

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

**Mémoire de Fin d'Etudes
de MASTER ACADEMIQUE**
Domaine : **Sciences et Technologies**
Filière : **Génie électrique**
Spécialité : **Commande des systèmes**

Présenté par
Sarah NAIT SAADA
Lynda NASRI

Thème

**Modélisation et commande non linéaire
d'une éolienne par la stratégie MPPT**

Mémoire soutenu publiquement le 14/07/2016 devant le jury composé de :

M Said DJENOUNE
Professeur, UMMTO, Président

M Amar HAMACHE
MC B, UMMTO, Encadreur

M Mohand Achour TOUAT
MC A, UMMTO, Examineur

M Rachid ZIRMI
MC A, UMMTO, Examineur

ملخص:

عرفت الآلات التزامنية ذات المغناطيس الدائم في السنوات الأخيرة كثيرا من التطبيقات الصناعية بفضل التطور الهائل الذي تشهده المغناطيس الدائمة، إلكترونيات الطاقة و تقنيات التحكم اللاخطي .

في هذه المذكرة، عرضت بنية و مبدأ تشغيل مولد طاقة هوائية. بعد صياغة نموذج للنظام المكون من الناعورة الهوائية والآلة، وتم حساب ثم تطبيق متحكم تقليدي من نوع PI لتنظيم سرعة الناعورة بهدف تتبع نقطة الإستطاعة العظمى و ذلك لتحقيق إنتاج أعظمي من أجل تابع معين لسرعة الرياح. أما فيما يخص التحكم في التيار، فقد تم إستعمال قانوني تحكم هما: التخم بالفصل و التحكم بنظام الإنزلاق. هذا النظام الأخير أظهر أحسن أداء سكوني و إنتقالي. بالإضافة إلى كونه أكثر صلابة أمام تقلبات النمذجة.

كلمات مفتاحية: الآلة التزامنية ذات المغناطيس الدائم، المولد الهوائي، تتبع نقطة الإستطاعة العظمى، تحويل Park، نظام الإنزلاق.

Résumé :

Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) ont connu ces dernières années un grand essor grâce à l'amélioration des qualités des aimants permanents, au développement de l'électronique de puissance et à l'évolution des techniques de commande non linéaires.

Dans le présent mémoire, la constitution et le fonctionnement d'une éolienne ont été exposés. Après avoir établi le modèle du système composé de la turbine éolienne et de la MSAP, un régulateur PI conventionnel a été synthétisé et appliqué à la régulation de vitesse de la turbine dans le but d'assurer la poursuite du point de fonctionnement optimal et maximiser par conséquent, la production de la puissance électrique pour un profil de vent donné. Quant à la commande des courants, deux lois de commande ont été utilisées à savoir : la commande par découplage et la commande par modes glissants. Cette dernière technique a révélé de meilleures performances statiques et dynamiques. De plus, elle est très robuste aux variations paramétriques.

Mots clés : MSAP ; éolienne ; MPPT ; transformation de Park ; modes glissants.

In recent years, the permanent magnet synchronous machine (PMSM) has been used extensively thanks to by permanent magnets improving qualities, development of power electronics and evolution of nonlinear control techniques.

Herein, the constitution and operation of a wind electric conversion system were exposed. After establishing the system plant which is constituted of a wind turbine and a PMSM, a conventional PI controller was synthesized and applied to regulate turbine speed in order to ensure the optimal power point tracking and maximizing therefore, the production of electric power for a given wind profile. As for controlling currents, two control laws were used namely the decoupling control and the sliding mode control. This one revealed better static and dynamic performances. Moreover, it is seen to be very robust against parametric variations.

Key words: PMSM ; wind electric conversion system ; MPPT ; Park's transformation; sliding mode.

Tout d'abord, nous tenons à remercier profondément Dieu, de nous avoir donné le courage, la patience, la volonté ainsi que la santé pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à Mr. HAMACHE pour avoir accepté d'encadrer notre travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude envers Mr. TOUAT Mouhend Achour pour ses conseils judicieux, sa constante écoute, sa volonté et sa détermination à améliorer le fonctionnement du département. Vous ne comptez pas vos heures et ne ménager pas votre peine pour le bien de tous.

Notre reconnaissance va aussi envers Mr. KARA Redouane, pour sa disponibilité, l'intérêt qu'il nous porte, sa patience infinie à réexpliquer mille fois les relations d'ordres dans $\min +$ et $\max +$.

Si une personne a bien été à la hauteur de sa réputation c'est bien Mr. MAIDI Ahmed, qui avec sa bonne humeur et son fameux « asme3 » a toujours égayé le cours de jeudi soir qui dure 3h.

Mr. DJENOUNE Said nous voulons que vous sachiez que vos étudiants garderont toute leur vie un très bon souvenir de votre enseignement. Vos connaissances n'ont d'égal que votre modestie. Vous êtes un exemple et nous nous sentons tellement petit devant vous.

Nous remercions Mr.MANSOURI Rachid et Mr.ARDJAL Aghilas qui nous ont donné de leur temps bien que nous ne soyons pas leurs étudiantes.

Pour finir nous tenons à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

LYNDA

Je dédie ce modeste travail à :

- *Mes très chers parents qui m'ont aidé, soutenu et encouragé pendant mon travail*
- *Mes très chères sœurs : FARIDA et LILA*
- *Mes très chers frères : KAMEL, SLIMANE et NOUREDDINE*
- *La famille Nait Saada que j'aime bien*
- *Mes chers amis : 3EBDOU, PINDOU, SACADOU, YOUPINOU, POMPIDOU, XAVI, 3EMI, SOFIANE, SMAIL, CHAFIK, ZAHOUA, KENZA.....*

SARAH

Je dédie ce modeste travail à :

- *Mes très chers parents qui m'ont aidé, soutenu et encouragé pendant mon travail.*
- *Mes très chères sœurs : BIBA, TAMI.*
- *Mon cher frère : HAKIM.*
- *Ma très chère tante DAHBIA ainsi que ses enfants.*
- *Les NASRI chez qui je me sens toujours chez moi et qui me considère des leurs.*
- *La famille de ZAHOUA que j'adore.*
- *Mes chers amis : LYNDOU, PINDOU, SACADOU, YOUPINO, POMPIDOU, XAVI, 3EMI, SOFIANE, SMAIL, CHAFIK, ZAHOUA, LUNA, KENZA.....*

MSAP : machine synchrone à aimant permanent.

MPPT: maximum power point tracking.

PI: régulateur proportionnel.

v_1 : vitesse du vent en amont de la turbine.

v_2 : vitesse du vent en aval de la turbine.

v_{moy} : moyenne des deux vitesses du vent en amont et en aval.

P : puissance extractible du vent.

P_{max} : puissance extractible maximale du vent.

P_t : puissance de la turbine.

C_p : Coefficient d'extraction de puissance.

β : angle de calage des pales.

λ : vitesse relative du vent.

Ω_t : vitesse de rotation de la turbine.

$\bar{\lambda}$: une variable auxiliaire.

λ_{opt} : vitesse relative optimale.

C_{popt} : Coefficient d'extraction de puissance optimal.

ω : pulsation des courants statoriques.

p : nombre de paires de pôles de la machine.

Oa, Ob, Oc : axe des enroulements a, b et c.

V_a, V_b, V_c : tension des phases a, b et c.

i_a, i_b, i_c : courant des phases a, b et c.

V_n : point neutre dans le repère triphasé.

R_s : résistance électrique d'une phase dans l'enroulement.

ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c : flux traversant les bobines statoriques a, b et c.

ϕ_f : flux produit par l'aimant permanent.

L_s : inductance de phase.

L_c : inductance cyclique.

θ : angle de synchronisme.

$P(\theta)$: matrice de la transformation de Park.

$P^{-1}(\theta)$: matrice de la transformation inverse de Park.

X_{abc} : grandeur triphasée.

X_{dqo} : grandeur synchrone.

V_d, V_q : Tension statorique sur l'axe d et l'axe q .

ϕ_d, ϕ_q : Flux statorique sur l'axe d et l'axe q .

J : inertie totale de l'arbre tournant.

C_m : couple mécanique en aval du multiplicateur de vitesse.

C_{em} : couple électromagnétique développé par la machine.

$C_f\Omega$: couple de frottement visqueux.

B : coefficient des frottements visqueux.

P_{elec} : puissance électrique produite par la machine.

P_{em} : puissance électromagnétique.

$\Omega_{turbref}$: vitesse de la turbine de référence.

C_{mref} : couple électromagnétique de référence.

G : coefficient de multiplications.

ω_n : pulsation naturelle.

ξ : coefficient d'amortissement.

t_r : temps de réponse.

k_i, k_p : paramètres du régulateur PI de vitesse.

μ_d, μ_q : entrées découplantes et linéarisantes.

e_d, e_q : erreurs de réglage en courant.

k_{pp}, k_{ii} : paramètres des régulateur PI de courant.

d_d, d_q : termes de perturbation.

\bar{d}_d, \bar{d}_q : bornes des perturbations.

S : surface de glissement vectorielle.

\dot{S} : dérivée en fonction du temps de la surface.

$k_{d1}, k_{d2}, k_{q1}, k_{q2}$: gains positifs.

V : fonction de Lyapunov.

\dot{V} : dérivée en fonction du temps de la fonction de Lyapunov.

σ_d, σ_q : composantes positives.

ρ : constante positive.

t_{\max} : temps de convergence.

Table des matières

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

Chapitre 01 : Généralités sur les systèmes éolien

1.1. Introduction.....	4
1.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne.....	4
1.2.1. Définition de l'énergie éolienne.....	4
1.2.2. L'énergie éolienne en quelques chiffres.....	4
1.2.2.1. A l'échelle mondiale.....	4
1.2.2.2. A l'échelle nationale.....	6
1.2.3. Fonctionnement général d'une éolienne.....	6
1.3. Les différents types d'éoliennes.....	7
1.3.1. Axe vertical.....	7
1.3.2. Axe horizontal.....	9
1.4. Principaux composants d'une éolienne.....	9
1.5. Energie cinétique du vent et conversion en énergie mécanique.....	10
1.6. Eolienne réelle et coefficient d'extraction de puissance.....	12
1.7. Production optimale d'énergie éolienne.....	14
1.8. Fonctionnement réel d'une éolienne.....	14
1.9. Conclusion.....	15

Chapitre 02 : Modélisation de l'éolienne

2.1. Introduction.....	17
2.2. Système de régulation aérodynamique.....	17
2.2.1. Pitch control.....	17
2.2.2. Stall control.....	17
2.2.3. Régulation active par décrochage aérodynamique.....	18

2.3. Le générateur synchrone.....	18
2.3.1. Générateur synchrone a rotor bobiné.....	18
2.3.2. Générateur synchrone a aimant permanent.....	19
2.4. Modélisation de la génératrice.....	19
2.4.1. Equation électrique dans le repère triphasé.....	20
2.4.2. Equation électrique de la machine dans le repère synchrone d-q.....	23
2.4.3. Equation mécanique de la turbine.....	27
2.5. Conclusion.....	29

Chapitre 03 : Commande MPPT de l'éolienne

3.1. Introduction.....	31
3.2. Cahier des charges et stratégie MPPT.....	31
3.2.1. Régulation de vitesse.....	32
3.2.2. Régulation des courants.....	32
3.3. Commande de la vitesse.....	33
3.4. Commande des courants.....	35
3.4.1. Commande par découplage non linéaire et régulateur PI.....	35
3.4.1.1. Simulation et discussion.....	37
3.4.2. Commande par mode glissant.....	42
3.4.2.1. Simulation et discussion.....	45
3.5. Conclusion.....	51

Conclusion générale.....	52
---------------------------------	-----------

Introduction générale

L'énergie est essentielle à la vie et au développement. A l'aube du XXI^{ème} siècle, d'énormes défis sont à relever, avec l'augmentation de la population mondiale et l'émergence de nouveaux pays industrialisés, les besoins en énergie continuent d'augmenter fortement. Ces 50 dernières années, les combustibles fossiles ont essentiellement couvert l'augmentation de la consommation d'énergie. Or leur combustion est à l'origine des deux tiers des émissions mondiales de gaz à effet de serre ; demain la demande devra être satisfaite par des énergies beaucoup moins carbonées.

L'énergie nucléaire, certes très concentrée, pose des problèmes d'enfouissements des déchets radioactifs, et après l'incident de FUKUSHIMA DAIICHI, les questions de sécurité font toujours débat.

La hausse du prix du baril de brut, la raréfaction programmée des ressources fossiles et la prise de conscience des enjeux environnementaux et climatiques sont la cause du développement rapide des énergies renouvelables dans de nombreux pays. L'électricité est la forme finale d'énergie qui connaît la croissance la plus rapide. D'après l'IAE (l'agence internationale de l'énergie), les énergies renouvelables représenteront un tiers de la production mondiale d'électricité à l'horizon 2040.

L'énergie solaire est disponible partout sur terre et représente théoriquement, 900 fois la demande mondiale d'énergie. Des capteurs solaires sur un 20^{ème} de la surface du Sahara fourniraient assez d'électricité pour approvisionner le monde entier. Le problème est d'exporter cette énergie à un coût raisonnable. L'énergie éolienne, dérivée de l'énergie solaire, occupe la plus grosse part de la hausse de production basée sur les énergies renouvelables ; en plus de son caractère inépuisable, elle augmente l'indépendance énergétique.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

L'orientation actuelle de la recherche pour aboutir à de meilleures conditions d'exploitation des actionneurs robustes comme le moteur synchrone est justifiée, car le moteur synchrone à aimant permanent possède une construction simple qui limite son coût et augmente le rapport de puissance massique.

Le développement rapide de l'électronique de puissance lié à l'apparition de composants performants ainsi que l'amélioration des techniques de commande favorisent le choix de la structure de commande vectorielle avec des techniques de commande non linéaires du générateur synchrone à aimant permanent.

Le réglage par modes glissants, qui est une commande non linéaire par sa nature, est fondamentalement une méthode qui force le vecteur d'état à glisser le long d'une trajectoire prédéfinie. Cependant, cette technique de commande a l'inconvénient des commutations à haute fréquence ou chattering.

Dans ce cadre, le présent mémoire décrira une étude d'utilisation des machines de type synchrone à aimant permanent dans un système éolien. Le premier chapitre rappellera quelques notions élémentaires sur le fonctionnement d'un système éolien à travers les équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement.

Le second chapitre sera consacré à la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent et à la détermination des différentes lois régissant la construction du modèle mathématique de la MSAP en triphasé puis dans le repère synchrone.

Le dernier chapitre exposera deux techniques de commande, la commande découplante basée sur un régulateur PI et la commande par modes glissants. Ces commandes sont comparées en termes de poursuite de trajectoire, robustesse aux incertitudes paramétriques et sensibilité aux perturbations externes.

Le mémoire sera achevé par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre 01

Généralités sur les systèmes éoliens

1.1. Introduction

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

1.2. Descriptif de l'énergie éolienne

1.2.1. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est produite à partir de la force du vent, par l'intermédiaire de l'aérogénérateur, qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'éolienne est constituée d'un mat sur lequel est fixée une hélice que fait tourner le vent. On distingue l'éolienne terrestre de l'éolienne de mer. Les éoliennes terrestres sont les plus répandues. Elles desservent la plupart des parcs installés avec des puissances pouvant atteindre 6 MW par turbine.

1.2.2. L'énergie éolienne en quelques chiffres

1.2.2.1. A l'échelle mondiale

Avec une capacité mondiale installée de 318 GW, l'éolien maintient sa place dans le mix énergétique à long terme, mais enregistre une croissance moins soutenue que les années précédentes.

Les diagrammes circulaires 1.1 et 1.2 montrent la production d'énergie éolienne par zone géographique et par pays.

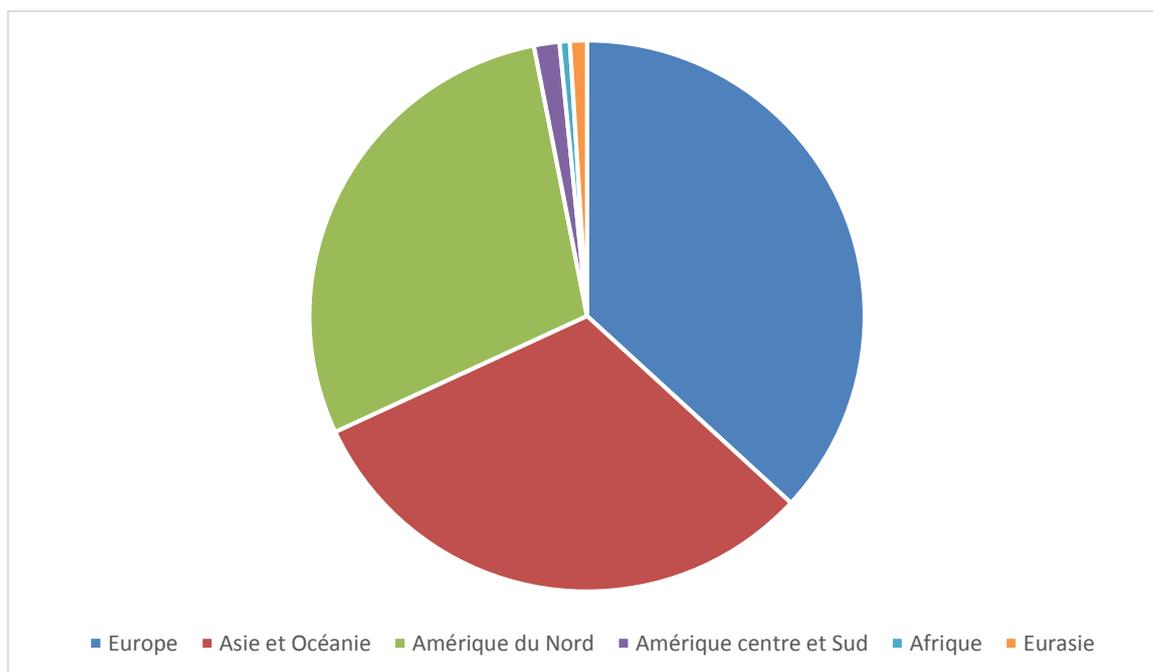


Figure 1.1 : principaux producteurs d'électricité éolienne dans le monde par zone géographique en 2013.

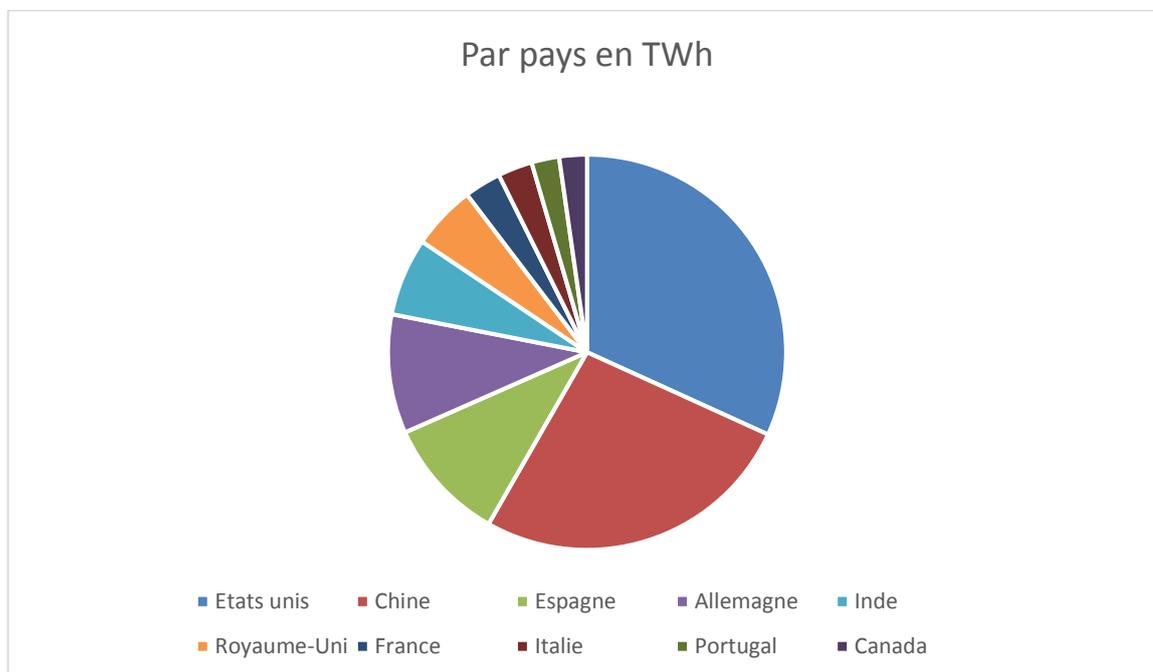


Figure 1.2 : principaux producteurs d'électricité éolienne dans le monde par pays en 2013

1.2.2.2. A l'échelle nationale

L'Algérie a mis en service sa première ferme d'une capacité de 10 MW, à Adrar en 2014 et qui doit servir de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 32 GW d'ici 2030 (22 GW pour le marché national et 10 GW destinés à l'exportation).

1.2.3. Fonctionnement général d'une éolienne

L'éolienne se compose en général de trois pales portées par un rotor et installées au sommet d'un mat vertical qui peut mesurer jusqu'à 120 m. L'hélice tourne sous l'effet d'un vent d'au moins 2.8 m/s de vitesse. La nacelle sur laquelle elle est fixée est dotée d'un gouvernail pour s'orienter automatiquement face au vent. Les pales pivotent pour capter un maximum de vent, plus elles sont grandes, moins rapidement elles tourneront. Si la vitesse du vent dépasse 25 m/s, l'éolienne freine et s'arrête automatiquement de fonctionner pour éviter l'emballement.

Dans la nacelle, l'hélice entraîne un axe. Sa vitesse de rotation n'étant pas suffisante pour générer de l'électricité, un multiplicateur augmente cette vitesse jusqu'à 1500 tr/min et la transmet à un second axe qui entraîne à son tour le rotor d'un alternateur. Dans ce dernier, l'interaction entre les aimants du rotor et les bobines du stator, induit une tension électrique triphasée à la sortie du stator, selon le principe de Lenz [11]. Un transformateur situé à l'extérieur du mat élève cette tension avant qu'elle ne soit injectée dans le réseau. La figure 1.3 schématise une éolienne et ses constituants.

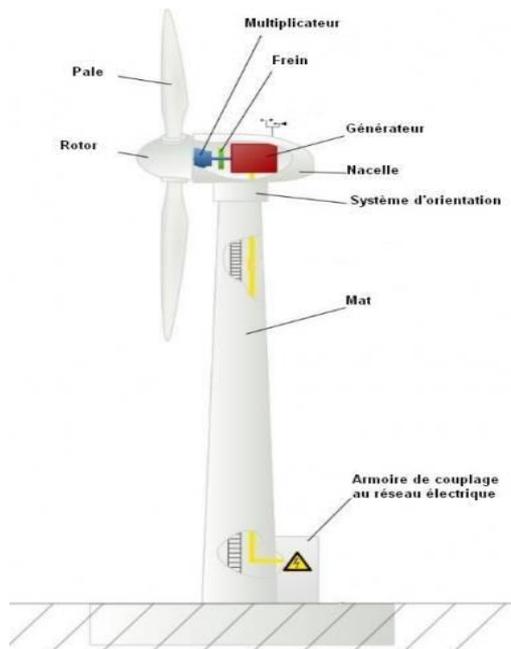


Figure 1.3 : Constitution d'une éolienne à axe horizontal.

1.3. Les différents types d'éoliennes

Il existe différents types d'éoliennes qui utilisent divers moyens technologiques, elles peuvent être classées selon la position de l'axe de leur rotor.

1.3.1. Eolienne à axe vertical

➤ Type Savonius

Constitué de demi-cylindres reliés à un axe vertical (figure 1.4). Ce type d'éolienne utilise la force de trainée du vent, son rendement est plus faible que celui des éoliennes qui utilisent la force de portance mais, ce type de machines permet d'exploiter des vitesses de vent plus faibles, engendre de faibles encombrements et est plus silencieux comparé aux autres types d'éoliennes. Les éoliennes Savonius sont idéales pour une intégration en milieu urbain.



Figure 1.4 : Eolienne de type Savonius.

➤ **Type Darrieus**

A pales verticales, paraboliques ou héliocoïdales, elle utilise la force de portance du vent, comme les éoliennes classiques (figure 1.5). Cependant, son plus faible encombrement est un avantage par rapport à l'intégration paysagère et architecturale ; elle ne nécessite pas de système d'orientation et est simple à installer. L'inconvénient est qu'elle ne démarre pas seule et a un faible rendement.



Figure 1.5 : Eolienne de type Darrieus.

➤ **Type à voilures tournantes**

L'éolienne à voile tournante est équipée de pales dont l'orientation dynamique permet de mieux exploiter l'énergie du vent à la manière d'un navire à voile (figure 1.6). Ce mécanisme rend possible l'exploitation de vents plus puissants que ceux que peuvent exploiter les éoliennes classiques à trois pales. En outre, le bruit généré est fortement réduit par ce système.



Figure 1.6 : Eolienne à voile tournante.

1.3.2. Eolienne à axe horizontal

Ce type d'éolienne est le plus répandu. Il utilise la force de portance du vent appliqué aux pales, à la manière des ailes d'un avion, pour entraîner un générateur électrique ou une pompe. C'est le type qui sera utilisé dans cette étude.

1.4. Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est composée, principalement, des éléments suivants :

➤ La tour

Elle est constituée du mat généralement conique en béton ou en acier pour supporter la nacelle avec une ouverture en bas pour permettre l'accès aux différents équipements de l'éolienne, du transformateur pour élever la tension avant d'être injectée dans le réseau et du système de commande électrique.

➤ La nacelle

C'est une structure abritant les différents éléments mécaniques, pneumatiques, électriques et électroniques. A l'avant, il y a le rotor qui tourne pour orienter la machine dans la bonne direction.

➤ Le rotor

C'est la partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé d'un certain nombre de pales ayant une forme aérodynamique (en général trois) en matériaux composite. Il est branché au système mécanique directement ou via un multiplicateur de vitesse à engrenages.

1.5. Energie cinétique du vent et conversion en énergie mécanique

Considérons une éolienne à un rotor balayant un disque d'aire A tel que représentée à la figure 1.7

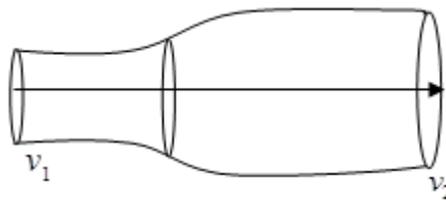


Figure1.7 : tracé du tube de Betz.

L'énergie cinétique E_c d'une masse m animée d'un mouvement de translation de vitesse v est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1.1)$$

Si cette masse est cylindrique ayant pour masse volumique ρ , pour aire de base A et pour hauteur l alors, la relation (1.1) se réécrit comme suit :

$$E_c = \frac{1}{2} l \rho A v^2 \quad (1.2)$$

De plus, si le mouvement est uniforme (la vitesse est constante) sur un laps de temps t alors, $l = vt$ et (1.2) s'écrit :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho A v^3 t \quad (1.3)$$

La différentiation de (1.3) par rapport au temps conduit à l'expression de la puissance (1.4):

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1.4)$$

Par transposition de la relation (1.4) dans le cas du vent, la puissance du vent en amont de l'éolienne peut être exprimée par :

$$P_1 = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 v_1^3 \quad (1.5)$$

Où v_1 est la vitesse du vent en amont de la turbine (avant détente) et R est le rayon du disque balayé par les pales de l'éolienne.

De même, la puissance du vent en aval de l'éolienne peut être exprimée par :

$$P_2 = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 v_2^3 \quad (1.6)$$

Où v_2 est la vitesse du vent en aval de la turbine (après détente).

Dans le cas d'une éolienne idéale, la vitesse du vent au contact des pales v_{moy} est la moyenne des deux vitesses du vent en amont et en aval. Celle-ci a pour valeur :

$$v_{moy} = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (1.7)$$

L'utilisation de (1.2) et (1.9) permet de donner la puissance extractible telle que :

$$P = \frac{1}{4} \rho \pi R^2 (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2) \quad (1.8)$$

La vitesse du vent en aval pour laquelle la puissance extractible est maximale vérifie $\frac{dP}{dv_2} = 0$,

ce qui donne l'équation quadratique en v_2 :

$$3v_2^2 + 2v_1v_2 - v_1^2 = 0 \quad (1.9)$$

Cette dernière admet pour solution acceptable $v_2 = \frac{v_1}{3}$. Alors, la puissance maximale extractible dans le cas d'une éolienne idéale vaut $P_{max} = \frac{16}{27} \rho \pi R^2 v_1^3 = \frac{16}{27} P_1$. Cela montre que quelque soit l'éolienne utilisée, la puissance extractible ne peut dépasser 59% (appelée limite de Betz) de la puissance apportée par le vent.

1.6. Éolienne réelle et coefficient d'extraction de puissance

Il est évident que pour une éolienne réelle, la puissance transmise à la turbine P_t est une fraction de la puissance apportée par le vent. Celle-ci peut s'écrire :

$$P = C_p P_1 \quad (1.10)$$

Où C_p est le coefficient d'extraction de puissance et représente l'efficacité de la turbine tel

que $C_p < \frac{16}{27}$.

On montre dans [7,6] que le coefficient d'extraction de puissance dépend de la forme aérodynamique des pales, de leur nombre, de leur angle de calage β ainsi que de la variable instantanée λ qui représente la vitesse relative du vent par rapport à un point situé sur l'extrémité du disque balayé par les pales. Cette variable λ est communément appelée rapport de vitesse de l'éolienne (Tip Speed Ratio en Anglais). Elle est donnée par :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{v_1} \quad (1.11)$$

Où Ω est la vitesse de rotation de la turbine.

Pour une forme aérodynamique choisie et un nombre de pales donné, le coefficient d'extraction de puissance C_p est fonction de l'angle de calage β (en degré) et la vitesse relative λ . Cette fonction est tellement complexe et son établissement analytiquement est si laborieux que les spécialistes en aérodynamique préfèrent une relation empirique [10,6]. Un exemple de fonction $C_p(\lambda, \beta)$, qui sera adopté dans ce travail, est donné par [1.12] :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left[\frac{151}{\bar{\lambda}} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right] \exp\left(\frac{-18.4}{\bar{\lambda}}\right) \quad (1.12)$$

Où $\bar{\lambda}$ est une variable auxiliaire donnée par :

$$\bar{\lambda} = \left(\frac{1}{\lambda - 0.02\beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1} \right)^{-1} \quad (1.13)$$

Cette caractéristique est représentée à la figure 1.8, pour trois valeurs de β .

Il est à noter que la caractéristique $C_p = f(\lambda, \beta)$ présente un optimum (maximum) $C_{p_{opt}}$ atteint pour un rapport optimal des vitesses λ_{opt} .

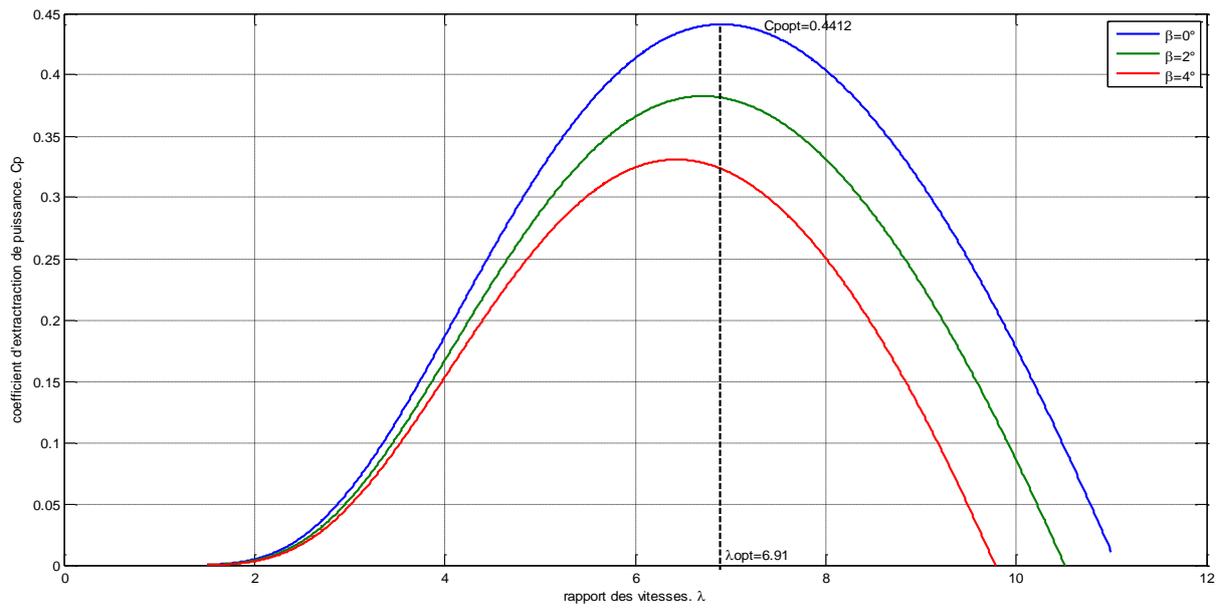


Figure 1.8 : Caractéristique de l'éolienne $C_p = f(\lambda, \beta)$.

1.7. Production optimale d'énergie éolienne

En analysant la caractéristique d'extraction d'une éolienne, il est déduit immédiatement que la puissance extraite peut être optimisée (maximisée) en faisant fonctionner l'éolienne telle que son rapport de vitesse instantané λ soit très proche du rapport optimal λ_{opt} . Sachant que la vitesse du vent v_1 ne peut être modifiée, c'est donc la vitesse de la turbine qui doit être réglée de manière à ramener le rapport des vitesses à sa valeur optimale. Autrement dit :

$$\frac{v_1 R}{\Omega_t} \approx \lambda_{opt} \quad (1.14)$$

Ou encore,

$$\Omega_t \approx \frac{v_1 R}{\lambda_{opt}} \quad (1.15)$$

1.8. Fonctionnement réel d'une éolienne

Selon la vitesse du vent, il y a quatre zones de fonctionnement pour une éolienne réelle :

➤ Zone 1

v_1 varie de 0 à 5 m/s qui est la vitesse minimum requise v_{\min} pour que l'éolienne entre en production. La vitesse du vent est trop faible et la turbine peut tourner sans que l'énergie de sortie ne soit significative.

➤ Zone 2

v_1 varie de la vitesse v_{\min} à la vitesse nominale v_n de 15m/s. La puissance produite augmente jusqu'à atteindre la puissance nominale.

➤ Zone 3

v_1 varie de la vitesse nominale à la vitesse de coupure v_{\max} de 24 m/s. La puissance produite est maintenue constante par l'intermédiaire de la régulation.

➤ Zone 4

v_1 dépasse la vitesse de coupure v_{\max} . Par mesure de sécurité, l'éolienne est mise à l'arrêt et la puissance produite est nulle. Cela peut être effectué soit à l'aide d'un frein, en orientant l'hélice parallèlement au vent (mise en drapeau) ou en modifiant l'angle de calage des pales β afin d'annuler le couple mécanique du vent.

Le schéma de la figure 1.9 représente les quatre zones de fonctionnement sus citées.

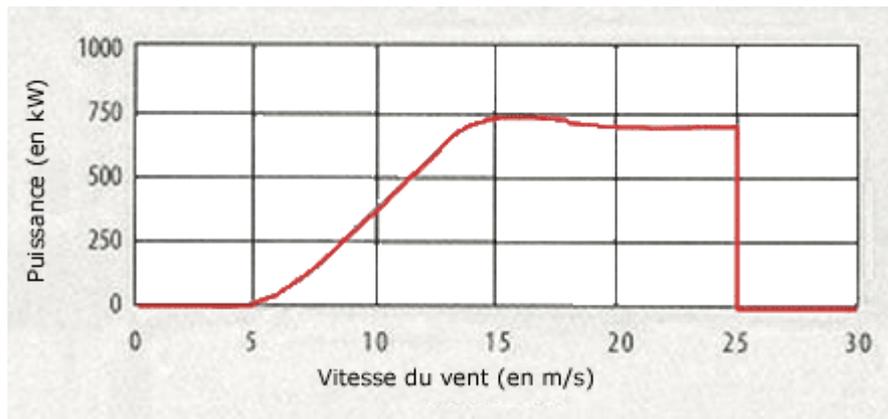


Figure 1.9 : Zones de fonctionnement d'une éolienne réelle.

1.9. Conclusion

Le présent chapitre a exposé quelques chiffres concernant la puissance éolienne installée et produite à l'échelle mondiale puis en Algérie suivis du fonctionnement d'une éolienne, sa constitution et ses types. Il a aussi été détaillé, la théorie de conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique dans le cas d'une éolienne idéale puis dans le cas d'une éolienne réelle ainsi que les différentes zones de fonctionnement de cette dernière.

Chapitre 02

Modélisation de l'éolienne

2.1. Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique.

Un modèle mathématique sera établi afin de simuler le comportement de l'éolienne choisie dans le cadre de fonctionnement bien définie.

2.2. Systèmes de régulation aérodynamiques

2.2.1. Pitch control

C'est un système de régulation actif. Il consiste à faire varier l'angle de calage des pales sur le moyeu autour d'un axe longitudinal pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. Un système de commande permet de déterminer la meilleure position des pales en fonction de la vitesse du vent (MPPT). Ce système permet :

- d'arrêter l'éolienne ou en limiter la puissance afin de la protéger des vents violents en plaçant les pales en drapeau,
- de maximiser l'énergie absorbée par l'éolienne pour la faire démarrer.

C'est le système le plus efficace car il permet une régulation constante et presque parfaite, mais c'est un dispositif complexe et très coûteux.

2.2.2. Stall control

C'est un système de régulation aérodynamique passif. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Ce système empêche les pales, qui sont conçues spécialement pour subir des décrochages, d'accélérer, en effet grâce à sa forme, la pale ne peut plus accélérer même si le vent augmente.

Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des petites éoliennes car il ne nécessite pas de système de régulation dans le rotor.

C'est un système simple, fiable et moins coûteux mais il engendre des pertes d'efficacité au démarrage et dans les grandes vitesses de vent. Le fonctionnement à vents faibles reste sans aucune commande.p

2.2.3. Régulation active par décrochage aérodynamique

Aussi appelée « active Stall », ce système est utilisé pour les éolienne de fortes puissances, il utilise les atouts de la régulation passive et de la régulation active afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité.

2.3. Générateur synchrone

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur, le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statorique.

Les génératrices synchrones sont conçues pour fournir un couple important, à dimensions géométriques convenables, c'est pourquoi elles offrent l'avantage de se passer du multiplicateur de vitesse, notamment si le nombre de pôles est important.

L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes de synchronisation avec le réseau d'injection. En effet, la vitesse de rotation de l'éolienne doit être strictement fixe. Pour ces raisons, une interface d'électronique de puissance est systématiquement placée entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage.

2.3.1. Générateur synchrone à rotor bobiné

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. Le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu par l'intermédiaire d'un redresseur à soutirage (connecté au réseau).

Ce mode d'excitation exige la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi il est souvent remplacé par des aimants permanents.

2.3.2. Générateur synchrone à aimant permanent

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent de plus en plus intéressants. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables.

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones doublement alimentées.

Toutefois certains de ces générateurs sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes du couple électromagnétique qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie.

C'est le type de génératrice choisie [annexe A].

2.4. Modélisation de la génératrice

L'étude du comportement d'un moteur électrique est une tâche difficile qui nécessite une bonne connaissance de son modèle dynamique pour des fins de simulation ou de commande.

Au-delà de quelques kilowatts, les machines synchrones sont généralement des machines triphasées. Qu'elles soient à pôles saillants ou à pôles lisses, elles ont un stator composé de trois enroulements identiques décalés de 120° dans l'espace. Ces enroulements sont logés dans les encoches du circuit magnétique. Dans la grande majorité des cas, ces trois enroulements sont couplés en étoile, ce qui annule la composante homopolaire du courant. Lorsque les enroulements statoriques sont alimentés par un système triphasé équilibré de courant, il y a création d'un champ tournant le long de l'entrefer. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques. Dans la suite du travail, les notations suivantes sont adoptées :

- ω la pulsation des courants statoriques, exprimée en radians par seconde.

- p Le nombre de paires de pôles de la machine.

- Ω La vitesse de rotation de la machine, exprimée en radians par seconde.

La vitesse Ω est liée à la pulsation ω et le nombre p par :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (2.1)$$

Le modèle analytique de la machine synchrone à aimant permanent peut être déduit en adoptant un ensemble d'hypothèses simplificatrices suivantes :

- La répartition du champ inducteur dans l'entrefer ainsi que les forces magnétomotrices sont sinusoïdales.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'avoir des relations linéaires entre les flux et les courants.
- Les irrégularités de l'entrefer dues aux encoches statoriques sont ignorées.
- Les phénomènes d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- L'aimant est idéal, le flux magnétique émis par les aimants est constant.
- L'influence de la température sur les résistances des enroulements est négligée.

A noter que les axes « O_a », « O_b », et « O_c » sont les axes respectifs des trois enroulements « a », « b » et « c » du stator.

2.4.1. Equation électrique de la machine dans le repère triphasé

Le point de départ dans l'étape de l'élaboration du modèle électrique de la machine consiste à modéliser le circuit des enroulements des phases illustrés par la Figure 2.1. Cette figure définit les tensions de phases V_a , V_b et V_c les courants instantanés i_a , i_b et i_c de phases ainsi que les forces magnétomotrices induites.

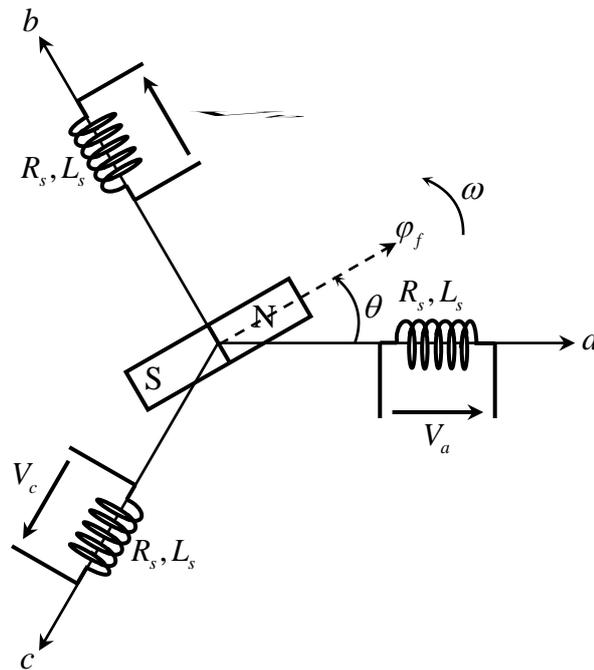


Figure 2.1 : Zones de fonctionnement d'une éolienne réelle.

Le point neutre du circuit en question est défini par la tension V_n et la résistance électrique d'une phase dans l'enroulement est désignée par R_s . A partir de la Figure 2.1, quatre équations de base peuvent être établies :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.2)$$

Les tensions s'expriment en fonction des courants et des flux par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_a = R_s i_a + \frac{d}{dt} \varphi_a \\ V_b = R_s i_b + \frac{d}{dt} \varphi_b \\ V_c = R_s i_c + \frac{d}{dt} \varphi_c \end{cases} \quad (2.3)$$

Sous forme matricielle, (2.3) s'écrit comme suit :

$$V_{abc} = R_s i_{abc} + \frac{d\varphi_{abc}}{dt} \quad (2.4)$$

$V_{abc} = [V_a V_b V_c]^t$: Vecteur tensions de phases statoriques ;

$i_{abc} = [i_a i_b i_c]^t$: Vecteur courants de phases statoriques ;

$\varphi_{abc} = [\varphi_a \varphi_b \varphi_c]^t$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques ;

R_s : Résistance de phase statorique.

Dans ce qui précède, φ_{abc} correspond au flux magnétique total induit à embrasser par chacun des bobinages a, b et c.

Le flux total dans chaque phase est donné par :

$$\begin{cases} \varphi_a = L_s i_a + M i_b + M i_c + \varphi_f \cos(\theta) \\ \varphi_b = M i_a + L_s i_b + M i_c + \varphi_f \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \varphi_c = M i_a + M i_b + L_s i_c + \varphi_f \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.5)$$

Avec: φ_f est le flux produit par l'aimant permanent.

L_s est l'inductance de phase.

L'équation (2.5) peut s'écrire aussi comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_a = L_s i_a - M i_a + M (i_a + i_b + i_c) + \varphi_f \cos(\theta) \\ \varphi_b = L_s i_b - M i_b + M (i_a + i_b + i_c) + \varphi_f \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \varphi_c = L_s i_c - M i_c + M (i_a + i_b + i_c) + \varphi_f \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.6)$$

En exploitant (2.2) et en posant $L_c = L_s - M$ (inductance cyclique), (2.6) se transforme en (2.7) :

$$\begin{cases} \varphi_a = L_c i_a + \varphi_f \cos(\theta) \\ \varphi_b = L_c i_b + \varphi_f \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \varphi_c = L_c i_c + \varphi_f \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.7)$$

La relation (2.4), qui décrit la dynamique des courant statoriques dans le repère triphasé est très complexe de structure et est fortement dépendante de l'angle de synchronisme θ qui à son tour dépend du temps. De plus, toutes les grandeurs utiles sont sinusoïdales. Cela rend l'exploitation de (2.4) en asservissement quasiment impossible.

2.4.2. Equation électrique de la machine dans le repère synchrone d-q

Dans la littérature dédiée aux systèmes électriques triphasés, la projection dans le repère synchrone d-q est présentée comme une solution idéale pour remédier aux difficultés liées à l'équation dynamique (2.4). Cette projection est assurée par une transformation dite de Park. En effet, lorsque celle-ci est appliquée aux grandeurs triphasées : tensions, courants ou flux, elle permet d'obtenir des grandeurs fictives continues faciles à manipuler et rendant la théorie des asservissements applicables. La transformation de Park peut être interprétée comme étant une substitution des enroulements des phases du système triphasé (a, b, c) en enroulements orthogonaux d'axes (d, q) tournant à une vitesse ω par rapport au stator (voir Figure 2.2).

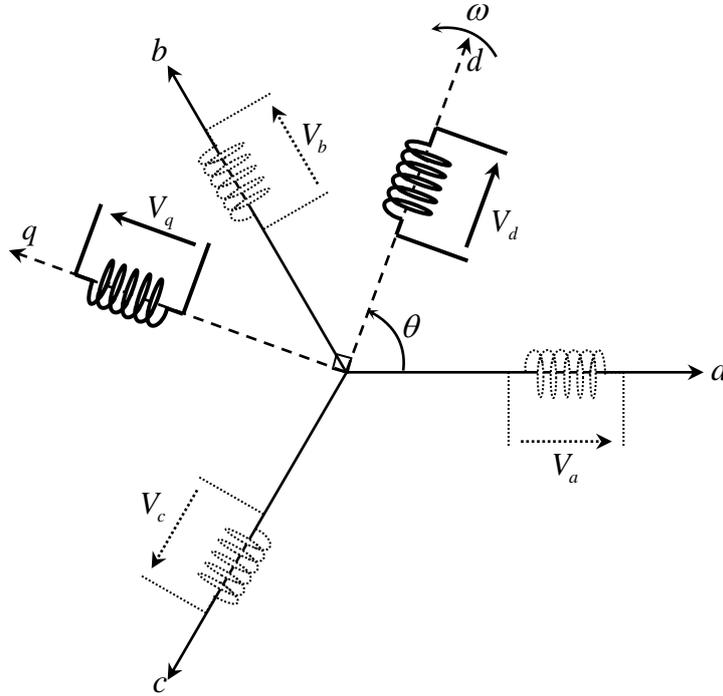


Figure 2.2 : Représentation d'une MSAP dans le repère d-q.

Pour un angle de synchronisme θ , une grandeur triphasée X_{abc} se transforme en grandeur synchrone X_{dqo} selon la relation suivante :

$$X_{dqo} = P(\theta) X_{abc} \quad (2.8)$$

Où $P(\theta)$ est la matrice de la transformation de Park qui s'exprime par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Et inversement :

$$\mathbf{X}_{abc} = \mathbf{P}^{-1}(\theta) \mathbf{X}_{dqs} \quad (2.10)$$

Où $\mathbf{P}^{-1}(\theta)$ est la matrice de la transformation inverse de Park, donnée par :

$$\mathbf{P}^{-1}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

En utilisant (2.7), (2.4) peut s'écrire comme suit :

$$\mathbf{V}_{abc} = R_s \dot{\mathbf{i}}_{abc} + \frac{d}{dt} \left(L_c \dot{\mathbf{i}}_{abc} + \varphi_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \right) \quad (2.12)$$

Ou encore,

$$\mathbf{V}_{abc} = R_s \dot{\mathbf{i}}_{abc} + L_c \frac{d\dot{\mathbf{i}}_{abc}}{dt} + \varphi_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Sachant que $\frac{d\theta}{dt} = \omega$, (2.13) conduit à :

$$\mathbf{V}_{abc} = R_s \dot{\mathbf{i}}_{abc} + L_c \frac{d\dot{\mathbf{i}}_{abc}}{dt} - \varphi_f \omega \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

En utilisant (2.13) et (2.10), l'équation électrique peut s'écrire comme suit :

$$\mathbf{P}^{-1}(\theta) V_{dqo} = R_s \mathbf{P}^{-1}(\theta) \dot{\mathbf{i}}_{dqo} + L_c \frac{d}{dt} (\mathbf{P}^{-1}(\theta) \dot{\mathbf{i}}_{dqo}) - \varphi_f \omega \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

En multipliant (2.14) à gauche par $\mathbf{P}^{-1}(\theta)$, elle devient :

$$V_{dqo} = R_s \dot{\mathbf{i}}_{dqo} + L_c \left(\mathbf{P}(\theta) \frac{d}{dt} \mathbf{P}^{-1}(\theta) \dot{\mathbf{i}}_{dqo} + \frac{d\dot{\mathbf{i}}_{dqo}}{dt} \right) - \varphi_f \omega \mathbf{P}(\theta) \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Sachant que :

$$\mathbf{P}(\theta) \frac{d}{dt} \mathbf{P}^{-1}(\theta) = \omega \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ et}$$

$$\mathbf{P}(\theta) \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} = -\sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ alors,}$$

$$\mathbf{V}_{dgo} = R_s \mathbf{i}_{dgo} + L_c \left(\omega \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{i}_{dgo} + \frac{d\mathbf{i}_{dgo}}{dt} \right) + \varphi_f \omega \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Dans l'hypothèse d'un système équilibré, donc des composantes homopolaires nulles, (2.16) se ramène à :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_c \frac{di_d}{dt} - L_c \omega i_q \\ V_q = R_s i_q + L_c \frac{d}{dt} i_q + L_c \omega i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \varphi_f \end{cases} \quad (2.17)$$

En convention générateur, il y a lieu d'inverser le sens des courants ce qui donne :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - L_c \frac{di_d}{dt} + L_c \omega i_q \\ V_q = -R_s i_q - L_c \frac{d}{dt} i_q - L_c \omega i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \varphi_f \end{cases} \quad (2.18)$$

La résolution de (2.18) par rapport aux dérivées des courants donne :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -R_s i_d + \omega i_q - \frac{1}{L_c} V_d \\ \frac{d}{dt} i_q = -\frac{R_s}{L_c} i_q - \omega i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \frac{\varphi_f}{L_c} - \frac{1}{L_c} V_q \end{cases} \quad (2.19)$$

Il est à noter que d'après (2.19), l'équation électrique est non linéaire et est fortement couplée.

2.4.3. Equation mécanique de la turbine

L'application du deuxième principe de Newton à la rotation de l'arbre tournant, en convention générateur, permet d'écrire :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - C_f \Omega \quad (2.20)$$

Avec: J : l'inertie totale de l'arbre tournant,

C_m : le couple mécanique en aval du multiplicateur de vitesse,

C_{em} : le couple électromagnétique développé par la machine,

$C_f \Omega$: le couple de frottement visqueux.

L'équation (2.20) peut se mettre sous la forme suivante :

$$\frac{d\omega}{dt} + B\omega = \frac{p}{J}(C_m - C_{em}) \quad (2.21)$$

Avec: p : le nombre de paires de pôles de la machine,

$B = \frac{C_f}{J}$: le coefficient des frottements visqueux.

La puissance électrique produite par la machine vaut [10,11] :

$$P_{elec} = V_d i_d + V_q i_q \quad (2.22)$$

En exploitant (19) et (22), la puissance électrique s'exprime par :

$$P_{elec} = -R_s (i_d^2 + i_q^2) - L_c \left(i_d \frac{di_d}{dt} + i_q \frac{di_q}{dt} \right) + \sqrt{\frac{3}{2}} \varphi_f \omega i_q \quad (2.23)$$

Où : $R_s (i_d^2 + i_q^2)$ représente les pertes par effet joule dans les enroulements statoriques.

$L_c \left(i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_q}{dt} \right)$ représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.

$\sqrt{\frac{3}{2}} \varphi_f \omega i_q$ représente la puissance électromagnétique.

La puissance électromagnétique est donnée aussi par :

$$P_{em} = C_{em} \Omega \quad (2.24)$$

Il est évident donc que le couple électromagnétique s'exprime par :

$$C_{em} = \sqrt{\frac{3}{2}} \varphi_f p i_q \quad (2.25)$$

En exploitant (2.19), (2.21) et (2.25), le modèle complet de la machine est donné par :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_c} i_d + \omega i_q - \frac{1}{L_c} V_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_c} i_q - \omega i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \frac{\varphi_f}{L_c} - \frac{1}{L_c} V_q \\ \frac{d\omega}{dt} + B\omega = -\frac{p^2}{J} \sqrt{\frac{3}{2}} \varphi_f i_q + \frac{p}{J} C_m \end{cases} \quad (2.26)$$

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, deux parties essentielles du système de conversion éolien ont été décrites. La première représente la partie mécanique qui comprend la turbine et l'arbre tournant. La deuxième partie détaille la modélisation de la machine à aimant permanent, fonctionnant en génératrice. Sous certaines hypothèses simplificatrices, le modèle obtenu n'est pas exploitable sous sa forme triphasée. Une projection de celui-ci dans le repère synchrone s'avère nécessaire pour rendre le modèle continu plus simple et facile à utiliser et à analyser. Le modèle obtenu dans le repère de Park est continu non linéaire fortement couplé.

Chapitre 03

Commande MPPT de l'éolienne

3.1. Introduction

Comme une suite logique au chapitre précédent, dans le présent chapitre, le modèle de l'éolienne servira à la commande en extraction puis conversion de l'énergie du vent en énergie électrique. Il sera donc question d'une part de commander la vitesse de rotation de l'éolienne image de la puissance extraite du vent, et d'autre part, de commander les courants de la MSAP image de la puissance électrique convertie avant d'être injectée au réseau.

3.2. Cahier des charges et stratégie MPPT

D'après Betz, la puissance extractible par la turbine ne peut en aucun cas dépasser les 59% de la puissance apportée par le vent. L'efficacité d'une éolienne se mesure donc par le taux d'extraction qui est toujours inférieur à la limite théorique de Betz. Ce taux communément appelé coefficient de puissance C_p est une fonction non linéaire de deux paramètres principaux. Le premier est l'angle de calage des pales β et le second est la vitesse relative de la turbine par rapport au vent λ .

Dans le présent travail, l'approche basée sur la poursuite du point d'extraction maximale ou MPPT (Maximum Power Point Tracking) est adoptée. En effet, afin d'identifier la valeur instantanée λ_{opt} de λ pour laquelle le coefficient d'extraction est maximum $C_{p_{max}}$, un calculateur utilise la courbe, donnant C_p en fonction de λ pour un β donné. Cette valeur λ_{opt} permet de calculer la vitesse de la turbine correspondante $\Omega_{turbref}$:

$$\Omega_{turbref} = \frac{\lambda_{opt} v_1}{R} \quad (3.1)$$

La vitesse de référence $\Omega_{turbref}$ est donc une fonction de la vitesse instantanée du vent. Pour une extraction quasi-maximale de la puissance, il faut que la vitesse de la turbine soit asservie à cette vitesse de référence. Cela est réalisé par un dispositif de commande en cascade à deux niveaux : le premier (externe) est un régulateur de vitesse et le second (interne) est un régulateur de courant, figure 3.1.

3.2.1. Régulateur de vitesse

Il permet d'imposer la vitesse de référence et délivre en sortie le couple électromagnétique qui compense le couple mécanique tendant à accélérer la turbine. A travers cette régulation, il permet d'alimenter le régulateur de courant par les courants de référence, selon la théorie des asservissements en cascade.

3.2.2. Régulateur de courant

Il permet d'imposer les courants de référence et délivre en sortie les tensions de commande concrétisées par le redresseur à absorption sinusoïdale de courant. Les courants statoriques régulés génèrent une puissance électrique P_{elec} variable qui tend à compenser l'énergie cinétique du rotor. La puissance électrique à la sortie du redresseur sous forme continue est injectée dans le réseau à la fréquence fondamentale de celui-ci.

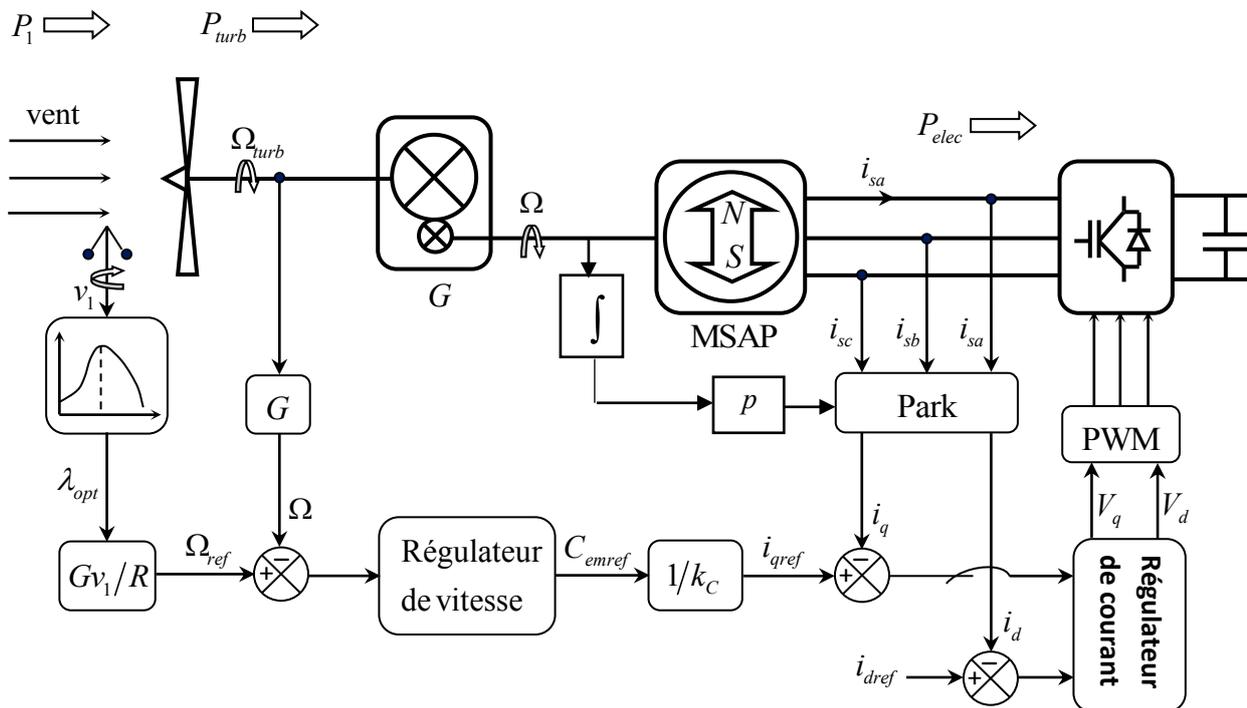


Figure.3.1. Structure de commande MPPT d'une éolienne à base d'une MSAP.

Des études d'aérodynamique statistique montrent que la vitesse d'un vent monotone suit des lois de probabilité significatives proches de la loi de Weibull. De plus, ces mêmes études montrent que le profil de vitesse peut être décrit par une valeur moyenne noyée dans un signal subharmonique aux amplitudes réduites [1,3].

Pour des raisons de simulation, nous allons utiliser un profil de vitesse du vent résultant de la superposition de quatre subharmoniques autour d'une valeur moyenne de 10 m/s . Il est donné en fonction du temps par l'expression suivante :

$$v_1 = 10 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t) \quad (3.2)$$

La figure 3.2 représente l'évolution de la vitesse du vent en fonction du temps.

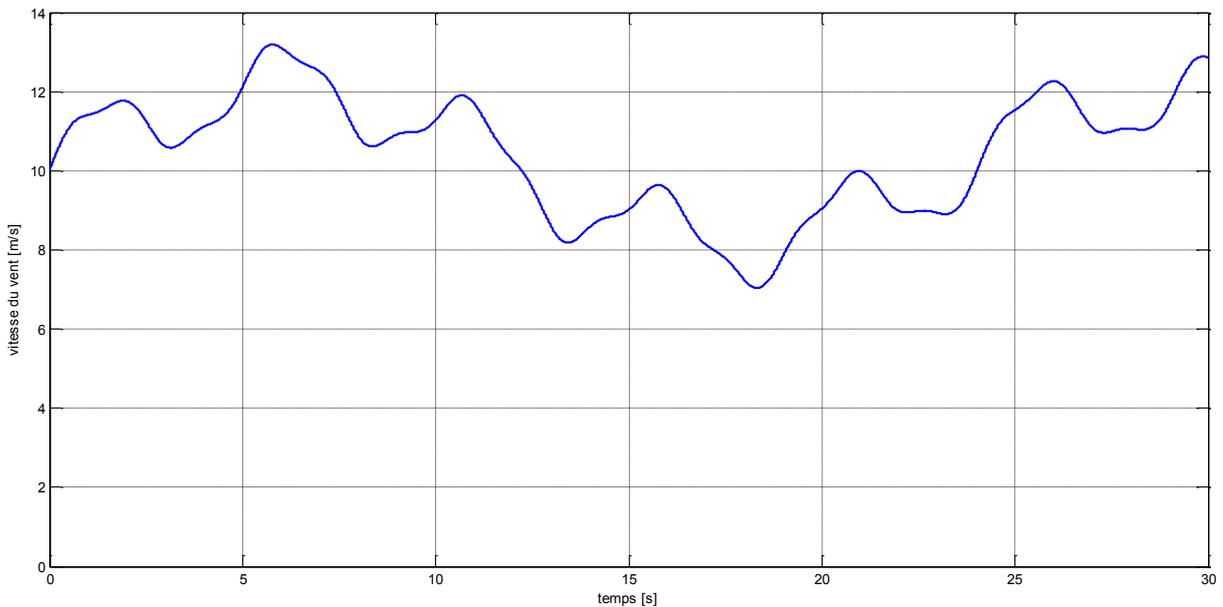


Figure.3.2. Profil de vitesse du vent.

3.3. Commande de la vitesse

La dynamique de la turbine (3.2) étant linéaire et relativement lente, par conséquent un régulateur conventionnel de type PI permettrait de réguler la vitesse Ω à sa référence Ω_{ref} .

$$\frac{d\Omega}{dt} + \frac{C_f}{J}\Omega = -\frac{1}{J}C_{em} + \frac{1}{J}C_m \quad (3.2)$$

C'est un système du premier ordre où Ω , C_{em} et C_m désignent, respectivement, la sortie, l'entrée de commande et la perturbation.

L'équation (3.2) peut être traduite par le schéma bloc de la figure 3.3.

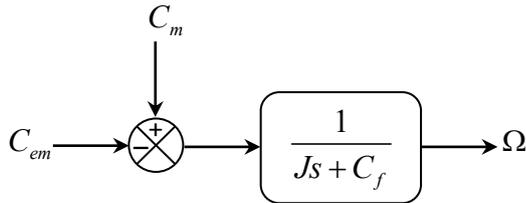


Figure.3.3. Schéma bloc de la turbine éolienne.

La fonction de transfert du régulateur PI est telle que :

$$F_{pi}(s) = \frac{k_p s + k_i}{s} \quad (3.3)$$

La fonction de transfert de la turbine en boucle fermée est donnée par :

$$F_{\Omega}(s) = \frac{k_p s + k_i}{Js^2 + (C_f + k_p)s + k_i} \quad (3.4)$$

Dont le polynôme caractéristique $\Delta_{\Omega}(s) = Js^2 + (C_f + k_p)s + k_i$ peut être identifié à celui d'un second degré :

$$\Delta(s) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (3.5)$$

Ce qui donne une pulsation naturelle ω_n et un coefficient ξ d'amortissement :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_i}{J}} \quad \text{et} \quad \xi = \frac{C_f + k_p}{2J\omega_n} \quad (3.6)$$

Autrement dit,

$$k_i = J\omega_n^2 \quad \text{et} \quad k_p = 2J\omega_n\xi - C_f \quad (3.7)$$

En choisissant un temps de réponse $t_r = 0.1s$ pour un coefficient d'amortissement $\xi = 0.7$, les valeurs des paramètres du régulateur PI sont données par :

$$k_i \approx 411 \quad \text{et} \quad k_p \approx 19 \quad (3.8)$$

A noter que la sortie du régulateur PI doit être de signe inversée car dans l'équation (3.2) la commande C_{em} est pondérée par un coefficient négatif.

3.4. Commande des courants

L'équation qui régit la dynamique des courants i_d et i_q est donnée par :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_c} i_d + \omega i_q - \frac{1}{L_c} V_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_c} i_q - \omega i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \frac{\varphi_f}{L_c} - \frac{1}{L_c} V_q \end{cases} \quad (3.9)$$

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à deux techniques de commande à savoir : comme approche intuitive, la commande conventionnelle par PI et comme approche robuste, la commande par modes glissants.

3.4.1. Commande par découplage non linéaire et régulateur PI

L'équation (3.9) présente des termes de couplage non linéaires, il y a lieu d'utiliser une commande par découplage non linéaire qui est, dans ce cas de figure, facile à utiliser. En effet, le système est carré. De plus, le degré relatif du système est égal au degré du système.

L'équation (3.9) peut se mettre sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} + \frac{R_s}{L_c} i_d = \mu_d \\ \frac{di_q}{dt} + \frac{R_s}{L_c} i_q = \mu_q \end{cases} \quad (3.10)$$

Où : les nouvelles entrées qui découplent et linéarisent μ_d et μ_q sont telles que :

$$\mu_d = \omega i_q - \frac{1}{L_c} V_d \quad (3.11.a)$$

$$\mu_q = -\omega i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \frac{\varphi_f}{L_c} - \frac{1}{L_c} V_q \quad (3.11.b)$$

Le système (3.10) est rendu linéaire découplé où chaque courant peut être commandé séparément.

Les tensions réelles de commande sont déduites de (3.11). Celles-ci sont données comme suit :

$$V_d = L_c (\omega i_q - \mu_d) \quad (3.12.a)$$

$$V_q = L_c \left(-\omega i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \frac{\varphi_f}{L_c} - \mu_q \right) \quad (3.12.b)$$

Les erreurs de réglage en courant e_d et e_q sont définies comme suit :

$$e_d = i_{dref} - i_d \quad (3.13.a)$$

$$e_q = i_{qref} - i_q \quad (3.13.b)$$

Les lois de commandes sont alors données par :

$$\mu_d = k_{pp} e_d + k_{ii} \int_0^t e_d(\tau) d\tau \quad (3.14.a)$$

$$\mu_q = k_{pp} e_q + k_{ii} \int_0^t e_q(\tau) d\tau \quad (3.14.b)$$

Où : k_{pp} et k_{ii} sont , respectivement, les gain proportionnel et intégral choisis égaux pour les deux régulateurs.

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$F_i(s) = \frac{k_{pp}s + k_{ii}}{s^2 + \left(k_{pp} + \frac{R_s}{L_c} \right) s + k_{ii}} \quad (3.15)$$

Dont le polynôme caractéristique $\Delta_i(s) = s^2 + \left(k_{pp} + \frac{R_s}{L_c}\right)s + k_{ii}$ peut être identifié à celui d'un second degré :

$$\Delta(s) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (3.16)$$

Ce qui donne une pulsation naturelle ω_n et un coefficient d'amortissement ξ :

$$\omega_n = \sqrt{k_{ii}} \text{ et } \xi = \frac{k_{pp} + \frac{R_s}{L_c}}{2\omega_n} \quad (3.17)$$

Autrement dit,

$$k_{ii} = \omega_n^2 \text{ et } k_{pp} = 2\omega_n\xi - \frac{R_s}{L_c} \quad (3.18)$$

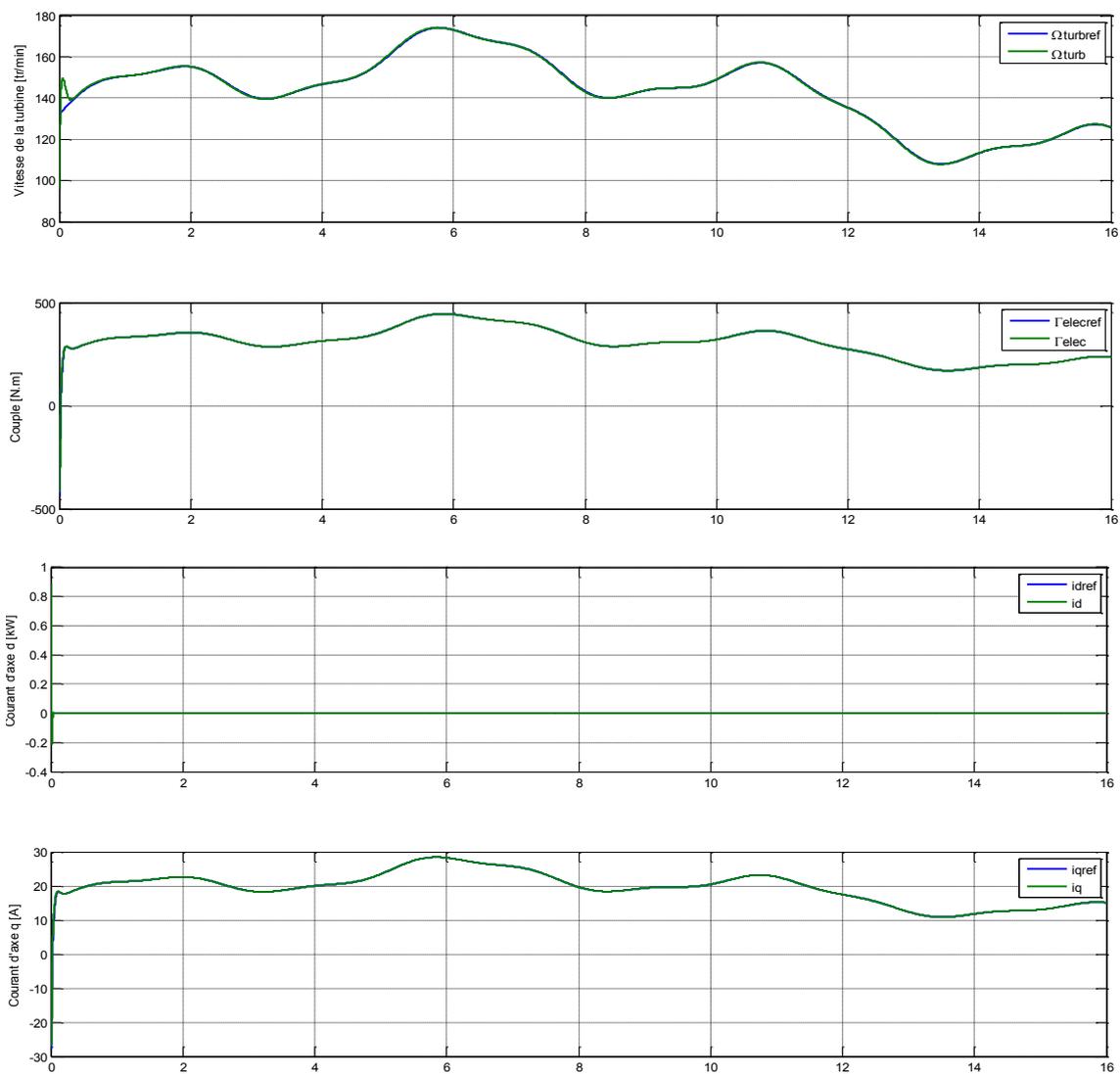
En choisissant un temps de réponse $t_r = 20$ ms pour un coefficient d'amortissement $\xi = 0.7$, les valeurs des paramètres du régulateur PI sont données par :

$$k_{ii} \approx 22.5 \times 10^3 \text{ et } k_{pp} \approx 209.5 \quad (3.19)$$

3.4.1.1. Simulation et discussion

Un programme Matlab a été élaboré afin de simuler le fonctionnement du système éolien piloté par la commande par découplage non linéaire et régulateur PI. Les simulations ont été réalisées dans situations de fonctionnement différentes à savoir :

- **Situation normale** : aucune perturbation n'est considérée.
- **Situation de défaillance** : des incertitudes paramétriques de l'ordre de 2% sur la résistance et l'inductance cyclique affectent le modèle de la machine.



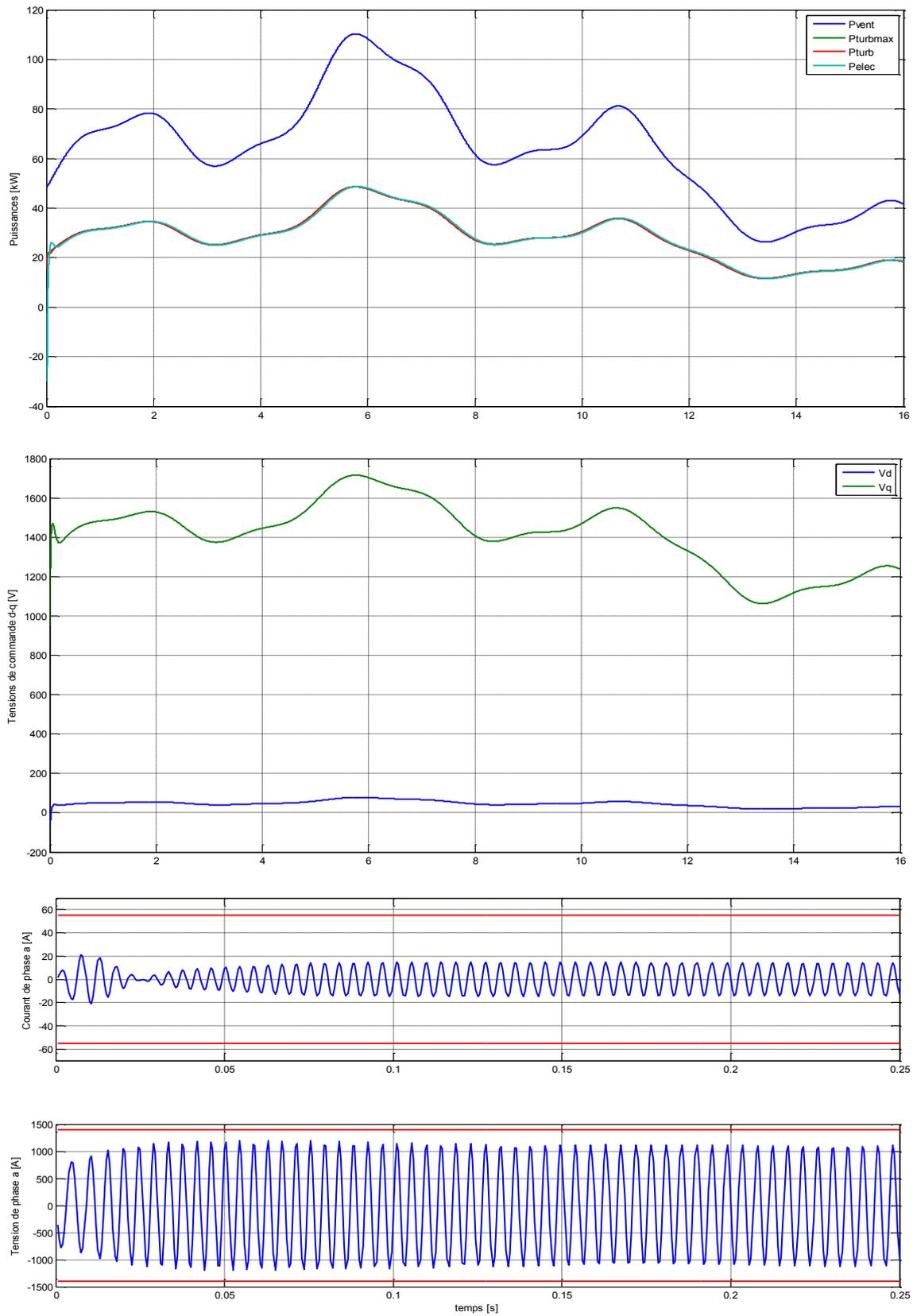
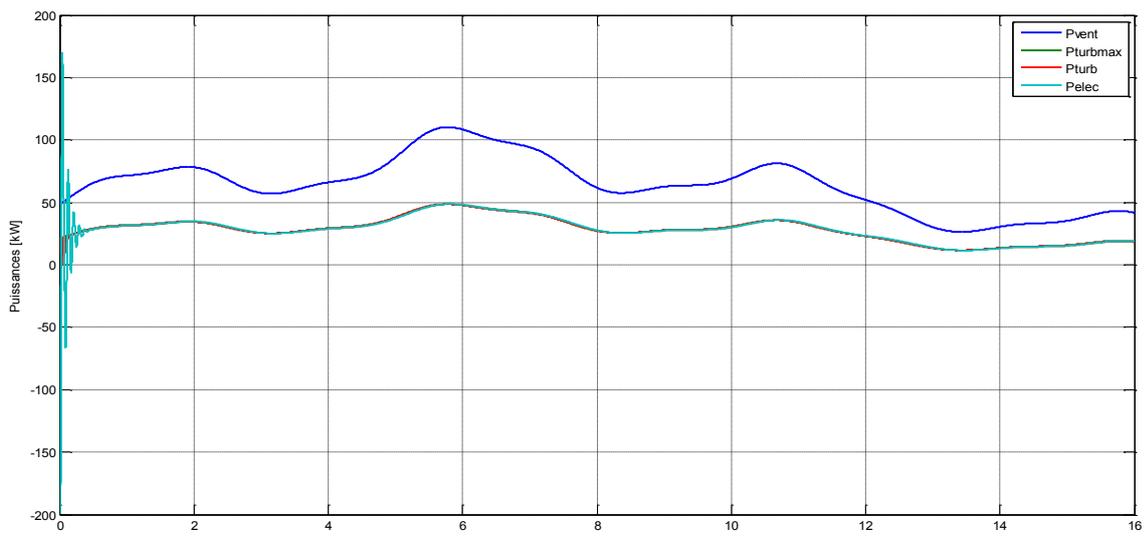
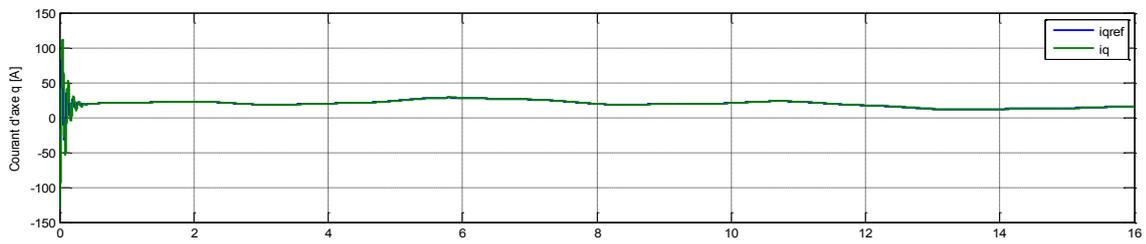
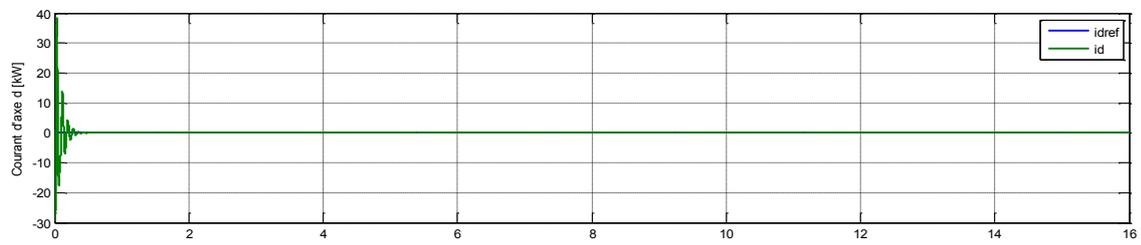
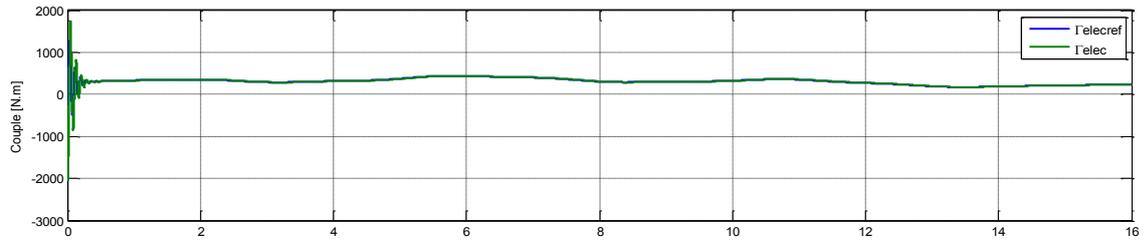
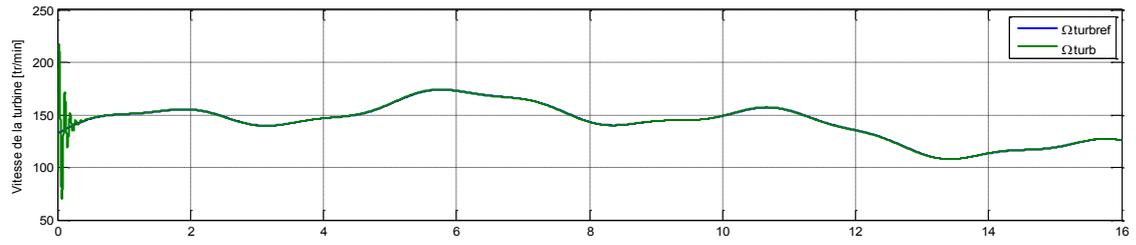


Figure.3.4. Réponses du système en situation normale.



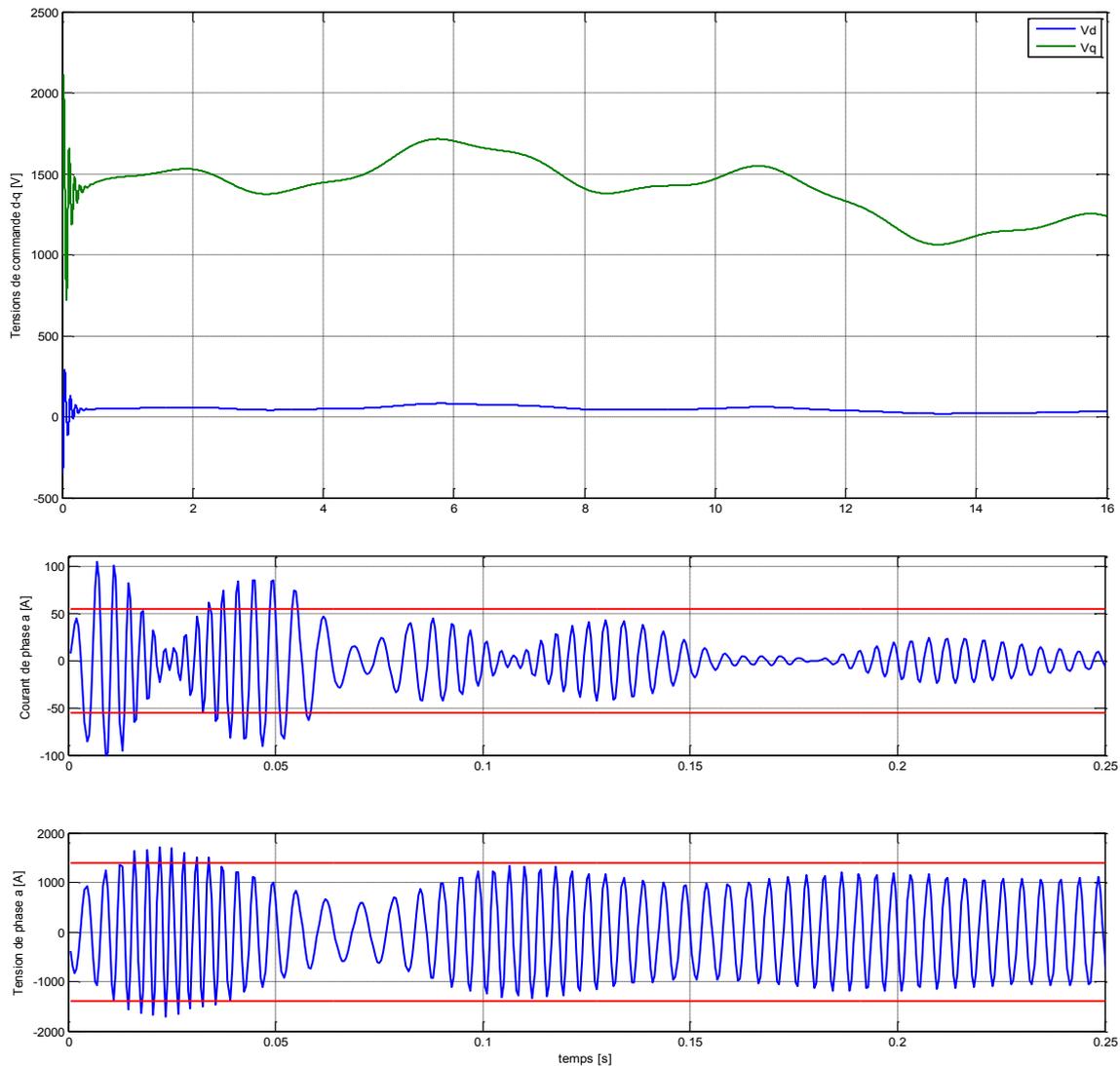


Figure.3.5. Réponses du système en situation de défaillance.

Les résultats de simulation représentés par les figures 3.4 et 3.5 montrent qu'en situation normale de fonctionnement, la poursuite de la vitesse et celle des grandeurs internes comme le couple électromagnétique et le courant statorique sont effectives avec une bonne réponse dynamique. De plus, les grandeurs de commande internes et externes sont admissibles. Cela permet de conclure que l'extraction de la puissance est optimale (ou MPPT).

Néanmoins, en situation de défaillance, la poursuite est réalisée au prix d'une commande inadmissible qui sollicite fortement l'actionneur (onduleur à absorption sinusoïdale de courant). En effet, la valeur crête du courant dépasse la limite tolérée de 55 A et celle de la tension dépasse la limite tolérée de 1400 V.

A noter qu'au-delà de 2% d'incertitude, les grandeurs s'effondreraient et la turbine s'emballerait.

3.4.2. Commande par modes glissants

La technique de commande à structure variable (*CSV*) par mode glissant en anglais *Sliding Mode Control*, est très connue par sa robustesse envers les incertitudes internes (variations des paramètres de la machine), et externes (perturbations due à la charge), et aux phénomènes ayant été omis dans la modélisation, tout en ayant une très bonne réponse dynamique.

Cette commande a été proposée en premier lieu en Union Soviétique par S.V. *Emelyanov* et fait l'objet de nombreux travaux de son équipe (*Utkin, Taran, Kostyleva*, etc.) à partir des travaux menés par le mathématicien A.F. *Philippov* sur les équations différentielles à second membre discontinu.

La commande des systèmes à structures variables par le mode de glissement n'est devenue très intéressante et attractive qu'à partir du début des années 80, elle est considérée comme une des approches les plus simples pour la commande des systèmes ayant un modèle imprécis. Ceci est dû à la bonne connaissance et à l'appréciation de la robustesse, propriété très importante caractérisant cette commande.

En réalité, l'équation dynamique régissant les courants est telle que :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_{sn}}{L_{cn}} i_d + \omega i_q - \frac{1}{L_{cn}} V_d + d_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_{sn}}{L_{cn}} i_q - \omega i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \frac{\varphi_f}{L_{cn}} - \frac{1}{L_{cn}} V_q + d_q \end{cases} \quad (3.20)$$

Où R_{sn} et L_{cn} sont, respectivement, les valeurs nominales de R_s et L_c . d_d et d_q sont, respectivement, des termes de perturbation qui englobent les dynamiques négligées, les saturations et les incertitudes paramétriques autour des valeurs nominales.

Ces termes de perturbation sont supposés bornés à bornes connues \bar{d}_d et \bar{d}_q . Cela se traduit par :

$$|d_d| \leq \bar{d}_d \quad \text{et} \quad |d_q| \leq \bar{d}_q \quad (3.21)$$

La surface de glissement vectorielle \mathbf{S} est choisie comme étant l'erreur de poursuite en courant comme suit :

$$\mathbf{S} = (s_d \quad s_q)^T = (e_d \quad e_q)^T \quad (3.22)$$

Où e_d et e_q sont les erreurs de poursuite en courant définies par (13.3).

L'utilisation de (3.9), (3.13) et (3.22) permet d'exprimer $\dot{\mathbf{S}}$ la dérivée en fonction du temps de la surface \mathbf{S} :

$$\dot{s}_d = \dot{i}_{dref} + \frac{R_{sn}}{L_{cn}} i_d - \omega i_q + \frac{1}{L_{cn}} V_d - d_d \quad (3.23.a)$$

$$\dot{s}_q = \dot{i}_{qref} + \frac{R_{sn}}{L_{cn}} i_q + \omega i_d - \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \frac{\varphi_f}{L_{cn}} + \frac{1}{L_{cn}} V_q - d_q \quad (3.23.b)$$

Pour forcer la surface \mathbf{S} à converger vers zéro, la loi de commande suivante est proposée :

$$V_d = L_{cn} \left(-\dot{i}_{dref} - \frac{R_{sn}}{L_{cn}} i_d + \omega i_q - k_{d1} \text{sign}(s_d) - k_{d2} s_d \right) \quad (3.24.a)$$

$$V_q = L_{cn} \left(-\dot{i}_{qref} - \frac{R_{sn}}{L_{cn}} i_q - \omega i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \frac{\varphi_f}{L_{cn}} - k_{q1} \text{sign}(s_q) - k_{q2} s_q \right) \quad (3.24.b)$$

Où k_{d1} , k_{d2} , k_{q1} et k_{q2} sont des gains positifs de conception vérifiant:

$$k_{d1} \geq \bar{d}_d \quad \text{et} \quad k_{q1} \geq \bar{d}_q \quad (3.25)$$

Théorème : l'application de la loi de commande (3.24) sous la condition (3.25) force les erreurs de poursuite en courant à converger vers zéro en temps fini donné par (3.38).

Preuve : La fonction de Lyapunov définie positive non radialement bornée suivante est proposée :

$$V = \frac{1}{2} (s_d^2 + s_q^2) \quad (3.26)$$

Sa dérivée en fonction du temps est telle que :

$$\dot{V} = s_d \dot{s}_d + s_q \dot{s}_q \quad (3.27)$$

En utilisant (3.23) et (3.24), (3.27) s'écrit :

$$\dot{V} = s_d (-k_{d1} \text{sign}(s_d) - k_{d2} s_d - d_d) + s_q (-k_{q1} \text{sign}(s_q) - k_{q2} s_q - d_q) \quad (3.28)$$

Ou encore,

$$\dot{V} = -k_{d1} |s_d| - k_{d2} s_d^2 - s_d d_d - k_{q1} |s_q| - k_{q2} s_q^2 - s_q d_q \quad (3.29)$$

Qui peut être majorée comme suit :

$$\dot{V} \leq (\bar{d}_d - k_{d1}) |s_d| + (\bar{d}_q - k_{q1}) |s_q| - k_{d2} s_d^2 - k_{q2} s_q^2 \quad (3.30)$$

D'après (3.25), il existe deux constantes positives σ_d et σ_q définies par :

$$\sigma_d = k_{d1} - \bar{d}_d \quad (3.31.a)$$

$$\sigma_q = k_{q1} - \bar{d}_q \quad (3.31.b)$$

Sous la condition (3.25), (3.30) permet d'écrire :

$$\dot{V} \leq -\sigma_d |s_d| - \sigma_q |s_q| \quad (3.32)$$

D'après (3.32), \dot{V} est définie négative. Par conséquent, toutes les grandeurs sont bornées. De plus, \mathbf{S} converge asymptotiquement vers zéro.

Il existe une constante positive $\rho = \min\{\sigma_d, \sigma_q\}$. Par conséquent, (3.32) se réduit à :

$$\dot{V} \leq -\rho (|s_d| + |s_q|) \quad (3.33)$$

L'inégalité de Cauchy-Schwarz et (3.33) conduisent à :

$$\dot{V} \leq -\rho \sqrt{s_d^2 + s_q^2} \quad (3.34)$$

La substitution de V par son expression (3.26) dans (3.34) donne :

$$\dot{V} \leq -\sqrt{2} \rho \sqrt{V} \quad (3.35)$$

D'où :

$$\frac{dV}{2\sqrt{V}} \leq -\frac{\rho}{\sqrt{2}} dt \quad (3.36)$$

L'intégration de (3.36) sur l'intervalle de temps $[0, t]$ entraîne :

$$\sqrt{V(t)} - \sqrt{V(0)} \leq -\frac{\rho}{\sqrt{2}} t \quad (3.37)$$

L'utilisation de (3.37) et le fait que V est décroissante donne une majoration du temps de convergence t_{\max} :

$$t_{\max} = \frac{\sqrt{2V(0)}}{\rho} \quad (3.38)$$

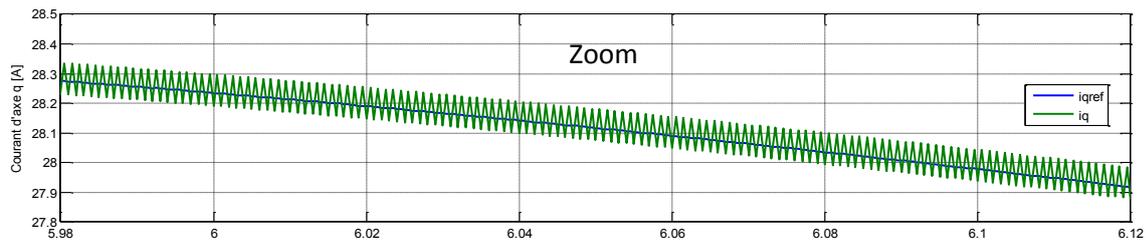
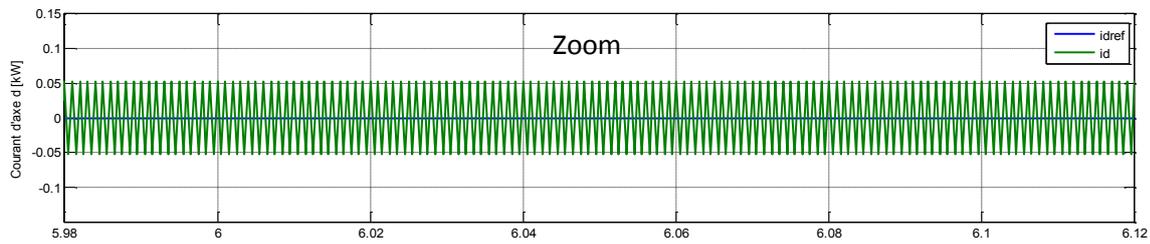
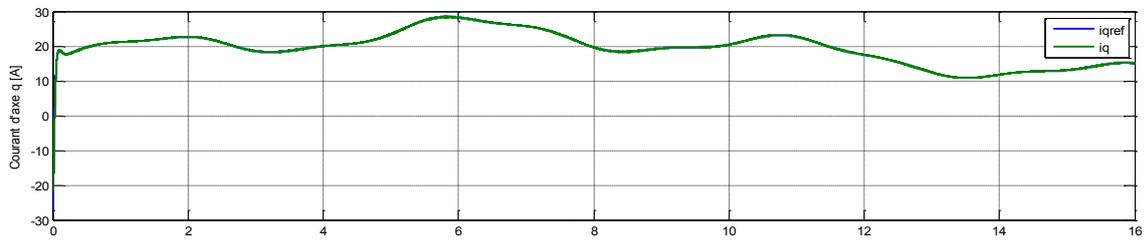
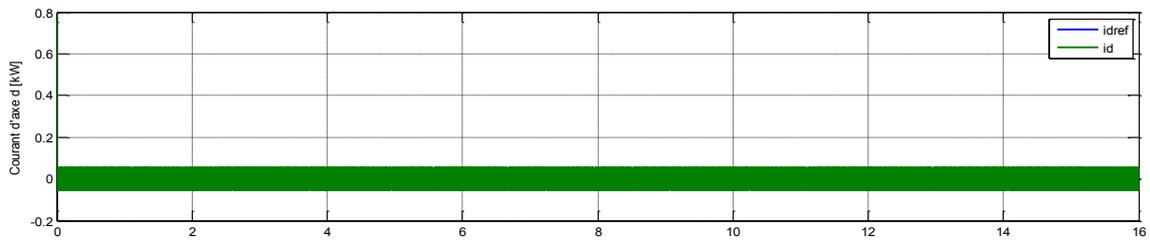
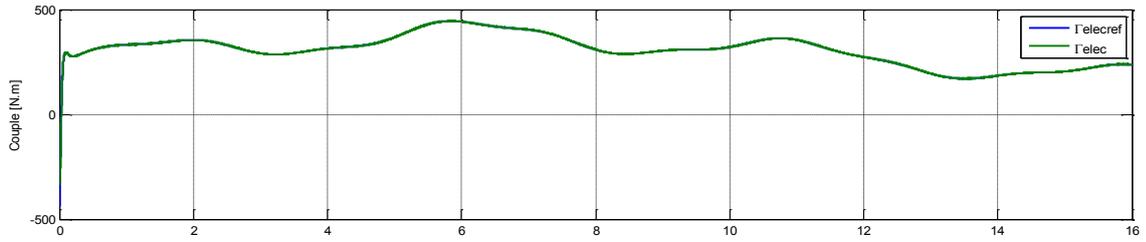
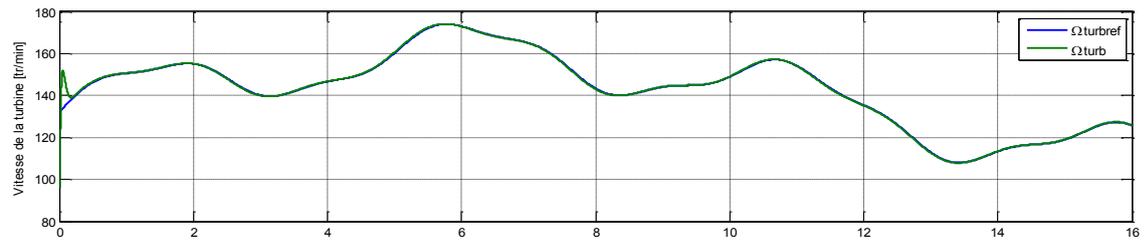
3.4.2.1. Simulation et discussion

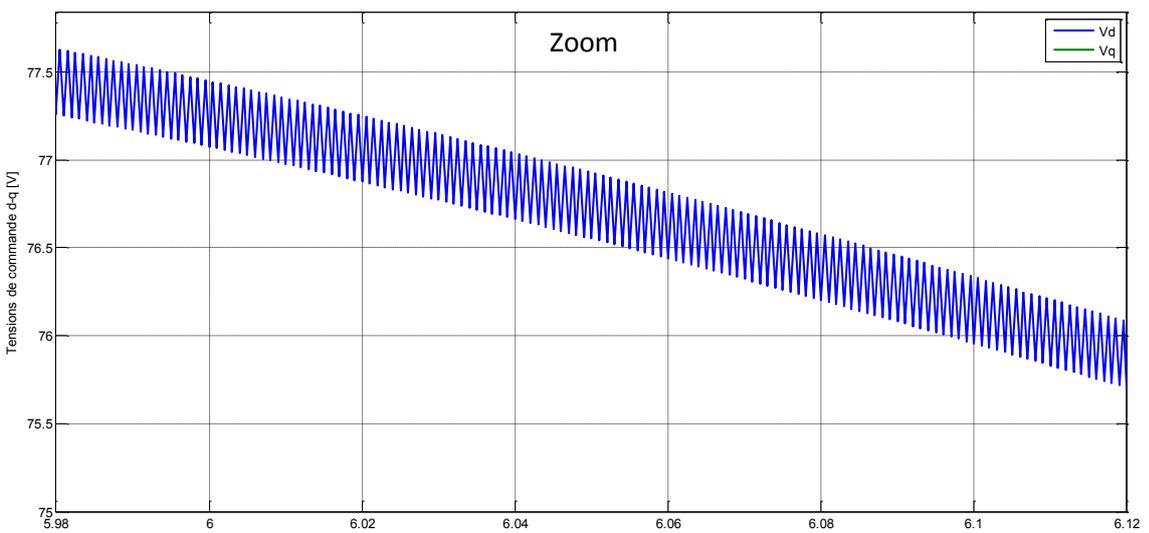
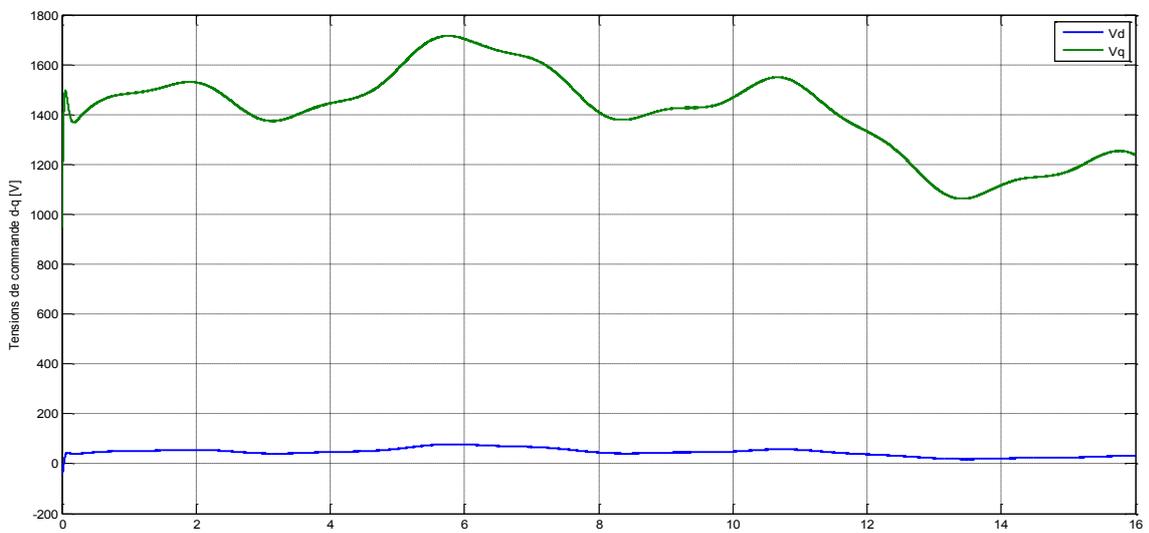
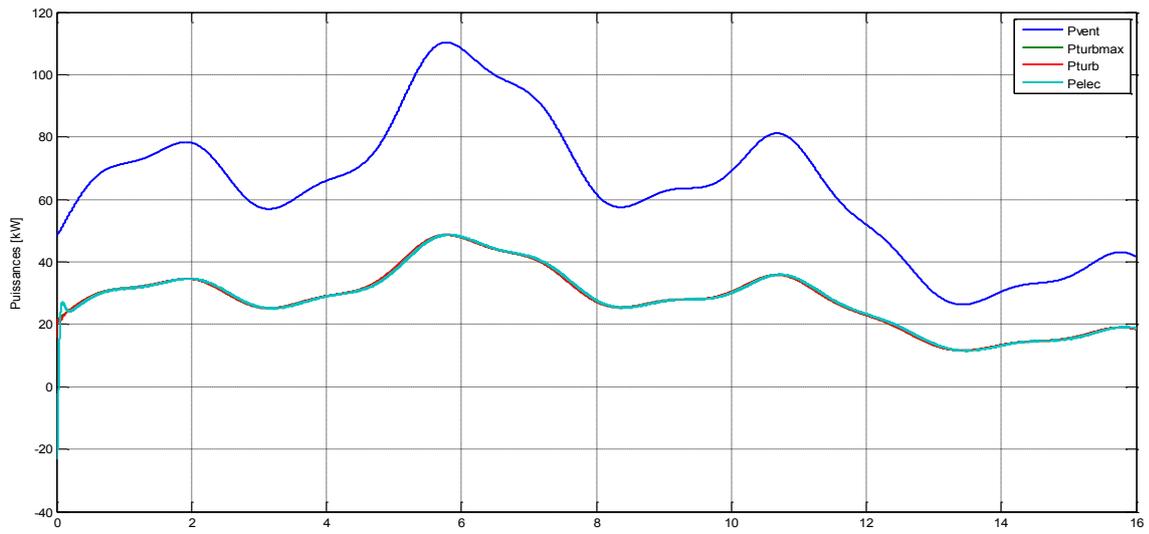
Les gains qui ont donnés satisfaction sont tels que :

$$k_{d1} = 170, k_{d2} = 200, k_{q1} = 190 \text{ et } k_{q2} = 200.$$

Pour les simulations du fonctionnement du système éolien piloté par la commande par modes glissants, les mêmes situations que celles de la technique de commande précédente sont considérées :

- **Situation normale** : aucune perturbation n'est considérée.
- **Situation de défaillance** : des incertitudes paramétriques de l'ordre de 30% sur la résistance et l'inductance cyclique affectent le modèle de la machine.





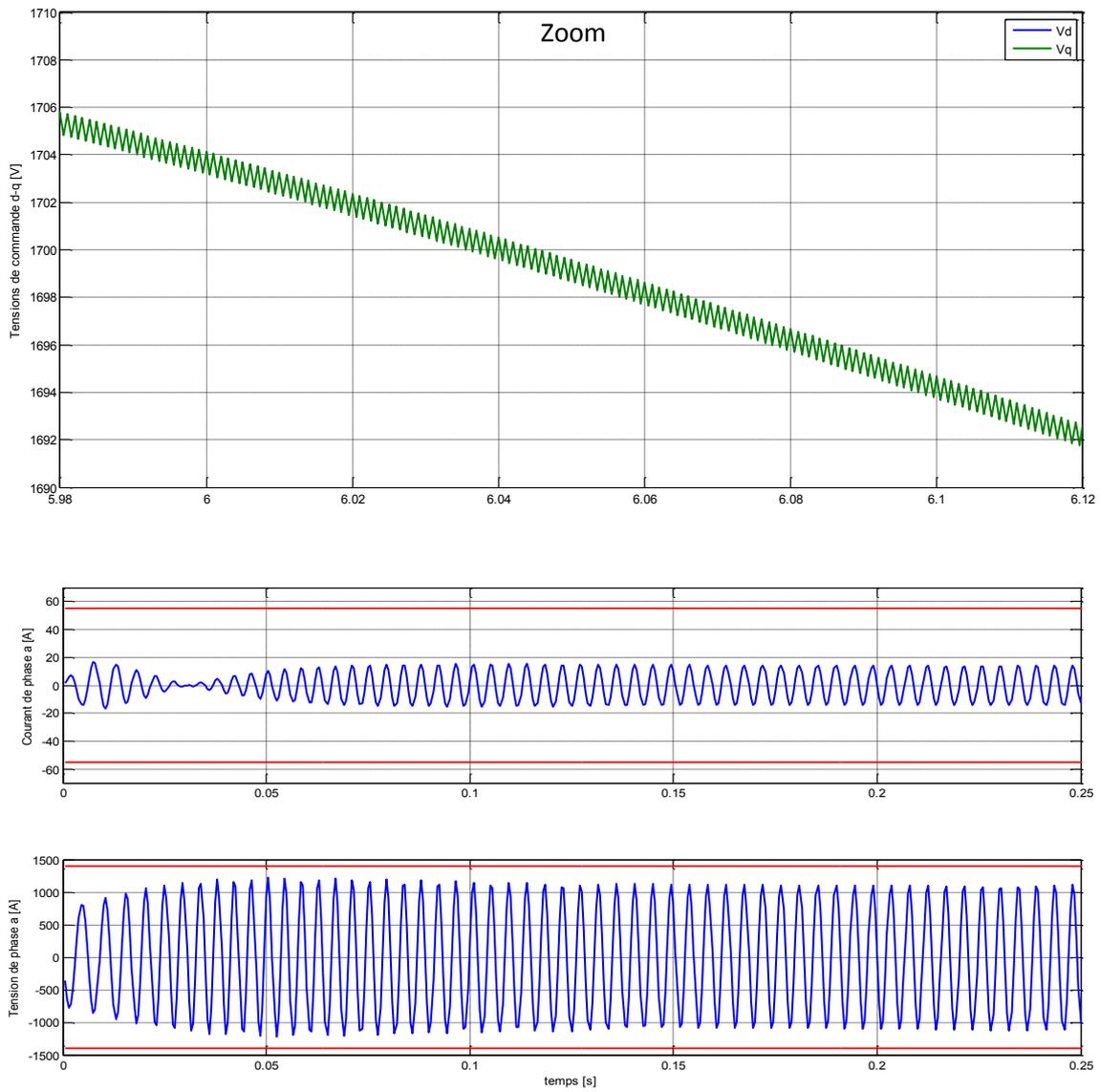
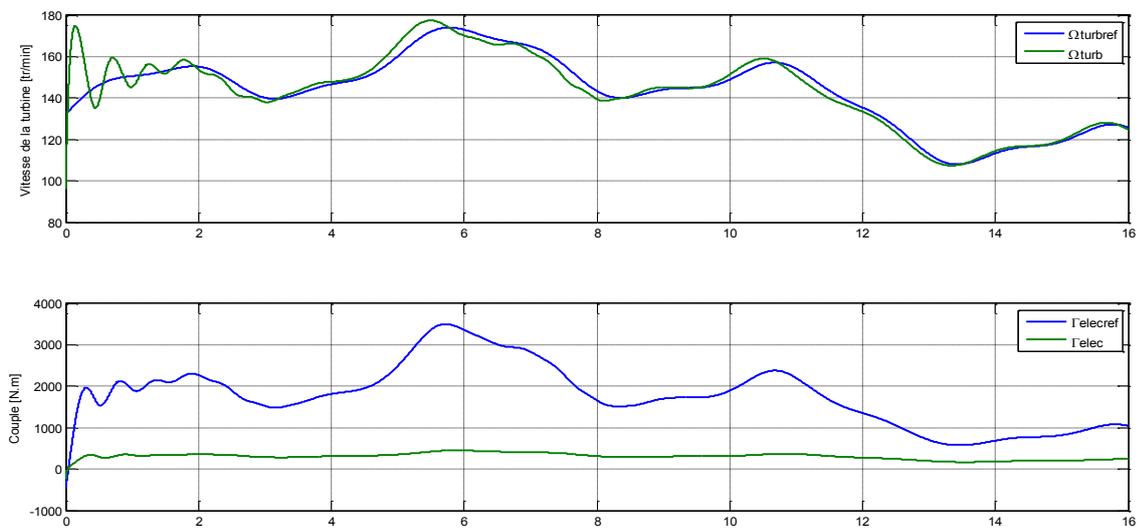
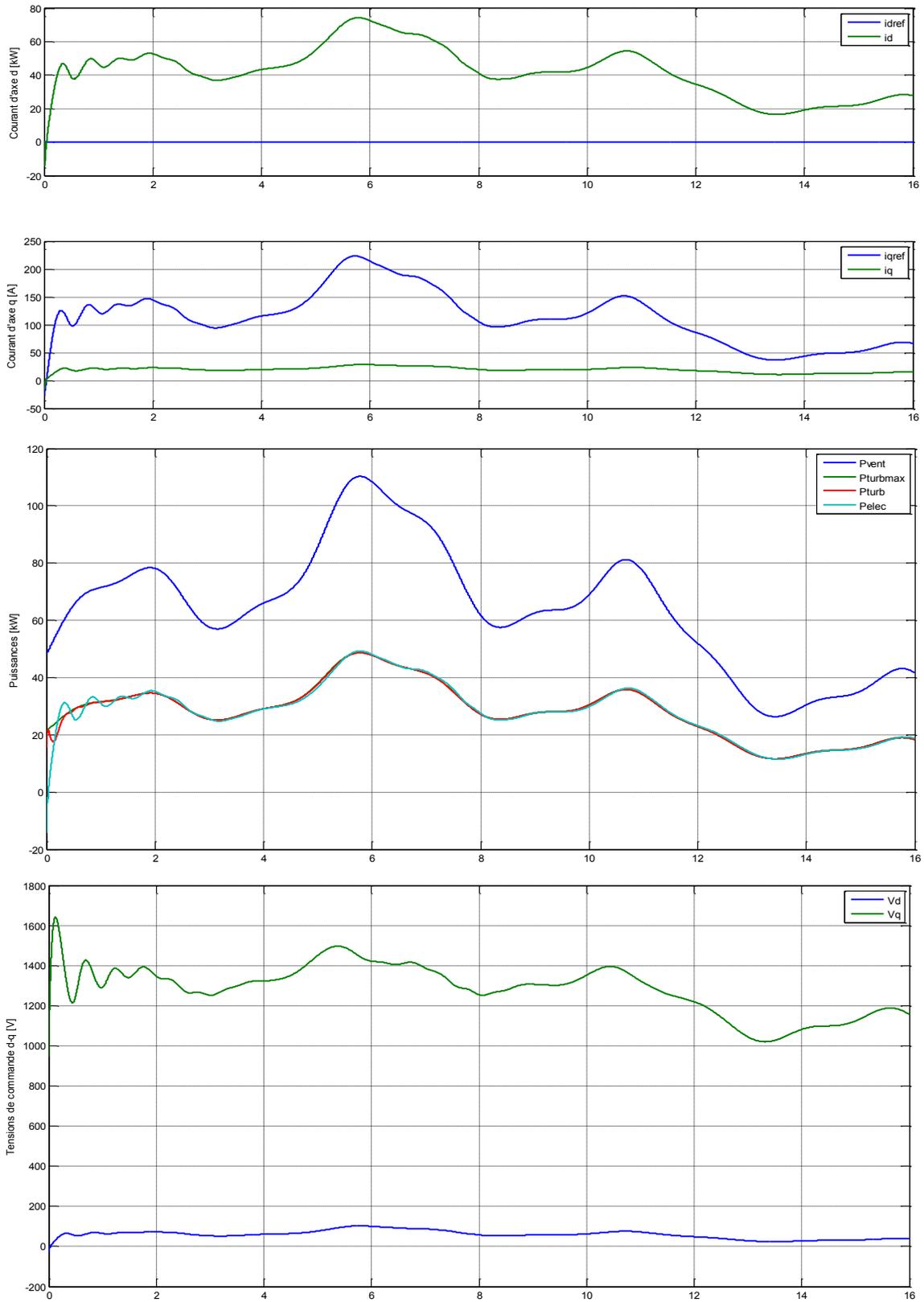


Figure.3.6. Réponses du système en situation normale.





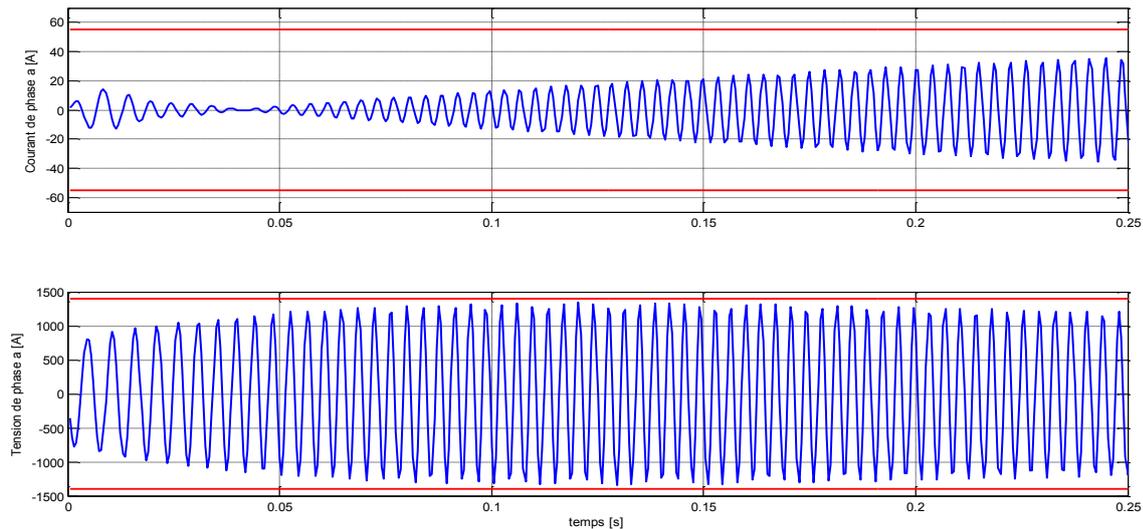


Figure.3.7. Réponses du système en situation de défaillance.

Les résultats de simulation représentés par les figures 3.6 et 3.7 montrent qu'en situation normale de fonctionnement, la poursuite de la vitesse et celle des grandeurs internes comme le couple électromagnétique et le courant statorique sont effectives avec une bonne réponse dynamique. De plus, les grandeurs de commande internes et externes sont admissibles. Cela permet de conclure que l'extraction de la puissance est optimale (ou MPPT). Cependant, il y a présence de l'inévitable phénomène de broutement qui affecte le la tension et le courant. La vitesse n'étant pas affectée, car elle est filtrée par l'inertie des parties tournantes. Toutefois, le système risque la fatigue ou le stress mécanique qui réduiraient sa durée de vie.

En situation de défaillance, la poursuite est réalisée avec une commande admissible sans solliciter fortement les actionneurs. Par conséquent la commande par modes glissants est très robuste aux variations paramétriques du système.

A noter qu'au-delà de 30% d'incertitude, la commande maintiendrait la stabilité au prix d'une réponse très dégradée.

3.5. Conclusion

Le présent chapitre expose les objectifs de la commande d'une éolienne, la méthode MPPT pour l'extraction optimale de puissance basée sur la poursuite de la vitesse optimale et deux approches pour la commande des courants.

La première approche utilise le découplage des équations de courant et un régulateur PI. Cette technique souffre essentiellement de la dégradation des performances voire même la perte de stabilité quand les paramètres du système sont entachés d'incertitudes.

Quant à la seconde approche, elle utilise les modes glissants. Cette technique est meilleure en termes de robustesse aux variations paramétriques. Toutefois, le phénomène de broutement est un inconvénient auquel il faut faire face.

Conclusion générale

Le présent mémoire expose une étude de modélisation et de commande de la vitesse d'un système éolien équipé d'une MSAP dans le but d'optimiser la production d'énergie pour un profil de vent variable.

Le premier chapitre a permis d'élaborer un rappel de quelques notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne. Différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits. De plus, la constante théorique de Betz, qui limite le rendement des systèmes de conversion des éoliennes, a été mise en évidence.

Dans le second chapitre, la modélisation de la MSAP a été étudiée. La transformation de Park a été utilisée pour représenter les équations de la machine triphasée dans un repère synchrone afin de rendre celles-ci plus simples et en mesure d'exploiter la théorie de la commande automatique. Du point de vue dynamique, il y a deux sous-systèmes : le sous-système mécanique concernant la vitesse de l'arbre tournant relativement lent et un sous-système électrique concernant le courant en sortie de la machine qui est relativement rapide.

Le troisième chapitre a été consacré à la commande du système éolien. Vu sa lenteur, la vitesse a été régulée par un PI. Quant au courant, deux techniques de commande ont été utilisées. La première utilise le découplage et le réglage PI et la seconde utilise les modes glissants.

En l'absence de perturbations paramétriques, les résultats de simulation sont satisfaisants pour les deux lois de commande en courant. Néanmoins, lorsque le modèle sur lequel est basé le calcul de la commande est incertain, la commande par découplage linéarisant perd ses performances et devient inadmissible si l'incertitude relative dépasse 2%. Par ailleurs, la commande par modes glissants se révèle performante et très peu sensible aux incertitudes de modélisation. Par conséquent, elle représente la meilleure approche de commande, bien que le chattering doive encore être réduit.

Comme perspectives sur le présent travail, il serait intéressant d'utiliser la commande floue adaptative ou la commande par modes glissants d'ordre supérieur pour voir s'il est possible d'améliorer les performances voire même d'éliminer l'effet du chattering.

References:

- [1] Renewables 2014 global status report, REN21 “Renewable Energy Policy Network for the 21st Century,” Paris, Tech. Rep., 2014.
- [2] S. Emelyanov, Variable Structure Control Systems, Nauka, Moscow, 1967
- [3] V. Utkin, “Variable structure systems with sliding modes,” IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 22, no. 2, pp. 121–222, 1977.
- [4] Bounar N, Boukroune A, Boudjema F, M'Saad M, Farza M. Adaptive fuzzy vector control for a doubly-fed induction motor. Neurocomputing 2015; 151: 756–769.
- [5] A. HAMACHE, M. O. BENSIDHOUM and H. CHEKIREB, “Sling Mode Control with Time Delay Disturbance Estimator For Power Flow Control Using SVC-HVDC”, Mediterranean Journal of Measurement and Control, Vol. 12 No. 2, 2016.
- [6] Frederic POITIERS, ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'ENERGIE EOLIENNE : Machine asynchrone à cage autonome et Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau octobre 13,2010.
- [7] Albert Betz, Wind Energie 1926.
- [8] R. Maouedj, S. Bousalem, et B. Benyoucef, Etude des performances d'un système éolien pour le site d'Adrar. Le 7eme congrès national de la physique et ses applications (CNPA' 2006). Béchar du 18 au 20 Décembre 2006.
- [9] Rachid Maouedj, Souad Bousalem, Boumediene Benyoucef. Etude des performances d'un système éolien. Application pour des sites algériens, JITH 2007.
- [10] S. BELAKEHAL, A. BENTOUNSI, M. MERZOUG ET H. BENALLA «Modélisation et commande d'une génératrice Synchrones à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne» article, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [11] R.H. Park, « Two Reaction Theory of Synchronous Machines », *AIEE Transactions*, n° 48.

Paramètres de la MSAP utilisée :

- Nombre de pair de pole : 6.
- Résistance statorique : 1.36 Ohm.
- Inductance : 12.5 Henry
- Flux : 1.8 Weber.
- Coefficient de frottement : 0.01.