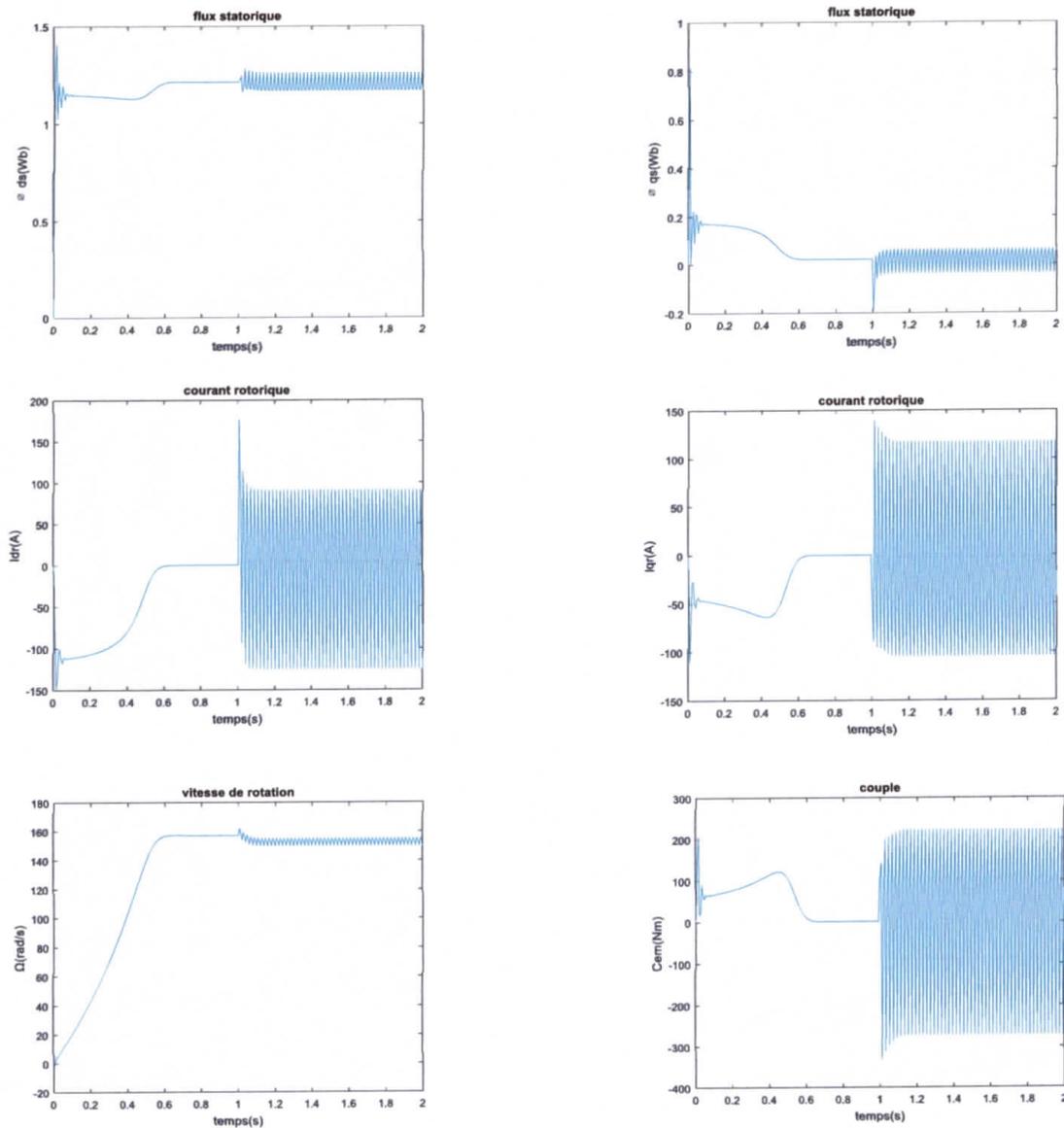


Figure II.8 : Réponses de la MADA avec alimentation du rotor 220 V et 50 Hz et $C_r=50$ N.m.

Dans ce cas, le rotor est alimenté. Les résultats de simulation ont montré un comportement non satisfaisant de la MADA (tendant vers l'instabilité).

II.5. Bref état de l'art sur la commande des aérogénérateurs

Dans le cadre de la commande des aérogénérateurs plusieurs techniques ont été élaborées. Ces commandes peuvent être linéaires ou non linéaires. Pour le cas linéaire plusieurs études ont été orientées vers la commande vectorielle (par orientation du flux) à base de régulateur classique PI [8,10]. Cependant, la robustesse est recommandée dans la commande des aérogénérateurs, ce qui ramène à étudier des commandes non linéaires plus élaborées. La commande robuste par mode

glissant est à la base des solutions proposées pour résoudre le problème des perturbations affectant ce système [5, 10,12], mais cette commande souffre du problème du broutement causé par la présence de la fonction *sign* dans la commande. Afin de pouvoir éliminer ce problème, certaines études ont proposé la commande par mode glissant flou [6, 13,14], la commande par mode glissant adaptative [15], la commande par mode glissant d'ordre supérieur [16, 17].

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique des principaux composants de la chaîne de conversion éolienne à base de la MADA. Le modèle de cette machine consiste en un système de sept équations différentielles à coefficient variable, dans le but de simplifier ce modèle nous avons utilisé la transformation de Park. Une simulation en boucle ouverte de la MADA a été effectuée afin de valider son modèle en vue de son utilisation par la suite. Enfin, un aperçu sur la commande de conversion éolienne à base de la MADA a été brièvement retracé.

Chapitre III :
Commande linéaire de
l'aérogénérateur
« Commande
vectorielle à base de
régulateurs PI »

Chapitre III

Commande linéaire de l'aérogénérateur

« Commande vectorielle à base de régulateurs PI »

III.1. Introduction

Depuis des années, plusieurs recherches universitaires et industrielles ont été proposées pour résoudre le problème de la commande de la machine asynchrone et établir une similitude avec la machine à courant continu. En effet, la difficulté pour commander une machine asynchrone réside dans le fait qu'il existe un couplage entre les variables d'entrées et de sorties et les variables internes de la machine comme le flux, le couple et la vitesse ; et les techniques de commandes classiques deviennent insuffisantes surtout dans les applications industrielles réclamant un couple important en basse vitesse. Pour maîtriser ces difficultés, et pour obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu où le découplage est naturel entre le flux et le couple, *Blaschke* et *Hasse* ont proposé une technique de commande dite commande vectorielle ou commande par orientation de flux. Aujourd'hui, grâce à cette technique de commande et au développement des systèmes numériques, plusieurs entraînements à courant continu sont remplacés par des machines à courant alternatif, ce qui permet un réglage de vitesse plus performant de point de vue rapidité et précision. La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur. [4]

Le but de ce chapitre est de présenter la technique de la commande vectorielle appliquée au système de conversion éolien à base de la MADA. Des simulations seront présentées à la fin de ce chapitre afin de montrer l'intérêt de cette technique de commande.

III.2. Stratégie de commande de la chaîne éolienne globale

La stratégie de commande des systèmes éoliens est généralement basée sur la courbe illustrée par la figure (III.1) qui est déduite des données aérodynamiques de l'éolienne [18]. Ainsi, on peut distinguer quatre zones :

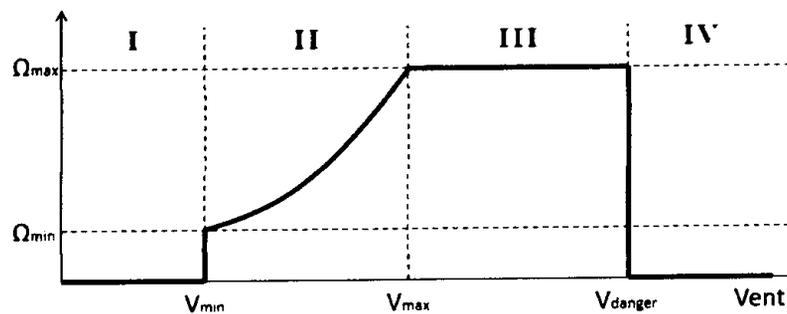


Figure III.1 : Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.

Dans la zone I, l'éolienne est en état d'arrêt car la vitesse du vent est insuffisante pour la faire fonctionner. Pour le cas de la zone II, la vitesse de rotation de l'éolienne est contrôlée, elle évolue avec la vitesse du vent (le fonctionnement de l'éolienne dans la zone II correspond à l'exploitation des valeurs maximales de l'ensemble des courbes de la figure (I.5), ce qui permet de maximiser la puissance extraite du vent). La zone III correspondant aux grandes vitesses du vent, dans cette zone l'éolienne tourne avec une vitesse constante pour ne pas détériorer le système. Pour des raisons de sécurité, l'éolienne est en état d'arrêt dans la zone IV. [19]

L'objectif de commande est de maximiser la puissance extraite du vent, cela n'est possible qu'en zone II.

III.3. Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle, notée FOC (Field Oriented Control) consiste à rendre le comportement d'une machine asynchrone identique à celui de la machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques vers un référentiel (dq) tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. Si cela est réalisé, nous pouvons rapprocher son comportement à celle d'un moteur à courant continu à excitation indépendante où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique nécessaire pour la faire tourner.

De nombreuses variétés de commandes ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer suivant la source d'énergie

- Commande en tension.
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère.

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement.

III.4. Architecture du dispositif de commande

Le but de notre étude est de commander le système aérodynamique dans la zone de fonctionnement II, selon deux stratégies :

- Maximum Power Point Tracking (MPPT) : un Maximum Power Point Tracking est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens.
- Commande vectorielle

a- Boucle de régulation de vitesse (MPPT) : L'objectif de commande étant de maximiser la production (la puissance active envoyée au réseau électrique), pour cela, la génératrice doit fonctionner à vitesse variable en suivant une caractéristique optimale, donc il faut établir une stratégie de commande permettant à la génératrice de tourner à une vitesse optimale (correspondant à un coefficient de puissance C_p maximal) donnant lieu à une production d'énergie optimale (maximum de puissance).

b- Boucle de régulation des puissances statorique (commande vectorielle) : Cette boucle est elle-même constituée de deux boucles ; la première fournit la tension v_{qr} permettant de contrôler la puissance active P_S transmise au réseau électrique en contrôlant le courant i_{qr} . Quant à la deuxième boucle, elle calcule la tension v_{dr} permettant d'imposer une puissance réactive statorique Q_S nulle en régulant le courant i_{dr} à une référence i_{dr-ref} (correspondant à $Q_S = 0$)

III.5. Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du coefficient de puissance comme montre la courbe de la figure (I.5). Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une vitesse de rotation optimale Ω_{opt} pour que la valeur de λ donnée $\lambda = \frac{R.v}{\Omega.G}$ soit égal à λ_{opt} . La résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}.v.G}{R} \quad (III.1)$$

λ_{opt} est considérée comme le maximum de la courbe $C_p(\lambda_{opt}) = C_{p_{max}}$ illustrée dans le chapitre précédent (figure II.3).

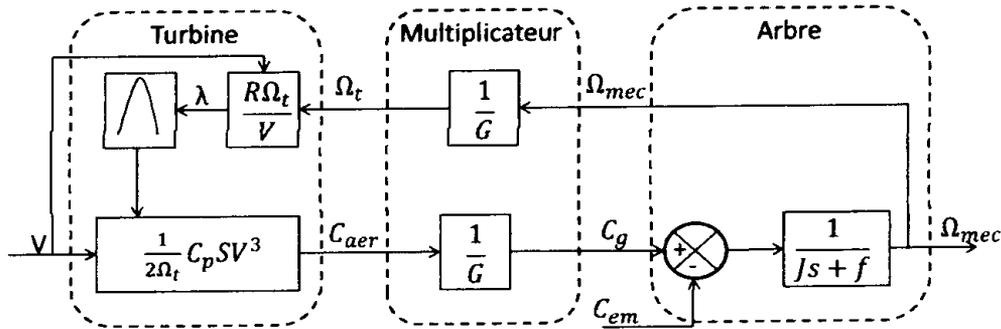


Figure III.2 : Principe de commande d'une éolienne à vitesse variable

Ce schéma fonctionnel obtenu en se servant des équations (II.9)-(II.18), décrit le fonctionnement de la turbine. La sortie qu'on veut commander dans ce système est la vitesse de rotation Ω_{mec} , voyant que les entrées de ce système sont le vent et le couple électromagnétique, mais le vent est une variable non-commandable (aléatoire), la seule entrée contrôlable étant le couple électromagnétique, ce qui pose un majeur problème dans la MADA, car son expression est non-linéaire $C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\phi_{qs} i_{dr} - \phi_{ds} i_{qr})$. La solution de ce problème est résolue en appliquant la commande vectorielle.

- Génération de couple de référence :

D'après l'équation (II.18) on peut écrire :

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J} (c_{em} - f_r \Omega_{mec} - e_v) \tag{III.2}$$

avec $e_v = c_g$

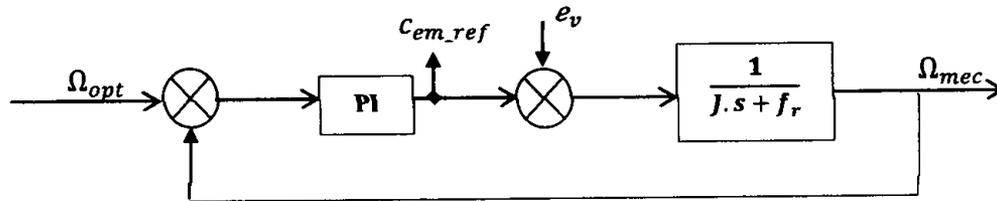


Figure III.3 : Schéma de régulation de vitesse.

Dans le cadre de ce mémoire, nous développons la commande vectorielle de la MADA avec orientation du repère (dq) suivant le flux statorique.

III.5.1. Choix du référentiel (dq)

Jusqu'ici, on a exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère (dq) faisant un angle θ_s avec le stator et un angle θ_r avec le rotor, mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre.

Il existe trois choix importants, on peut fixer le référentiel (dq) :

- au stator ;
- au rotor ;
- au champ tournant.

III.5.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Dans ce cas le repaire (dq) sur le stator

$$\theta_s = 0 \text{ et } \theta_s = \theta + \theta_r \rightarrow \theta_r = -\theta$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0, \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega_r \quad (\text{III.3})$$

On oriente le flux statorique selon l'axe d pour que la composante suivant l'axe q soit constamment nulle ($\phi_{qs} = 0, \phi_{ds} = \phi_s$).

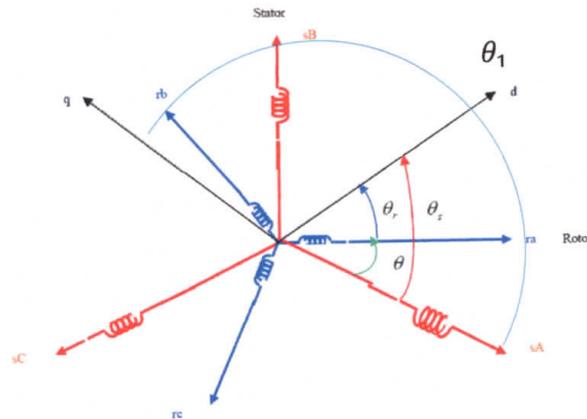


Figure III.4 : Orientation du repère (dq).

Le stator est directement relié au réseau, alors l'angle électrique θ_s nécessaire aux transformations de PARK est calculé à partir de la mesure de la tension statorique :

$$\theta_s = \theta_1 - \frac{\pi}{2} \quad (\text{III.4})$$

où $\theta_1 = \text{artg}\left(\frac{u_{s\beta}}{u_{s\alpha}}\right)$: est l'angle du vecteur tension statorique dans le repère stationnaire abc comme il est montré sur la figure (III.4).

Rappelons l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{PM}{L_s} (i_{dr}\phi_{qs} - \phi_{ds}i_{qr}) \Rightarrow C_{em} = -K(\phi_s i_{qr}) \quad (\text{III.5})$$

où $K = \frac{pM}{L_s}$.

D'après l'équation (III.5) et pour Φ_s constant, le couple électromagnétique peut être contrôlé par le courant i_{qr} . Alors, la MADA peut prendre une forme similaire à celle de la machine à courant continu.

Pour faire l'orientation du flux statorique, on fait appel au modèle de la machine dans le repère de PARK selon les équations (II.30) et (II.31) [8,11] :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (III.6)$$

On peut alors écrire (toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant) :

$$v_{ds} = 0 \text{ et } v_{qs} = v_s \quad (III.7)$$

Nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = v_s = \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (III.8)$$

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (III.9)$$

À partir de l'équation (III.9), on écrit les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} i_{ds} = -\frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{\Phi_s}{L_s} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (III.10)$$

Ces courants statoriques sont remplacés dans les équations des composantes directes et en quadrature des flux rotoriques.

$$\Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{M}{L_s} \cdot \Phi_{ds} = L_r \cdot \sigma \cdot i_{dr} + \frac{M}{L_s} \cdot \Phi_{ds} \quad (III.11)$$

$$\Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} - \frac{M^2}{L_s} \cdot i_{qr} = L_r \cdot \sigma \cdot i_{qr} \quad (III.12)$$

σ : est le coefficient de dispersion entre les enroulements d et q :

$$\sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r} \right) \quad (III.13)$$

En remplaçant les expressions des composantes directes et quadrature des courants statoriques (III.8) dans v_{ds}, v_{qs} (l'équation III.6), puis les expressions des composantes directes et quadratures des flux rotoriques (III.11) et (III.12) dans v_{dr}, v_{qr} (équations III.6), on obtient :

$$\begin{cases} v_{ds} = \frac{R_s}{L_s} \phi_{ds} - \frac{R_s}{L_s} M i_{dr} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = -\frac{R_s}{L_s} M i_{qr} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \sigma \frac{di_{dr}}{dt} + e_d \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \sigma \frac{di_{qr}}{dt} + e_q \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Tel que :

$$e_d = -L_r \cdot (\omega_s - \omega) \cdot \sigma \cdot i_{qr} + \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{ds}}{dt} \quad (\text{III.15})$$

$$e_q = -L_r \cdot (\omega_s - \omega) \cdot \sigma \cdot i_{dr} + \frac{M}{L_r} (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{ds} \quad (\text{III.16})$$

Pour le contrôle de la génératrice, des expressions sont établies montrant la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui lui seront appliquées :

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{L_r \sigma} (v_{dr} - R_r i_{dr} - e_d) \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{L_r \sigma} (v_{qr} - R_r i_{qr} - e_q) \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

- Génération des courants rotoriques de référence :

Le couple électromagnétique étant proportionnel au courant rotorique d'axe q (d'après l'équation (III.16)), nous pouvons donc établir une relation entre le courant i_{qr_ref} et le couple électromagnétique C_{em_ref} issu du bloc de contrôle MPPT, par :

$$i_{qr_ref} = -\frac{L_s}{pM\phi_{ds_ref}} C_{em_ref} \quad (\text{III.18})$$

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone sont données par l'équation (II.36). Avec $v_{ds} = 0$, et en remplaçant i_{ds} et i_{qs} par leurs expressions, on obtient :

$$P_s = -v_{qs} \frac{M}{L_s} i_{qr} \quad (\text{III.19})$$

$$Q_s = \left(\frac{v_{qs} \cdot \phi_{ds}}{L_s} - \frac{M}{L_s} v_{qs} i_{dr} \right) \quad (\text{III.20})$$

Dans le cadre de cette étude, on veut que la machine fonctionne avec un facteur de puissance unitaire du côté du stator, participant ainsi à la production totale de la puissance active P_s (puissance réactive Q_s nulle). Ce qui va permettre à partir de l'équation (III.8) et (III.20) de déduire la relation suivante :

$$0 = \frac{v_{qs} \cdot \phi_{ds}}{L_s} - \frac{M \cdot v_{qs} i_{dr}}{L_s} \quad (\text{III.21})$$

$$i_{dr_ref} = \frac{\phi_{ds}}{M} \quad (\text{III.22})$$

- Génération des tensions rotoriques de référence :

En supposant que le convertisseur est parfait ($v_{dr_ref} = v_{dr}$ et $v_{qr_ref} = v_{qr}$)

D'après les équations (III.15, III.16, III.17), on peut représenter ce schéma :

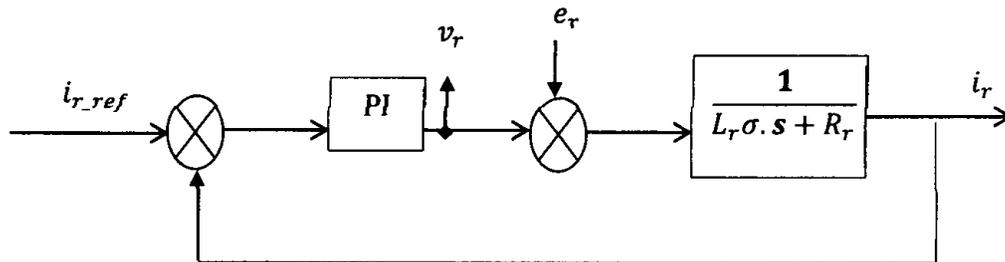


Figure III.5 : Schéma de régulation des courants

Avec : $i_{r_ref} = i_{qr_ref}$ ou i_{dr_ref} ; $i_r = i_{qr}$ ou i_{dr} ; $v_r = v_{qr}$ ou v_{dr} ; $e_r = e_q$ ou e_d .

Les tensions rotoriques sont les sorties des deux régulateurs PI.

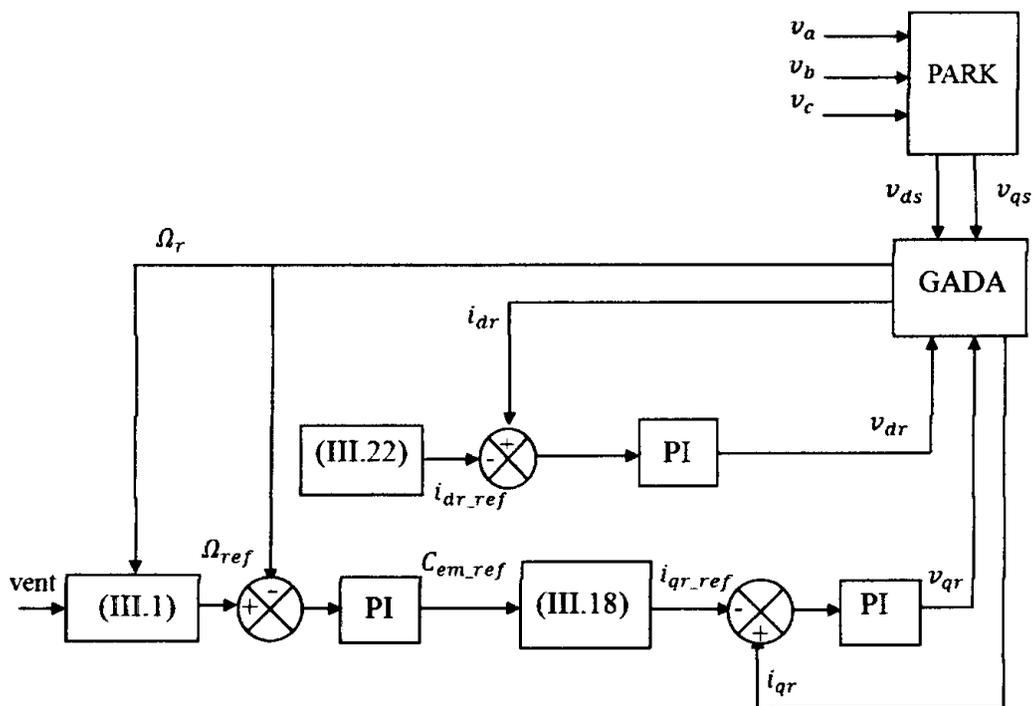


Figure III.6 : Principe de la commande du système éolien

La figure (III.6) montre le principe de la commande vectorielle et MPPT appliquée à l'aérogénérateur.

III.6. Résultats de simulation

Nous présenterons dans cette section les résultats de commande appliquée sur le modèle de l'aérogénérateur donné au deuxième chapitre (Les paramètres du système sont données en annexe A) avec la stratégie MPPT et la commande vectorielle avec les paramètres des régulateur suivants :

- Vitesse : $K_p = 20, K_i = 30$
- Courant I_{dr} : $K_p = 10, K_i = 1$
- Courant I_{qr} : $K_p = 10, K_i = 1$

Le modèle du vent est illustré sur la figure (III.7), le maximum du coefficient de puissance $C_{p_max}(\lambda) = 0.553$ ce maximum est atteint pour une valeur optimale de $\lambda = 6.224$. Considérons que la variation de vitesse du vent est gérée par l'équation suivante :

$$v(t) = 1.8(5 + 0.4 \sin(1.7t + 1) + 0.8 \sin(0.5t + 1.5)) \quad (\text{III.23})$$

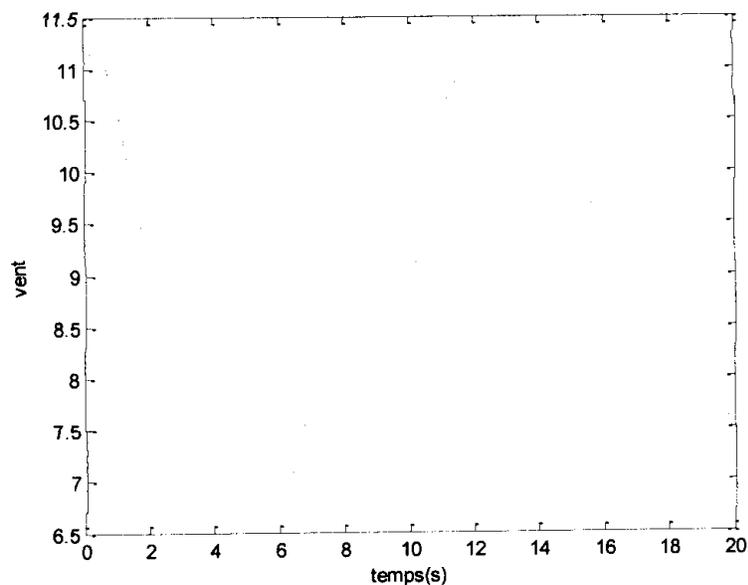


Figure III.7 : Équation du vent utilisé dans la simulation

III.6.1. Test sous les conditions nominales

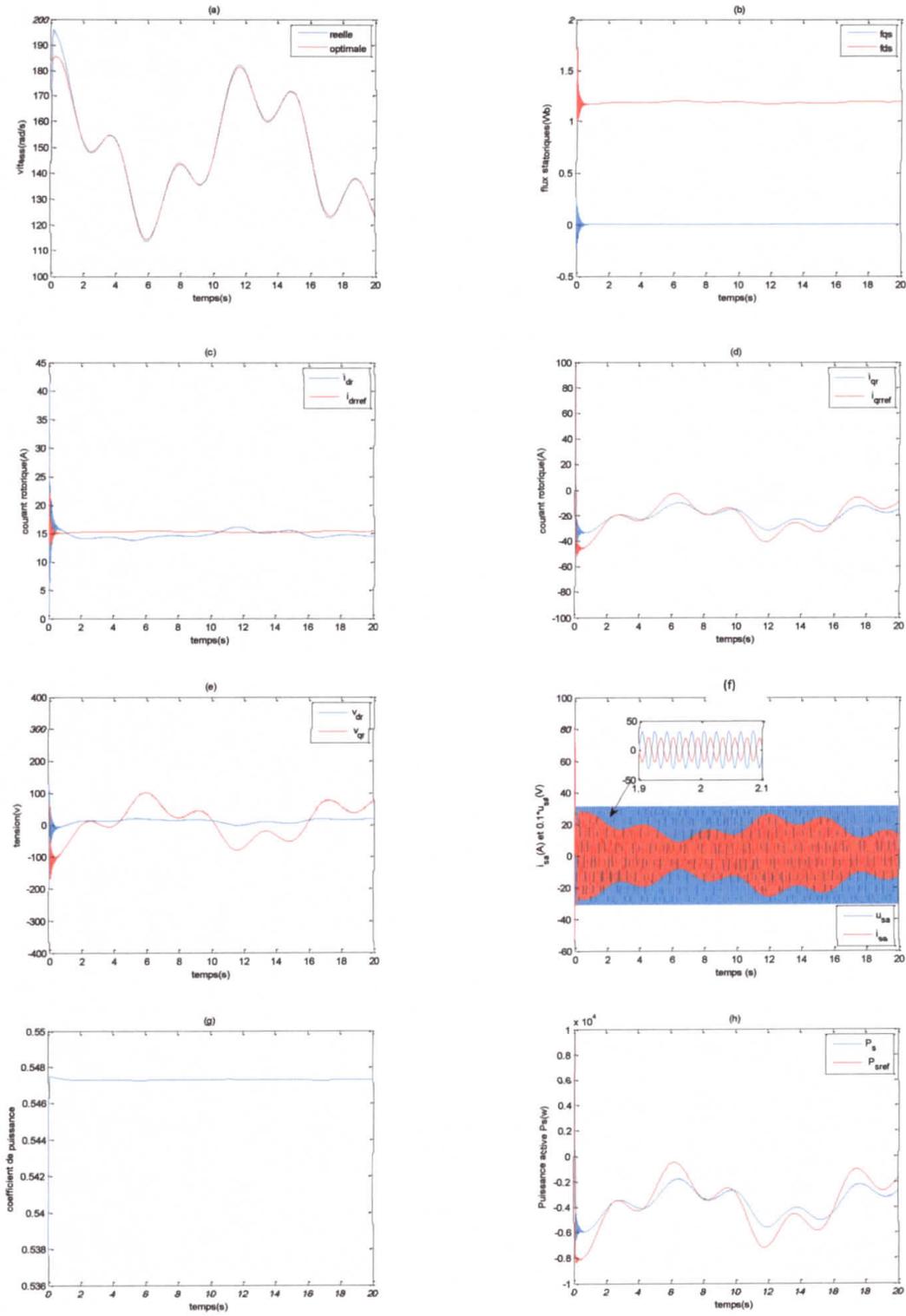


Figure III.8 : Résultats de simulation de la commande vectorielle sous conditions nominales.

L'analyse des résultats obtenus se fait en vérifiant la réalisation de nos objectifs de commande, à savoir :

- Découplage (Orientation du flux statorique) ;
- Production de puissance maximale (MPPT);
- Production avec un facteur de puissance statorique unitaire ;
- Qualité des signaux de commande.

a- Découplage

La figure (III.8.b) montre une bonne orientation du flux qui résulte un bon découplage entre le flux statorique et le couple de la GADA.

b- Production de puissance maximale(MPPT)

Une bonne production de puissance maximale (MPPT) (puissance active figure (III.8.h)) est assurée si la vitesse de rotation de la GADA suit son profil optimal, ce qui est montré sur la figure (III.8.a), ceci peut être également confirmé par le coefficient de puissance C_p qui est proche à sa valeur optimale ($C_{p-max}=0.553$) figure (III.8.g).

c- Production avec un facteur de puissance statorique unitaire

Le courant (statorique) délivré par le système éolien est en opposition de phase ($\varphi = 180^\circ$) par rapport à la tension du réseau figure (III.8.f) Ceci confirme que le système éolien n'injecte que de la puissance active ($P_s = u_s i_s \cos\varphi = -u_s i_s$) dans le réseau, donc une puissance réactive nulle ($Q_s = u_s i_s \sin\varphi = 0$).

d- Qualité des signaux de commande

La figure (III.8.e) montre l'évolution des tensions rotorique (tension de commande de l'aérogénérateur) où on constate que ces tensions restent dans les limites tolérées par la MADA (ne dépassent pas leurs valeurs nominales).

III.6.2. Test de robustesse

Afin de tester la robustesse de la commande utilisée (commande vectorielle), des changements paramétriques ont été appliqués sur le système éolien.

- Paramètres électriques : variation de -30% de l'inductance mutuelle (M), variation de 30% des inductances propres (L_r et L_s), et variation de 50% des résistances (R_s et R_r) à $t = 2s$ jusqu'à $t = 4s$.
- Paramètres mécaniques : à l'instant $t = 7s$ jusqu'à $t = 10s$ une variation de 500% de coefficient de frottement (f_r) une variation de 300% de l'inertie (J).
- Paramètres du réseau : variation de 10% de la fréquence (f) introduite à $t=13s$ jusqu'à $t=15s$.

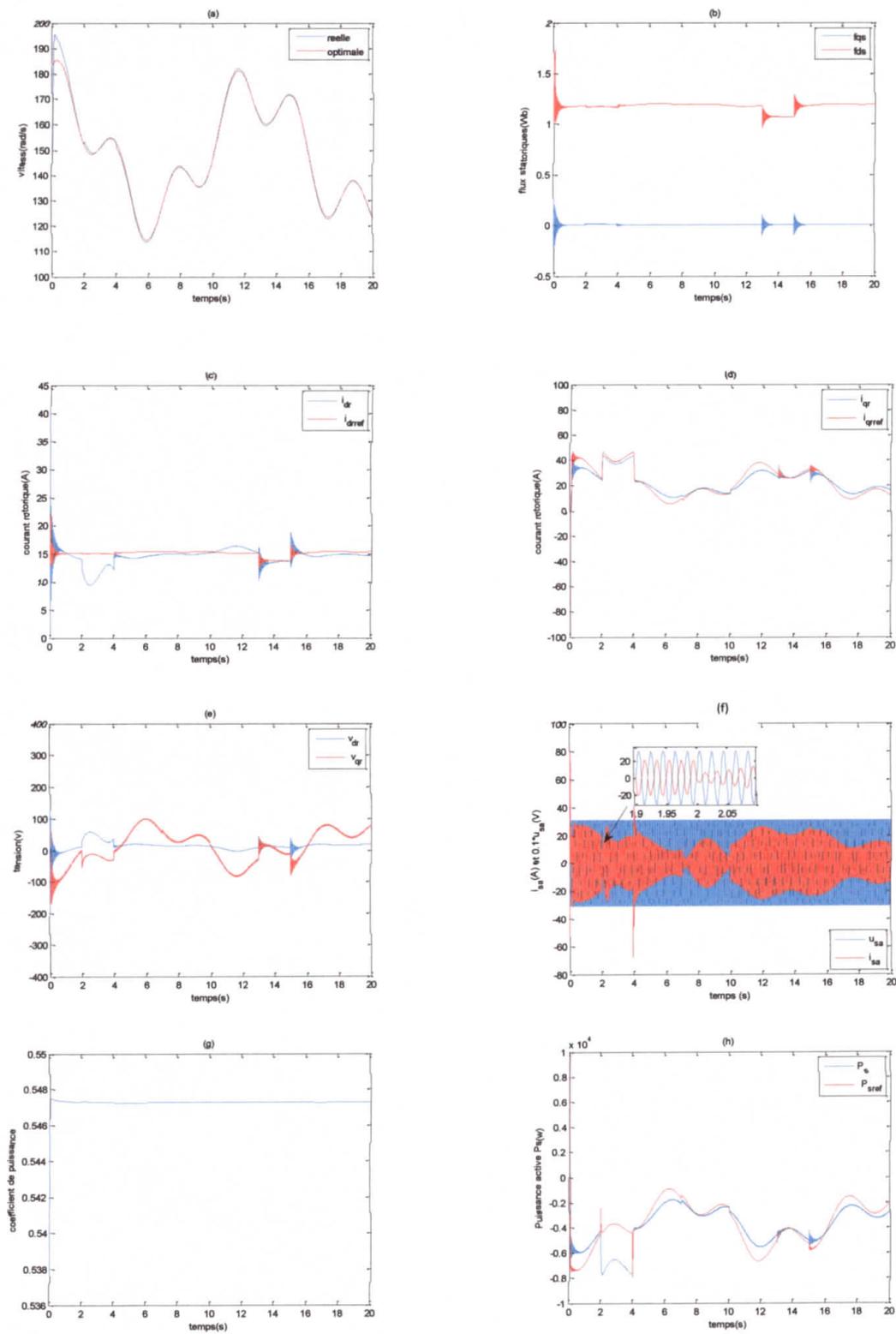


Figure III.9 : Résultats de simulation de la commande vectorielle –test de robustesse.

L'analyse des résultats obtenus se fait toujours en vérifiant la réalisation de nos objectifs de commande.

a- Découplage

La figure (III.9.b) montre qu'il y a une perte du découplage entre le flux statorique et le couple de la GADA aux instants du changement paramétrique.

b- Production de puissance maximale(MPPT)

La figure (III.9.a) montre que la vitesse de rotation ne suit plus son profil optimal, ceci va directement agir sur la puissance délivrée qui n'est plus maximal figure (III.9.h).

c- Production avec un facteur de puissance statorique unitaire

Le courant (statorique) délivré par le système éolien n'est plus en opposition de phase ($\varphi < 180^\circ$) par rapport à la tension du réseau figure (III.9.f). Ceci confirme que le système éolien ne fonctionne plus avec un facteur de puissance unitaire ($P_s = u_s i_s \cos\varphi \neq -u_s i_s$), donc une puissance réactive non nulle ($Q_s = u_s i_s \sin\varphi \neq 0$).

d- Qualité des signaux de commande

Sur la figure (III.9.e), on constate une augmentation de l'effort de commande (tensions rotoriques). Ceci est tout à fait normal, le contrôleur répond en essayant de compenser les perturbations. Toutefois, cette augmentation peut atteindre des taux non désirables si les perturbations deviennent plus importantes (risque de détruire le système).

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la commande linéaire d'un aérogénérateur à base de MADA. Dans un premier lieu, nous avons présenté le principe de la commande vectorielle, cette commande permet de contrôler la MADA d'une façon analogue à celle d'une machine à courant continu. Ensuite, nous avons appliqué une stratégie de commande permettant à l'aérogénérateur d'extraire le maximum de puissance disponible dans le vent en réalisant un asservissement de vitesse de la MADA, il s'agit de la stratégie MPPT à base de régulateurs PI. L'étude réalisée en simulation a montré l'intérêt de la stratégie de commande linéaire adoptée.

Cependant, en raison des perturbations auxquelles est soumise la MADA et qui peuvent affecter les performances de la commande comme on l'a déjà montré en simulation, en plus de la forte dynamique non linéaire de cette machine, et sa structure multivariable, le développement des lois de commande non linéaires plus élaborées s'impose. Ceci constitue l'objectif du prochain chapitre.

Chapitre IV :
Commandes non
linéaires de
l'aérogénérateur à base
de la MADA

Chapitre IV

Commandes non linéaires de l'aérogénérateur à base de la MADA

IV.1. Introduction

Les machines électriques, utilisées dans la plupart des entraînements réglés, sont modélisées par des systèmes dynamiques non linéaires. Pour ces machines, l'échauffement conduit à une augmentation des résistances par contre la saturation du circuit magnétique provoque une diminution des inductances. Comme conséquence, la synthèse de loi de commande non linéaire bien élaborée, revêt un grand intérêt. [20]

Dans ce chapitre, différentes lois de commande non linéaires seront synthétisées, puis testées sur l'aérogénérateur sous diverses conditions de fonctionnement (perturbations, changements paramétriques, ... etc.).

Ainsi, quatre lois de commande non linéaires (commande par mode glissant, commande par mode glissant dynamique, commande par backstepping avec un terme robuste, commande par surface dynamique) seront étudiées et comparées.

IV.2. Stratégie de commande de l'aérogénérateur

La commande non linéaire de l'aérogénérateur a le même objectif que la commande linéaire, on cherche à extraire le maximum de puissance délivrée par le vent en respectant l'algorithme de MPPT et le principe de la commande vectorielle, mais cette fois-ci on remplace les régulateurs PI par des contrôleurs non-linéaires robustes dans le but de surmonter l'inconvénient des régulateurs PI en terme de sensibilité aux différents types de perturbations pouvant affectés l'aérogénérateur.

IV.3. Principe de la commande par mode glissant

La technique de commande par mode glissant consiste à attirer les états du système dans une région convenablement sélectionnée et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, puis de concevoir une loi de commande qui maintiendra toujours le système dans cette région. [21,22]

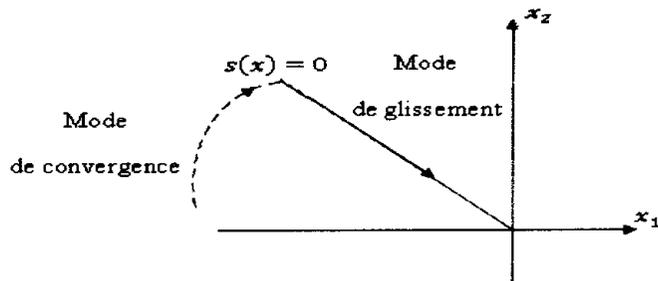


Figure IV.1 : Différents modes de convergence pour la trajectoire d'état.

La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite trois étapes :

- Choix de la surface de glissement.
- Etablissement des conditions d'existence de la convergence.
- Détermination d'une loi de commande permettant au bout d'un certain temps fini de contraindre la dynamique du système à évoluer vers cette surface et d'y demeurer.

IV.3.1. Synthèse de la loi de commande

IV.3.1.1. Choix de la surface de glissement

Soit le système donné par :

$$\begin{cases} \dot{x}^{(r)} = f(x, t) + g(x, t)u \\ y = S(x, t) \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

où $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ représente le vecteur d'état, f et g sont des fonctions non linéaires, r est le degré relatif du système (présente le nombre de fois dont il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande), u est l'entrée du système.

L'objectif de commande consiste à synthétiser une loi de commande par la technique des modes glissants, assurant la poursuite pour l'état x d'une trajectoire désirée $x_d = (x_{1d}, \dots, x_{nd})^T$.

Soit $e = x - x_d$ l'erreur de poursuite de la variable x . On définit la surface variante dans le temps par l'équation [20] :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(x) \quad (\text{IV.2})$$

où n est l'ordre du système, λ est une constante strictement positive, choisie de façon à assurer la rapidité et la stabilité du système.

IV.3.1.2. Condition de convergence

Les conditions de convergence permettent aux dynamiques du système de converger vers les surfaces de glissement. Nous retenons de la littérature deux conditions :

- Fonction directe de commutation

C'est la première condition de convergence, elle est proposée par *Utkin*. Elle s'exprime sous la forme :

$$S(x)\dot{S}(x) < 0 \quad (\text{IV.3})$$

- Fonction de Lyapunov

Il s'agit de formuler une fonction positive $V(S) > 0$ pour les variables d'état du système, et de choisir la loi de commande qui fera décroître cette fonction ($\dot{V}(S) < 0$). Cette fonction est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires.

En définissant la fonction de Lyapunov par :

$$V(S) = \frac{1}{2} S^2 \quad (\text{IV.4})$$

sa dérivée temporelle est donnée par :

$$\dot{V} = S\dot{S} \quad (\text{IV.5})$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative. Ceci est vérifié si :

$$\dot{V} = S\dot{S} < 0 \quad (\text{IV.6})$$

IV.3.1.3. Calcul de la commande

L'objectif de la loi de commande est de contraindre les trajectoires d'état du système à atteindre et ensuite à rester sur la surface de glissement malgré la présence d'incertitudes sur le système. En d'autres termes, la loi de commande doit rendre la surface de glissement localement attractive (c.à.d. au voisinage de la surface de glissement, toutes les trajectoires du système doivent être dirigées vers elle). Ainsi, la loi de commande doit être calculée en vérifiant une condition assurant la stabilité de $S(x, t) = 0$. Une telle condition est appelée condition d'attractivité.

La loi de commande est définie par la relation

$$u = u_{eq} + u_n \quad (\text{IV.7})$$

$$u = -G^{-1}(x)(f(x) + v(x) + k_0 S(x) + k_1 \text{sign}(S)) \quad (\text{IV.8})$$

avec :

$$k_{0,1} > 0$$

$$\text{sign}(S) = \begin{cases} 1 & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ -1 & \text{si } S < 0 \end{cases}$$

$$k_1 \geq \eta + \bar{\Delta}$$

$$u_{eq} = -G^{-1}(x)(f(x) + v(x))$$

$$u_n = -G^{-1}(x)(k_0 S(x) + k_1 \text{sign}(S))$$

u_{eq} : correspond à la commande équivalente proposer par *Flipov* et *Utkin*. Cette commande est considérée comme la commande la plus directe et la plus simple. Elle est calculée en reconnaissant que le comportement du système durant le mode de glissement est décrit par : $\dot{S}(x) = 0$.

u_n : est le terme discontinu de la commande.

IV.3.2. Application de la commande par mode glissant à la MADA

Dans notre cas, le stator de la MADA est connecté directement à un réseau stable. Alors, considérons le modèle réduit d'ordre 2 constitué par les équations rotoriques auxquelles nous ajoutons un terme représentant les incertitudes du modèle :

$$\begin{cases} \dot{x} = F(x) + G(x)u + \Delta(x) \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{IV.9})$$

$$F(x) = \begin{pmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\gamma_r i_{dr} + (\omega_s - \omega) i_{qr} + \alpha_s \beta \phi_{ds} - \beta \omega \phi_{qs} - \beta v_{ds} \\ -\gamma_r i_{qr} - (\omega_s - \omega) i_{dr} + \alpha_s \beta \phi_{qs} + \beta \omega \phi_{ds} - \beta v_{qs} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.10})$$

avec : $x = [i_{dr} \ i_{qr}]^T$, $G(x) = \text{diag}[g_1(x), g_2(x)] = \text{diag}\left[\frac{1}{\sigma_r}, \frac{1}{\sigma_r}\right]$, $u = \begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix}$

$\Delta(x) = [\Delta_1(x) \ \Delta_2(x)]^T$ Incertitudes sur le système supposées bornées ($|\Delta(x)| \leq \bar{\Delta}$).

Les variables à contrôler sont les courants i_{dr}, i_{qr} , donc :

$$y(x) = \begin{pmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.11})$$

D'après l'étude théorique, les surfaces choisies pour chacune des sorties sont définies par :

$$S_1 = e_1, \quad S_2 = e_2 \quad (\text{IV.12})$$

où :

$$e_1 = i_{dr} - i_{dr_{ref}}, \quad e_2 = i_{qr} - i_{qr_{ref}}$$

Les dérivées des deux surfaces sont données par :

$$\dot{S}_1 = \left(\frac{di_{dr}}{dt} - \frac{di_{dr_{ref}}}{dt} \right) \quad (IV.13)$$

$$\dot{S}_2 = \left(\frac{di_{qr}}{dt} - \frac{di_{qr_{ref}}}{dt} \right) \quad (IV.14)$$

On garde les objectifs de commande montrés dans le chapitre précédent relatif à la commande vectorielle, c-à-d que :

$$i_{dr_{ref}} = \frac{\phi_{ds_{ref}}}{M} = \text{constante} \quad (IV.15)$$

$$i_{qr_{ref}} = - \frac{L_s}{pM\phi_{ds_{ref}}} C_{em_{ref}} \quad (IV.16)$$

En remplaçant les expressions de $\left(\frac{di_{dr}}{dt} \right)$ et $\left(\frac{di_{qr}}{dt} \right)$ dans (IV.13) et (IV.14), on aura :

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = \left(-\gamma_r \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{ds} - \beta \cdot \omega \cdot \phi_{qs} - \beta \cdot V_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} \cdot v_{dr} - V_1 \right) + \Delta_1 \\ \dot{S}_2 = \left(-\gamma_r \cdot i_{qr} - (\omega_s - \omega) \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{qs} + \beta \cdot \omega \cdot \phi_{ds} - \beta \cdot V_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} \cdot v_{qr} - V_2 \right) + \Delta_2 \end{cases} \quad (IV.17)$$

Les incertitudes sont supposées bornées comme suit :

$$|\Delta_1| < \bar{\Delta}_1 \text{ et } |\Delta_2| < \bar{\Delta}_2$$

$$\text{Prenons : } v(x) = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{di_{qr_{ref}}}{dt} \end{pmatrix}$$

Les surfaces peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\dot{S} = F(x) + \Delta(x) + v(x) + G(x)u \quad (IV.18)$$

$$\text{avec : } S = (S_1 \ S_2)^T, u = (v_{dr} \ v_{qr})^T, F(x) = (f_1(x) \ f_2(x))^T, G(x) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_r} \end{pmatrix}$$

Comme il a été montré précédemment, la surface de glissement se détermine en fonction du système et des performances désirées, indépendamment de la commande, et l'obtention du régime glissant supposerait une commande discontinue. De ce fait, si cette commande est indispensable, elle l'empêche nullement, au contraire, qu'une partie continue lui soit adjointe pour diminuer l'amplitude de la discontinuité. Par conséquent, la structure d'un contrôleur comporte deux parties

$$\begin{cases} u_{eq} = -G^{-1}(x)(f(x) + v(x)) \\ u_n = -G^{-1}(x)(K_0 S(x) + K_1 \text{sign}(s(x))) \end{cases} \quad (IV.19)$$

Maintenant, il faut trouver les conditions pour garantir l'attractivité des surfaces et leur convergence vers zéro. Pour cela, on définit la fonction de Lyapunov suivante :

$$V = \frac{1}{2} S^T S \quad (IV.20)$$

avec :

$$\dot{V} = S^T \dot{S} \quad (IV.21)$$

En remplaçant (IV.17) dans (IV.20), on trouve :

$$\dot{V} = S^T (F(x) + \Delta(x) + V + G(x)u) \quad (IV.22)$$

ou encore :

$$\dot{V} = S^T (F(x) + V + G(x)u) + S_1 \Delta_1 + S_2 \Delta_2 \quad (IV.23)$$

Alors :

$$\dot{V} \leq S^T (F(x) + G(x)u) + |S_1| |\Delta_1| + |S_2| |\Delta_2| \quad (IV.24)$$

$$\dot{V} \leq S^T (F(x) + G(x)u) + |S_1| \bar{\Delta}_1 + |S_2| \bar{\Delta}_2 \quad (IV.25)$$

Si on introduit la loi de commande u donnée par (IV.8) dans l'expression de \dot{V} , celle-ci sera réduite à la forme :

$$\dot{V} \leq -k_0 S^2 + (-k_1 + \bar{\Delta}) |S| \quad (IV.26)$$

avec : $k_0 = \text{diag}[k_{01} \ k_{02}]$, $k_1 = \text{diag}[k_{11} \ k_{12}]$, $\text{sing}(S) = [\text{sign}(S_1) \ \text{sign}(S_2)]^T$

Pour assurer que S converge asymptotiquement vers zéro et se maintient dans son voisinage

($\dot{V} \leq 0$), les gains k_{11} , k_{12} , k_{01} , k_{02} doivent satisfaire les inégalités suivantes :

$k_{11} \geq \gamma_1 + \bar{\Delta}_1$, $k_{12} \geq \gamma_2 + \bar{\Delta}_2$ et $k_{01} > 0$, $k_{02} > 0$ avec $\gamma_1, \gamma_2 > 0$.

Remarque :

La détermination du vecteur de commande u n'est possible que si est seulement si la matrice $G(x)$ est inversible.

IV.3.2.1. Résultats de simulation

La commande par mode glissant a été appliquée sur le modèle de l'aérogénérateur donné au deuxième chapitre avec les paramètres suivants :

- Vitesse : $K_p = 20, K_i = 30$
- Courant I_{dr} : $K_{01} = 2700, K_{11} = 1000$
- Courant I_{qr} : $K_{02} = 2700, K_{12} = 1000$

IV.3.2.1.1. Test sous les conditions nominales



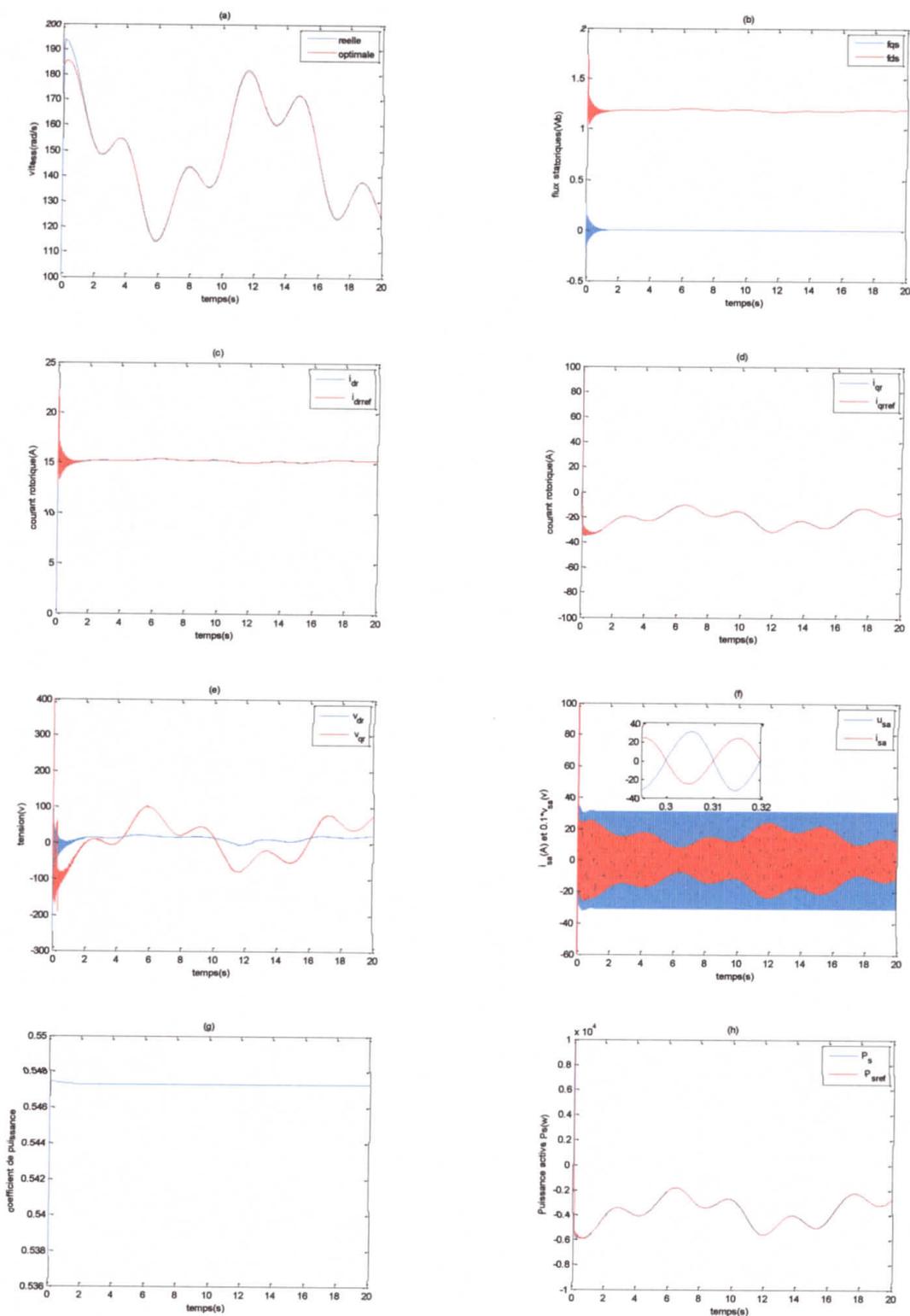


Figure IV.2 : Résultats de simulation de la commande par mode glissant-test sous conditions nominales

IV.3.2.1.2. Test de robustesse

Pour tester la robustesse de la commande par modes glissants et pouvoir comparer les

résultats avec celles obtenues avec la commande vectorielle à base de PI classiques, on considère le même profil de vent utilisé dans le chapitre précédent, tout en gardant les mêmes conditions de fonctionnement (perturbations).

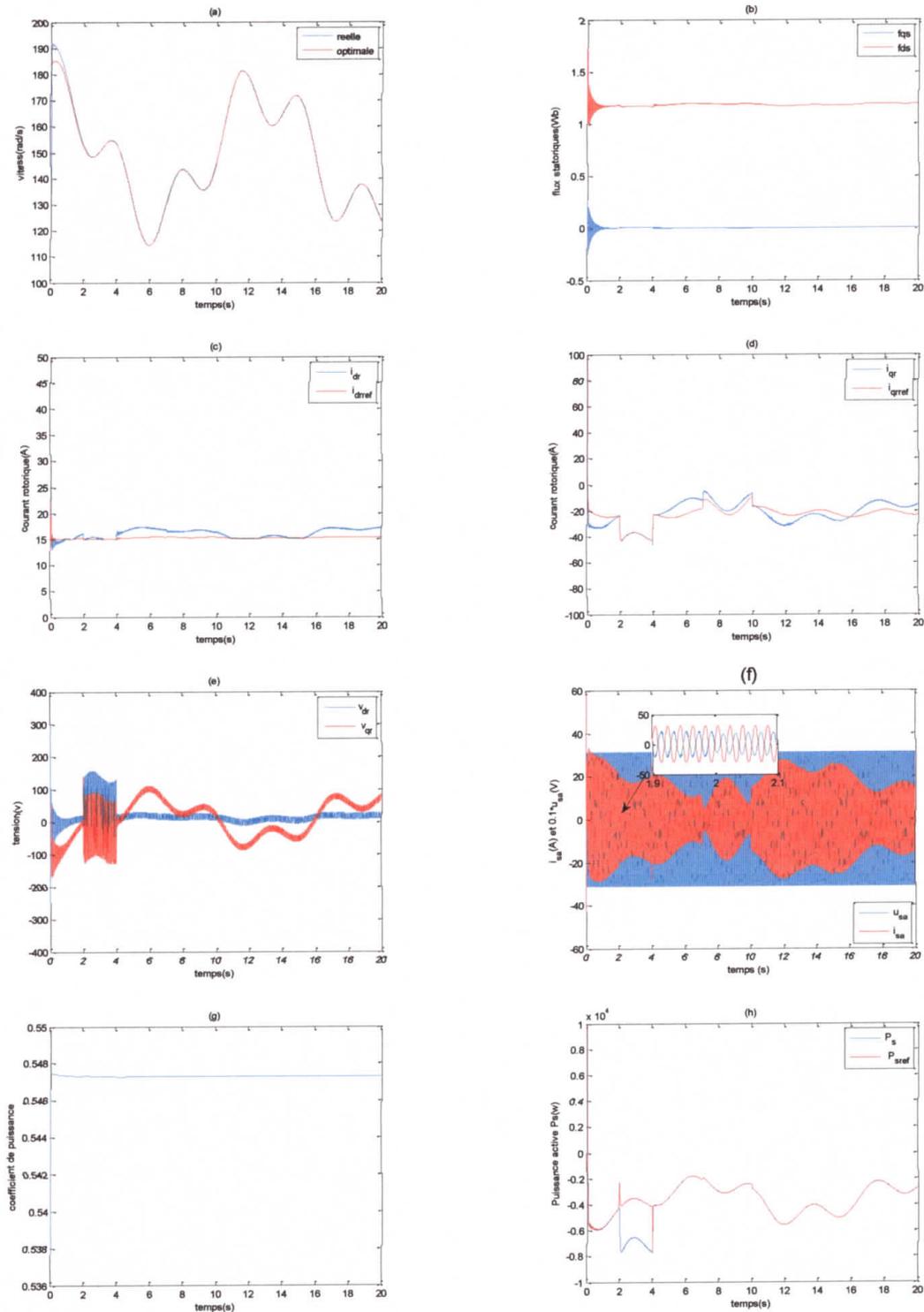


Figure IV.3 : Résultats de simulation de la commande par mode glissant-test de robustesse

L'analyse des résultats obtenus se fait en vérifiant la réalisation de nos objectifs de commande.

a- Découplage

La figure (IV.3.b) montre que le découplage n'est pratiquement pas affecté par les variations des paramètres électriques. Toutefois, une variation plus franche de la fréquence du réseau peut affecter ce découplage.

b- Production de puissance maximale(MPPT)

La figure (IV.3.a) ne montre aucune dégradation des performances en termes de poursuite de vitesse optimale. Le coefficient de puissance (figure (IV.3.g)) confirme également que durant la phase de perturbation, l'aérogénérateur injecte au réseau une puissance (active) maximale. L'allure de cette puissance est représentée sur la figure (IV.3.h).

c- Production avec un facteur de puissance statorique unitaire

En introduisant les perturbations paramétriques, on remarque que le courant (statorique) délivré par le système éolien et la tension du réseau reste en opposition de phase (donc $\varphi = 180^\circ$) figure (IV.3.f), et par conséquent la puissance réactive (pertes) est nulle.

d- Qualité des signaux de commande

La figure (IV.3.e) montre que les performances de robustesse de la commande par mode glissant se paye au prix de la dégradation de la qualité des signaux de commande, c-à-d apparition du phénomène indésirable de *chattering* limitant l'application réelle de cette commande.

IV.4. Le broutement (*chattering*)

En pratique, la présence de la fonction discontinue $sign(S)$ dans la loi de commande implique que l'état du système ne peut pas glisser le long de la surface, mais il oscille le long de celle-ci. Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées, comme la solution de mode glissant dynamique [20], mode glissant flou [6], mode glissant d'ordre supérieur [6], etc.

IV.5. Commande par mode glissant dynamique

Dans le but de réduire les oscillations, nous allons présenter une solution qui repose sur la variation de la commande u de façon à diminuer ou éliminer l'effet de la fonction $sign$, origine du *chattering*. Les étapes d'élaboration de la commande par mode glissant dynamique sont les mêmes que dans le cas précédent.

IV.5.1. Synthèse de la loi de commande**IV.5.1.1. Surface de glissement**

Considérons la surface $S = [S_1 \dots S_m]^T$ décrite par :

$$S_i(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_i\right)^{n_i-1} e_i(x) \quad (\text{IV.27})$$

$$\lambda_i > 0 \forall i = 1, \dots, m$$

IV.5.1.2. Loi de commande

Si les incertitudes $\Delta(x)$ sont connues la loi de commande idéale suivante assurera les objectifs de commande :

$$u^* = -G^{-1}(x)[F(x) + v + \Delta(x) + kS] \quad (\text{IV.28})$$

avec :

$$u^* = [u_1^* \dots u_m^*]^T$$

$$S = [S_1 \dots S_m]^T$$

$$k = [k_1 \dots k_m], k_i > 0 \forall i = 1, \dots, m$$

$$v = [v_1 \dots v_m]^T$$

Preuve :

Considérons la fonction de Lyapunov candidate suivante :

$$V = \frac{1}{2} S^T S \quad (\text{IV.29})$$

sa dérivée temporelle est exprimée par :

$$\dot{V} = S^T \dot{S} \quad (\text{IV.30})$$

Prenons :

$$\dot{S} = F(x) + v(x) + \Delta(x) + G(x)u \quad (\text{IV.31})$$

Si la commande u prend la valeur de u^* , formulée par la relation (IV.28), la dynamique se réduit alors à la forme :

$$\dot{S} = -kS \quad (\text{IV.32})$$

En introduisant (IV.32) dans (IV.30), celle-ci prend l'expression finale :

$$\dot{V} = -kS^T S \quad (\text{IV.33})$$

Pour vérifier l'inégalité $\dot{V} < 0, \forall S \neq 0$, il faut choisir les coefficients k_i de telle sorte que :

$$k_i > 0, i = 1, \dots, m$$

On peut écrire cette loi de commande dans une forme réduite comme suit :

$$u^* = u_0 - \Delta_1 \quad (\text{IV.34})$$

où :

$$u_0 = [u_{01} \dots u_{0m}]^T$$

$$\Delta_1 = [\Delta_{11} \dots \Delta_{1m}]$$

avec :

$$u_0 = -G^{-1}(x)[F(x) + v(x) + kS] \quad (\text{IV.35})$$

$$\Delta_1 = G^{-1}(x)\Delta(x) \quad (\text{IV.36})$$

u_0 : représente la commande nominale dans le cas où les incertitudes sont nulles.

La réalisation de cette loi de commande est impossible car les incertitudes sont mal connues, pour cette raison, on doit approcher la partie qui contient ces incertitudes par une commande u_s , ce qui implique une nouvelle forme de la commande, soit :

$$u = u_0 + u_s \quad (\text{IV.37})$$

avec :

$$u = [u_1 \dots u_m]^T$$

$$u_s = [u_{s1} \dots u_{sm}]^T$$

Le problème posé consiste à développer une procédure systématique de la commande u_s de façon à compenser les effets de Δ_1 , pour se faire, on définit une surface de glissement convenable S_u , tel que :

$$S_u = u - u^* \quad (\text{IV.38})$$

avec :

$$S_u = [S_{u1} \dots S_{um}]^T$$

De (IV.34) et (IV.37), (IV.38) devient :

$$S_u = u_s + \Delta_1 \quad (\text{IV.39})$$

Pour cette surface, on définit la fonction de Lyapunov $V(S_u)$ candidate suivante :

$$V(S_u) = \frac{1}{2} S_u^T S_u \quad (\text{IV.40})$$

sa dérivée temporelle est donnée par :

$$\dot{V}(S_u) = S_u^T \dot{S}_u \quad (\text{IV.41})$$

La dérivée de (IV.39) peut s'écrire sous la forme :

$$\dot{S}_u = \dot{u}_s + \dot{\Delta}_1 \quad (\text{IV.42})$$

avec $\dot{\Delta}_1$ est supposée borné par :

$$|\dot{\Delta}_{1i}| \leq \delta_i(x, u), \quad i = 1, \dots, m$$

où : $\delta_i(x, u) = [\delta_1 \dots \delta_m]^T$ et δ_i des fonctions positives données.

Par conséquent, la dynamique de la fonction de Lyapunov donnée par l'expression (IV.41), se réduit à :

$$\dot{V}(S_u) = S_u^T \dot{S}_u = S_u^T (\dot{u}_s + \dot{\Delta}_1) \quad (\text{IV.43})$$

$$\dot{V}(S_u) = \sum_{i=1}^m (S_{ui} \dot{u}_s + S_{ui} \dot{\Delta}_{1i}) \quad (\text{IV.44})$$

$$\dot{V}(S_u) \leq \sum_{i=1}^m (S_{ui} \dot{u}_s + |S_{ui}| |\dot{\Delta}_{1i}|) \quad (\text{IV.45})$$

$$\dot{V}(S_u) \leq \sum_{i=1}^m (S_{ui} \dot{u}_s + |S_{ui}| \delta_i) \quad (\text{IV.46})$$

Pour garantir l'attractivité en temps fini de u vers u^* , il suffit de choisir pour \dot{u}_{si} , la forme suivante :

$$\dot{u}_{si} = -\Lambda_i \text{sign}(S_{ui}) \quad (\text{IV.47})$$

$$i = 1, \dots, m$$

avec $\Lambda_i (i = 1, \dots, m)$ fonction strictement positive vérifiant :

$$\Lambda_i = \delta_i(x, u) + \eta_i \quad (\text{IV.48})$$

En utilisant (IV.47), (IV.46) devient :

$$\dot{V}(S_u) \leq -\sum_{i=1}^m \eta_i |S_{ui}| \quad (\text{IV.49})$$

Ce qui implique que $S_{ui} \rightarrow 0, (i = 1, \dots, m)$ dans un temps fini et, par conséquence, u s'approche de u^* pour t fini.

Le terme \dot{u}_s peut s'écrire sous forme matricielle comme suit :

$$\dot{u}_s = -\Lambda \text{sign}(S_u) \quad (\text{IV.50})$$

avec :

$$\Lambda = \text{diag}[\Lambda_1 \dots \Lambda_m]$$

$$\text{sign}(s) = [\text{sign}(S_{u1}) \dots \text{sign}(S_{um})]^T$$

En principe chaque terme contenant l'expression de u^* est difficile à utiliser dans la commande.

C'est pourquoi on cherche pour S_u une nouvelle formulation de telle sorte qu'elle ne contient aucun terme de u^* . Si on ajoute et on retranche $G(x)u^*$ dans (IV.32), on aura :

$$\dot{S} = F(x) + v(x) + \Delta(x) + G(x)u + G(x)u^* - G(x)u^* \quad (\text{IV.51})$$

$$\dot{S} = F(x) + G(x)(u - u^*) + v(x) + \Delta(x) + G(x)[-G^{-1}(x)(F(x) + v(x) + \Delta(x) + kS)] \quad (\text{IV.52})$$

$$\dot{S} = -kS + G(x)Su \quad (\text{IV.53})$$

$$S_u = G^{-1}(x)(\dot{S} + kS) \quad (\text{IV.54})$$

Alors (IV.50) devient :

$$\dot{u}_s = -\Lambda \text{sign}(G^{-1}(x)(\dot{S} + kS)) \quad (\text{IV.55})$$

Finalement la commande par mode glissant dynamique peut s'écrire sous la forme :

$$u = u_0 + u_s = -G^{-1}(x)[F(x) + v(x) + kS] + u_s \quad (\text{IV.56})$$

avec :

$$\dot{u}_s = -\Lambda \text{sign}(G^{-1}(x)(\dot{S} + kS)) \quad (\text{IV.57})$$

Remarque :

- L'implantation de la commande u n'est possible sauf si la matrice $G(x)$ est inversible pour toute la trajectoire de x .
- Dans ce cas l'effet de la fonction sign est réduit après intégration de u_s

IV.5.2. Application de la commande par mode glissant dynamique à la MADA

Considérons le système réduit (IV.9) constitué de la partie rotorique, dont les sorties sont :

$$\begin{cases} y_1 = h_1(x) = i_{dr} \\ y_2 = h_2(x) = i_{qr} \end{cases} \quad (\text{IV.58})$$

Les surfaces de glissement sont choisies comme :

$$\begin{cases} S_3 = i_{dr} - i_{dr_{ref}} \\ S_4 = i_{qr} - i_{qr_{ref}} \end{cases} \quad (\text{IV.59})$$

Selon le développement détaillé dans la section précédente, la dynamique de la surface s'écrit comme suit :

$$\dot{S} = F(x) + v(x) + \Delta(x) + G(x)u \quad (\text{IV.60})$$

avec :

$$\Delta = [\Delta_3, \Delta_4]^T$$

$$|\Delta_3| \leq \bar{\Delta}_3 \text{ et } |\Delta_4| \leq \bar{\Delta}_4$$

La stabilité du système est assurée si la condition de glissement est vérifiée :

$$S^T \dot{S} < 0 \quad (\text{IV.61})$$

Ce qui donne :

$$\dot{S} = -kS \quad (\text{IV.62})$$

où :

$$k = \text{diag}[k_3, k_4], k_3, k_4 > 0$$

Remplaçons \dot{S} par son expression donnée par (IV.60) dans (IV.62), on obtient :

$$\dot{S} = F(x) + v(x) + \Delta(x) + G(x)u = -kS \quad (\text{IV.63})$$

De l'équation précédente, la commande peut prendre la forme suivante :

$$u^* = -G^{-1}(x)[F(x) + \Delta(x) + v(x) + kS] \quad (\text{IV.64})$$

Prenons :

$$u_0 = -G^{-1}(x)[F(x) + v(x) + kS] : \text{Commande nominale (incertitudes nulles) et}$$

$$\Delta_m = G^{-1}(x)\Delta$$

L'équation (IV.64) peut s'écrire sous la forme réduite suivante :

$$u^* = u_0 + \Delta_m \quad (\text{IV.65})$$

Cette forme de la commande est appelée idéale, parce que dans ce cas, les incertitudes sont supposées connues. En réalité, ces incertitudes sont inconnues, et l'implémentation de cette commande est impossible. Pour cela, notre but est de synthétiser une loi de commande u , qui s'approche vers u^* dans un temps fini, en se basant sur la commande par mode glissant.

La commande u proposée est :

$$u = u_0 + u_s \quad (\text{IV.66})$$

avec : u_s la partie de la commande à calculer, son rôle est d'approcher les incertitudes. Pour se faire, on définit une surface de glissement :

$$S_u = u - \dot{u} \quad (IV.67)$$

Soit la fonction de Lyapunov :

$$V(S_u) = \frac{1}{2} S_u^T S_u \quad (IV.68)$$

sa dérivée temporelle s'écrit comme suit :

$$\dot{V}(S_u) = S_u^T \dot{S}_u \quad (IV.69)$$

En remplaçant u et u^* par leur expression dans (IV.67), la surface de glissement s'écrit comme suit :

$$S_u = u_s + \Delta_m \quad (IV.70)$$

La dynamique de la surface prend la forme suivante :

$$\dot{S}_u = \dot{u}_s + \dot{\Delta}_m \quad (IV.71)$$

avec $\dot{\Delta}_m$ est supposée bornée, on peut écrire :

$$|\dot{\Delta}_{m1}| \leq \alpha_{m1}(x, u), |\dot{\Delta}_{m2}| \leq \alpha_{m2}(x, u) \quad (IV.72)$$

En remplaçant la dynamique de la surface dans la fonction de Lyapunov, on aura :

$$\dot{V} = S_u^T (\dot{u}_s + \dot{\Delta}_m) \quad (IV.73)$$

$$\dot{V} = S_u^T \dot{u}_s + S_u^T \dot{\Delta}_m$$

$$\dot{V} \leq S_{u3} \dot{u}_s + S_{u4} \dot{u}_s + |S_{u3}| |\dot{\Delta}_{m1}| + |S_{u4}| |\dot{\Delta}_{m2}|$$

$$\dot{V} \leq S_{u3} \dot{u}_s + S_{u4} \dot{u}_s + |S_{u3}| \alpha_3 + |S_{u4}| \alpha_4$$

Pour garantir une attractivité en temps fini, on choisit pour \dot{u}_s la forme suivante :

$$\dot{u}_s = -\Lambda \text{sign}(S_u) \quad (IV.74)$$

avec :

$$\Lambda = \text{diag}[\Lambda_3 \Lambda_4]$$

$$\text{sign}(s) = [\text{sign}(S_{u3}) \text{sign}(S_{u4})]^T$$

$$\dot{V} \leq -\Lambda_3 |S_{u3}| - \Lambda_4 |S_{u4}| + |S_{u3}| \alpha_3 + |S_{u4}| \alpha_4 \quad (IV.75)$$

$$\dot{V} \leq -(\Lambda_3 - \alpha_3)|S_{u3}| - (\Lambda_4 - \alpha_4)|S_{u4}|$$

Les coefficients Λ_3, Λ_4 doivent satisfaire les inégalités suivantes [20] :

$$\begin{cases} \Lambda_3 \geq \gamma_3 + \alpha_3 \\ \Lambda_4 \geq \gamma_4 + \alpha_4 \end{cases} \quad (\text{IV.76})$$

avec :

$$\gamma_3, \gamma_4 > 0$$

Ce qui donne :

$$\dot{V} \leq 0 \quad (\text{IV.77})$$

D'autre part, nous avons $S_u = u - u^*$, cette expression de S_u est mal connue, pour qu'on puisse l'utiliser dans la loi de commande, il faut trouver une relation entre S_u et des variable bien connues. Si on ajoute et on soustrait $G(x)u^*$ dans (IV.31), on obtient :

$$\dot{S} = F(x) + v(x) + \Delta(x) + G(x)u + G(x)u^* - G(x)u^* \quad (\text{IV.78})$$

En remplaçant u^* par son expression, on trouve :

$$\dot{S} = F(x) + G(x)u + v(x) + \Delta(x) + G(x)[-G^{-1}(x)(F(x) + v(x) + \Delta(x) + kS)] - G(x)u^* \quad (\text{IV.79})$$

$$\dot{S} = -kS + G(x)(u - u^*) \quad (\text{IV.80})$$

$$\dot{S} = -kS + G(x)S_u \quad (\text{IV.81})$$

On peut écrire S_u en fonction de la surface et de sa dérivée comme suit :

$$S_u = G^{-1}(x)(\dot{S} + kS) \quad (\text{IV.82})$$

Finalement, on peut écrire la loi de commande par mode glissant dynamique sous la forme suivante :

$$u = -G^{-1}(x)[F(x) + v(x) + kS] + u_s \quad (\text{IV.83})$$

avec :

$$\dot{u}_s = -\Lambda \text{sign}(G^{-1}(x)(\dot{S} + kS))$$

IV.5.2.1. Résultats de simulation

La commande par mode glissant dynamique a été appliquée sur le modèle de l'aérogénérateur donné au deuxième chapitre avec les paramètres suivants :

- Vitesse : $K_p = 20, K_i = 30$
- Courant I_{dr} : $K_{01} = 2500, K_{11} = 0.5$
- Courant I_{qr} : $K_{02} = 2500, K_{12} = 2$

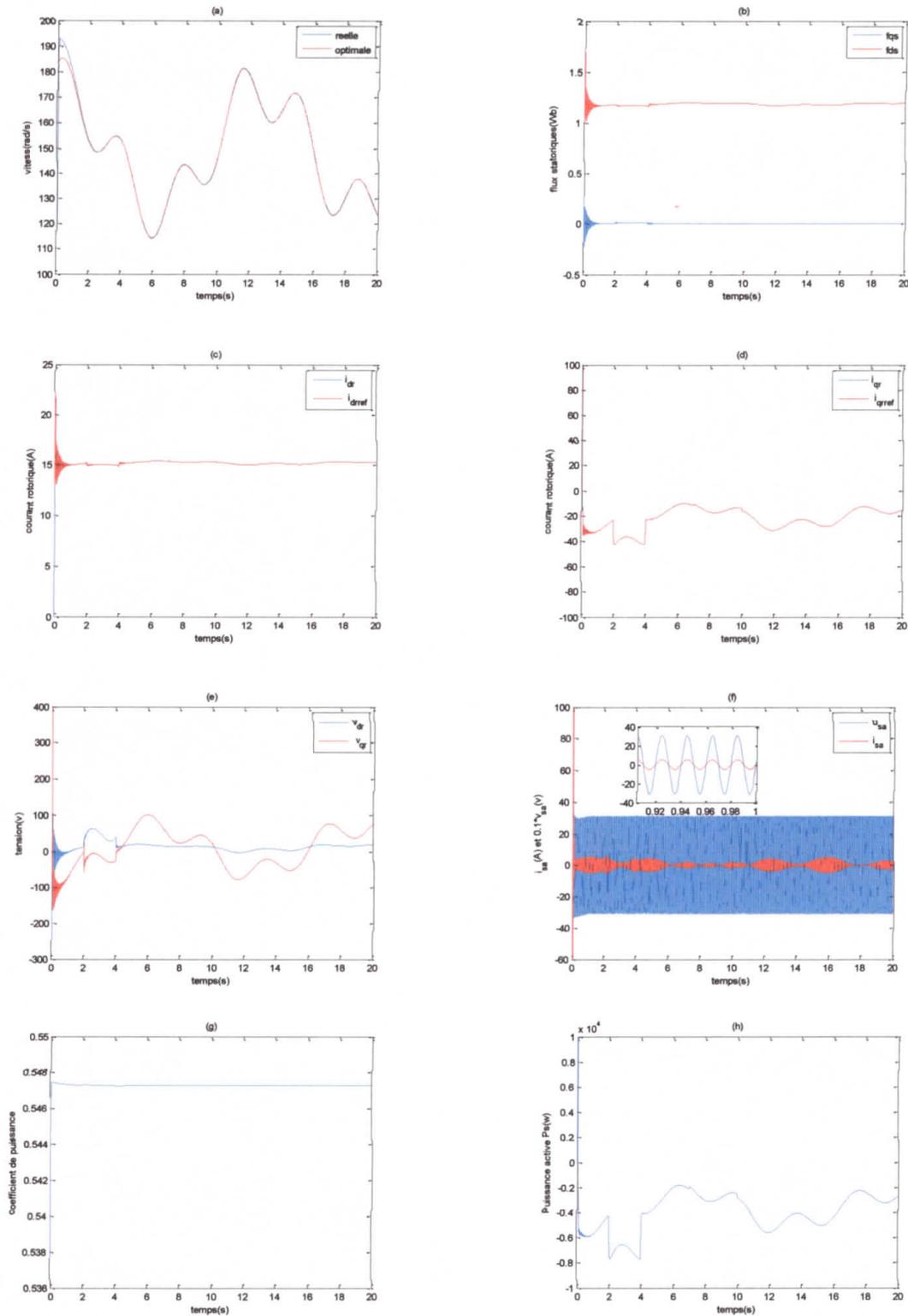


Figure IV.4 : Résultats de simulation de la commande par mode glissant dynamique

Pour le test de robustesse, on garde les mêmes conditions de fonctionnement données au troisième chapitre (section III.6.2).

Les résultats de simulation (figure IV.4) montrent l'efficacité de la stratégie de commande par mode glissant dynamique de l'aérogénérateur en termes de la réalisation des objectifs de commande à savoir :

- Orientation du flux statorique (découplage).
- Extraction maximale de puissance.
- Production sous un facteur de puissance statorique unitaire.
- Qualité des signaux de commande.

Les résultats obtenus montrent également la robustesse de cette commande face aux différentes perturbations pouvant affecter le système éolien et particulièrement la GADA (voir chapitre II). Comparativement à la commande par mode glissant conventionnel, on constate la réduction du phénomène du *chattering*, ceci est clairement montré sur les figures illustrant l'évolution des flux et des tensions de commande. D'où l'intérêt de cette stratégie qui réduit considérablement le *chattering* tout en gardant la puissance de la commande par mode glissant en terme de robustesse.

IV.6. Principe de la commande par backstepping

L'idée basique de la commande par backstepping consiste à décomposer un système non linéaire complexe à des sous-systèmes où le degré de chacun de ces derniers ne dépasse pas celui du système original [23]. La conception d'une loi de commande par backstepping est divisée en plusieurs étapes, dans chaque étape on calcule une commande virtuelle à partir de l'erreur de poursuite, qui sera utilisée dans l'étape suivante comme référence. On répète cette opération jusqu'à l'obtention de la commande qui sera appliquée au système. Il doit être assuré, dans chaque étape, que la dérivée de la fonction de Lyapunov (définie positive) est toujours négative [24].

IV.6.1. Synthèse de la loi de commande par backstepping

Afin d'illustrer le principe de la méthode de commande par backstepping, on considère le cas de système non linéaire d'ordre n de la forme :

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\
 \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_{n-1} &= f_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) + g_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})x_n
 \end{aligned} \tag{IV.84}$$

$$\dot{x}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) + g_n(x_1, x_2, \dots, x_n)u + \Delta(t, x)$$

où : $f_i(0) = 0, g_i \neq 0, i = 1, \dots, n$

- **Etape 1**

La 1^{ère} valeur d'erreur se définit par :

$$e_1 = x_1 - x_{1d} \quad (IV.85)$$

sa dérivée temporelle est de la forme suivante :

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} \quad (IV.86)$$

$$\dot{e}_1 = f_1 + g_1 x_2 - \dot{x}_{1d}$$

Pour un tel système on définit la fonction de Lyapunov :

$$V_1(e_1) = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (IV.87)$$

sa dérivée est :

$$\dot{V}_1 = e_1(f_1 + g_1 x_2 - \dot{x}_{1d}) \quad (IV.88)$$

Soit x_2 l'entrée de la commande virtuelle pour cette étape et x_{2d} sa valeur désirée. Un choix judicieux de x_2 rendra \dot{V}_1 négative, et assurera la stabilité de l'origine du sous-système, prenons comme valeur de x_2 la fonction x_{2d} , telle que :

$$f_1 + g_1 x_{2d} - \dot{x}_{1d} = -k_1 e_1 \quad (IV.89)$$

où : $k_1 > 0$.

Cela donne :

$$x_{2d} = \frac{1}{g_1} (-f_1 + \dot{x}_{1d} - k_1 e_1) \quad (IV.90)$$

Finalement, on aura :

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 \leq 0 \quad (IV.91)$$

Donc e_1 est globalement asymptotiquement stable.

- **Etape i**

La $i^{\text{ème}}$ valeur d'erreur se définit par :

$$e_i = x_i - x_{id} \quad (IV.92)$$

Les différentes fonctions de Lyapunov sont données par :

$$V_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^i e_j^2 \quad (IV.93)$$

La commande virtuelle $(x_{i+1})_d$ se définit par :

$$(x_{i+1})_d = \frac{1}{g_i} (-f_i + \dot{x}_{id} - k_i e_i - g_{i-1} e_{i-1}) \quad (\text{IV.94})$$

où : $i=1, \dots, n$

La dernière commande virtuelle représente la vraie commande u .

- **Etape n**

Définissons la dernière variable d'erreur comme suit :

$$e_n = x_n - x_{nd} \quad (\text{IV.95})$$

sa dérivée est de la forme :

$$\dot{e}_n = f_n + g_n u + \Delta - \dot{x}_{nd} \quad (\text{IV.96})$$

La loi de commande est donc de la forme

$$u = \frac{1}{g_n} (-f_n + \dot{x}_{nd} - k_n e_n - g_{n-1} e_{n-1} - \beta \text{sign}(e_n)) \quad (\text{IV.97})$$

où : $k_n > 0$

La fonction de Lyapunov globale est donnée par :

$$V_n = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n e_j^2 \quad (\text{IV.98})$$

sa dérivée temporelle est :

$$\dot{V}_n = -\sum_{j=1}^{n-1} k_j e_j^2 + g_{n-1} e_{n-1} e_n + e_n (-k_n e_n - g_{n-1} e_{n-1} - \beta \text{sign}(e_n) + \Delta) \quad (\text{IV.99})$$

$$= -\sum_{j=1}^{n-1} k_j e_j^2 - |e_n|(\beta - \Delta)$$

Si on choisit le paramètre β suffisamment grand de tel sorte que : $\beta \geq \Delta$

On trouve que :

$$\dot{V}_n \leq -\sum_{j=1}^n k_j e_j^2 \leq 0 \quad (\text{IV.100})$$

Ce qui explique la stabilité asymptotique globale du système en boucle fermée et la convergence des erreurs de poursuite vers zéro.

IV.6.2. Application de la commande par backstepping à la MADA

Considérons le modèle constitué par les quatre équations auxquelles nous ajoutons un terme représentant les incertitudes du modèle :

$$\begin{cases} \frac{d\Omega}{dt} = \frac{pM}{l_s J} (\Phi_{ds} i_{qr}) - \frac{f_r}{J} \Omega + \frac{c_g}{J} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r i_{qr} - (\omega_s - \omega) i_{dr} + \beta \omega \Phi_{ds} - \beta v_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} v_{qr} + \Delta_1 \\ \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \Phi_{ds} + \alpha_s M i_{dr} + v_{ds} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r i_{dr} - (\omega_s - \omega) i_{qr} + \alpha_s \beta \Phi_{ds} - \beta v_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} v_{dr} + \Delta_2 \end{cases} \quad (IV.101)$$

Prenons :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{d\Omega}{dt}, \quad \dot{x}_2 = \frac{di_{qr}}{dt}, \quad \dot{x}_3 = \frac{d\Phi_{ds}}{dt}, \quad \dot{x}_4 = \frac{di_{dr}}{dt} \\ a_1 &= \frac{pM}{l_s J}, \quad a_2 = \frac{f_r}{J}, \quad a_3 = \frac{c_g}{J}, \quad a_4 = \gamma_r, \quad a_5 = \omega_s, \quad a_6 = p, \quad a_7 = \beta p, \quad a_8 = \alpha_s, \\ a_9 &= \alpha_s M, \quad a_{10} = \alpha_s \beta, \quad b = \beta, \quad c = \frac{1}{\sigma_r} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 x_2 x_3 - a_2 x_1 + a_3 \\ \dot{x}_2 = -a_4 x_2 - a_5 x_4 + a_6 x_1 x_4 + a_7 x_1 x_3 - b v_{qs} + c v_{qr} + \Delta_1 \\ \dot{x}_3 = -a_8 x_3 + a_9 x_4 + v_{ds} \\ \dot{x}_4 = -a_4 x_4 + a_5 x_2 - a_6 x_1 x_2 + a_{10} x_3 + b v_{ds} + c v_{dr} + \Delta_2 \end{cases} \quad (IV.102)$$

Le degré relatif du système est égal à deux, donc la recherche de la commande par backstepping se fait en deux étapes.

- **Etape 1**

On définit les erreurs de poursuite de la vitesse de rotation et du flux :

$$\begin{aligned} e_1 &= x_{1d} - x_1 \\ e_3 &= x_{3d} - x_3 \end{aligned} \quad (IV.103)$$

leurs dérivées sont :

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{x}_{1d} - a_1 x_2 x_3 + a_2 x_1 - a_3 \\ \dot{e}_3 &= \dot{x}_{3d} + a_8 x_3 - a_9 x_4 - v_{ds} \end{aligned} \quad (IV.104)$$

On choisit la fonction de Lyapunov :

$$V = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_3^2 \quad (IV.105)$$

sa dérivée est :

$$\dot{V} = e_1 (\dot{x}_{1d} - a_1 x_2 x_3 + a_2 x_1 - a_3) + e_3 (\dot{x}_{3d} + a_8 x_3 - a_9 x_4 - v_{ds}) \quad (IV.107)$$

On utilise $x_2 x_3$ et x_4 comme commande virtuelle pour assurer la négativité de la fonction de Lyapunov.

leurs valeurs désirables sont :

$$\alpha_1 = (x_2 x_3)_d = \frac{1}{a_1} (\dot{x}_{1d} + a_2 x_1 - a_3 + k_1 e_1) \quad (\text{IV.108})$$

$$\alpha_3 = (x_4)_d = \frac{1}{a_9} (\dot{x}_{3d} + a_8 x_3 - v_{ds} + k_3 e_3)$$

Ce qui donne :

$$\dot{V} = -k_1 e_1^2 - k_3 e_3^2 \leq 0 \quad (\text{IV.109})$$

ou encore :

$$\dot{e}_1 = -k_1 e_1 \quad (\text{IV.110})$$

$$\dot{e}_3 = -k_3 e_3$$

avec :

$$k_1, k_3 > 0.$$

- **Etape 2**

On définit les erreurs de poursuite des courants rotoriques :

$$e_2 = \alpha_1 - x_2 x_3 \quad (\text{IV.111})$$

$$e_4 = \alpha_3 - x_4$$

Donc, l'équation (IV.104) devient :

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_{1d} - a_1(\alpha_1 - e_2) + a_2 x_1 - a_3 \quad (\text{IV.112})$$

$$\dot{e}_3 = \dot{x}_{3d} + a_8 x_3 - a_9(\alpha_3 - e_4) - v_{ds}$$

Ce qui donne :

$$\dot{e}_1 = -k_1 e_1 + a_1 e_2 \quad (\text{IV.113})$$

$$\dot{e}_3 = -k_3 e_3 + a_9 e_4$$

La dynamique des erreurs e_2 et e_4 devient :

$$\dot{e}_2 = \dot{\alpha}_1 - x_2 \dot{x}_3 - x_3 \dot{x}_2 \quad (\text{IV.114})$$

$$\dot{e}_4 = \dot{\alpha}_3 - \dot{x}_4$$

Pour des raisons de simplification, on écrit :

$$\dot{e}_2 = \varphi_1 - c x_3 v_{qr} \quad (\text{IV.115})$$

$$\dot{e}_4 = \varphi_2 - c v_{dr}$$

tel que :

$$\varphi_1 = \frac{1}{a_1} (\dot{x}_{1d} + a_2(a_1 x_2 x_3 - a_2 x_1 + a_3) - a_3 + k_1(-k_1 e_1 + a_1 e_2)) x_2 (-a_8 x_3 + a_9 x_4 + v_{ds}) - x_3 (-a_4 x_2 - a_5 x_4 + a_6 x_1 x_4 + a_7 x_1 x_3 - b v_{qs}) \quad (\text{IV.116})$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{a_9} (\dot{x}_{3d} + a_8(-a_8 x_3 + a_9 x_4 + v_{ds}) - v_{ds} + k_3(-k_3 e_3 + a_9 e_4)) + a_4 x_4 - a_5 x_2 + a_6 x_1 x_2 - a_{10} x_3 - b v_{ds}$$

Pour assurer la stabilité de e_2 et e_4 , on choisit la fonction de Lyapunov :

$$V_a = V + \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2}e_4^2 \quad (\text{IV.117})$$

sa dérivée est :

$$\dot{V}_a = e_1(-k_1e_1 + a_1e_2) + e_2(\varphi_1 - cx_3v_{qr}) + e_3(-k_3e_3 + a_9e_4) + e_4(\varphi_2 - cv_{dr}) \quad (\text{IV.118})$$

$$\dot{V}_a = -k_1e_1^2 - k_2e_2^2 - k_3e_3^2 - k_4e_4^2 + e_2(a_1e_1 + \varphi_1 - cx_3v_{qr} + k_2e_2) + e_4(a_9e_3 + \varphi_2 - c v_{dr} + k_4e_4)$$

avec :

$$k_2, k_4 > 0.$$

Les commandes v_{qr} et v_{dr} sont apparues, donc pour garantir la négativité de \dot{V}_a on les choisit de la forme :

$$v_{qr} = \frac{1}{cx_3}(\varphi_1 + a_1e_1 + k_2e_2 + \beta_1 \text{sign}(e_2)) \quad (\text{IV.119})$$

$$v_{dr} = \frac{1}{c}(\varphi_2 + a_9e_3 + k_4e_4 + \beta_2 \text{sign}(e_4))$$

avec :

$$x_3(0) \neq 0$$

$$\beta_1 > \bar{\Delta}_1 > \Delta_1$$

$$\beta_2 > \bar{\Delta}_2 > \Delta_2$$

Ce choix donne :

$$\dot{V}_a \leq -k_1e_1^2 - k_2e_2^2 - k_3e_3^2 - k_4e_4^2 \leq 0 \quad (\text{IV.120})$$

Ce qui garantit la poursuite des signaux de référence.

IV.6.2.1 Résultats de simulation

La commande par backstepping a été appliquée sur le modèle de l'aérogénérateur donné au deuxième chapitre avec les paramètres suivants :

- Vitesse : $K_p = 20, K_i = 30$
- $K_1 = 70, K_2 = 2600, K_3 = 100, K_4 = 2600$
- $\beta_1 = 10, \beta_2 = 10$

Pour tester la robustesse de la loi de commande, on garde les mêmes conditions de fonctionnement (profil de perturbation) montrés au troisième chapitre (section III.6.2).

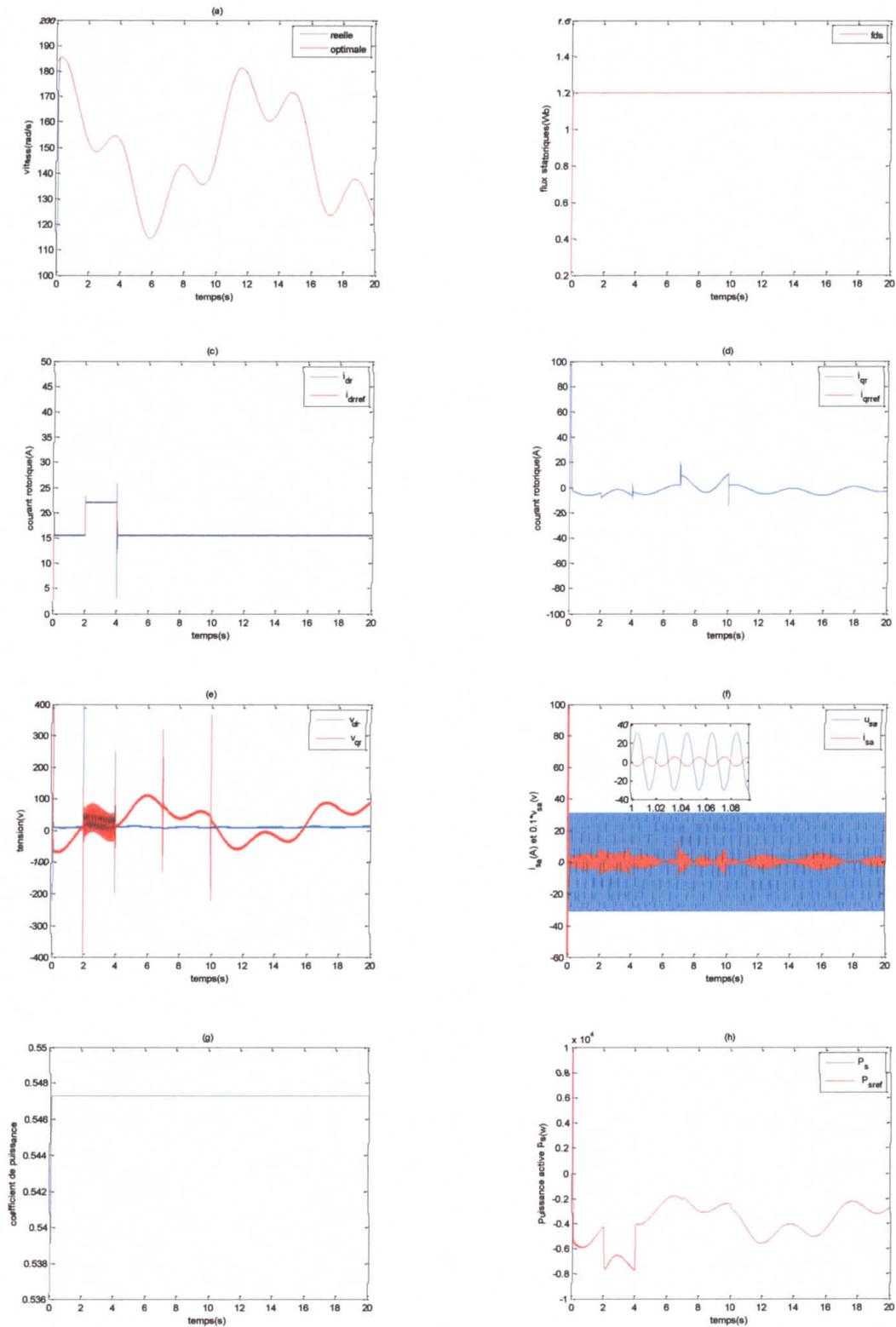


Figure IV.5 : Résultats de simulation de la commande par backstepping

L'analyse des résultats obtenus se fait en vérifiant la réalisation de nos objectifs de commande.

a- Production de puissance maximale(MPPT)

La figure (IV.5.a) montre une meilleure poursuite de vitesse dans le régime transitoire par rapport à la commande par mode glissant. Le coefficient de puissance (figure (IV.5.g)) confirme également que l'aérogénérateur donne une puissance active maximale au réseau durant la phase de perturbation, figure (IV.5.h).

b- Production avec un facteur de puissance statorique unitaire

La figure (IV.5.f) montre que le courant statorique et la tension statorique sont en opposition de phase ($\varphi = 180^\circ$), ceci confirme que le système éolien n'injecte que la puissance active.

c- Qualité des signaux de commande

La figure (IV.5.e) montre la présence du phénomène indésirable du *chattering* sur les signaux de commande.

Remarque :

Pour éviter le problème de *chattering* causé par l'utilisation de la fonction *sign*, nous allons utiliser une fonction lisse de tangente hyperbolique $\tanh(e) = \frac{e}{\varepsilon}$ avec les paramètres suivants :

- Vitesse : $K_p = 20, K_i = 30$
- $k_1 = 70, k_2 = 2600, k_3 = 100, k_4 = 2600$
- $\beta_1 = 250, \beta_2 = 250$
- $\varepsilon_1 = 0.32, \varepsilon_2 = 0.32$

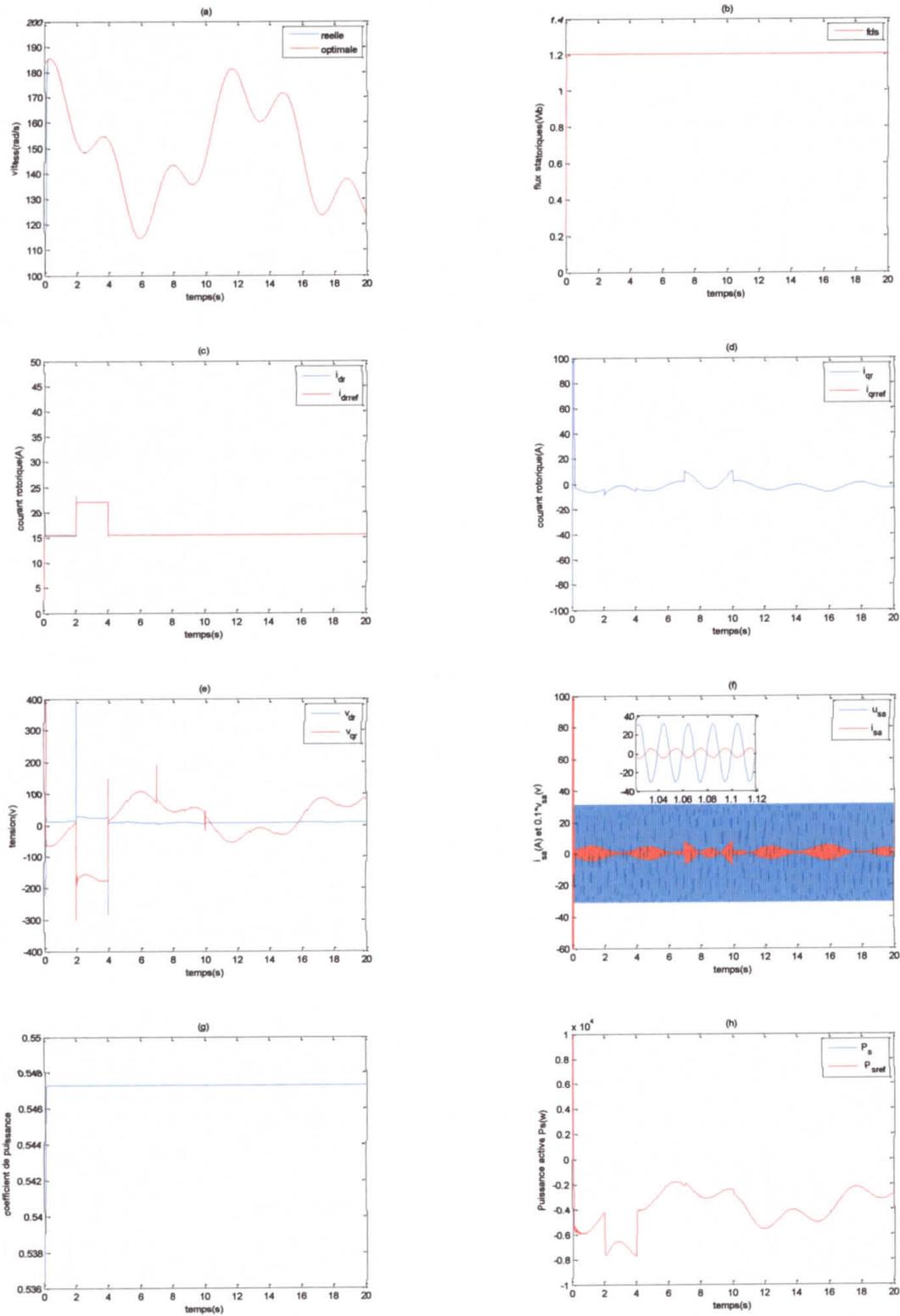


Figure IV.6 : Résultats de simulation de la commande par backstepping-avec la fonction \tanh

Les résultats de simulation (figure IV.6) montrent l'efficacité de la commande par backstepping avec le terme \tanh appliqué sur l'aérogénérateur en termes de la réalisation des objectifs de commande présenté précédemment.

Les résultats obtenus montrent également la robustesse de cette commande face aux différentes perturbations pouvant affecter le système éolien et particulièrement la GADA. Comparativement à la commande par backstepping (avec le terme *sign*), on constate l'élimination du phénomène du *chattering*.

IV.7. Commande par surface dynamique (DSC)

Le problème principal avec l'approche du backstepping est « l'explosion de complexité » causée par la dérivation des commandes virtuelles [25,26]. C'est-à-dire, la complexité de la conception de la commande augmente lorsque l'ordre du système augmente. La commande par surface dynamique a été développée pour pallier ce problème.

IV.7.1. Commande par DSC avec des filtres non linéaires par mode glissant

Dans cette section, nous allons synthétiser une commande par surface dynamique en utilisant des filtres non linéaires par mode glissant. Considérons le même système présenté par l'équation (IV.84).

La procédure de conception s'effectue en n étapes comme suit :

- Etape 1

Nous définissons la première surface :

$$S_1 = x_1 - x_{1d} \quad (IV.121)$$

dont la dérivée temporelle est :

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} \\ &= x_2 + f_1(x_1) - \dot{x}_{1d} \end{aligned} \quad (IV.122)$$

Nous choisissons x_{2c} pour que S_1 tend vers zéro :

$$x_{2c} = -k_1 S_1 - f_1(x_1) + \dot{x}_{1d} \quad (IV.123)$$

avec : $k_1 > 0$.

Pour éviter la dérivation de la commande virtuelle (i.e. \dot{x}_{2c}), on introduit une nouvelle variable x_{2d} obtenu par le filtrage de la commande x_{2c} . Dans cette section on utilise un filtre non linéaire par mode glissant avec une constante de temps $\tau_2 > 0$ [27] :

$$\tau_2 \dot{x}_{2d} + x_{2d} = x_{2c} - \bar{\alpha} \tau_2 \text{sign}(x_{2d} - x_{2c}) \quad (IV.124)$$

avec :

$$x_{2d}(0) = x_{2c}(0)$$

L'erreur du filtre est donnée par :

$$E_2 = x_{2d} - x_{2c} \quad (IV.125)$$



Prenons en compte la deuxième surface $S_2 = x_2 - x_{2d}$, on trouve que :

$$x_2 = S_2 + E_2 + x_{2c} \quad (\text{IV.126})$$

En remplaçant les équations (IV.123) et (IV.126) dans (IV.122), on trouve :

$$\dot{S}_1 = -k_1 S_1 + S_2 + E_2 \quad (\text{IV.127})$$

- **Etape i ($i=2, \dots, n-1$)**

Nous définissons la $i^{\text{ème}}$ surface :

$$S_i = x_i - x_{id} \quad (\text{IV.128})$$

dont la dérivée temporelle est :

$$\begin{aligned} \dot{S}_i &= \dot{x}_i - \dot{x}_{id} \\ &= x_{i+1} + f_i(x_i) - \dot{x}_{id} \end{aligned} \quad (\text{IV.129})$$

Nous choisissons $x_{(i+1)c}$ comme suit :

$$x_{(i+1)c} = -S_{i-1} - k_i S_i - f_i(x_i) + \dot{x}_{id} \quad (\text{IV.130})$$

avec :

$$k_i > 0.$$

Des filtres du premier ordre avec des constantes de temps $\tau_{i+1} > 0$, sont utilisés pour éliminer le problème d'explosion de la complexité :

$$\tau_{i+1} \dot{x}_{(i+1)d} + x_{(i+1)d} = x_{(i+1)c} - \bar{\alpha} \tau_{i+1} \text{sign}(x_{(i+1)d} - x_{(i+1)c}) \quad (\text{IV.131})$$

avec :

$$x_{(i+1)d}(0) = x_{(i+1)c}(0)$$

On définit l'erreur du filtre comme suit :

$$E_{i+1} = x_{(i+1)d} - x_{(i+1)c} \quad (\text{IV.132})$$

sa dérivée temporelle est :

$$\dot{E}_{i+1} = \dot{x}_{(i+1)d} - \dot{x}_{(i+1)c} = -\frac{1}{\tau_{i+1}} E_{i+1} - \bar{\alpha} \text{sign}(E_{i+1}) - \dot{x}_{(i+1)c} \quad (\text{IV.133})$$

Considérons la $i^{\text{ème}} + 1$ surface $S_{i+1} = x_{i+1} - x_{(i+1)d}$, on trouve que :

$$x_{i+1} = S_{i+1} + E_{i+1} + x_{(i+1)c} \quad (\text{IV.134})$$

- **Etape n**

La dérivée temporelle de la $n^{\text{ème}}$ surface $S_n = x_n - x_{nd}$:

$$\dot{S}_n = \dot{x}_n - \dot{x}_{nd} \quad (\text{IV.135})$$

$$= f_n(x) + g(x)u + \Delta - \dot{x}_{nd}$$

Pour que S_n tend vers zéro, nous choisissons la loi de commande u suivante :

$$u = \frac{1}{g(x)} \left(-S_{n-1} - k_n - f(x) + \dot{x}_{nd} - \alpha \text{sign}(E_n) - k \text{sign}(s_n) \right) \quad (\text{IV.136})$$

L'erreur du filtre est définie par :

$$E_n = x_{nd} - x_{nc} \quad (\text{IV.137})$$

dont la dérivée temporelle est :

$$\dot{E}_n = \dot{x}_{nd} - \dot{x}_{nc} = -\frac{1}{\tau_n} E_n - \alpha \text{sign}(E_n) - \dot{x}_{nc} \quad (\text{IV.138})$$

En remplaçant (IV.136) dans (IV.135), on trouve que :

$$\dot{S}_n = -S_{n-1} - k_n S_n - k \text{sign}(S_n) + \Delta_n \quad (\text{IV.139})$$

La fonction candidate de Lyapunov est donnée par :

$$V = \sum_{i=1}^n V_{s_i} + \sum_{i=2}^n V_{E_i} \quad (\text{IV.140})$$

avec :

$$V_{s_i} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n S_i^2, \quad V_{x_i} = \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n E_i^2 \quad (\text{IV.141})$$

sa dérivée temporelle est :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{i=1}^{n-1} S_i \dot{S}_i + S_n \dot{S}_n + \sum_{i=2}^n E_i \dot{E}_i \quad (\text{IV.142}) \\ &= \sum_{i=1}^{n-1} (S_i (-S_{i-1} - k_i S_i + S_{i+1} + E_{i+1})) + S_n (-S_{n-1} - k_n S_n - \lambda \text{sign}(S_n) + \Delta) + \\ &\quad \sum_{i=2}^n E_i \left(-\frac{1}{\tau_i} E_i - \bar{\alpha}_i \text{sign}(E_i) - \dot{x}_{ic} \right) \\ &\leq \sum_{i=1}^{n-1} \left(-\left(k_i - \frac{1}{2}\right) S_i^2 + \frac{1}{2} E_{i+1}^2 - S_i S_{i-1} + S_i S_{i+1} \right) - k_n S_n^2 - S_n S_{n-1} - \\ &\quad |S_n|(\lambda - \Delta) + \sum_{i=2}^n -\frac{1}{\tau_i} E_i^2 - |E_i|(\bar{\alpha}_i - M_i) \end{aligned}$$

Si on suppose que : $|\Delta| \leq k$ et $M_i \leq \alpha_i$ il en résulte que :

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \sum_{i=1}^{n-1} \left(-\left(k_i - \frac{1}{2}\right) S_i^2 + \frac{1}{2} E_{i+1}^2 - S_i S_{i-1} + S_i S_{i+1} \right) - k_n S_n^2 - S_n S_{n-1} + \\ &\quad \sum_{i=2}^n -\frac{1}{\tau_i} E_i^2 \quad (\text{IV.143}) \\ &\leq -\sum_{i=1}^{n-1} \left(k_i - \frac{1}{2}\right) S_i^2 - k_n S_n^2 - \sum_{i=2}^n \left(\frac{1}{\tau_i} - 1\right) E_i^2 \\ &\leq -\gamma V \end{aligned}$$

avec :

$$\gamma = \min \left[(2k_1 - 1), (2k_2 - 1), \dots, (2k_{n-1} - 1), 2k_n, 2\left(\frac{1}{\tau_2} - 1\right), 2\left(\frac{1}{\tau_3} - 1\right), \dots, 2\left(\frac{1}{\tau_n} - 1\right) \right]$$

Ce qui explique la stabilité exponentielle globale du système en BF ainsi que la convergence asymptotique des surfaces vers zéro.

IV.7.2. Application de la commande par surface dynamique à la MADA

Considérons le même système présenté par l'équation (IV.101).

- **Etape 1**

Définissons les erreurs de poursuite de la vitesse de rotation et du flux :

$$S_1 = x_1 - x_{1d} \quad (\text{IV.144})$$

$$S_3 = x_3 - x_{3d}$$

leurs dérivées temporelles sont :

$$\dot{S}_1 = -\dot{x}_{1d} - a_1 x_2 x_3 - a_2 x_1 - a_3 \quad (\text{IV.145})$$

$$\dot{S}_3 = -\dot{x}_{3d} - a_8 x_3 + a_9 x_4 + v_{ds}$$

Choisissons $(x_2 x_3)_c$ et $(x_4)_c$ pour que s_1 et s_3 tend vers zéro avec :

$$\alpha_1 = (x_2 x_3)_c = \frac{1}{a_1} (\dot{x}_{1d} + a_2 x_1 - a_3 - k_1 S_1) \quad (\text{IV.146})$$

$$\alpha_3 = (x_4)_c = \frac{1}{a_9} (\dot{x}_{3d} + a_8 x_3 - v_{ds} - k_3 S_3)$$

Utilisons deux filtres non linéaires par mode glissant :

$$\tau_1 \dot{\alpha}_{1f} + \alpha_{1f} = \alpha_1 - \bar{\alpha}_1 \tau_1 \text{sing}(\alpha_{1f} - \alpha_1) - \tau_1 S_1 \quad (\text{IV.147})$$

$$\tau_3 \dot{\alpha}_{3f} + \alpha_{3f} = \alpha_3 - \bar{\alpha}_3 \tau_3 \text{sing}(\alpha_{3f} - \alpha_3) - \tau_3 S_3$$

- **Etape 2**

Définissons les erreurs de poursuite des courants rotoriques :

$$S_2 = x_2 x_3 - \alpha_{1f} \quad (\text{IV.148})$$

$$S_4 = x_4 - \alpha_{3f}$$

leurs dérivées temporelles sont :

$$\dot{S}_2 = x_2 \dot{x}_3 + \dot{x}_2 x_3 - \dot{\alpha}_{1f} \quad (\text{IV.149})$$

$$\dot{S}_4 = \dot{x}_4 - \dot{\alpha}_{3f}$$

Pour des raisons de simplification, on écrit :

$$\dot{S}_2 = \dot{\varphi}_1 - \dot{\alpha}_{1f} + cx_3v_{qr} \quad (\text{IV.150})$$

$$\dot{S}_4 = \dot{\varphi}_2 - \dot{\alpha}_{3f} + cv_{dr}$$

tel que :

$$\dot{\varphi}_1 = x_2(-a_8x_3 + a_9x_4 + v_{ds}) + x_3(-a_4x_2 - a_5x_4 + a_6x_1x_4 + a_7x_1x_3 - bv_{qs})$$

$$\dot{\varphi}_2 = -a_4x_4 + a_5x_2 - a_6x_1x_2 + a_{10}x_3 + bv_{ds}$$

Définissons les erreurs du filtre par :

$$E_1 = \alpha_{1f} - \alpha_1 \quad (\text{IV.151})$$

$$E_3 = \alpha_{3f} - \alpha_3$$

Ce qui donne :

$$x_2x_3 = S_2 + E_1 + \alpha_1 \quad (\text{IV.152})$$

$$x_4 = S_4 + E_3 + \alpha_3$$

Prenons les lois de commande v_{qr} et v_{dr} comme suit :

$$v_{qr} = \frac{1}{cx_3} (\dot{\varphi}_1 - a_1S_1 - k_2S_2 - \frac{1}{\tau_1}E_1 - \bar{a}_1\text{sing}(E_1) - \lambda_1\text{sing}(S_2)) \quad (\text{IV.153})$$

$$v_{dr} = \frac{1}{c} (\dot{\varphi}_2 - a_9S_3 - k_4S_4 - \frac{1}{\tau_3}E_3 - \bar{a}_3\text{sing}(E_3) - \lambda_2\text{sing}(S_4))$$

- Analyse de stabilité

La fonction candidate de Lyapunov est donnée par :

$$V = \sum_{i=1}^n V_{S_i} + V_{E_1} + V_{E_3} \quad (\text{IV.154})$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n S_i^2 + \frac{1}{2} (E_1^2 + E_3^2)$$

sa dérivée temporelle est définie par :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S_1\dot{S}_1 + S_2\dot{S}_2 + S_3\dot{S}_3 + S_4\dot{S}_4 + E_1\dot{E}_1 + E_3\dot{E}_3 \quad (\text{IV.155}) \\ &= S_1(-k_1S_1 + S_2 + E_2) + S_3(-k_3S_3 + S_4 + E_3) + S_2(-S_1 - k_2S_2 - \\ &\lambda_1\text{sign}(S_2) + \Delta_1) + S_4(-S_3 - k_4S_4 - \lambda_2\text{sign}(S_4) + \Delta_2) + E_1\left(-\frac{1}{\tau_1}E_1 - \right. \\ &\left. \bar{a}_1\text{sign}(E_1) - \dot{\alpha}_1\right) + E_3\left(-\frac{1}{\tau_3}E_3 - \bar{a}_3\text{sign}(E_3) - \dot{\alpha}_3\right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -k_1 S_1^2 + S_1 S_2 + |S_1| |E_1| - k_3 S_3^2 + S_3 S_4 + |S_3| |E_3| - k_2 S_2^2 - S_1 S_2 + \\
&\lambda_1 |S_2| + \Delta_1 S_2 - k_4 S_4^2 - S_3 S_4 + \lambda_2 |S_4| + \Delta_2 S_4 - \frac{1}{\tau_1} E_1^2 - \bar{\alpha}_1 |E_1| + |E_1 \dot{\alpha}_1| - \\
&\quad \frac{1}{\tau_3} E_3^2 - \bar{\alpha}_3 |E_3| + |E_3 \dot{\alpha}_3| \\
&\leq -\left(k_1 - \frac{1}{2}\right) S_1^2 + \frac{1}{2} E_1^2 + S_1 S_2 - \left(k_3 - \frac{1}{2}\right) S_3^2 + \frac{1}{2} E_3^2 + S_3 S_4 - k_2 S_2^2 - S_1 S_2 - \\
&\quad |S_2| (\lambda_1 - \Delta_1) - k_4 S_4^2 - S_3 S_4 - |S_4| (\lambda_2 - \Delta_2) - \frac{1}{\tau_1} E_1^2 - |E_1| (\bar{\alpha}_1 - M_1) - \\
&\quad \frac{1}{\tau_3} E_3^2 - |E_3| (\bar{\alpha}_3 - M_2)
\end{aligned}$$

Si on suppose que : $|\Delta_1| \leq \lambda_1$, $|\Delta_2| \leq \lambda_2$ et $M_1 \leq \bar{\alpha}_1$, $M_2 \leq \bar{\alpha}_3$ il en résulte que :

$$\begin{aligned}
&\leq -\left(k_1 - \frac{1}{2}\right) S_1^2 - \left(k_3 - \frac{1}{2}\right) S_3^2 - k_2 S_2^2 - k_4 S_4^2 - \left(\frac{1}{\tau_1} - 1\right) E_1^2 - \left(\frac{1}{\tau_3} - 1\right) E_3^2 \quad (\text{IV.156}) \\
&\leq -\gamma V
\end{aligned}$$

avec :

$$\gamma = \min[(2k_1 - 1), (2k_2 - 1), 2\left(\frac{1}{\tau_1} - 1\right), 2\left(\frac{1}{\tau_3} - 1\right)]$$

IV.7.2.1 Résultats de simulation

La commande par surface dynamique a été appliquée sur le modèle de l'aérogénérateur donné au deuxième chapitre avec les paramètres suivants :

- Vitesse : $K_p = 20, K_i = 30$
- $k_1 = 300, k_2 = 1550, k_3 = 500, k_4 = 2000$
- $\bar{\alpha}_1 = 30, \bar{\alpha}_3 = 30$
- $\tau_1 = 10, \tau_3 = 10$
- $\lambda_1 = 5, \lambda_2 = 5$

La robustesse de cette loi de commande a été testée en gardant un profil de perturbation identique à celui appliqué précédemment (pour les autres lois de commande).

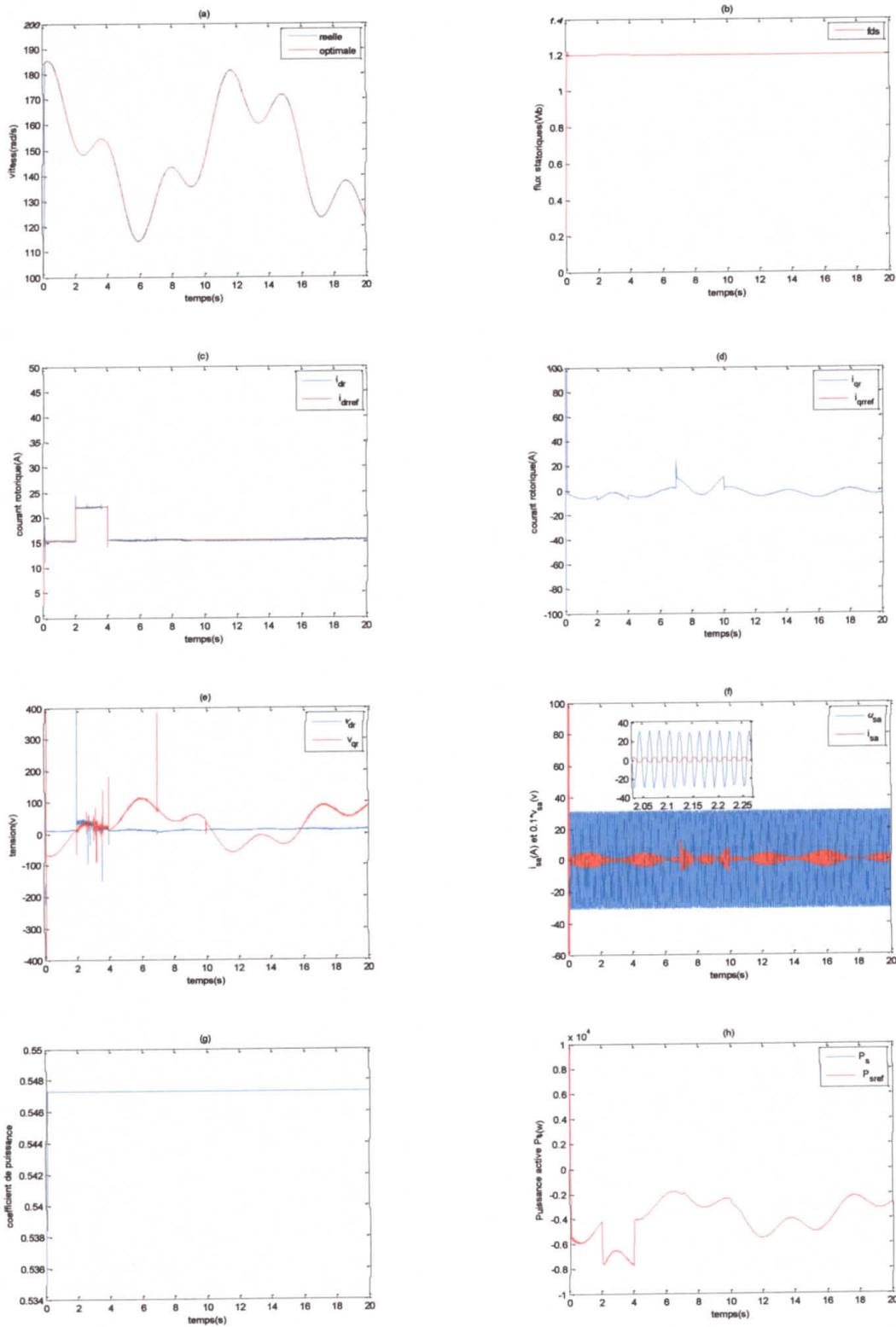


Figure IV.7 : Résultats de simulation de la commande par surface dynamique

L'analyse des résultats obtenus se fait en vérifiant la réalisation de nos objectifs de commande.

a- Production de puissance maximale(MPPT)

La figure (IV.7.a) montre une meilleure poursuite de vitesse dans le régime transitoire par rapport à la commande par mode glissant. Le coefficient de puissance (figure (IV.7.g)) confirme également que l'aérogénérateur fournit une puissance active maximale au réseau durant la phase de perturbation, figure (IV.7.h).

b- Production avec un facteur de puissance statorique unitaire

La figure (IV.7.f) montre que le courant statorique et la tension statorique sont en opposition de phase ($\varphi = 180^\circ$), donc ceci confirme que le système éolien n'injecte que la puissance active.

c- Qualité des signaux de commande

La figure (IV.7.e) montre que les signaux de commande par surface dynamique sont plus ou moins lisse et présentent moins de *chattering* par rapport à la commande par mode glissant.

Remarque :

Pour éviter le problème de *chattering* causé par l'utilisation de la fonction *sign*, nous allons utiliser une fonction lisse de tangente hyperbolique $K \tanh(e) = \frac{e}{\varepsilon}$ avec les paramètres suivants :

- Vitesse : $K_p = 20, K_i = 30$
- $k_1 = 300, k_2 = 1550, k_3 = 500, k_4 = 2000$
- $\tau_1 = 10, \tau_3 = 10$
- $K_1 = 30, K_2 = 750$
- $K_3 = 30, K_4 = 5$
- $\varepsilon_1 = 0.5, \varepsilon_2 = 0.5$
- $\varepsilon_3 = 0.5, \varepsilon_4 = 0.5$

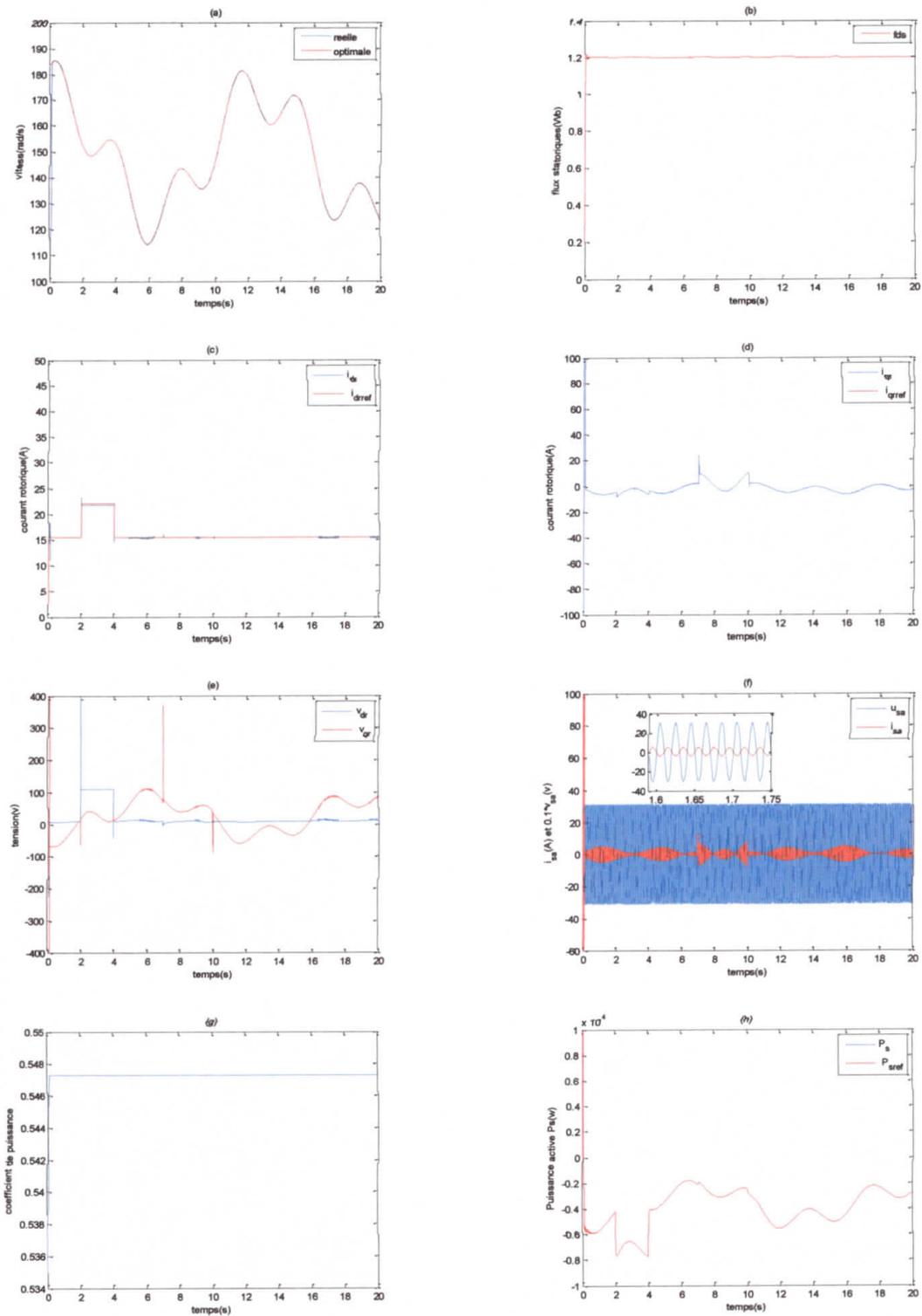


Figure IV.8 : Résultats de simulation de la DSC-avec la fonction \tanh

Les résultats de simulation (figure IV.8) montrent l'efficacité de la commande par surface dynamique avec le terme \tanh appliqué sur l'aérogénérateur en termes de la réalisation des objectifs de commande présentés précédemment.

Les résultats obtenus montrent également la robustesse de cette commande face aux différentes perturbations pouvant affecter le système éolien et particulièrement la GADA. Comparativement à la commande par surface dynamique (avec le terme $sign(.)$), on constate la disparition du phénomène du *chattering*.

IV.8. Étude comparative

Le tableau donné ci-dessous montre une comparaison entre les différentes lois de commande présentées dans ce travail.

Commande	Type	Synthèse (simplicité/ complexité)	Robustesse face aux perturbations	Qualité des signaux de commande
Vectorielle	Linéaire	Simple	Non	Bonne
Mode glissant	Non linéaire	Moyenne	Oui	Mauvaise
Mode glissant dynamique	Non linéaire	Moyenne	Oui	Bonne
Backstepping (avec le terme $\tanh(.)$)	Non linéaire	Moyenne	Oui	Bonne
DSC (avec le terme $\tanh(.)$)	Non linéaire	Moins complexe que les autres	Oui	Bonne

Tableau IV.1 : Étude comparative entre les lois de commandes présentées.

IV.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la commande non linéaire d'un aérogénérateur à base de la MADA. Pour cela, nous avons présenté quatre types de commande, à savoir la commande par modes glissants, la commande par modes glissants dynamique, la commande par backstepping et enfin la commande par surface dynamique. Les performances obtenues avec la commande par modes glissants sont satisfaisantes, les objectifs de commande sont atteints en terme de maximisation de la puissance produite, toutefois, il faut noter la dégradation de la qualité des signaux de commande (phénomène indésirable du *chattering* dû à la présence de la fonction $sign(.)$ dans la loi de commande).

Dans le but de résoudre ce problème tout en gardant les performances de la commande par modes glissant concernant la robustesse, la commande par modes glissants dynamique a été introduite, les résultats obtenus ont montré que cette technique apporte une amélioration conséquente en termes de réduction du *chattering*. Ensuite, dans le but d'améliorer davantage les performances de notre système, nous avons opté pour la commande par backstepping avec un terme robuste. Afin d'éviter la complexité de la commande par backstepping et d'avoir de meilleur performances, nous avons appliqué la commande par surface dynamique. Les résultats de simulation ont montré clairement que les performances de ces trois dernières techniques sont quasiment pareilles et sont nettement meilleurs que celles obtenus avec la commande par mode glissant. Toutefois, on note qu'au niveau de simplicité de synthèse, la dernière commande (DSC) se distingue. Le problème du *chattering* dû à la présence du terme $sign(.)$ dans la loi de commande a été traité en remplaçant la fonction $sign(.)$ par le terme $tanh(.)$.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail a été consacré pour l'étude d'un système éolien à base de la machine asynchrone à double alimentation. Notre choix s'est porté sur cette machine vue les avantages qu'elle offre en termes de production de puissance et le fonctionnement en vitesse variable.

Une étude de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne constituée de la turbine, multiplicateur de vitesse et la MADA a été réalisée en vue de l'élaboration d'une stratégie de commande permettant l'extraction du maximum de la puissance du vent.

Ainsi cinq techniques de commande ont été appliquées. Une commande de type linéaire s'agit de la commande vectorielle à base de régulateurs PI classiques, les résultats de simulation ont montré que cette technique s'adapte à un certain degré, c.-à-d., en absence de perturbations. Cependant, en présence d'incertitudes et de perturbations pouvant affecter le système, les performances se dégradent considérablement. D'où le besoin à des méthodes de commande robuste de type non linéaire.

La première commande non linéaire appliquée est la commande par modes glissants. La stabilité du système sous cette loi de commande est théoriquement prouvée par la méthode de Lyapunov. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de cette méthode en termes de robustesse et la réalisation des objectifs de commande. Toutefois, cette commande souffre du problème de *chattering* pouvant limiter son application réelle.

Afin de surmonter l'inconvénient de la commande par modes glissants classique, la commande par modes glissants dynamique a été introduite pour résoudre ce problème. Les résultats obtenus ont montré que cette technique apporte une amélioration conséquente en termes de réduction du *chattering*.

Cependant, visant à améliorer davantage les performances de notre système, nous avons présenté une troisième technique de commande non linéaire, il s'agit de la commande par backstepping avec un terme robuste.

Afin d'éviter la complexité de la commande par backstepping et d'avoir de meilleures performances, nous avons introduit la commande par surface dynamique.

Toutefois, le problème de *chattering* apparu lors de la synthèse des deux dernières commandes a été traité en remplaçant le terme $sign(.)$ par le terme $tanh(.)$. Les résultats de



Conclusion générale

simulation ont montré l'efficacité de ces approches de commande en termes de réalisations des objectifs de commande.

Enfin, une étude comparative entre les commandes réalisées dans ce travail a été présentée.

A titre de perspective de ce travail, nous pouvons suggérer pour des travaux ultérieurs :

- La synthèse d'une loi de commande non linéaire à base d'observateur de vitesse et/ou de flux pour le système éolien.
- Validation expérimentale des stratégies de commande présentées dans ce travail sur un banc expérimental.

Annexe

Annexe

Transformation Triphasée –Biphasée

1.1. Changement de repère

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations électriques et mécaniques plus simple à exploiter.

1.2. Rappel sur la transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé continu.

1.3. Passage du repère triphasé au repère de Park

- **Le passage de Concordia (repère triphasé [a,b,c] – biphasé [α, β])**

La transformation utilisée pour calculer les composantes (α, β) dans le repère fixe d'une grandeur triphasée telle que $\underline{X} = (X_a, X_b, X_c)^T$ est:

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

La transformation inverse peut donc être obtenue et s'écrit :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{2}}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{2}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

La transformation de CONCORDIA est un cas particulier de la transformation modifiée de Park,

- **Repère fixe (α, β)– Repère tournant (d, q)**

La transformation des grandeurs biphasées du repère fixe (α, β) vers le repère tournant (d, q) s'exprime par :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

θ : est l'angle entre le repère biphasé fixe et le repère tournant (d, q)

La transformation inverse qui permet de passer de variables exprimées dans le repère biphasé (d, q) vers des variables exprimées dans le repère (α, β) est :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

1.4. Choix du référentiel

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels.

Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique :

1.4.1. Référentiel lié au stator

Dans ce cas les repères (d, q) sur le stator. Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (α, β) . Ce système est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques.

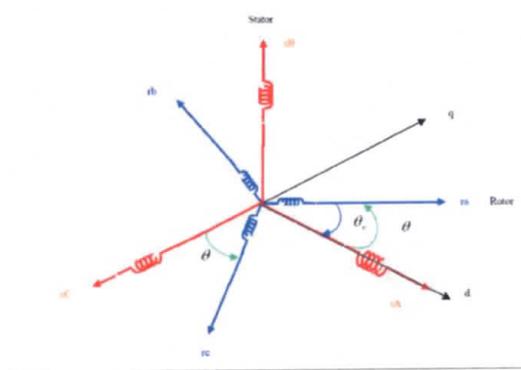


Figure 1 : Les repères (d, q) liés au stator.

$$\theta_s = 0$$

et

$$\theta_s = \theta_r + \theta \Rightarrow \theta_r = -\theta$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega_r$$

1.4.2. Référentiel lié au rotor

Dans ce cas les repères (d, q) sur le rotor, le système d'axes (d, q) est immobile par rapport au rotor et tourne avec la vitesse $\omega = \omega_s$

Ce système d'axes est utile pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor.

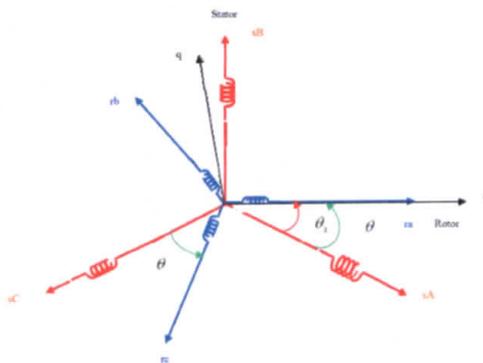


Figure 2 : Les repères (d, q) liés au rotor.

$$\theta_r = 0$$

$$\theta_s = \theta_r + \theta \Rightarrow \theta_s = \theta$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega_s$$

1.4.3. Référentiel lié au champ tournant

Dans ce cas les repères (d, q) sur le champ tournant. Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (X, Y), il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique,

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$$

$$\theta_s = \theta_r + \theta \Rightarrow \theta_r = \theta_s - \theta$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta}{dt} = \omega_s - \omega = g\omega_s$$

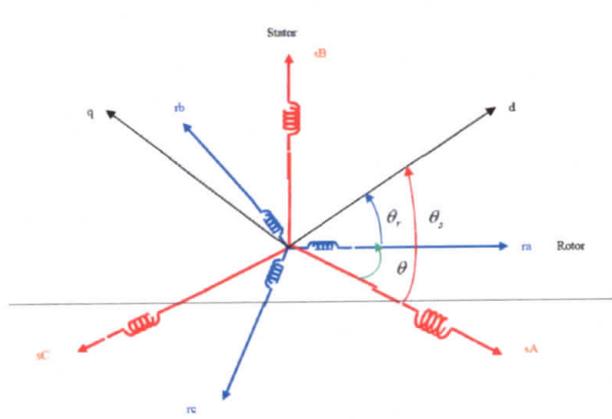


Figure.3 : Les repères (d, q) liés au champ tournant.

A.2. Paramètre de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation « GADA »

Paramètres de la MADA	
Puissance p_e	7.5 kW
Résistances statorique R_s	0.455 Ω
Résistances rotorique R_r	0.62 Ω
Inductance statorique L_s	0.084 H
Inductance rotorique L_r	0.081 H
Inductance mutuelle M	0.078 H
Moment d'inertie J	0.3125 Kg. m ²
Nombre de pair de pôles P	2
Coefficient de frottements f	0.00673 N. m. s/rad
Fréquence nominale f_n	50 Hz
La vitesse nominale Ω_n	157 Rad/s

A.3. Paramètres de l'éolienne

	paramètres de La turbine	
Puissance (KW)		7.5 KW
Nombre de pales		3
Diamètre de la turbine		3 m
Gain de multiplicateur		8

Références bibliographiques

Références

- [1] site internet : la-tour-solaire.e-monsite.com
- [2] site internet : www.lenergeek.com
- [3] N. Kasbadji Merzouk, “ Evaluation du Gisement Energétique Eolien Contribution a la Détermination du Profil Vertical de la Vitesse du Vent en Algérie ”, Thèse de Doctorat en Physique Energétique et Matériaux, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2006.
- [4] M.K Touati, “Étude D’une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau électrique”, thèse de Magister en électrotechnique, université de Batna, 2015
- [5] B.Beltran, “ Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à Base de génératrice asynchrones double alimentation : du mode glissant classique au mode glissant d’ordre supérieur ”, Sciences de l’ingénieur, Université de Bretagne occidentale - Brest, 2010
- [6] K.Boufas et S.Labdai, “ contribution à l’étude d’un système de conversion d’énergie éolienne basé sur MADA ‘ commande et optimisation’ ”, Mémoire de PFE en automatique et informatique industrielle, université de Jijel, 2014
- [7] N.Benouerkhou et S.Bensadi, “ alimentation et commande d’une machine asynchrone à double alimentation utilisé pour la production de l’énergie éolienne ”, Ingénieur d’état en électrotechnique, université de Jijel, 2010
- [8] S. Drid, “ Contribution à la Modélisation et la Commande Robuste d’une Machine à Induction Double Alimentation a Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d’Alimentation, Théorie et Expérimentation ”, Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, 2005.
- [9] T. Belkacem, “Modélisation et Commande Floue Optimise d’une Génératrice à Double Alimentation Application a un System Eolien à Vitesse Variable ”, Thèse de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, 2010
- [10] P.E. Vidal, “Commande Non-Linéaire d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation ” Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004
- [11] S. el Aimani, “ Modélisation des Différent Technologie d’Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyen Tension ”, Thèse de Doctorat de l’Université de Science et Technologie de Lille, 2004.

- [12] A. Mechter, K. Kmih and M. Ghanes, " Sliding mode control of wind turbine with exponential reaching law ", Acta Polytechnic Hungarica, vol.12, no.13, pp.167-183, 2015.
- [13] N. Bounar et all., " Fuzzy sliding mode control of double-fed induction machine," , 2nd International Conference on Information Processing and Electrical Engineering, Tebessa, Algeria, 2012.
- [14] S. E. Ardjoun, M. Abid, A. Aissaoui and A. Nacéri, " A robust fuzzy sliding mode control applied to the double-fed induction machine, ", International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, vol.5, pp.315-321, 2011.
- [15] F. A. Okou, O. Akhrif and M.Tarbouchi, " Design of a nonlinear robust adaptive controller for a grid-connected doubly fed induction generator under wind turbine," , 18th Mediterranean Conference on Control & Automation, Marrakech, Morocco, 2010.
- [16] B. Beltran et al. , " Second-order sliding mode control of a doubly fed induction generator driven wind turbine," , IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.27, no.2, pp.261-269, 2012.
- [17] C. A Evangelista, F. Valenciaga and P. Puleston, " Multivariable 2-sliding mode control for wind energy conversion système based on a doubly-fed induction generator," International Journal of Hydrogen Energy, 37, pp.10070-10075, 2012.
- [18] T. Douadi, " Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Générateur Asynchrone", Thèse de Magistère en Electrotechnique, Université Batna, 2010.
- [19] F. Poitier, "Etude et Commande de la Génératrice Asynchrone pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne ", Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [20] A. Zibra et N. Boumimiz "Commande par Mode Glissant d'une machine asynchrone", Mémoire de PFE en Automatique, Université de Jijel, 2005.
- [21] M. Bouchoucha "Conception d'un contrôleur a logique floue basée sur la théorie des modes glissants", Thèse Magister, Ecole Militaire Polytechnique, septembre 1999.
- [22] A. Boubakir "Méthodes de commande par mode de glissement appliquées au bras manipulateur et au système hydraulique CE105 à réservoirs couplés ", Thèse Magister, Ecole Militaire Polytechnique, février 2007.

Références bibliographiques

- [23] A. Benaskeur. “ Aspects de l'application du backstepping adaptatif à la commande décentralisée des systèmes non linéaires”, Thèse de doctorat, Université Laval Québec, Canada, 2000.
- [24] A. Mechter, “ Contribution à la commande non linéaire d'une éolienne”, Thèse de Doctorat en Electronique, Université de Jijel, 2015.
- [25] J. S. Bang, H. Shim, S. K. Park and J. H. Seo, “ Robust tracking and vibration suppression for a tow-inertia system by combining backstepping approach with disturbance observer”, IEEE Trans Ind Electron, vol.57, pp.3197.
- [26] W. Yim, “ Adaptiv control of a flexible joint manipulator” Proceedings IEEE, International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, pp.3441-3446.
- [27] H. Khebbache, “ Adaptive sensor-fault tolerant control for a class of MIMO uncertain nonlinear systems : Adaptive nonlinear filter-based dynamique surface control”, 2016.

