

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira

Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialités : Automatique et Informatique Industrielle

Automatique et Systèmes

Thème

**Commande non linéaire par retour d'état statique et dynamique
d'un système éolien à vitesse variable**

Préparé par :

AIT MESSAOUD Mehrez

ABDELLI Nassim

Dirigé par :

Mr H.LEHOUCHE

Examiné par :

Mr F.YAHIAOUI

Mr A.OUARET

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous remercions avant tout le Dieu, le tout puissant qui nous a donné la force, le courage et la patience afin d'achever ce travail.

Nos plus sincères remerciements vont à toutes les personnes qui nous ont aidés à réaliser ce modeste travail et plus particulièrement

Mr H.LEHOUCHE pour son aide, ses conseils, ses encouragements et sa présence.

Nos remerciements les plus respectueux aux membres du jury

Mr F.YAHIAOUI et Mr A.OUARET pour leur acceptation d'évaluer ce travail.

Nous remercions aussi tous les enseignants des départements Automatiques qui ont contribué à notre formation

Enfin, à toute personnes ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce projet.

Dédicaces

*Avant toute chose je vaudrais faire une pensée à ma très chère
maman qui est au ciel (paix à son âme) que dieu l'accueille
dans son vaste paradis.*

A mon père et Nana (que dieu les gardent pour nous).

A mes sœurs bien aimés et leurs maris.

A mes adorables neveux et nièces que j'adore.

*A toute la famille ABDELLI plus particulièrement mon cousin
Fawzi.*

*A ma famille sportive (Boubekeur, Abid, Haroun, Sofiane,
Khaled, Billel, Hanine, Saïd.....).*

A tous mes amis (Sofiane, Walid, Saïd, arezki).

A mon binôme mehrez et sa famille.

Nassim

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail, en premier lieu à mes très chers parents (que dieu les gardent pour nous), qui m'ont soutenue dans mes études

A mon cher frère ANIS

A mes sœurs NOUR ELHOUDA et IMENE adorables

A mes tentes et oncles plus particulièrement ma tante HADJILA et sa fille NABILA et mon oncle GHILES

A tous mes cousins et cousine (Lyes, Hamza, Belkacem...)

A tous mes amis (Moussa, Oussama, ouahib, lamine ...)

A toute la famille Ait Messaoud, Oumbiche

A mon binôme Nassim et sa famille et tout le club de RCA

Mehrez

Table des matières

| | |
|--|----|
| Liste des figures..... | IV |
| Liste des tableaux..... | V |
| Nomenclature..... | VI |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre 1 : Généralités et modélisation d'une éolienne à vitesse variable | |
| 1.1 Introduction | 3 |
| 1.2 Description d'une éolienne..... | 3 |
| 1.3 Les types et Classification des éoliennes..... | 3 |
| 1.3.1 Selon la taille | 4 |
| 1.3.2 Selon la vitesse de rotation | 4 |
| 1.3.3 Classification selon le principe de fonctionnement | 4 |
| 1.4 Les principaux composants des éoliennes..... | 6 |
| 1.4.1 La fondation..... | 6 |
| 1.4.2 Le rotor | 7 |
| 1.4.3 Le Mât..... | 7 |
| 1.4.4 La nacelle..... | 7 |
| 1.4.5 La cabine de dispersion | 8 |
| 1.5 Principes de fonctionnement des éoliennes pour la transformation d'énergie | 8 |
| 1.6 Aérodynamique..... | 9 |
| 1.6.1 Conversion de l'énergie cinétique de vent | 9 |
| 1.6.2 Puissance aérodynamique..... | 10 |
| 1.6.3 Coefficient de puissance aérodynamique | 11 |
| 1.6.4 Couple aérodynamique | 12 |
| 1.7 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne | 13 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| 1.7.1 Avantages | 13 |
| 1.7.2 Inconvénients..... | 14 |
| 1.8 Dispositif d'entraînement | 15 |
| 1.8.1 Modèle à deux masses | 15 |
| 1.8.2 Modèle à une masse | 18 |
| 1.9 Simulation du modèle à une masse en boucle ouverte | 21 |
| 1.9.1 Profil du vent | 22 |
| 1.9.2 Résultats de simulation | 23 |
| 1.9.3 Interprétation des résultats..... | 25 |
| 1.10 Conclusion..... | 25 |
| Chapitre 2 Commande non linéaire par retour d'état statique d'un système éolien | |
| 2.1 Introduction | 26 |
| 2.2 Caractéristique de la puissance vitesse d'une éolienne | 26 |
| 2.3 Objectif de la commande | 27 |
| 2.4 Configuration de la commande | 29 |
| 2.5 Commande non linéaire par retour d'état statique | 30 |
| 2.5.1 Modèle a deux masse | 30 |
| 2.5.2 Modèle à une masse | 34 |
| 2.5.3 Simulation du modèle a une masse avec retour d'état statique | 36 |
| 2.5.4 Résultats de simulation | 36 |
| 2.6 Conclusion..... | 38 |
| Chapitre 3 Commande non linéaire par retour d'état dynamique d'un système éolien | |
| 3.1 Introduction | 39 |
| 3.2.1 Modèle a deux masse | 39 |
| 3.2.2 Modèle à une masse | 41 |

Table des matières

| | |
|---|----|
| 3.2.3 Simulation du modèle à une masse avec retour d'état dynamique | 42 |
| 3.2.4 Résultats de simulation | 42 |
| 3.3 Comparaison des performances entre les différentes commandes..... | 45 |
| 3.4 Conclusion..... | 47 |
| Conclusion général..... | 48 |
| Référence bibliographique..... | 50 |
| Annexe A : Paramètres de l'éolienne CART..... | 53 |

Liste des figures

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1.1 éolienne à axe horizontal et à axe vertical | 5 |
| Figure 1.2 Les composantes d'une éolienne | 6 |
| Figure 1.3 Chaîne de transformation énergétique | 9 |
| Figure 1.4 Principe d'extraction de l'énergie cinétique du vent | 9 |
| Figure 1.5 Principe d'extraction de l'énergie cinétique du vent | 10 |
| Figure 1.6 Coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ | 12 |
| Figure 2.1 caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne | 27 |
| Figure 2.2 Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique λ pour une valeur de l'angle de calage fixe $\beta = 2$ | 28 |
| Figure 2.3 Niveaux de commande d'une éolienne à vitesse variable et calage variable | 29 |
| Figure 2.4 Bloc Simulink de la commande par retour d'état statique d'un système éolien | 35 |
| Figure 2.5 vitesse de rotation du rotor de la commande non linéaire par retour d'état statique | 36 |
| Figure 2.6 vitesse de rotation de la génératrice de la commande non linéaire par retour d'état statique | 37 |
| Figure 2.7 puissance mécanique de la commande non linéaire par retour d'état statique..... | 37 |
| Figure 2.8 couple de générateur..... | 38 |
| Figure 3.1 Bloc Simulink de la commande par retour d'état dynamique d'un système éolien | 41 |
| Figure 3.2 vitesse de rotation du rotor de la commande non linéaire par retour d'état dynamique | 42 |
| Figure 3.3 vitesse de rotation de la génératrice de la commande non linéaire par retour d'état dynamique | 42 |
| Figure 3.4 puissance mécanique de la commande par retour d'état dynamique..... | 43 |
| Figure 3.5 couple du générateur | 43 |
| Figure 3.6 vitesse de rotation du rotor par retour d'état statique | 44 |
| Figure 3.7 vitesse de rotation du rotor par retour d'état dynamique | 45 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 3.8 puissance mécanique par retour d'état statique..... | 45 |
| Figure 3.9 puissance mécanique par retour d'état dynamique | 46 |

Liste des tableaux

Liste des Tableaux

Tableau 1-1 Classification des éoliennes 4

Nomenclature

Nomenclature

| | |
|------------------------------|--|
| V | Vitesse de vent |
| ρ | Densité de l'air |
| R | Rayon de rotor |
| P_a | Puissance aérodynamique |
| T_a | Couple aérodynamique |
| λ | Vitesse spécifique |
| β | Angle de calage des pales |
| $C_p(\lambda, \beta)$ | Coefficient de puissance |
| $C_{p_max}(\lambda, \beta)$ | Limite de Betz du coefficient de puissance |
| $C_q(\lambda, \beta)$ | Coefficient du couple |
| ω_t | Vitesse angulaire du rotor |
| $\omega_{t\ opt}$ | Vitesse angulaire du rotor optimale |
| ω_g | Vitesse angulaire de la génératrice |
| ω_{ls} | Vitesse angulaire de l'arbre lent |
| ω_{hs} | Vitesse angulaire de l'arbre rapide |
| θ_t | Position angulaire du rotor |
| θ_g | Position angulaire de la génératrice |
| T_{em} | Couple électromagnétique du générateur |
| T_{mec} | Couple mécanique |
| T_{ls} | Couple de l'arbre lent |
| T_{hs} | Couple de l'arbre rapide |
| T_g | Couple du générateur |

| | |
|----------|---|
| J_r | Inertie des masses du côté du rotor |
| J_g | Inertie des masses du côté du générateur |
| J_t | Inertie de la turbine |
| K_r | Coefficient de frottements externes du rotor |
| K_g | Coefficient de frottements externes de la génératrice |
| K_t | Coefficient de frottements visqueux |
| B_{ls} | Coefficient de frottements sur l'arbre lent |
| K_{ls} | Coefficient de torsion sur l'arbre lent |

Introduction générale

Introduction générale

La demande mondiale en énergie électrique augmente progressivement surtout avec l'apparition des nouvelles technologies des équipements industriels électroniques et informatiques et par conséquent l'épuisement à plus ou moins long terme des énergies fossiles et la pollution de l'environnement ainsi que l'effet de serre posent des problèmes et des crises économiques mondial. Diverses solutions ont été proposées et envisagées. Après la crise pétrolière, certains pays sont pris les devants dans l'orientation nucléaire tandis que d'autre ont massivement utilisé les énergies renouvelables et en particulier l'énergie éolienne [1].

Jusqu'à présent, l'énergie éolienne est l'énergie renouvelable la plus prometteuse. Elle est basée sur conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique.

L'énergie éolienne peut proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO_2 . C'est une énergie propre, abondante et inépuisable qui peut produire l'électricité pratiquement sans l'émission des gaz par polluants [1].

L'intégration des systèmes éoliens au sein des systèmes énergétiques du point de vue des prix nécessite la croissance de leur efficacité, à savoir la réduction des coûts d'opération et de maintenance, aussi bien que l'augmentation de la puissance captée du vent. Les systèmes de contrôle des éoliennes ont eu un développement considérable dans les dernières années. Effectivement, quel que soit le type de l'éolienne, le facteur clé demeure la méthode de commande et il a été montr² par ailleurs que les stratégies de commande peuvent avoir un effet majeur sur les chargements de l'éolienne et sur le système électrique. On distingue pour des éoliennes à vitesse variable, qui sont les plus répandues actuellement, deux régimes de fonctionnement [2].

Le premier est le régime à vitesse variable qui correspond à un fonctionnement en dessous de la puissance nominale. L'objectif principal de la commande dans cette zone est de maximiser la capture de l'énergie du vent. Le couple de la génératrice est alors utilisé pour faire varier la vitesse du rotor [2].

Le second régime est celui de la régulation de puissance. Le calage des pales et le couple de la génératrice peuvent alors être utilisés. Notre travail dans ce mémoire porte sur les techniques de commande des éoliennes à vitesse variable [2].

Ce mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre est divisé en deux parties, la première est consacrée sur le principe de fonctionnement des éoliennes à travers des équations et les concepts physiques régissant sur leur fonctionnement, la deuxième partie comporte sur la modélisation du comportement aérodynamique et mécanique. On y présente deux modèles mathématiques qui découlent de ces lois aérodynamique et mécanique. Le modèle à deux masses et le modèle à une masse, ce dernier est un modèle simplifié du premier sous certaines hypothèses.

Le deuxième et troisième chapitre présentent les commandes non linéaires étudiées dans ce mémoire. Il existe une littérature sur l'optimisation de la capture de l'énergie. En effet, Une grande partie des travaux dans le domaine de la commande des systèmes de conversion d'énergie éolienne traite des commandes dans la zone de charge partielle (à faibles vitesses) mais nous employons dans le cadre de ce travail deux techniques dans la littérature accessible et relevant du domaine de l'éolien, le deuxième chapitre est consacré sur la commande non linéaire par retour d'état statique et le troisième sur la commande non linéaire par retour d'état dynamique. Enfin une comparaison sera élaborée sur les deux commandes.

Enfin, on termine par une conclusion générale et les perspectives envisagées.

Chapitre 1

Généralités et modélisation d'un système éolien à vitesse variable

Chapitre 1 : Généralités et modélisation d'un système éolien à vitesse variable

1.1 Introduction

Ce chapitre porte sur la définition de l'éolienne et sa conception, en présentent le principe de son fonctionnement, ainsi que ses constituants technologiques, en se focalisant sur les éoliennes à axe horizontal et a vitesse variable et ensuite nous faisons un rappel des notions élémentaires du fonctionnement d'un système éolien et équations qui s'y rapportent, les principaux avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

Ensuite on s'intéresse à la modélisation et l'étude de dispositif d'entraînement. Ce dernier est destiné à transformer la vitesse de rotation lente du côté rotor en une vitesse de rotation rapide du côté générateur. On peut lui associer un modèle à deux masses ou à une masse uniquement.

Cette étude représente les deux modèles, le modèle à deux masses est plus général et peut être appliquée aux éoliennes de toute taille. Le modèle à une masse est une simplification du premier et il est adopté aux éoliennes de grandes tailles.

1.2 Description d'une éolienne

Est un dispositif conçu pour convertir de l'énergie cinétique en énergie mécanique, une éolienne est constituée de pales qui tournent autour d'un rotor et sont entraînées par le vent, ils sont généralement utilisés pour produire de l'électricité et entrent dans la catégorie des énergies renouvelables [3]

1.3 Les types et classification des éoliennes

Il existe plusieurs types d'éoliennes, chaque-une a son propre principe de fonctionnement et permet de produire plus ou moins d'électricité.

Il n'y a pas de relation directe entre la hauteur et la puissance de l'éolienne.

En effet, cette puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor qui n'est pas toujours en fonction de la hauteur de l'éolienne, mais du diamètre du rotor.

1.3.1 Classification selon la taille

Dans le tableau suivant sont repris les dénominations de taille et les ordres de grandeur de puissance associée [4]

| Échelles | Diamètres du rotor [m] | Puissance délivrés |
|----------|------------------------|--------------------|
| Petite | Moins de 12 | Moins de 40 KW |
| Moyenne | 12 à 45 | De 40 KW à 1 MW |
| Grande | 46 et plus | 1 MW et plus |

Tableau 1-1 Classification des éoliennes

1.3.2 Classification selon la vitesse de rotation

Les éoliennes actuellement installées fonctionnent soit à vitesse fixe ou à vitesse variable.

➤ **Turbine à vitesse fixe**

Elles sont les premières à avoir été développées, leur technologie inhérente est bien maîtrisée. En effet, c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implémentation, une fiabilité et un faible coût ; ce qui permet une installation rapide.

➤ **Turbine à vitesse variable**

Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, leur technologie évolue [5]. Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

1.3.3 Classification selon le principe de fonctionnement

Il existe deux types d'éoliennes en fonction de la disposition géométrique de l'arbre sur lequel l'hélice est installée. Éoliennes à axe horizontal et éoliennes à axe vertical voir la figure 1.1 il s'agit de générer un couple moteur pour entraîner la génératrice [6].



Eolienne à axe horizontal



Eolienne à axe vertical

Figure 1.1 éolienne à axe horizontal et à axe vertical

➤ **les éoliennes à axe vertical**

Les éoliennes à axe vertical sont les premières structures utilisées pour générer de l'énergie électrique. La tour d'une éolienne à axe vertical est en fonctionnement. 0,1 à 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout dispositif de conversion d'énergie au pied de l'éolienne, facilitant les opérations de maintenance. L'orientation du rotor est la même que dans une éolienne à axe horizontal. Cependant, les vents proches du sol étaient faibles, ce qui a entraîné une baisse des rendements. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et les mâts sont soumis à des contraintes mécaniques importantes, de sorte qu'aujourd'hui les fabricants d'éoliennes préfèrent les éoliennes à axe horizontal.

➤ **Les éoliennes à axe horizontal**

Les éoliennes à axe horizontal sont constituées d'une turbine à trois pales aux contours aérodynamiques dans laquelle la circulation du flux d'air provoque la rotation du rotor de la machine. Pour la plupart, les rotors de ces éoliennes sont tripales par rapport aux bipales [3], les tripales constituent un bon compromis en termes de facteur de puissance, de coût et de vitesse de rotation du capteur de vent, ainsi que d'esthétique. Ce type d'éolienne est le plus répandu au monde en raison de leur meilleur rendement aérodynamique que les éoliennes à axe

vertical, de leur capacité à démarrer de manière autonome et de leur faible encombrement au sol. C'est pourquoi notre sélection s'est portée sur l'étude des éoliennes à axe horizontal.

1.4 Les principaux composants des éoliennes

Les systèmes éoliens sont généralement constitués des principaux éléments représentés sur la figure 1.2

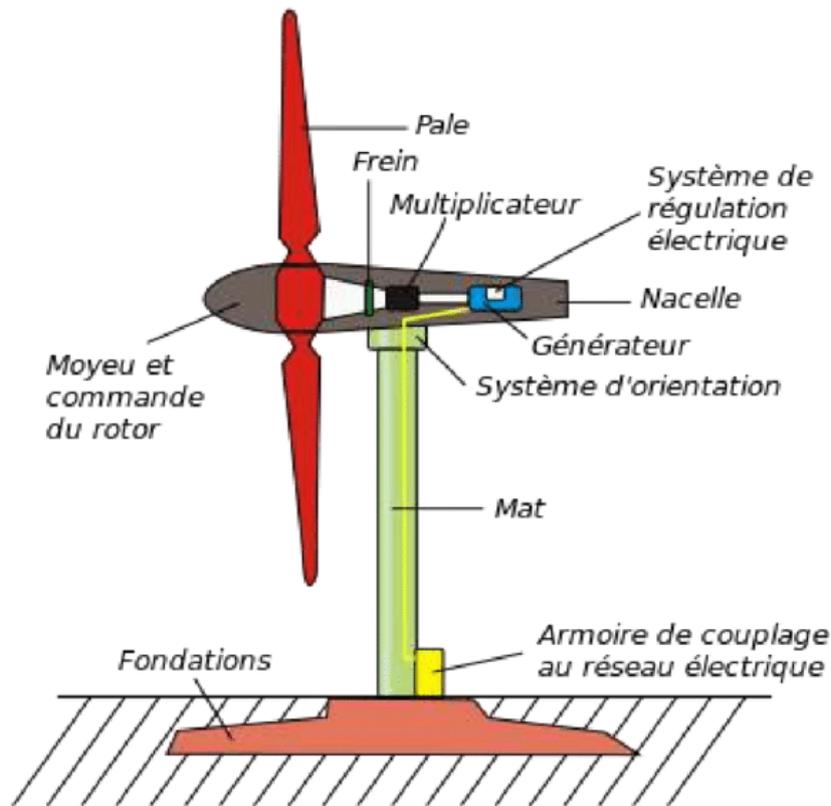


Figure 1.2 Les composants d'une éolienne

1.4.1 La fondation

La fondation est généralement en béton. Doit être suffisamment solide pour sécuriser toute la structure de l'éolienne.

1.4.2 Le rotor

Partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter le vent fort et régulier. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par

l'énergie cinétique du vent. Reliées par un noyau, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute.

1.4.3 Le mât

Généralement de forme conique, le mât supporte la nacelle. Il mesure entre 50 et 130 m de haut et a un diamètre à son pied compris entre 4 et 7 m. Une ouverture en bas du mât permet d'accéder aux différents équipements de l'éolienne parmi lesquels le transformateur qui permet d'augmenter la tension de l'électricité produite afin de l'injecter sur le réseau.

1.4.4 La nacelle

Elle est montée au sommet du mât, reliée au rotor par le moyeu. Elle abrite les composants mécaniques, pneumatiques, électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. Le transport de l'électricité produite par la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

Les différents composants d'une nacelle [4] :

- **Arbre de transmission** : Il reçoit le mouvement de rotation du moyeu afin d'entraîner la génératrice électrique.
- **Transmission** : Appelée aussi multiplicateur, elle adapte la vitesse de rotation au fonctionnement de la génératrice. (Elle n'est pas nécessaire dans les petites éoliennes).
- **Frein** : Il sert à arrêter l'éolienne en cas d'urgence, ou pour effectuer la maintenance.
- **Génératrice** : Elle peut être un générateur à courant continu ou un alternateur; dans tous les cas elle transforme l'énergie mécanique que lui transmet le rotor, en énergie électrique.
- **Système de contrôle** : chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle.

- **Anémomètre** : Il mesure en permanence la vitesse du vent qu'il va transmettre au système de contrôle de façon à démarrer ou arrêter l'éolienne. En général, une éolienne est enclenchée à partir de 3 à 4 m/s et est arrêtée approximativement à 25m/s (90 km/h).
- **Gouvernail** : C'est le système d'orientation pour les petites éoliennes; il sert à maintenir le rotor de l'éolienne dans l'axe horizontal face au vent afin de tirer le maximum d'énergie.

1.4.5 La cabine de dispersion

Située à la base de l'éolienne permet de se connecter au réseau électrique afin d'y injecter l'électricité produite, pour la stocker si elle n'est pas directement utilisée ou pour la réinjecter plus tard sur le réseau si elle est fabriquée en surplus.

1.5 Principes de fonctionnement des éoliennes pour la transformation d'énergie

La figure 1.3 [3] montre le mécanisme général de la production d'énergie éolienne. Les éoliennes convertissent l'énergie éolienne en énergie électrique, l'énergie cinétique du vent subie une chaîne de transformation et cela grâce aux différents éléments de bas :

- **Les hélices** : transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique
- **L'arbre de transmission** : conduit l'énergie mécanique.
- **Le générateur électromagnétique** : transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique non utilisable.
- **Le convertisseur** : traite de l'énergie électrique produite par le générateur pour avoir un courant stable sans changement.
- **Le régulateur** : augmente la tension de l'énergie électrique traitée par le convertisseur.
- **Accumulateur** : stocke l'énergie utilisable pour finalement la distribuer via des réseaux électriques

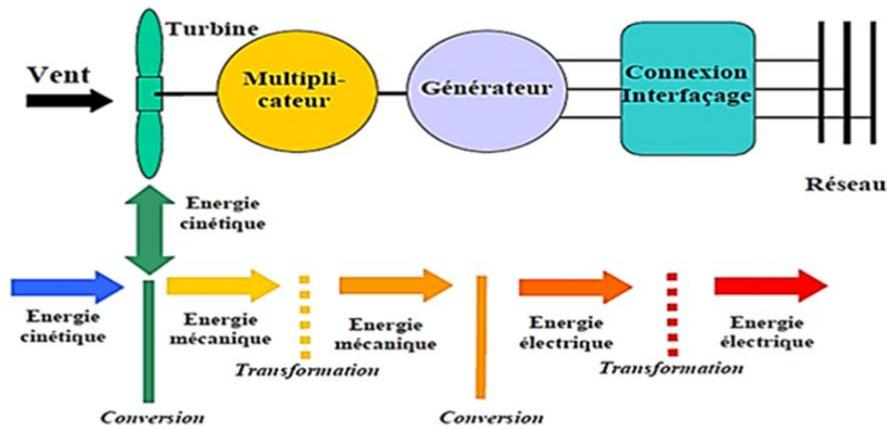


Figure 1.3 Chaîne de transformation énergétique

1.6 Aérodynamique

1.6.1 Conversion de l'énergie cinétique de vent

Les pales des éoliennes balayent un champ de vitesse du vent variant dans le temps autour du disque du rotor, faisant varier localement la pression et la vitesse de l'air. Parlons brièvement de l'échange d'énergie entre le vent et les turbines.

Soit un tube à air se déplaçant sur un rotor avec une vitesse v_{am} et une pression statique P_0 . La force du vent agissant sur la turbine ralentit progressivement. Lorsque cette masse s'approche du rotor, elle ralentit et dilate le tube à air. Cela augmente la pression d'air statique en amont jusqu'à P_1 devant le rotor (figure 1.4).

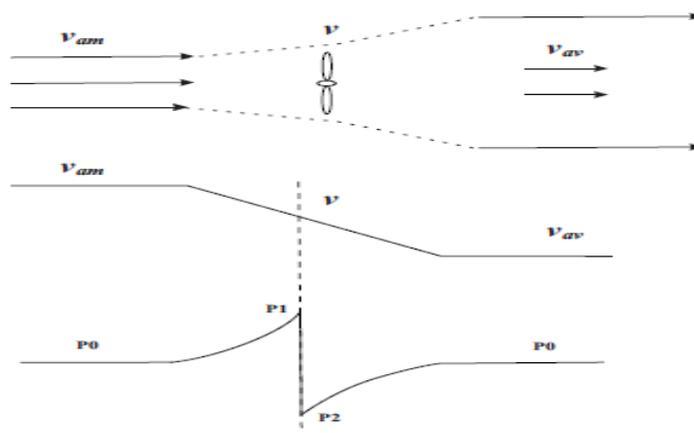


Figure 1.4 Principe d'extraction de l'énergie cinétique du vent

Une partie de l'énergie cinétique du vent est transformé en énergie potentielle pour produire cette augmentation de la pression. la pression chute ensuite pour atteindre une valeur p_2 en dessous de la pression atmosphérique sur la face arrière du rotor [7].

1.6.2 Puissance aérodynamique

La puissance aérodynamique p_a extraire par le rotor [8] en fonction du facteur de puissance C_p est donnée par

$$p_a = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p \quad (1.1)$$

Le paramètre C_p est sans dimension, il exprime la capacité de la turbine à extraire de l'énergie du vent. Ce paramètre caractéristique de l'éolienne est une fonction de la vitesse spécifique et du calage β .

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v} \quad (1.2)$$

$\omega_t R$ désigne la vitesse tangentielle du bout de la pale, R étant le rayon de l'aire balayée par le rotor (figure 1.5).

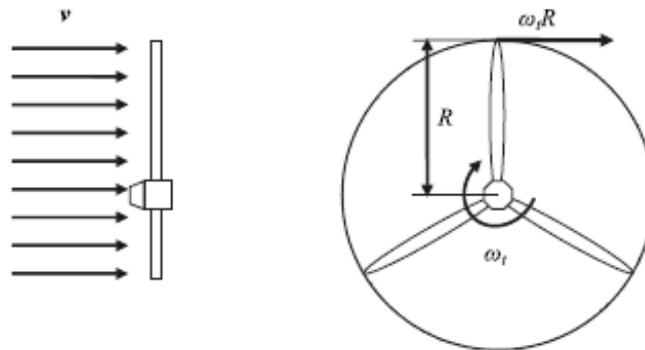


Figure 1.5 Principe d'extraction de l'énergie cinétique du vent

La puissance aérodynamique p_a est ainsi une fonction non linéaire de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation du rotor et l'angle de calage :

$$p_a = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1.3)$$

Avec :

- $S = \pi R^2$, l'aire de la surface balayée par le rotor.
- ρ la masse volumétrique de l'air.

1.6.3 Coefficient de puissance aérodynamique

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ dépend du nombre de pales du rotor et de leur géométrie et forme aérodynamique (longueur, profil de section) [9]. Ils sont conçus en fonction des caractéristiques du site, de la puissance nominale requise, du type de régulation (en pitch ou décrochage) et du mode de fonctionnement (vitesse fixe ou variable). $C_p(\lambda, \beta)$ peut être obtenu par des essais en soufflerie. C'est une forme de fonctions non linéaires de λ et β décrites par une famille de polynômes ou splines. La limite supérieure théorique du coefficient de puissance $C_{p,max}$ est fournie par la loi de Betz [8].

$$C_{p,max} = \frac{16}{27} \approx 0.5926 \quad (1.4)$$

En pratique, les frottements et la force de traînée réduisent cette valeur à environ 0.5 pour les éoliennes de grande taille. On peut aussi calculer une expression analytique de $C_p(\lambda)$ pour différentes valeurs de β . Une seule interpolation par rapport à β est alors suffisante. Pour un angle de calage β donné, l'expression analytique généralement utilisée est une régression polynomiale [8] :

$$C_p(\lambda) = \sum_{i=0}^{nc} a_i \lambda^i \quad (1.5)$$

Winckelmann [10] et Abdîn [11] proposent une forme sinusoïdale, qui a été reprise par El Aimani [5].

Heier [12] suggère une expression plus complexe

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\left(\frac{-c_5}{\lambda_i} \right)} + c_6 \lambda \quad (1.6)$$

Ou

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (1.7)$$

Le coefficient de puissance de l'éolienne considéré dans cette étude est donné en Annexe A.

1.6.4 Couple aérodynamique

L'énergie cinétique du vent capturée par l'aéroturbine se transforme en énergie mécanique qui se traduit par un couple moteur T_a faisant tourner le rotor à vitesse ω_t . En termes de puissance, on peut écrire

$$p_a = T_a \omega_t \quad (1.8)$$

Ou encore

$$T_a = \frac{p_a}{\omega_t} \quad (1.9)$$

En substituant l'expression (1.3) de p_a dans (1.9) et en tenant compte de (1.2), on peut réécrire l'expression du couple aérodynamique sous la forme

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_q(\lambda, \beta) \quad (1.10)$$

Où

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (1.11)$$

$C_q(\lambda, \beta)$ Est le coefficient du couple aérodynamique

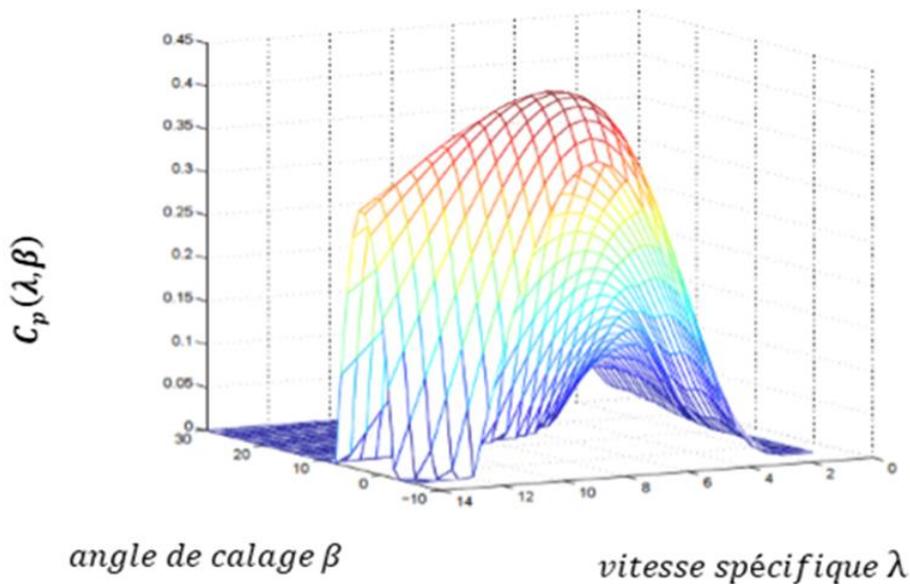


Figure 1.6 Coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$

1.7 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier. Afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

1.7.1 Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [13]:

- A L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie notamment, contribuent à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration du CO_2 a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 1000 dernières années. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100. L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO_2 .
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO_2 . 21 mille tonnes de SO_2 et 17.5 mille tonnes de NOX. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ces dernières fournissent de l'énergie même lorsque l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.

- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laisse pas de trace.

L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains:

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut en plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie dans ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à celui de centrales à énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

1.7.2 Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients [14].

- L'impact visuel. Ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit: il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux: certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbine.
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant aléatoire, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau étant faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable.

- Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants dis réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques: bien qu'en terme de coût, l'éolien puise sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

1.8 Dispositif d'entraînement

1.8.1 Modèle à deux masses

Le modèle à deux masses bien connu dans la littérature pour le dispositif d'entraînement. Son schéma est illustré sur la figure 1.7

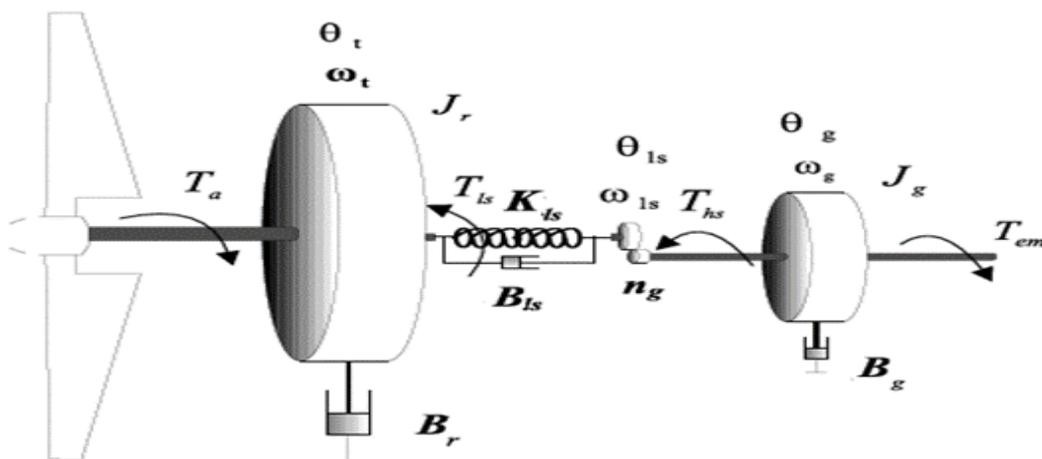


Figure 1.7 Schéma du dispositif d'entraînement à deux masses

Avec

| symbole | Signification | Unité |
|---------------|---|----------------------|
| J_r | inertie des masses du côté du rotor | [kg.m ²] |
| J_g | inertie des masses du côté de la génératrice | [kg.m ²] |
| B_{ls} | coefficient de frottements sur l'arbre lent | [Nm/rad/s] |
| k_r | coefficient de frottements externes du rotor | [Nm/rad/s] |
| k_g | coefficient de frottements externes de la génératrice | [Nm/rad/s] |
| K_{ls} | coefficient de torsion sur l'arbre lent | [Nm/rad] |
| T_{ls} | couple de l'arbre lent | [Nm] |
| T_{hs} | couple de l'arbre rapide | [Nm] |
| T_{em} | couple électromagnétique de la génératrice | [Nm] |
| ω_t | vitesse du rotor | [rad/s] |
| ω_{ls} | vitesse de l'arbre lent | [rad/s] |
| ω_{hs} | vitesse de la génératrice | [rad/s] |
| n_g | rapport de transmission du multiplicateur | Sans unite |

Les hypothèses relatives à ce modèle sont :

- tous les modes flexibles sont localisés dans l'élément flexible de l'arbre lent,
- l'arbre rapide est infiniment rigide,
- les modes flexibles des pales sont supposés suffisamment élevés pour être négligés.

Les inerties du multiplicateur et de l'arbre lent sont intégrées à celle du rotor. L'ensemble est représenté par J_r .

A cause de sa taille immense, le rotor peut être modélisé par une seule masse. En effet, l'inertie de la turbine est sensiblement égale à celle des pales. Selon Vihriälä [15], l'inertie du moyeu peut être négligée car elle représente 1 % de l'inertie totale de la turbine.

L'inertie de l'arbre rapide associé à la génératrice est représentée par J_g . Les torsions des pales, moyeu, multiplicateur et de l'arbre lent sont regroupées dans un coefficient d'élasticité global représenté sur l'arbre lent ; [16]. La torsion de l'axe de la turbine, en termes de constante de raideur, peut être calculée analytiquement connaissant sa forme géométrique et les propriétés des matériaux la constituant grâce aux lois de la résistance des matériaux [8].

Les frottements visqueux sur les roulements du dispositif d'entraînement sont pris en compte par les coefficients k_r et k_g .

Hormis quelques travaux qui supposent que seul l'arbre rapide est flexible, la majorité des auteurs considèrent un arbre lent flexible et un arbre rapide parfaitement rigide [8],

Cependant, on peut dans tous les cas ramener les coefficients de frottement et d'élasticité sur un seul arbre. Dans la suite de ce document, on désigne par J_r et J_g . Les inerties du rotor et de la génératrice respectivement.

La dynamique du rotor est caractérisée par une équation différentielle du premier ordre

$$J_r \dot{\omega}_t = T_a - T_{ls} - k_r \omega_t \quad (1.12)$$

D'où

$$\omega_t = \frac{1}{J_r s + k_r} (T_a - T_{ls}) \quad (1.13)$$

Les écarts entre la vitesse de rotation w_t et w_{ls} et les écarts entre la position angulaire θ_t et θ_{ls} sont prise en compte par l'équation du couple représentant le couple de freinage qui agit sur le rotor.

$$T_{ls} = k_{ls} \left(\omega_t - \frac{\omega_g}{n_g} \right) + B_{ls} \left(\theta_t - \frac{\theta_g}{n_g} \right) \quad (1.14)$$

A partir du couple mécanique total T_{mec} , les équations fondamentales de la dynamique permettent de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique, celle-ci est donnée par l'équation

$$J_g \frac{d\omega_g}{dt} = T_{mec} \quad (1.15)$$

Tel que le couple mécanique prend en compte le couple aérodynamique qui fait tourner le rotor, le couple de l'arbre lent ainsi que le couple de frottement visqueux. Il est exprimé par l'équation suivant :

$$T_{mec} = T_{hs} - T_{em} - T_{vis} \quad (1.16)$$

Sachons que T_{vis} représente le couple des frottements visqueux qui réagit sur la 2^{ème} masse a comme expression :

$$T_{vis} = k_g \omega_g \quad (1.17)$$

De nos deux dernières équations on obtient l'expression de la dynamique de la génératrice

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - T_{em} - k_g \omega_g \quad (1.18)$$

D'où

$$\omega_g = \frac{1}{J_g s + k_g} (T_{hs} - T_{em}) \quad (1.19)$$

Le multiplicateur permet l'adaptation entre la vitesse de rotation du rotor et celle de la génératrice. Pour un multiplicateur idéal le rapport de transmission est ainsi exprimé :

$$n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} = \frac{\theta_g}{\theta_{ls}} \quad (1.20)$$

Ce qui nous donne

$$\begin{cases} \theta_g = n_g \cdot \theta_{ls} \\ \omega_g = n_g \omega_{ls} \end{cases} \quad (1.21)$$

1.8.2 Modèle à une masse

Dans le cas des grandes éoliennes, l'arbre lent du dispositif d'entraînement peut être considéré comme complètement rigide. Les modèles à deux de masse décrits dans la partie précédente peuvent être réduits à un seul modèle de masse. Il se compose d'une seule inertie [17], [18] et d'un seul coefficient de frottement qui résume tous les coefficients de frottement externes, sous réserve de certaines hypothèses :

- Les arbres de transmission sont parfaitement rigides,
- Le multiplicateur de vitesse est idéal,
- L'inertie de la génératrice J_g peut être négligée devant celle de la turbine J_r ou ramenée du côté de l'arbre lent.

1.8.2.1 Model à une masse ramenée sur l'arbre lent

Dans la plupart des modèles à une masse, l'inertie de la turbine est ramenée sur l'arbre lent [17], [18], [19], [20]. En considérant que l'arbre lent est infiniment rigide (B_{ls} infini), alors

$$\theta_t = \theta_{ls} \quad \text{Et} \quad \omega_t = \omega_{ls}$$

La relation (1.20) s'écrit maintenant

$$n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_t} = \frac{\theta_g}{\theta_t} \quad (1.22)$$

Les équations (1.12) et (1.18) devient

$$J_r \dot{\omega}_t = T_a - n_g T_{hs} - K_r \omega_t \quad (1.23)$$

$$n_g J_g \dot{\omega}_t = T_{hs} - K_g n_g \omega_t - T_{em} \quad (1.24)$$

En multipliant les équations de (1.23) et (1.24) par n_g et en sommant membre à membre les deux équations, on aboutit à

$$J_t \dot{\omega}_t = T_a - K_t \omega_t - T_g \quad (1.25)$$

Avec

$$J_t = J_r + n_g^2 J_g$$

$$K_t = K_r + n_g^t K_g$$

$$T_g = n_g T_{em}$$

J_t , K_t et T_g sont respectivement l'inertie, le coefficient de frottements externes de la turbine et le couple électromagnétique de la génératrice ramenés du côté de l'arbre lent. L'inertie de la génératrice ramenée sur l'arbre lent $n_g^2 J_g$ est très souvent négligée devant celle du rotor. Ce modèle est généralement utilisé dans la commande de l'aéroturbine. Le modèle à une masse du dispositif d'entraînement est illustré sur la figure 1.8.

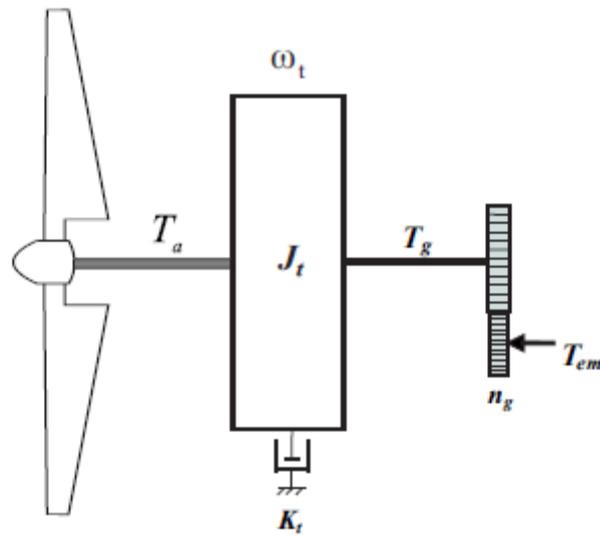


Figure 1.8 Modèle à une masse ramenée sur l'arbre lent

1.8.2.2 Modèle à une masse ramenée sur l'arbre rapide

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale constituée de l'inertie de la génératrice et de celle de la turbine rapportées sur l'arbre rapide (arbre de la génératrice) [5], comme représenté sur la figure 1.9.

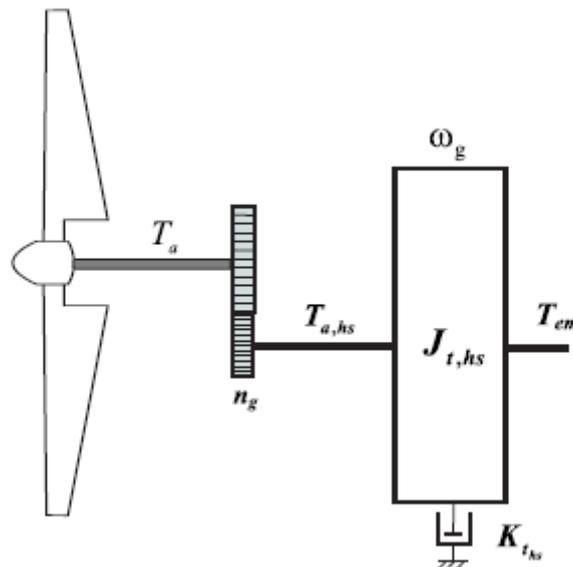


Figure 1.9 Modèle à une masse ramenée sur l'arbre rapide

Lorsque le modèle à une masse est ramené sur l'arbre rapide alors, en faisant les mêmes étapes que précédemment

Les équations (1.12) et (1.18) s'écrivent

$$\begin{aligned}\frac{J_R}{n_g} \dot{\omega}_g &= T_a - T_{ls} - \frac{K_r}{n_g} \omega_g \\ J_g \dot{\omega}_g &= T_{hs} - K_g \omega_g - T_{em}\end{aligned}\tag{1.26}$$

En divisant la première équation de (1.26) par n_g et en sommant les deux on obtient

$$J_{ths} \dot{\omega}_g = T_{ahs} - K_{ths} \omega_g - T_{em}\tag{1.27}$$

avec

$$\begin{aligned}J_{ths} &= J_g + \frac{J_r}{n_g^2} \\ K_{ths} &= K_g + \frac{K_r}{n_g^2} \\ T_{ahs} &= \frac{T_a}{n_g}\end{aligned}$$

J_{ths} , K_{ths} et T_{ahs} sont l'inertie, le coefficient de frottements externes de la turbine et le couple aérodynamique ramenés du côté de l'arbre rapide. L'inertie de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine. Le modèle à une masse ramené sur l'arbre rapide est généralement utilisé dans la commande de la génératrice.

1.9 Simulation du modèle à une masse en boucle ouverte

Le modèle élaboré précédemment est implanté sous un bloc Simulink de Matlab comme indiqué avant. Ce modèle utilise le couple électromagnétique T_{em} et l'angle de calage β comme entrées, la vitesse du vent est considérée comme perturbation mais utilisée aussi en tant que référence, et la vitesse de la génératrice ω_g quant à elle, est considérée comme sortie qui doit suivre la vitesse de rotation liée à la vitesse du vent v . La figure 1.10 schématise le bloc Simulink de la turbine éolienne.

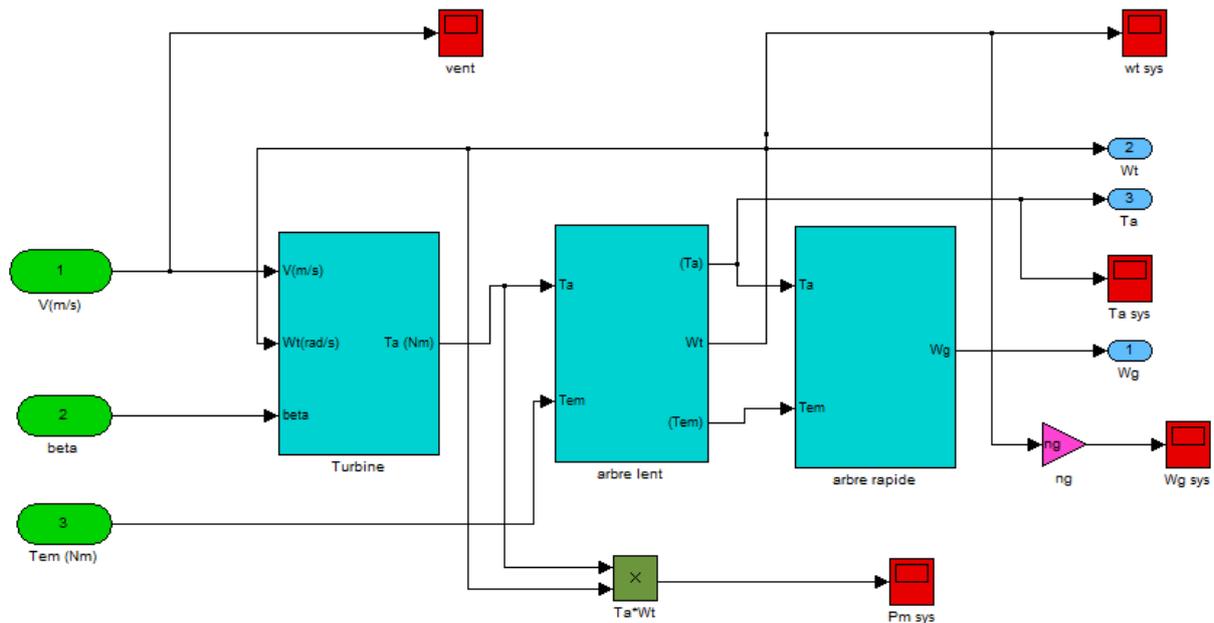


Figure 1.10 Bloc Simulink de la turbine éolienne

1.9.1 Profil du vent

Pour simuler le bloc présenté dans la figure 1.10, on a utilisé un tableau contenant des valeurs du vent prélevées au tour de d'une valeur moyenne 7m/sec. Prenant en compte l'hypothèse que la vitesse du vent change chaque dizaine de minute, les valeurs du vent utilisées sont alors mesurées chaque dix minute. Le profil du vent obtenu après la simulation est illustré dans la figure 1.11.

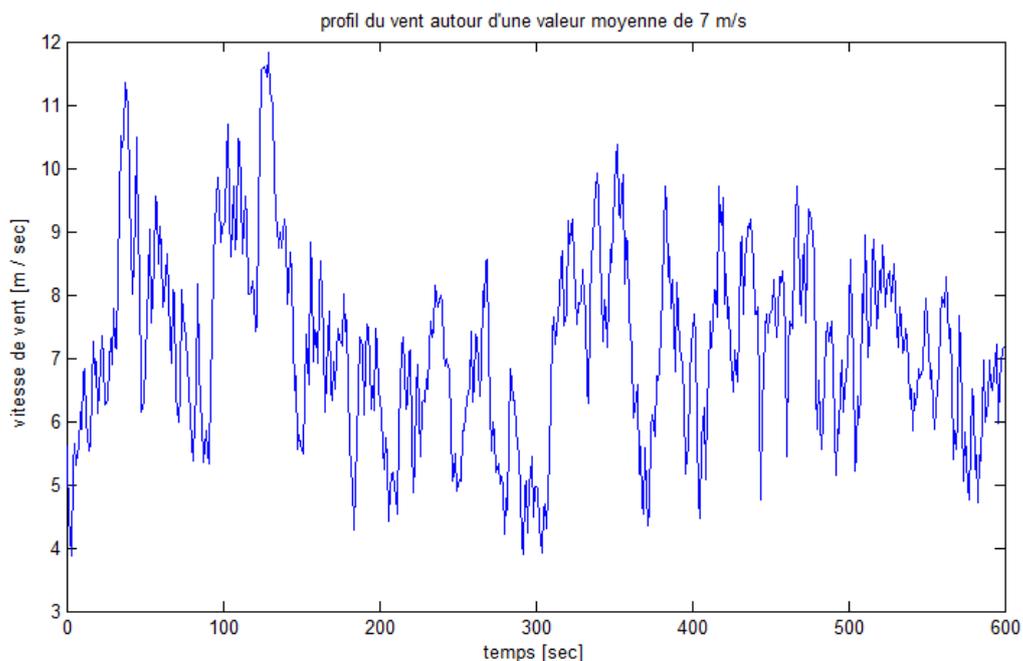


Figure 1.11 Profil du vent autour d'une valeur moyenne de 7 m/s

1.9.2 Résultats de simulation

La simulation du bloc Simulink de la figure 1.10 a été réalisée pour une valeur du couple électromagnétique $T_{em} = 162 Nm$, un angle de calage $\beta = 2^\circ$, un profil du vent correspondant à celui de la figure 1.11, et des valeurs des paramètres de la turbine présentés dans l'annexe A, les résultats de cette simulation faite en boucle ouverte sont montrés dans les figures qui suivent :

La figure 1.12 représente la sortie obtenue par le modèle de simulation qui est la vitesse de rotation du rotor ω_t et celle de la vitesse de rotation désirée $\omega_{t_référence}$.

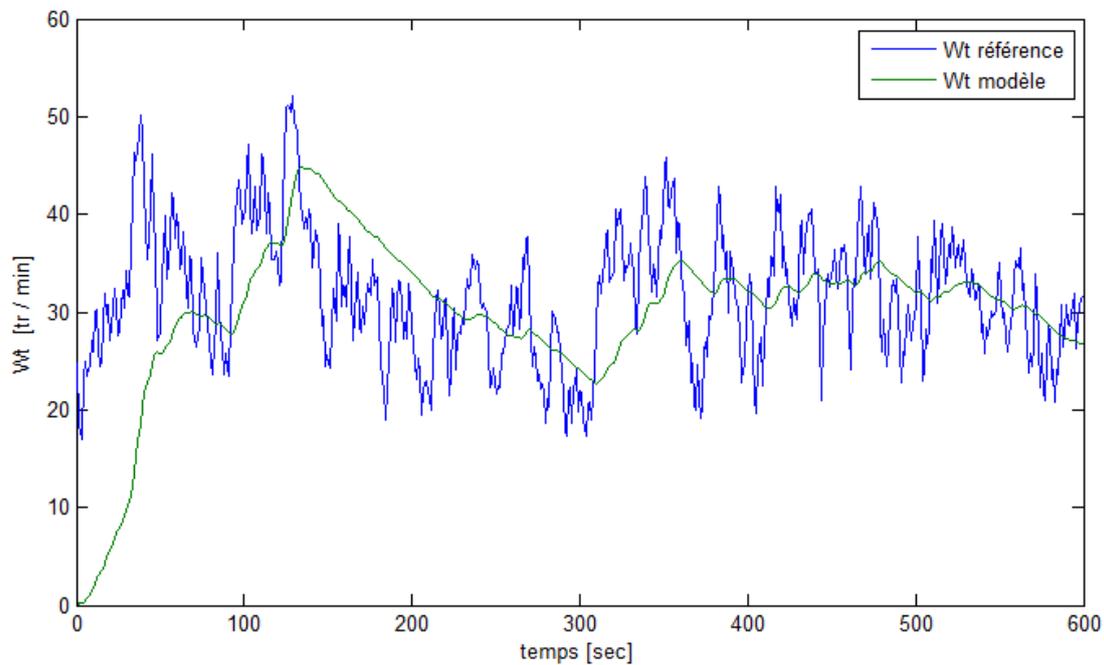


Figure 1.12 Vitesse de rotation du rotor

La figure 1.13 représente la vitesse de rotation de la génératrice résultante de la stimulation du modèle ω_g et la vitesse de rotation désirée $\omega_{g_référence}$.

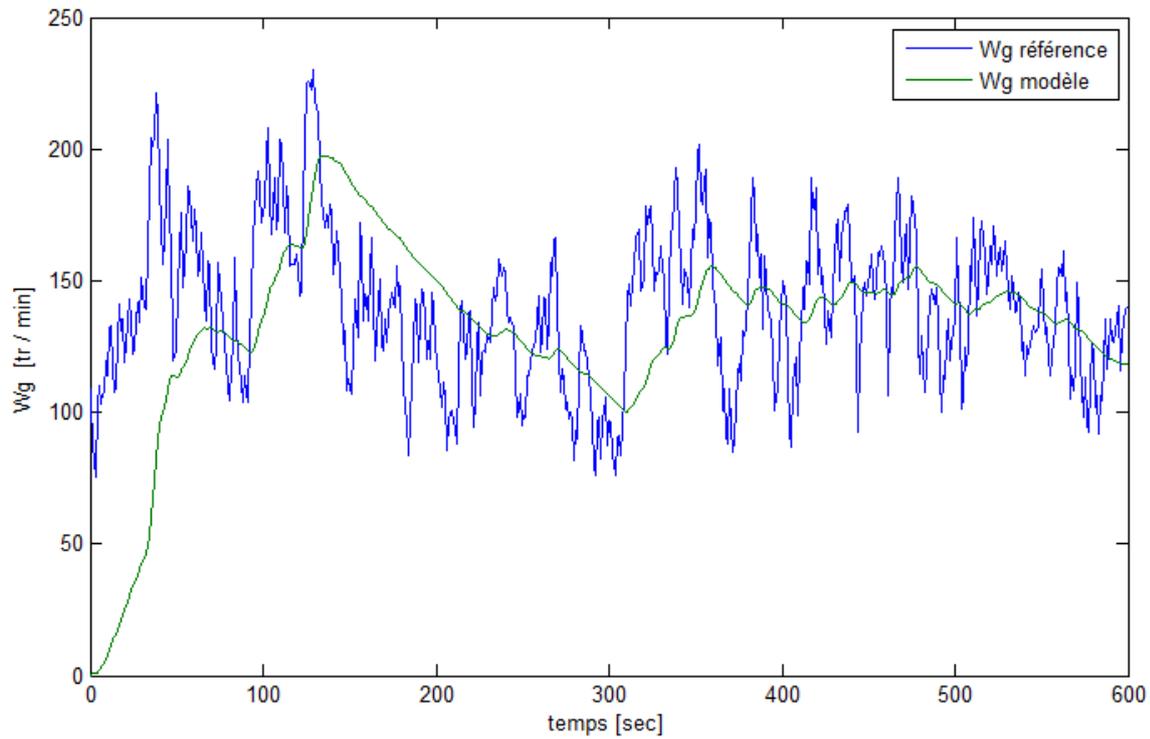


Figure 1.13 Vitesse de rotation de la génératrice

La figure 1.13 représente la puissance mécanique délivrée par le modèle de la génératrice élaboré ainsi que la puissance désirée

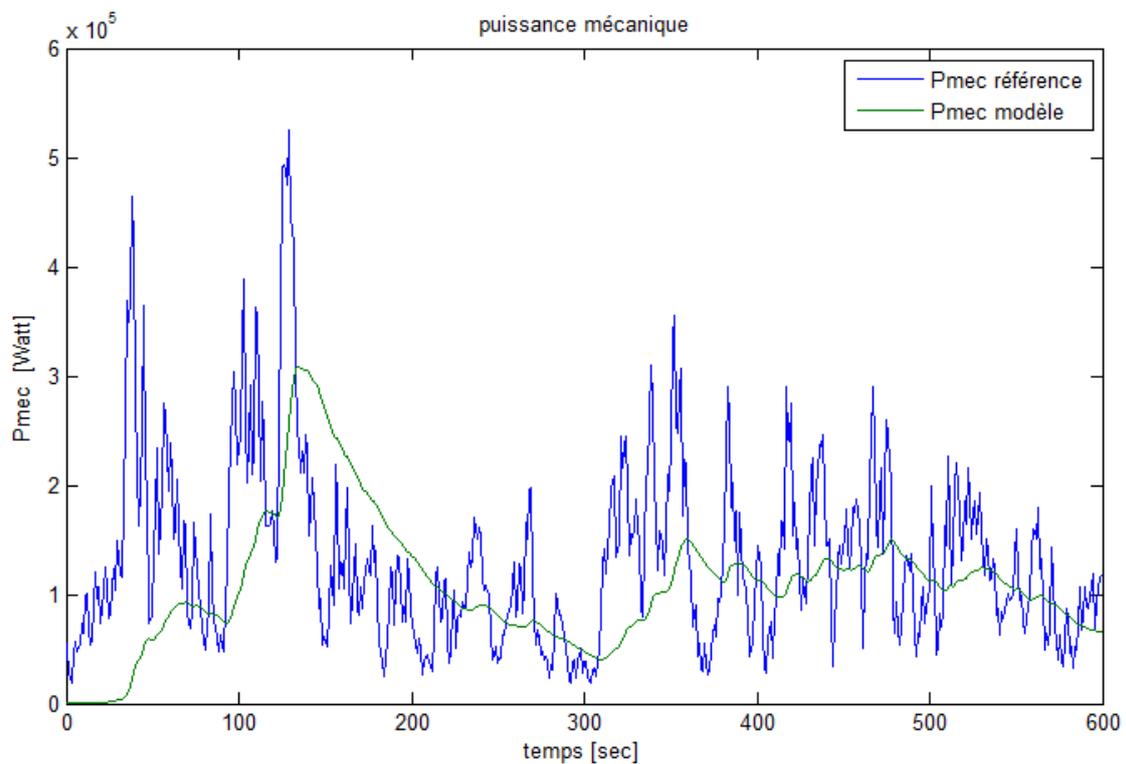


Figure 1.14 Puissance mécanique

1.9.3 Interprétation des résultats

D'après les figures précédentes (figure 1.12) (figure 1.13) (figure 1.14), nous remarquons que la valeur moyenne de la vitesse de rotation du rotor et celle de la génératrice résultante de la simulation du modèle en boucle ouverte, sont très loin des valeurs moyennes des vitesses de référence liée à la vitesse du vent fictif v .

Nous observons dans la dernière figure (1.14) un important écart entre la valeur moyenne de puissance mécanique fournie par la turbine et la valeur moyenne de puissance mécanique de référence, pour minimiser cet écart, on favorise l'utilisation d'une commande qui maximise la puissance tout en assurant la stabilité du système.

1.10 Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons effectué une brève description de l'énergie éolienne, des différents types d'éoliennes puis nous nous sommes intéressés à l'étude d'une éolienne à axe horizontal, dont nous avons présenté ces principaux composants et également parlé de la chaîne de transformation énergétique d'aérogénérateur et le principe de la conversion aérodynamique du vent.

Ensuite nous avons décrit les modèles mathématiques d'un système éolien à deux et une masse à vitesse variable. Cette modélisation nous a permis d'effectuer une simulation en boucle ouverte sous Matlab.

Vu les résultats obtenus et discutés auparavant, il est important d'étudier une commande pour améliorer les résultats.

Pour cela, le modèle à une masse du dispositif d'entraînement ramené sur l'arbre lent sera utilisé comme le modèle non linéaire pour la synthèse des lois de commande dans la suite de notre travail.

Chapitre 2

**Commande non linéaire par retour
statique d'état d'un système éolien à
vitesse variable**

Chapitre 2 Commande non linéaire par retour d'état statique d'un système éolien à vitesse variable

2.1 Introduction

Ce chapitre présente la conception d'une commande pour l'éolienne, afin d'optimiser ses performances et son rendement par rapport à l'énergie cinétique du vent capté par la turbine, tout en respectant ses limites physiques.

Nous présentons la commandes non linéaires par retour d'état statique, ces lois sont connues mais leur application dans le domaine de l'éolien est tout récent.

2.2 Caractéristique de la puissance vitesse d'une éolienne

En fonction de la vitesse du vent, quatre zones peuvent être identifiées dans le fonctionnement d'une turbine éolienne (figure 3.1) [21] :

Zone 1 : pour des vitesses plus petites que la vitesse de démarrage v_d , l'énergie contenue dans le vent n'est pas suffisante pour entraîner la turbine et la puissance captée est nulle.

Zone 2 : pour des vitesses supérieures à celle de démarrage v_d , et inférieures à celle nominale v_n , la puissance extraite augmente proportionnellement avec la vitesse du vent cubée. Cette zone correspond au régime de la charge partielle.

Zone 3 : pour des vitesses supérieures à celle nominale v_n et plus petite que celle maximale v_m la puissance captée est limitée à celle nominal p_n . Cette zone correspond au régime de charge complète.

Zone 4 : pour des vitesses supérieures à la vitesse extrême d'opération v_m , la turbine éolienne s'arrête, la puissance fournie s'annule.

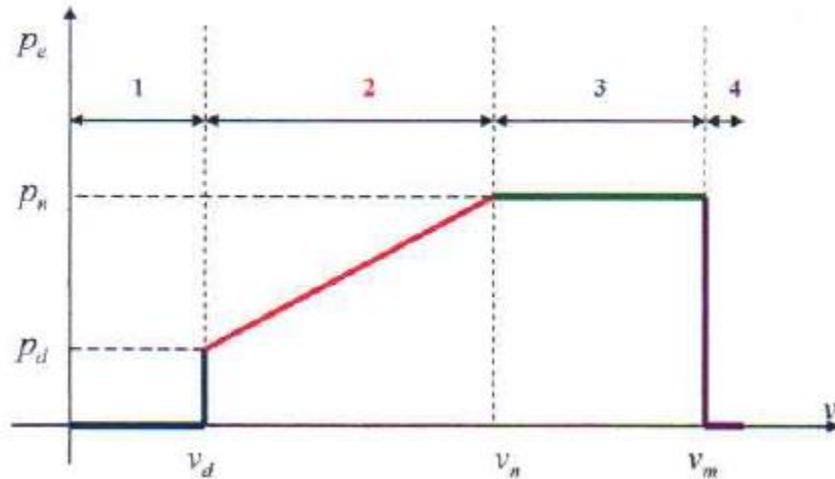


Figure 2.1 caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne

On distingue alors deux régimes de fonctionnement :

- Le premier est le régime à vitesse variable qui correspond à un fonctionnement dans la zone 2.
- Le second régime est celui de régulation de puissance.

La zone la plus intéressante est le fonctionnement normal, qui se superpose pratiquement sur le régime de charge partielle (zone 2) [21]. D'ailleurs une grande partie des travaux dans le domaine de la commande dans des systèmes de conversion d'énergie éolienne traite de la commande dans cette zone [22].

Dans la suite de notre travail, nous nous intéressons à l'élaboration des lois de commande dans la zone à charge partielle.

2.3 Objectif de la commande

Dans la région de fonctionnement à charge partielle d'une éolienne à vitesse variable, la commande a pour principaux objectifs de maximiser l'énergie capturée du vent et de minimiser les efforts subis par le dispositif d'entraînement. Comme cité dans le chapitre 1 le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ est une fonction non linéaire de la vitesse spécifique λ et l'angle de calage β . Cette fonction possède un seul maximum $C_{p_{opt}}(\lambda_{opt}, \beta_{opt})$ comme illustré sur la

figure 2.2. Le rotor fournit donc une puissance aérodynamique maximale uniquement à la vitesse spécifique λ_{opt} .

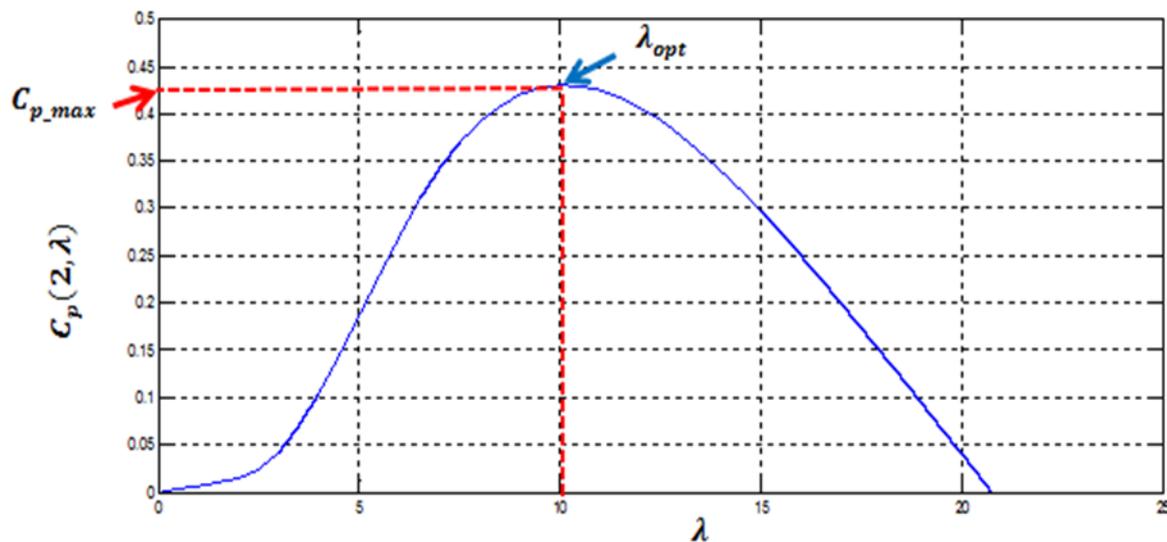


Figure 2.2 Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique λ pour une valeur de l'angle de calage fixe $\beta = 2$

Dans le but de maximiser la capture de l'énergie du vent, l'angle de calage et la vitesse spécifique doivent être maintenue à leurs valeurs optimales afin d'assurer la valeur maximale de C_p . L'angle de calage est fixé à sa valeur optimale. la vitesse spécifique dépend à la fois de la vitesse du vent et de la vitesse de l'aéroturbine. Comme la vitesse du vent est une entrée non commandable, la vitesse du rotor doit varier constamment pour suivre les fluctuations de la vitesse du vent afin de maintenir la vitesse spécifique à sa valeur optimale.

Cette optimisation doit être réalisée en minimisant les efforts mécaniques sur les différentes parties d'éolienne. Ces deux objectifs s'avèrent contradictoires : afin de garder la vitesse spécifique constante, la vitesse du rotor doit suivre exactement la turbulence du vent, ce qui nécessite une variation rapide et des amplitudes importantes de ω , et par conséquent l'augmentation des efforts de commande et de charges subis par l'éolienne [22].il est nécessaire alors de réaliser un compromis.

2.4 Configuration de la commande

Les constantes de temps du système électrique sont beaucoup plus faibles que celles des autres parties de l'aérogénérateur. Ceci permet de dissocier la commande de la machine électrique de celle de l'aéroturbine et de définir ainsi deux niveaux de commande [19] [22].

- Un module de commande de niveau 1 qui est appliqué au générateur électrique via les convertisseurs de puissance ainsi que le dispositif de calage.
- Un module de commande de niveau 2 qui fournit les entrées β^* et T_{em}^* du module du niveau 1.

Cette configuration de commande est illustrée sur la figure 2.3

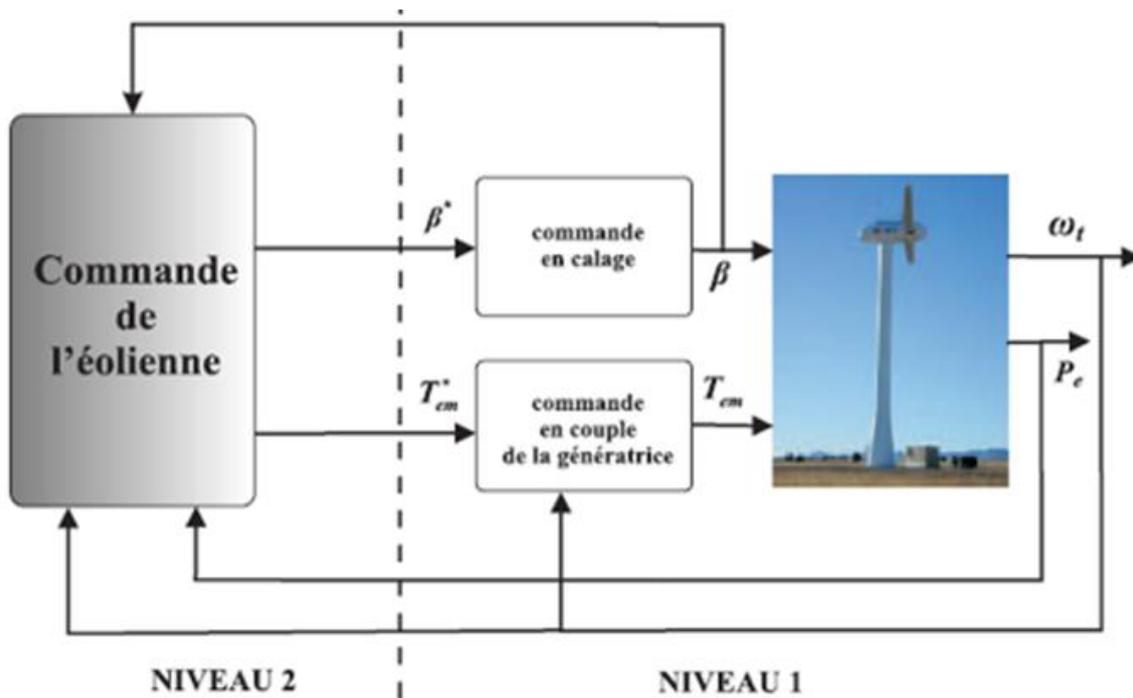


Figure 2.3 Niveaux de commande d'une éolienne à vitesse variable et calage variable

La commande de niveau 2 de l'aérogénérateur peut être réalisée sans modéliser la partie électrique [19]. cette approche est souvent utilisée dans la littérature spécifique à la commande de l'aérogénérateur [23], [22]. toutefois, on peut trouver de nombreux travaux dédiés spécifiquement à la commande de la partie électrique [22], [24].

Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons à la commande de niveau 2. les constantes de temps de niveau 1 sont négligeable (rapport de 20) pour l'éolienne CART [25] considéré dans cette étude.

2.5 Commande non linéaire par retour d'état statique

2.5.1 Modèle a deux masse

On suppose que la vitesse du vent est mesurable. Nous allons d'abord présenter la commande calculée à partir du modèle mathématique à deux masses. Les lois de commande élaborées ici sont générales, c'est à dire qu'elles peuvent être appliquées aux éoliennes de toutes les tailles mais plus particulièrement aux petites éoliennes dont la flexibilité de l'arbre rotorique est prise en compte par ce modèle.

Soit \tilde{v} une mesure de la vitesse du vent fictif. On peut alors reconstruire le couple aérodynamique à partir de cette mesure et de celle de la vitesse du rotor $\tilde{\omega}_t$.

$$\tilde{T}_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \tilde{v}^2 C_q(\tilde{\lambda}) \quad (2.1)$$

Avec

$$\tilde{\lambda} = \frac{\omega_t R}{\tilde{v}} \quad (2.2)$$

2.5.1.1 Linéarisé tangent du modèle de l'éolienne

La commande sur un modèle linéarisé du système, pour un point de fonctionnement correspondant à une vitesse de vent moyenne. Pour cela, reprenons les équations (1.12) (1.18) (1.14) régissant le comportement du modèle à deux masses de l'aéroturbine.

$$J_r \dot{\omega}_t = T_a - T_{ls} - k_r \omega_t$$

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - T_{em} - k_g \omega_g$$

$$T_{ls} = K_{ls} \left(\omega_t - \frac{\omega_{ls}}{n_g} \right) + B_{ls} \left(\theta_t - \frac{\theta_g}{n_g} \right)$$

En introduisant la dérivée de T_{ls} , ce système d'équations devient

$$\dot{\omega}_t = \frac{1}{J_r} T_a - \frac{1}{J_r} T_{ls} - \frac{k_r}{J_r} \omega_t \quad (2.3)$$

$$\dot{\omega}_g = \frac{1}{n_g J_g} T_{hs} - \frac{1}{J_g} T_{em} - \frac{k_g}{J_g} \omega_g \quad (2.4)$$

$$\dot{T}_{ls} = K_{ls} \left(\dot{\omega}_t - \frac{\dot{\omega}_{ls}}{n_g} \right) + B_{ls} \left(\omega_t - \frac{\omega_g}{n_g} \right) \quad (2.5)$$

En remplaçant (2.3) et (2.4) dans (2.5), il devient

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{k_r}{J_r} & 0 & -\frac{1}{J_r} \\ 0 & -\frac{k_g}{J_g} & \frac{1}{n_g J_g} \\ \left(B_{ls} - \frac{k_{ls} k_r}{J_r} \right) & \frac{1}{n_g} \left(\frac{k_{ls} k_g}{J_g} - B_{ls} \right) & -k_{ls} \left(\frac{J_r + n_g^2 J_g}{n_g^2 J_g J_r} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{1}{J_r} \\ 0 \\ \frac{k_{ls}}{J_r} \end{bmatrix} T_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_g} \\ \frac{k_{ls}}{n_g J_g} \end{bmatrix} T_{em} \end{aligned} \quad (2.6)$$

On suppose aussi que l'on dispose de la mesure de la vitesse du rotor d'après les équations dynamiques du système (2.3)

$$\dot{\omega}_t = \frac{1}{J_r} T_a - \frac{1}{J_r} T_{ls} - \frac{k_r}{J_r} \omega_t$$

En calculant la dérivée temporelle on obtient

$$\ddot{\omega}_t = \frac{1}{J_r} \dot{T}_a - \frac{1}{J_r} \dot{T}_{ls} - \frac{k_r}{J_r} \dot{\omega}_t \quad (2.7)$$

Reprenons l'expression \dot{T}_{ls} de (2.6). Afin d'alléger les notations, posons

$$\dot{T}_{ls} = a_{31} \omega_t + a_{32} \omega_g + a_{33} T_{ls} + b_{31} T_a + b_{32} T_{em} \quad (2.8)$$

Avec

$$a_{31} = \left(B_{ls} - \frac{k_{ls} k_r}{J_r} \right) \quad ; \quad a_{32} = \frac{1}{n_g} \left(\frac{k_{ls} k_g}{J_g} - B_{ls} \right)$$

$$a_{33} = -k_{ls} \left(\frac{J_r + n_g^2 J_g}{n_g^2 J_g J_r} \right) ; \quad b_{31} = \frac{k_{ls}}{J_r}$$

$$b_{32} = \frac{k_{ls}}{n_g J_r}$$

En utilisant (2.3) et (2.8), l'équation (2.7) devient

$$\begin{aligned} \ddot{\omega}_t = & \frac{\dot{T}_a}{J_r} - \frac{(k_r + b_{31} J_r)}{J_r^2} T_a + \frac{(k_r^2 + a_{31} J_r)}{J_r^2} \omega_t - \frac{a_{32}}{J_r} \omega_g + \frac{(k_r + a_{33} J_r)}{J_r^2} T_{ls} \\ & - \frac{b_{32}}{J_r} T_{em} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Soit ε_ω l'erreur de poursuite définie par

$$\varepsilon_\omega = \omega_{t_{opt}} - \omega_t$$

Où la vitesse de référence optimale est

$$\omega_{t_{opt}} = \frac{\lambda_{opt} v}{R} \quad (2.10)$$

$\omega_{t_{opt}}$ est la vitesse du rotor qui permet d'avoir une vitesse spécifique correspondant à la valeur optimale $C_{p_{opt}}$ du coefficient de puissance $C_p(\lambda)$.

On désire imposer à l'erreur ε_ω une dynamique du second ordre définie par

$$\ddot{\varepsilon}_\omega + b_1 \dot{\varepsilon}_\omega + b_0 \varepsilon_\omega = 0$$

b_0 et b_1 sont choisis tels que le polynôme $s^2 + b_1 s + b_0$ soit Hurwitz.

En remplaçant $\dot{\omega}_t$ donnée par (2.3) et $\ddot{\omega}_t$ donnée par (2.9), on aboutit à l'expression suivante de la commande

$$T_{em} = A_1 \omega_t + A_2 \omega_g + A_3 T_{ls} + A_4 T_a + A_5 \dot{T}_a + A_6 \left(\ddot{\omega}_{t_{opt}} + b_1 \dot{\omega}_{t_{opt}} + b_0 \omega_{t_{opt}} \right) \quad (2.11)$$

Avec

$$A_1 = \frac{(b_0 J_r^2 - b_1 k_r J_r - a_{31} J_r + k_r^2)}{b_{32} J_r}$$

$$A_2 = \frac{-a_{32}}{b_{32}}$$

$$A_3 = \frac{(k_r - b_1 J_r - a_{33} J_r)}{b_{32} J_r}$$

$$A_4 = \frac{(b_1 J_r - b_{31} J_r - k_r)}{b_{32} J_r}$$

$$A_5 = \frac{1}{b_{32}}$$

$$A_6 = \frac{-J_r}{b_{32}}$$

Remarque: La sortie étant ω_t le choix de la dynamique de l'erreur de poursuite est dû ici au fait que le degré relatif est égal à 1.

Comme la référence $\omega_{t_{opt}}$ (d'après (2.10)) est proportionnelle à la vitesse du vent v , elle change donc avec la turbulence du vent. Le choix d'une dynamique rapide pour l'erreur de poursuite impliquera la poursuite de ces turbulences induisant ainsi des efforts de commande assez importants et turbulents. Les efforts subis par l'éolienne au niveau du dispositif d'entraînement comportent, pour la même raison, de fortes oscillations et des pics importants. Cette situation est très nuisible pour la structure de l'éolienne, car elle la fragilise et diminue sa durée de vie. A l'inverse, le choix d'une dynamique trop lente ne permet pas au rotor de suivre, d'une façon suffisamment rapide, la vitesse de rotation de référence qui garantit un rendement aérodynamique optimal.

2.5.2 Modèle à une masse

On suppose que la vitesse du vent est mesurable. Les lois de command élaborées ici peuvent être appliquées aux éoliennes de grande taille.

Soit \tilde{v} une mesure de la vitesse du vent fictif. On peut alors reconstruire le couple aérodynamique à partir de cette mesure et de celle de la vitesse du rotor $\tilde{\omega}_t$

$$\tilde{T}_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \tilde{v}^2 C_q(\tilde{\lambda}) \quad (2.12)$$

Avec

$$\tilde{\lambda} = \frac{\omega_t R}{\tilde{v}} \quad (2.13)$$

On suppose aussi que l'on dispose la mesure de la vitesse de rotor ω_t .

D'après les équations dynamiques du système données au chapitre 1 on a

$$\dot{\omega}_t = \frac{1}{J_t} T_a - \frac{k_t}{J_t} \omega_t - \frac{1}{J_t} T_g \quad (2.14)$$

Nous allons utiliser une commande linéarisant T_g qui permet de ramener le système à un intégrateur simple avec une nouvelle entrée w

$$\dot{\omega}_t = w \quad (2.15)$$

Cette commande est donnée par

$$T_g = J_t \left[\frac{1}{J_t} T_a - \frac{K_t}{J_t} \omega_t - w \right] \quad (2.16)$$

Soit ε_w l'erreur de poursuite définie par

$$\varepsilon_w = \omega_{t_{opt}} - \omega_t \quad (2.17)$$

Où la vitesse de référence optimale est

$$\omega_{t_{opt}} = \frac{\lambda_{opt} v}{R} \quad (2.18)$$

$\omega_{t_{opt}}$ est la vitesse du rotor qui permet d'avoir une vitesse spécifique correspondant à la valeur optimale $C_{p_{opt}}$ du coefficient de puissance $C_p(\lambda)$.

On désire imposer à l'erreur ε_w une dynamique du premier ordre définie par

$$\dot{\varepsilon}_w + a_0 \varepsilon_w = 0 ; \quad a_0 > 0 \quad (2.19)$$

De même, à partir de (2.15) et (2.19), on aboutit à l'expression

$$\omega = \dot{\omega}_{t_{opt}} + a_0 (\omega_{t_{opt}} - \omega_t) \quad (2.20)$$

D'où la commande

$$T_g = T_a - K_t \omega_t - a_0 J_t \varepsilon_w - J_t \dot{\omega}_{t_{opt}} \quad (2.21)$$

Le choix de la dynamique de l'erreur de poursuite du premier ordre est dû au fait que le degré relatif de ce système est égal à 1 [22]

Cette commande par retour d'état statique conduit à des bons résultats en l'absence de perturbations, mais sinon elle présente l'inconvénient de ne pas les rejeter.

2.5.3 Simulation du modèle à une masse avec retour d'état statique

Après l'élaboration et l'implantation du modèle à une masse avec retour d'état statique sous Matlab qui est schématisé dans la figure (2.4), la vitesse du vent est considérée comme perturbation mais utilisée aussi tant que référence, et la vitesse de la génératrice ω_g quant à elle, est considérée comme sortie qui doit suivre la vitesse de rotation liée à la vitesse du vent v .

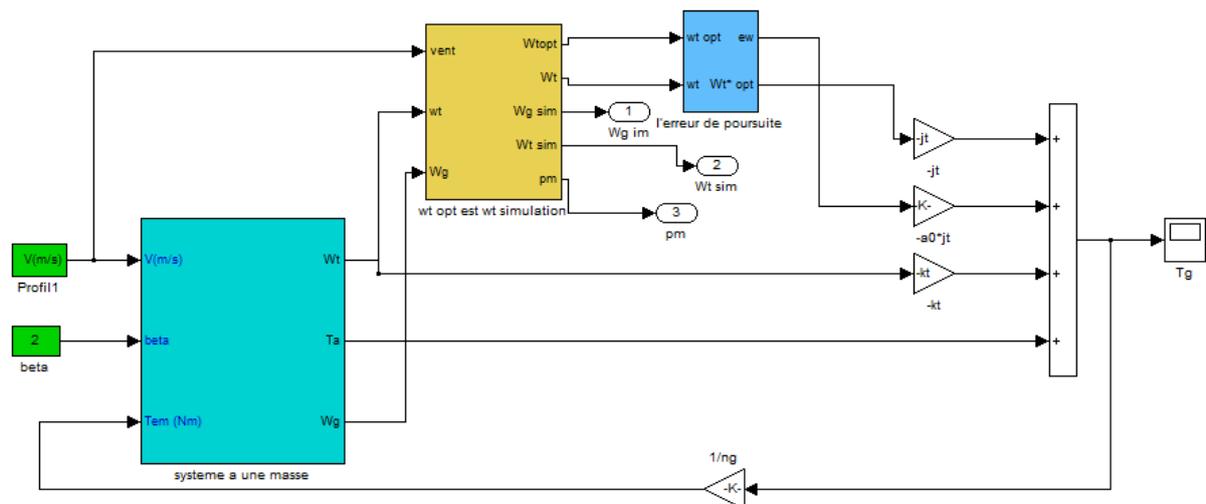


Figure 2.4 Bloc Simulink de la commande par retour d'état statique d'un système éolien

2.5.4 Résultats de simulation

La simulation a été réalisée dans les conditions suivantes :

- Absence de perturbation additive au couple du générateur
- Un profil du vent d'une vitesse moyenne de 7 m/s

Les grandeurs caractéristiques de l'éolienne commandée sont représentées dans la figure (2.5), c'est-à-dire la vitesse de rotor et sa référence optimale, la vitesse de la génératrice et sa référence optimale, la puissance aérodynamique et sa référence et le couple du générateur.

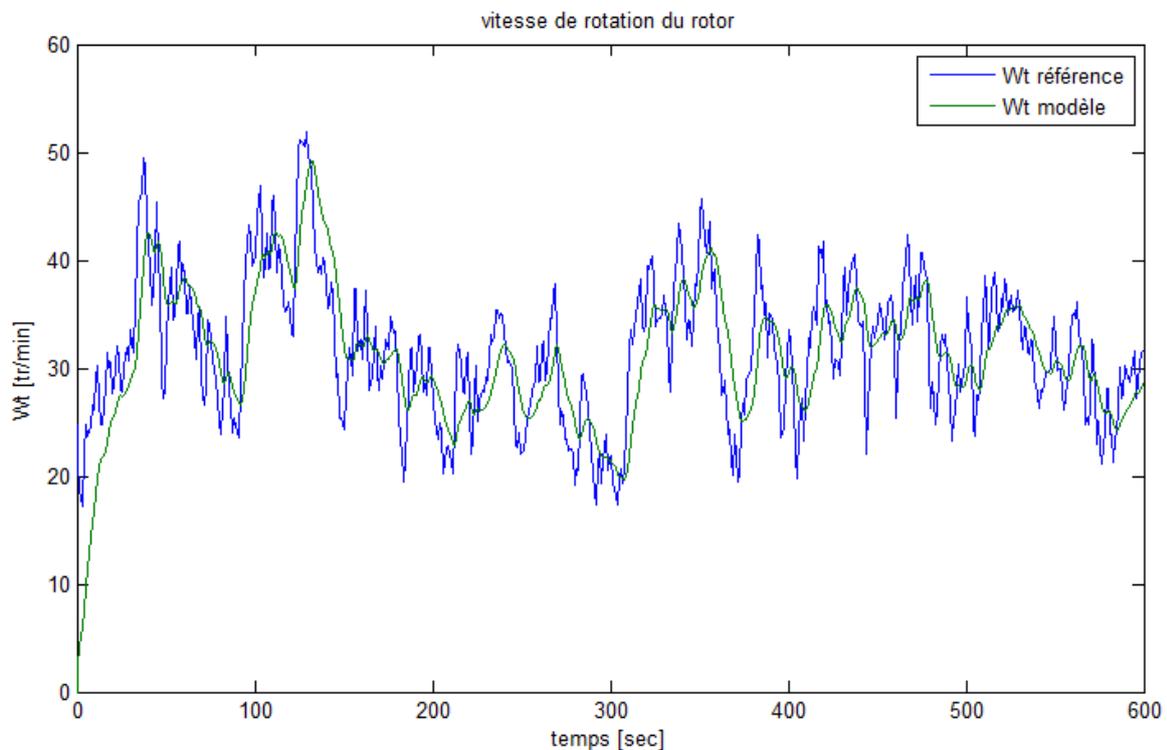


Figure 2.5 vitesse de rotation du rotor de la commande non linéaire par retour d'état statique

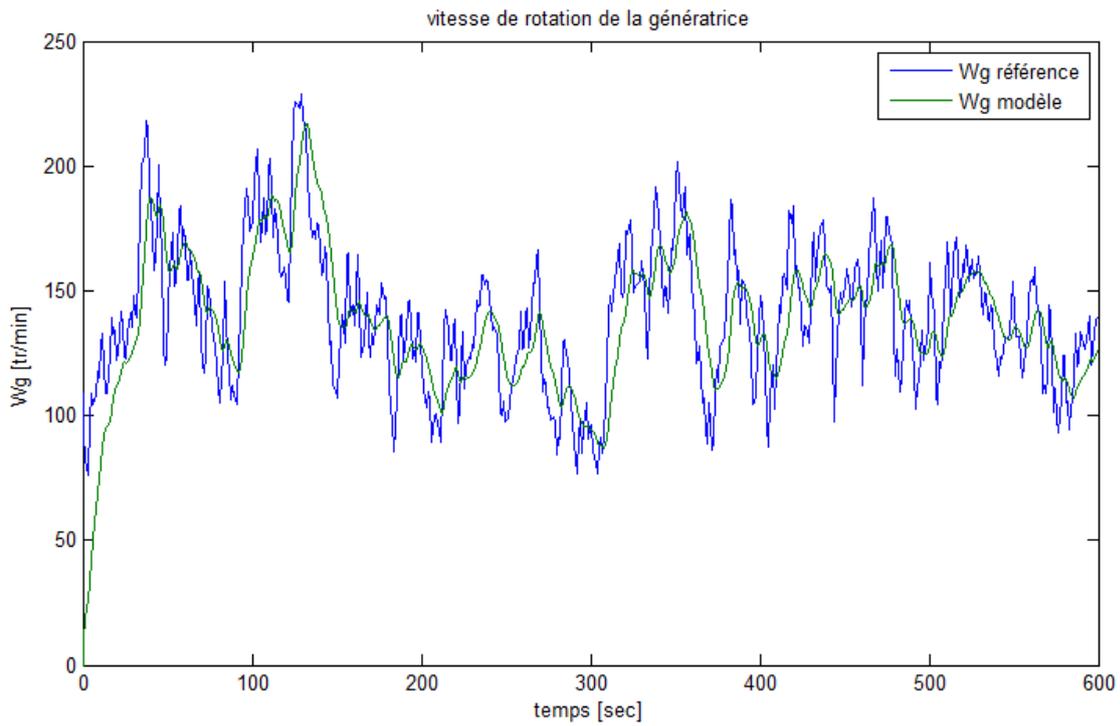


Figure 2.6 vitesse de rotation de la génératrice de la commande non linéaire par retour d'état statique

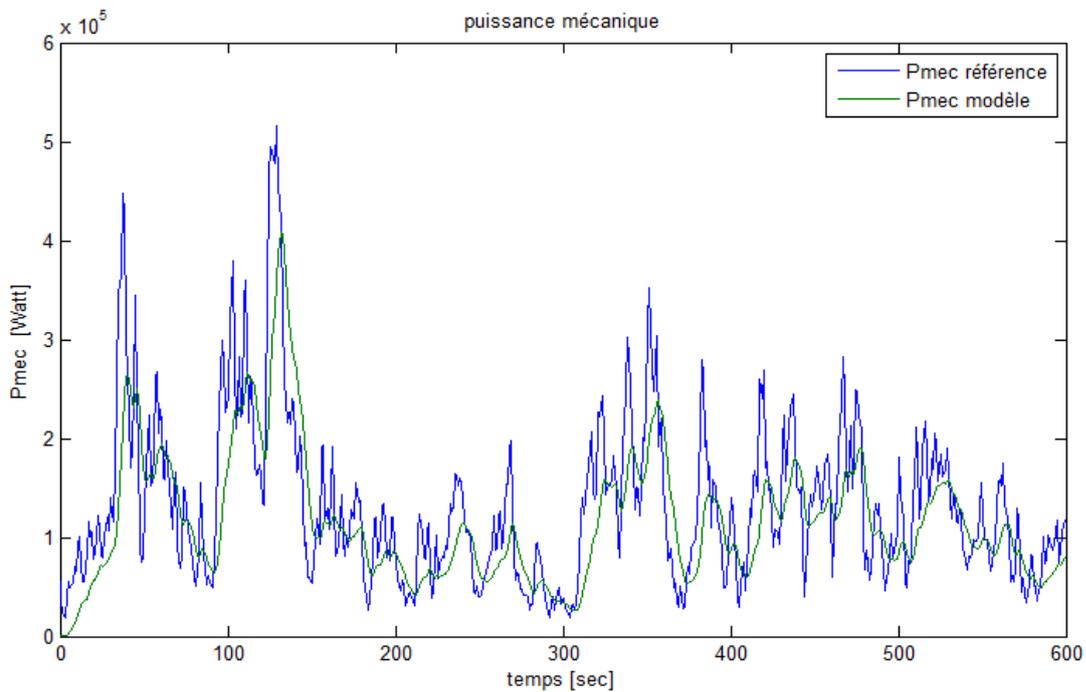


Figure 2.7 puissance mécanique de la commande non linéaire par retour d'état statique

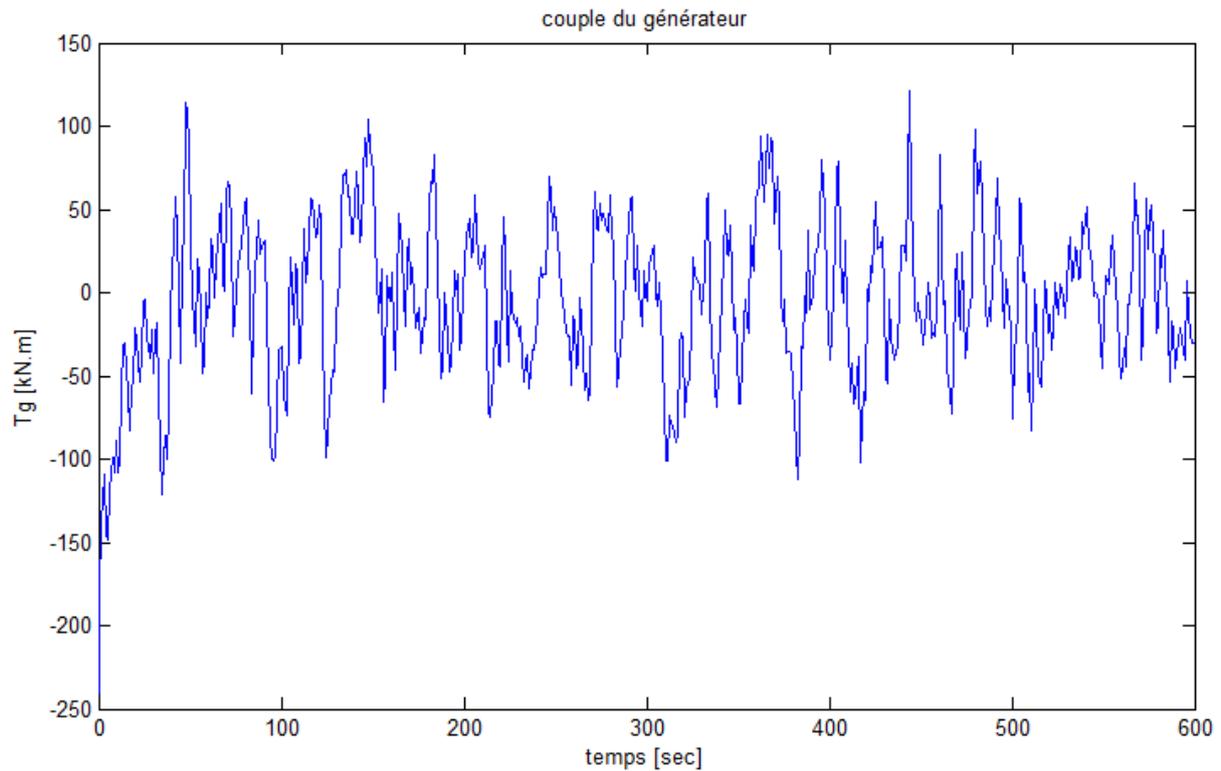


Figure 2.8 couple de générateur

On remarque que la vitesse de rotor et de la génératrice reste au voisinage de sa valeur optimale la trajectoire de la puissance aérodynamique proche de celle de référence.

On peut confirmer alors que cette méthode de commande donne de bons résultats en absence de perturbations.

2.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un ensemble de lois de la commande par retour d'état statique pour les modèle à deux et à une masse puis on a implanté le modèle mathématique à une masse sous Matlab et on a effectué la simulation pour atteindre l'objectif principal de la commande dans la zone de fonctionnement en dessous de la puissance nominale ; à savoir l'optimisation de l'extraction de l'énergie du vent.

La commande non linéaire par retour d'état statique conduit à des résultats proches de celle de l'optimal.

Chapitre 3

**Commande non linéaire par retour
d'état dynamique d'un système
éolien à vitesse variable**

Chapitre 3 Commande non linéaire par retour d'état dynamique d'un système éolien à vitesse variable

3.1 Introduction

Cette partie est consacrée à l'étude de la commande non linéaire par retour d'état dynamique, nous allons voir en premier lieu le concept de base de cette commande .ensuite une simulation du modèle a une masse sera élaborée sous Matlab suivie d'une discussion des résultats obtenue. Enfin une comparaison entre les deux commandes par retour d'état statique et dynamique.

3.2 Commande non linéaire par retour d'état dynamique

3.2.1 Modèle à deux masses

Afin de rejeter l'effet d'une perturbation additive constante sur la commande, on impose une dynamique du troisième ordre à l'erreur de poursuite $\varepsilon_\omega = \omega_{t_{opt}} - \omega_t$

$$\varepsilon_\omega^{(3)} + b_2 \ddot{\varepsilon}_\omega + b_1 \dot{\varepsilon}_\omega + b_0 \varepsilon_\omega = 0 \quad (3.1)$$

Avec b_0, b_1, b_2 sont choisis tels que le polynôme $s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0$ soit Hurwitz.

Reprenons l'expression de (2.9)

$$\begin{aligned} \ddot{\omega}_t = & \frac{\dot{T}_a}{J_r} - \frac{(k_r + b_{31}J_r)}{J_r^2} T_a + \frac{(k_r^2 - a_{31}J_r)}{J_r^2} \omega_t - \frac{a_{32}}{J_r} \omega_g + \frac{(k_r - b_{33}J_r)}{J_r^2} T_{ls} \\ & - \frac{b_{32}}{J_r} T_{em} \end{aligned} \quad (3.2)$$

En la dérivant par rapport au temps, et en prenant compte des expressions (2.3) de $\dot{\omega}_t$ et (2.8) de \dot{T}_{ls} on parvient à l'expression suivante de $\ddot{\omega}_t$

$$\omega_t^{(3)} = B_1 \omega_t + B_2 \omega_g + B_3 T_{ls} + B_4 T_a + B_5 \dot{T}_a + B_6 \ddot{T}_a + B_7 T_{em} + B_8 \dot{T}_{em} \quad (3.3)$$

Avec :

$$B_1 = \frac{[a_{31}J_r(k_r - a_{33}J_r) - k_r(k_r^2 - a_{31}J_r)]}{J_r^2}$$

$$\begin{aligned}
 B_2 &= \frac{a_{32}[k_g J_r + J_g(k_r - a_{33} J_r)]}{J_r^2 J_g} \\
 B_3 &= \frac{[n_g J_g J_r a_{33}(k_r - a_{33} J_r) - a_{32} J_r^2 - n_g J_g(k_r^2 - a_{31} J_r)]}{n_g J_g J_r^2} \\
 B_4 &= \frac{[b_{31} J_r(k_r - a_{33} J_r) + (k_r^2 - a_{31} J_r)]}{J_r^3} \\
 B_5 &= -\frac{(k_r + b_{31} J_r)}{J_r^2} \\
 B_6 &= \frac{1}{J_r} \\
 B_7 &= \frac{b_{32} J_g(k_r - a_{33} J_r) + a_{32} J_r}{J_r^2 J_g} \\
 B_8 &= -\frac{b_{32}}{J_r}.
 \end{aligned}$$

En substituant cette expression dans (3.1) ainsi que celles de $\dot{\omega}_t$ et $\ddot{\omega}_t$ données respectivement par (2.3) et (2.9), la dynamique de la commande est :

$$\begin{aligned}
 \dot{T}_{em} &= C_1 \ddot{T}_a + C_2 \dot{T}_a + C_3 T_a + C_4 \omega_t + C_5 \omega_g + C_6 T_{ls} + C_7 T_{em} \\
 &\quad + C_8 (\dot{\omega}_{t_{opt}} + b_2 \omega_{t_{opt}} + b_0 \omega_{t_{opt}})
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \frac{1}{b_{32}} \\
 C_2 &= -\frac{(k_r + (b_{31} - b_2) J_r)}{b_{32} J_r} \\
 C_3 &= -\frac{[b_2 J_r(k_r + b_{31} J_r) - b_1 J_r^2 - b_{31} J_r(k_r - a_{33} J_r) - k_r^2 + a_{31} J_r]}{b_{32} J_r^2} \\
 C_4 &= -\frac{[k_r(k_r^2 - a_{31} J_r) - b_2 J_r(k_r^2 - a_{31} J_r) + b_1 k_r J_r^2 - b_0 J_r^3 - a_{31} J_r(k_r - a_{33} J_r)]}{b_{32} J_r^2} \\
 C_5 &= -\frac{a_{32}[J_r J_g - k_g J_r - J_g(k_r - a_{33} J_r)]}{b_{32} J_r J_g}
 \end{aligned}$$

$$C_6 = - \frac{b_1 n_g J_g J_r^2 - n_g J_g J_r a_{33} (k_r - a_{33} J_r) + a_{32} J_r^2 + n_g J_g (k_r^2 - a_{31} J_r) - b_2 n_g J_g J_r (k_r - a_{33} J_r)}{b_{32} n_g J_g J_r^2}$$

$$C_7 = - \frac{b_3 b_2 J_r J_g - b_{32} J_g (k_r - a_{33} J_r) - a_{32} J_r}{b_{32} J_g J_r}$$

$$C_8 = - \frac{J_r}{b_{32}}$$

3.2.2 Modèle à une masse

Cette commande est élaborée dans l'objectif de rejeter les perturbations additives constant sur la commande. On impose une dynamique du second ordre à l'erreur de poursuite

$$\begin{aligned} \varepsilon_\omega &= \omega_{t_{opt}} - \omega_t \\ \ddot{\varepsilon}_\omega + b_1 \dot{\varepsilon}_\omega + b_0 \varepsilon_\omega &= 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

b_0 Et b_1 sont choisis tels que le polynôme $s^2 + b_1 s + b_0$ soit Hurwitz.

Si on suppose aussi qu'une perturbation constante d agit sur le système, on

$$J_t \dot{\omega}_t = T_a - k_t \omega_t - T_g + d \quad (3.6)$$

En dérivent cette équation, on aboutit

$$\ddot{\omega}_t = \frac{1}{J_t} [\dot{T}_a - K_t \omega_t - \dot{T}_g] \quad (3.7)$$

Nous cherchons une commande qui va ramener le système (3.7) à un double intégrateur avec la nouvelle entrée w

$$\ddot{\omega}_t = w \quad (3.8)$$

On déduit alors

$$\dot{T}_g = J_t \left[\frac{1}{J_t} \dot{T}_a - \frac{K_t}{J_t} \dot{\omega}_t - w \right] \quad (3.9)$$

On utilisant (3.5) et (3.8), il devient

$$w = \ddot{\omega}_{t_{opt}} + b_1 (\dot{\omega}_{t_{opt}} - \dot{\omega}_t) + b_0 (\omega_{t_{opt}} - \omega_t) \quad (3.10)$$

Enfin, en remplaçant cette expression dans (3.9), on aboutit à la commande dynamique.

$$\dot{T}_g = \dot{T}_a + (b_1 J_t - K_t) \dot{\omega}_t + b_0 J_t \omega_t - J_t (\dot{\omega}_{t\ opt} + b_1 \dot{\omega}_{t\ opt} + b_0 \omega_{t\ opt}) \quad (3.11)$$

Le compromis entre l'optimisation de capteur de l'énergie du vent et la minimisation des efforts transitoires subis par le dispositif d'entraînement est réalisé en choisissant une dynamique de poursuite qui permet de suivre la tendance moyenne de la vitesse de rotation optimale sans pour autant suivre de manière étroite les pics de vent.

3.2.3 Simulation du modèle à une masse avec retour d'état dynamique

Le modèle mathématique d'une masse avec retour d'état dynamique implémenté sous Matlab est schématisé dans la figure (3.1).

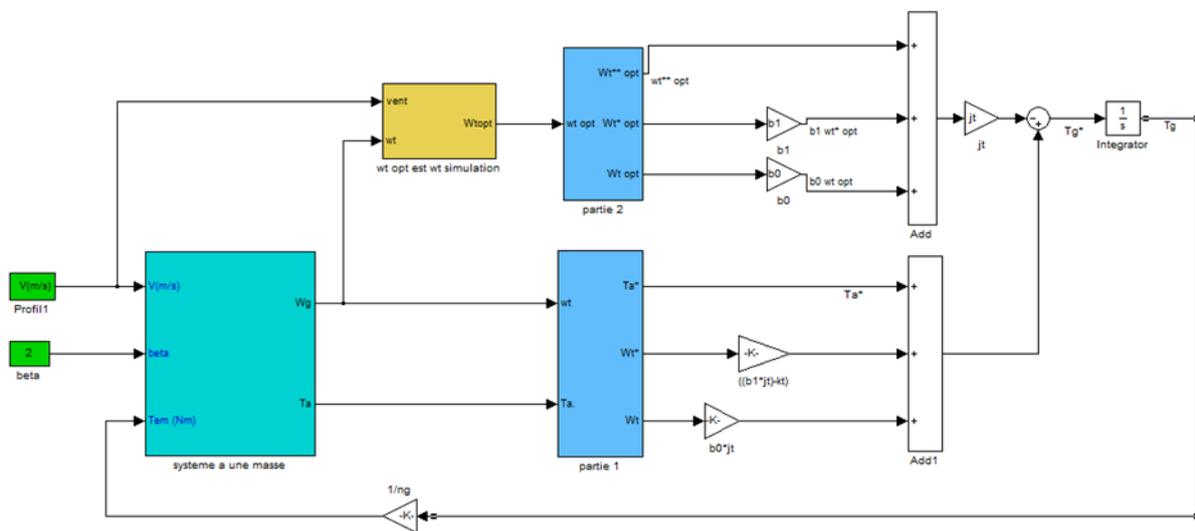


Figure 3.1 Bloc Simulink de la commande par retour d'état dynamique d'un système éolien

3.2.4 Résultats de simulation

La simulation été réalisée dans les conditions suivantes :

- Absence de perturbation additive au couple du générateur.
- Un profil de vent d'une moyenne de 7 m/s.

Les résultats de la simulation sont présentés dans la figure suivante

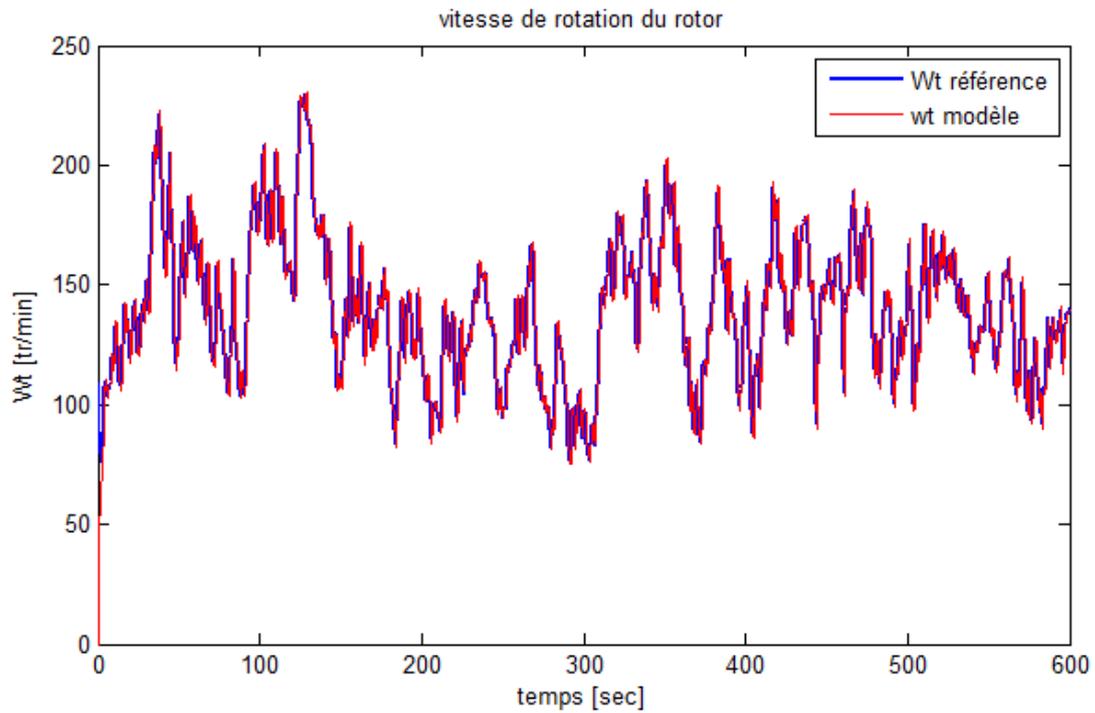


Figure 3.2 vitesse de rotation du rotor de la commande non linéaire par retour d'état dynamique

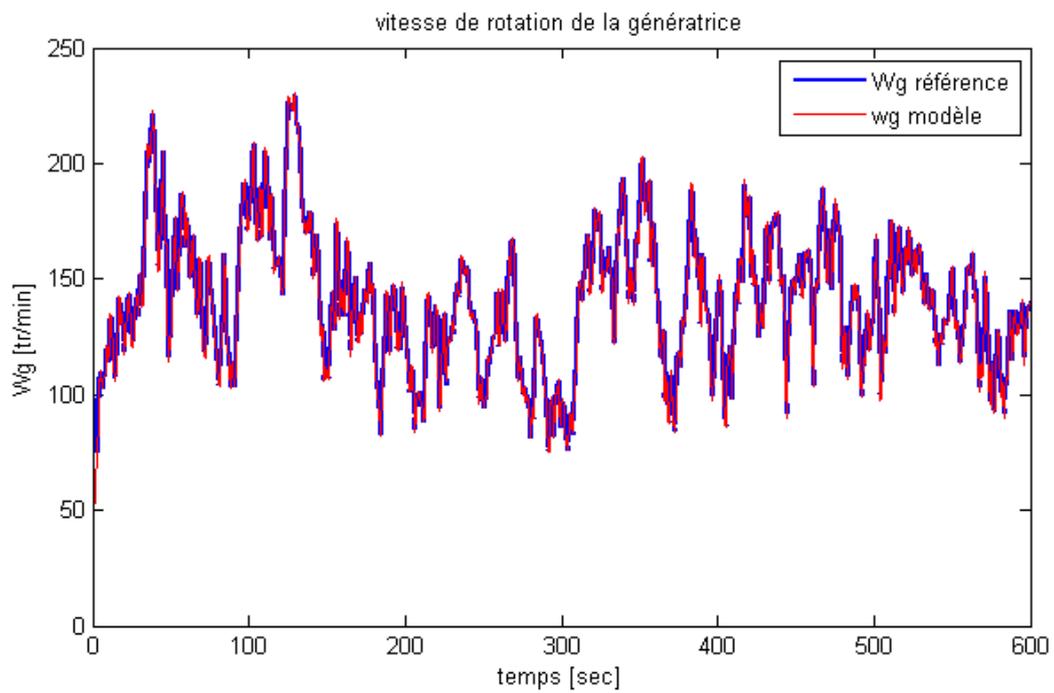


Figure 3.3 vitesse de rotation de la génératrice de la commande non linéaire par retour d'état dynamique

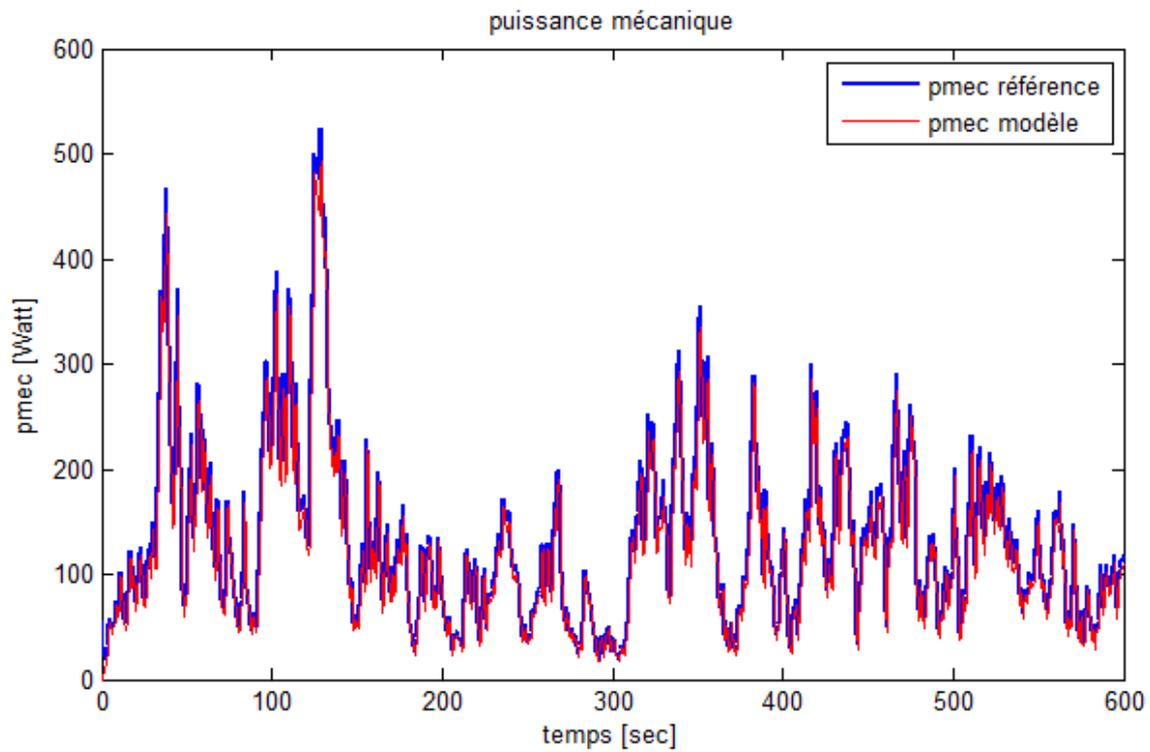


Figure 3.4 puissance mécanique de la commande par retour d'état dynamique

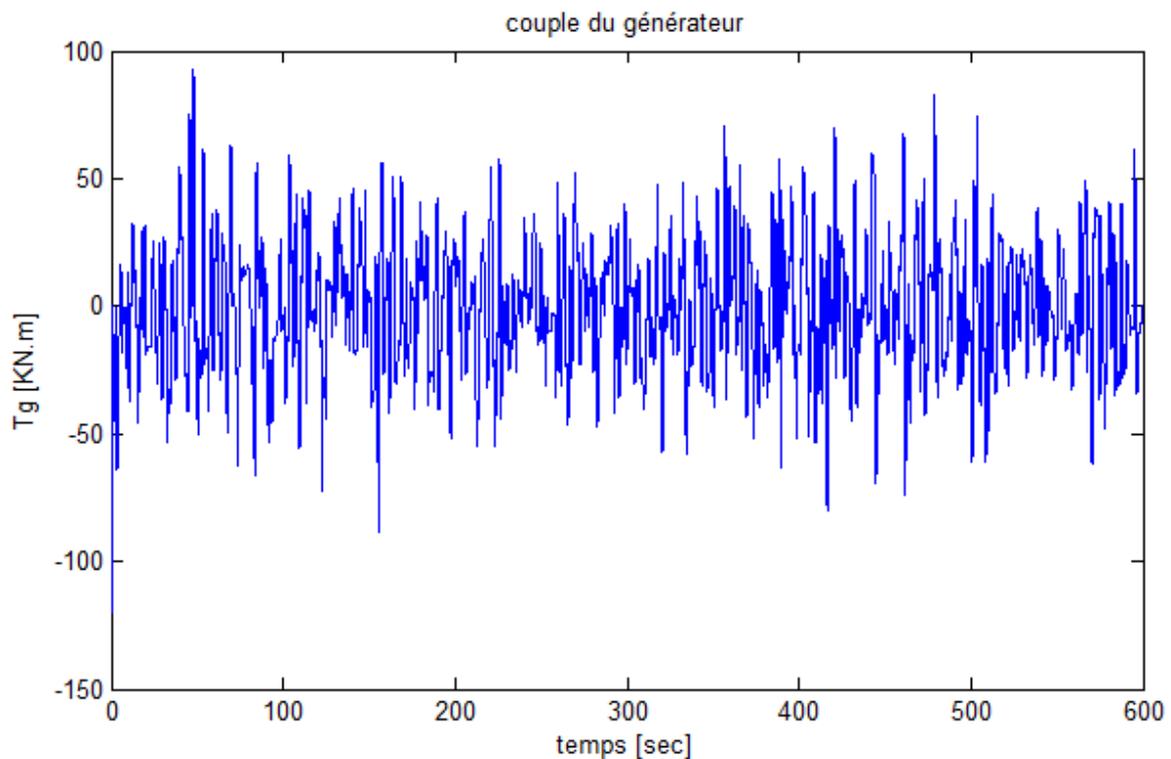


Figure 3.5 couple du générateur

Les grandeurs caractéristiques de l'éolienne commandée sont représentées sur les figures (3.2) (3.3)(3.4)(3.5) c'est à dire les différentes vitesses, leur référence, la puissance mécanique et le couple de générateur. Après la simulation on note que la vitesse du rotor et de la génératrice augmente et presque identique à celle de référence. la puissance mécanique capturée est maximale et on note aussi qu'elle est proche avec la puissance optimale.

3.3 Comparaison des performances entre les deux commandes

Pour mettre en évidence la performance de la commande non linéaire par retour d'état statique et dynamique on teste les deux commandes pour un échelon de vent de 7 m/s. Puis on la compare avec leurs comportements dans le cas d'absence de perturbation.

Les résultats sont présentés dans les deux figures suivantes

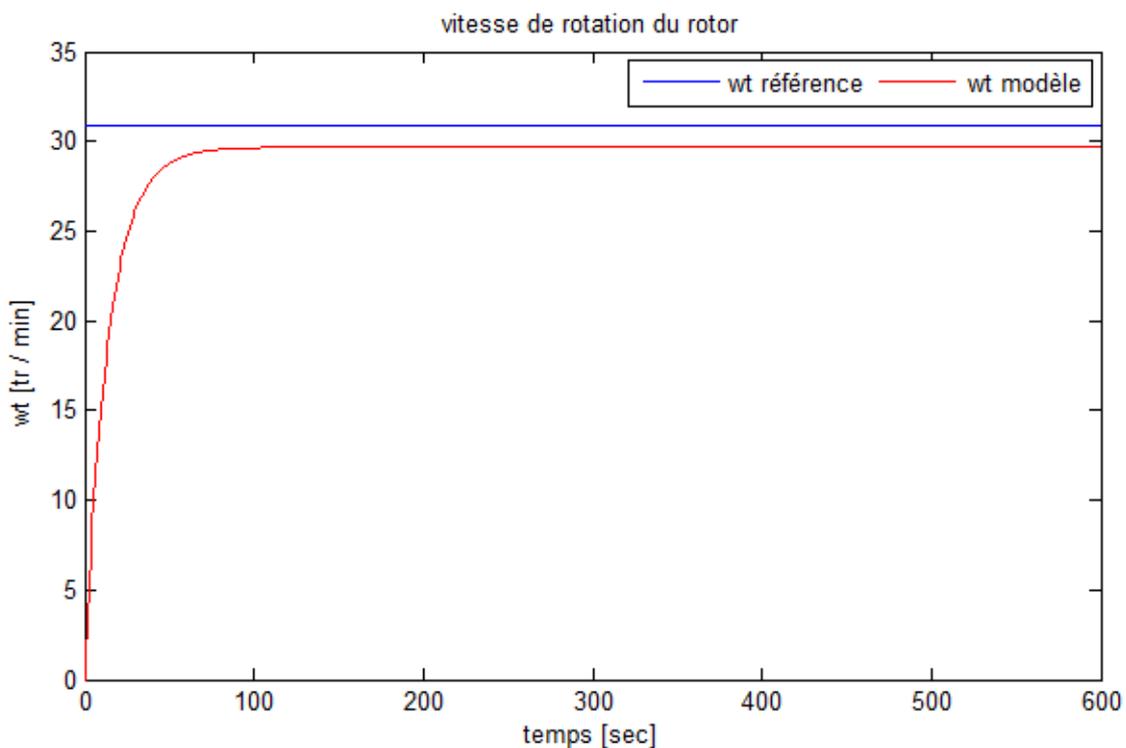


Figure 3.6 vitesse de rotation du rotor par retour d'état statique

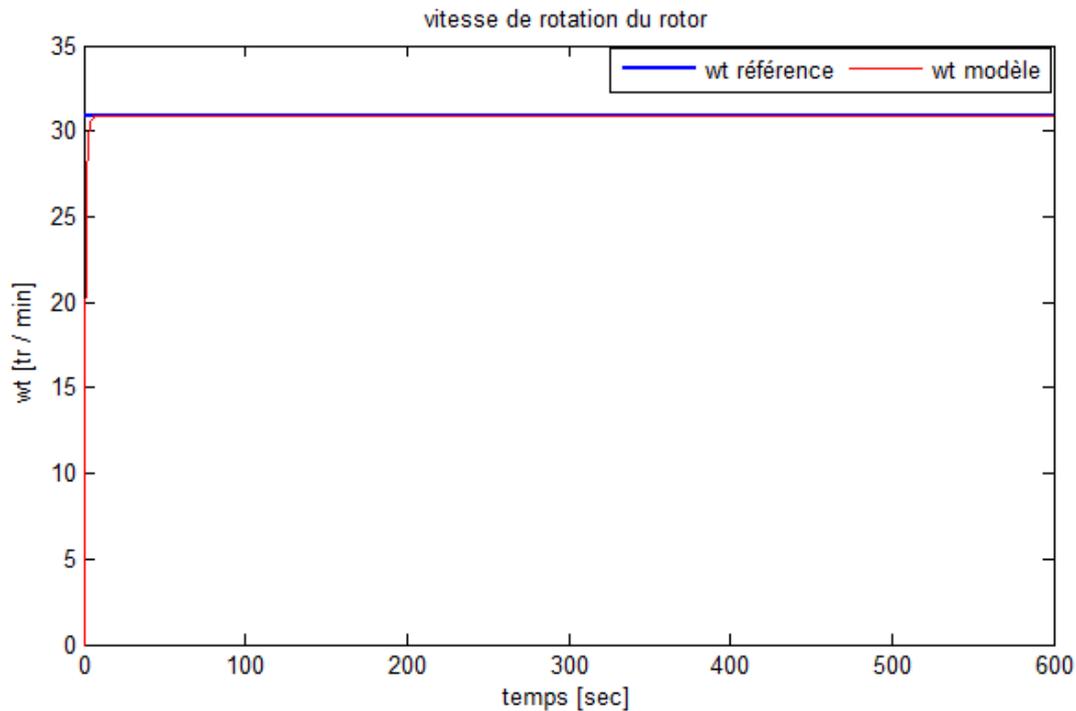


Figure 3.7 vitesse de rotation du rotor par retour d'état dynamique

D'après les courbes de la vitesse de rotor (figure 3.6 et figure 3.7).On remarque que la vitesse de rotation du rotor de la commande par retour d'état statique est proche de l'optimal avec une erreur statique de 1.23 tr/min.la vitesse de rotation du rotor par retour d'état dynamique du modèle est presque identique à celle de référence avec une erreur égale à zéro.

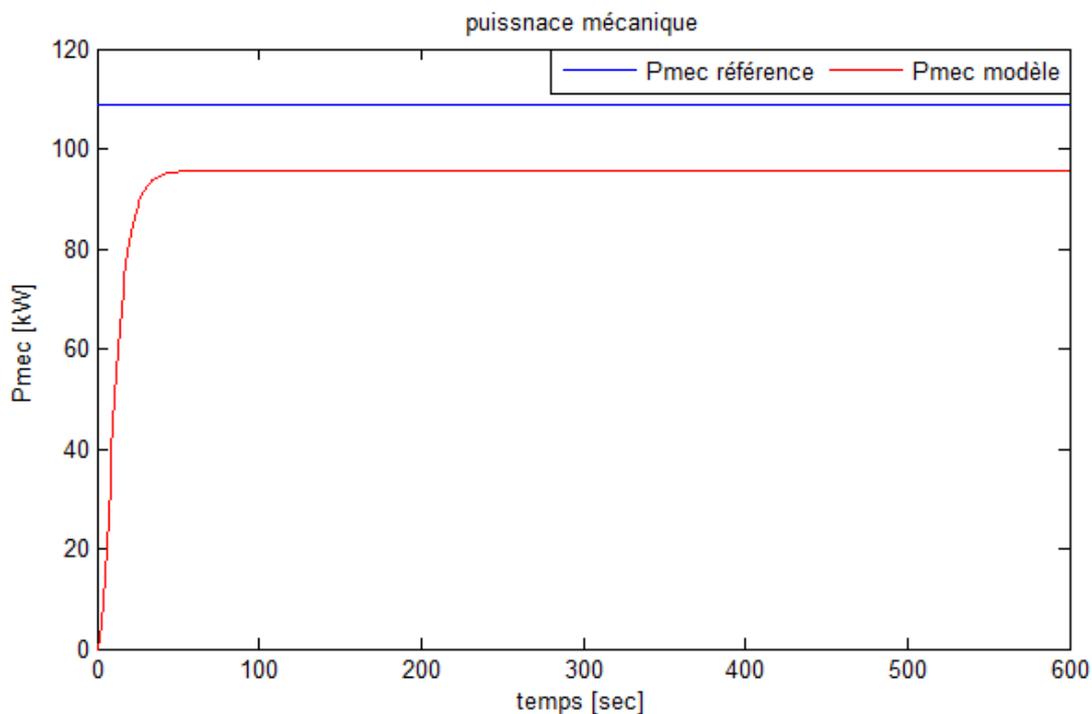


Figure 3.8 puissance mécanique par retour d'état statique

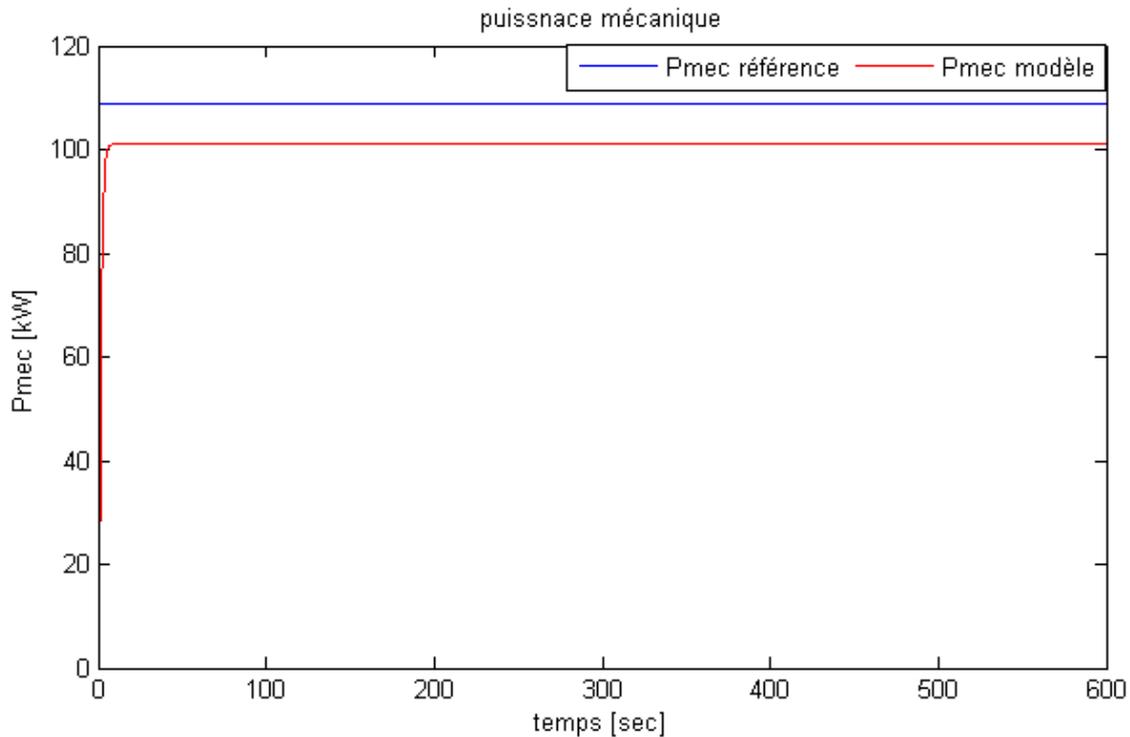


Figure 3.9 puissance mécanique par retour d'état dynamique

D'après les courbes des figure 3.8 et figure 3.9, la puissance mécanique de la commande par retour d'état statique a une erreur statique de 12 kW. la puissance mécanique de la commande par retour d'état dynamique a une erreur statique de 9 kW.

La puissance mécanique capturé par le rotor est plus proche de l'optimal dans le cas de la commande par retour d'état dynamique par rapport au retour d'état statique.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a d'abord présenté le modèle de la commande non linéaire par retour d'état dynamique pour une éolienne à deux et à une masse puis on a implémenté le modèle de celle d'une masse sous Matlab puis on a effectué la simulation pour atteindre l'objectif principal de la commande. Enfin on a terminé par une comparaison entre la commande par retour d'état statique et la commande par retour d'état dynamique qui nous montrés que cette dernière conduit à des performances satisfaisante.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail consiste à élaborer des stratégies de commande basée sur la commande non linéaire par retour d'état statique et la commande non linéaire par retour d'état dynamique permettant de répondre aux exigences spécifiques de la zone de fonctionnement (zone 2) des éoliennes à vitesse variable. Le but de ces stratégies est d'optimiser le rendement énergétique de système et donc d'extraire un maximum d'énergie éolien, tout en minimisant les efforts subis sur le dispositif d'entraînement. Techniques de commande permettant, lorsque les vents sont faibles, de maximiser l'énergie capturée par l'éolienne.

Le premier chapitre décrit le mécanisme de fonctionnement d'une éolienne et l'intérêt de fonctionnement à vitesse variable. Il nous a permis de définir l'éolienne retenue pour cette étude est à axe horizontal et à vitesse variable.

Ensuite, nous avons présenté les modèles mathématiques qui découlent de la modélisation aérodynamique et mécanique des éoliennes à vitesse variable. Nous avons modélisé dans la suite de notre travail le modèle à deux et une masse, puis une simulation sur le modèle à une masse en boucle ouverte sous Matlab (Simulink). Les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants et loin de l'optimal, pour y arriver, nous avons présenté deux techniques de commande.

Le deuxième et troisième chapitre porte sur les commandes d'une éolienne à vitesse variable fonctionnant dans la zone à charge partielle. Nous avons étudié deux commandes dans la littérature relevant des éoliennes, la commande non linéaire avec retour d'état statique et la commande non linéaire avec retour d'état dynamique, ces deux commandes permettent de prendre en compte l'aspect dynamique de l'éolienne et le caractère non linéaire de son comportement aérodynamique. Après la simulation et les résultats obtenus on trouve que la commande non linéaire par retour d'état statique mène à de bonnes performances en fonctionnement normal, les résultats obtenus par la commande dynamique est plus satisfaisante.

Enfin, pour étudier la commande la plus performante une comparaison a été faite entre la vitesse de rotation du rotor et la puissance mécanique des deux commandes les deux par rapport à l'optimal qui montre que la commande par retour d'état dynamique mène à des résultats satisfaisants par rapport à la commande non linéaire par retour d'état statique.

Conclusion générale

Il sera intéressant de simuler les lois de commande du modèle à deux masses sous Matlab (Simulink), mais on aura besoin d'un estimateur pour effectuer cette simulation.

Bibliographie

- [1] BOUTERAA.Rachida , BOULABBA.Aimen. « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne connectée au réseau électrique», mémoire de master université Larbi Tébessi– Tébessa, juin 2021
- [2] K.A. Stol « Geometry and Structural Properties for the Controls Advanced Research Turbing (CART) from Model Taming Subcontractor » report, NREL/SH-500-32087, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado (USA), September 2004.
- [3] S.REBIAI. « Commande adaptative par mode glissant appliqué sur un système éolien » Mémoire de master université Abderrahmane Mira, Bejaia 2021.
- [4] R.Redjem, « étude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne », thèse de magistère en électrotechnique, université Mentouri de Constantine, 2009.
- [5] S. El Aimani « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau moyen tension ». Thèse doctorat. Ecole Centrale de Lille-Université des Sciences et Technologies de Lille 1. France, décembre 2004.
- [6] D.L. Gouriere, « énergie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations », paris : édition EYROLLES, 1982.
- [7] L.L.Freris, « Wind Energy Conversion Systems », Uk : Printice Hall International, 1999.
- [8] B.Boukhezzar, « Les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable », Paris : Doctorat en sciences, Université Paris XI Orsay, 2006.
- [9] H.Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable »
- [10] J.David, R, Winkelman and S.H, « controm design and performance analysis of a 6 Mw Wind turbin generator », IEEE Transaction on PAS, vol.102(5), p.1347, 1983.

- [11] E.Xu, S. Abdin and W, « control design and dynamic performance analysis of a Wind turbine-induction generator unit. », IEEE Transaction on energy conversion. Vol. 15(1), p.91-96, march 2000
- [12] S.Heir, « Grid integration of wind energy conversion systems »,john wiley & sons Ltd 1998.
- [13] K.Idjedarene. « Analyse et control d'une chaine de converzcion electrque par energie eolienne ». Mémoire de magister, département d'électrotechnique, université de bejaia, juin 2005.
- [14] A G.Abo.-Khalil, D-C.lee. « Dynamic Modeling and control of wind turbines for Grid-connected xind Generation system.Power Electronics specialists » conference, PESC, 37th IEEE, 18-22 juin 2006.
- [15] H. Vihriälä, « permanent magnet generator in wind power plants », master's thesis, Tampere university of technolgy, 1998.
- [16] X.Ma, « adaptative extremum control and wind turbine control », Danemark :phD thesis 1997.
- [17] R.Cardenas-Dobson. « Control of Wind Turbines Using a Switched Reluctance Generator » . PhD thesis,Uniersity of Nottingham, 1996.
- [18] Ekelund . « *Modeling and Linear Quadratic Optimal Control of Wind Turbines* » .PhD thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, April1997.
- [19] H. Camblong. « *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éoliennes dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable* ». Thèse de Doctorat, ENSAM Bordeaux, 2004.
- [20] H.Vihriälä. « *Control of Variable Speed Wind Turbines* ». PhD thesis, Tampere University of technology, November 2002.
- [21] A.I. bratcu, I. munteaunu, D.C cernega. « Modélisation a évènement discret d'un système éolien à vitesse variable en vue de la commande supervisée ». 6 éme conférence francophone de modélisation et simulation, rabat, Maroc, avril 2006.

Bibliographie

[22] B. Boukhezzar, H. Siguerdidjate « Nonlinear Control of Variable Speed Wind Turbines Without wind speed measurement Proceedings » of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005, Spain, December 2005.

[23] W. E.Leithead, B.connor. «Control of variable speed wind turbines»: design task.international journal of control, 73 :13,1189-1212,2000.

[24] F.poitiers. « etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de doctorat université de Nantes, France, décembre 2003

[25] M.Maureen Hand, Mark J.Balas. « systematic controller design methodology for variable-speed wind turbines ». Technical report, NREL/TP-500-29415, Golden, Colorado(USA), February 2002

Annexe A : Paramètres de l'éolienne CART

A.1 Eolienne CART

L'éolienne CART (control Advanced Research Turbine) est installée sur le site du NWTC (National Wind Technology Center). Elle est à axe horizontal avec un mat de 35 m et possède deux pales. Les paramètres du modèle ainsi que les différentes caractéristiques de la CART utilisés sont issus de [10].

A.2 Paramètres de l'éolienne à axe horizontal

| | |
|-------------------------------|-----------|
| Rayon du rotor | 21.65 m |
| Diamètre du rotor | 43.3 m |
| Hauteur du moyeu | 36.6 m |
| Puissance électrique nominale | 600 kW |
| Vitesse nominale du rotor | 42 tr/min |
| Couple maximal du générateur | 162 kN.m |
| Vitesse maximale du rotor | 53 tr/min |
| Maximum de l'angle de calage | 30° |
| Minimum de l'angle de calage | -5 ° |

Tableau A-1 Caractéristiques de l'éolienne CART

A.3 paramètres du modèle a deux masses

| Paramètre | signification |
|---|--|
| $R = 21.65 \text{ m}$ | Rayon du rotor |
| $\rho = 1 \text{ kg/m}^3$ | Masse volumique de l'air |
| $J_r = 3.25 * 10^5 \text{ kg. m}^2$ | Inertie des masses du coté rotor |
| $J_g = 34.4 \text{ kg. m}^2$ | Inertie des masses du côté de la génératrice |
| $k_r = 27.36 \text{ N.m/rad/s}$ | Coefficient de frottement visqueux externe du rotor |
| $k_g = 0.2 \text{ N.m/rad/s}$ | Coefficient de frottement visqueux externe de la génératrice |
| $k_{ls} = 9500 \text{ N.m/rad/s}$ | Coefficient de frottement visqueux interne de l'arbre lent |
| $B_{ls} = 2.691 * 10^5 \text{ N.m/rad/s}$ | Coefficient de torsion de l'arbre lent |
| $n_g = 43.165$ | Rapport de transmission du multiplicateur |

Tableau A-2 Paramètres du modèle à deux masses

A.4 paramètres du modèle à une masse

| paramètre | signification |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| $R = 21.65 \text{ m}$ | Rayon du rotor |
| $\rho = 1 \text{ kg/m}^3$ | Masse volumique de l'air |
| $J_t = 3.92 * 10^5 \text{ kg. m}^2$ | Inertie de la turbine |
| $k_t = 400 \text{ N.m/rad/s}$ | Coefficient de frottements visqueux |

Tableau A.3 paramètres du modèles a une masse

A.5 coefficients de puissance de l'éolienne

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\left(\frac{-c_5}{\lambda_i} \right)} + c_6 \lambda$$

| | |
|-------|--------|
| c_1 | 0.5109 |
| c_2 | 116 |
| c_3 | 0.4 |
| c_4 | 5 |
| c_5 | 21 |
| c_6 | 0.0068 |

Tableau A-3 coefficients de puissance de l'éolienne CART

ملخص

يهدف العمل المقدم في هذه المذكرة إلى تطوير استراتيجيات التحكم، بناءً على التحكم غير الخطي من خلال التغذية المرتدة للحالة الثابتة والديناميكية، والتي تجعل من الممكن تلبية المتطلبات المحددة لمنطقة التشغيل الثانية، توربينات الرياح بسرعة عالية المحور المتغير والأفقي. حيث يكون الهدف هو تحسين كفاءة الطاقة للنظام وبالتالي استخراج أقصى قدر من طاقة الرياح، مع تقليل الجهد المبذول في التحكم. لتحقيق ذلك، تم تطوير نهجين. الأول يتكون من تحكم غير خطي من خلال ردود الفعل الثابتة التي تؤدي إلى نتائج قريبة من النتائج المثلى. تتمثل الطريقة الثانية في استخدام التحكم غير الخطي من خلال ردود الفعل الديناميكية للحالة التي تؤدي إلى أداء أعلى بكثير. تجعل الأوامر غير الخطية من خلال ردود فعل الحالة الثابتة و ردود الفعل الديناميكية من الممكن مراعاة الجانب الديناميكي لتوربين الرياح والطابع غير الخطي لسلوكه الديناميكي الهوائي.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif d'élaborer des stratégies de commande, basée sur la commande non linéaire par retour d'état statique et dynamique, qui permettant de répondre aux exigences spécifiques de la zone de fonctionnement II, des éoliennes à vitesse variable et à axe horizontal. Où le but d'optimiser le rendement énergétique du système et donc extraire un maximum d'énergie éolienne, tout en minimisant l'effort sur la commande. Afin d'y arriver, deux approches sont élaborées. La première consiste en une commande non linéaire par retour d'état statique qui conduit à des résultats proches de celle de l'optimal. La deuxième approche consiste à utiliser la commande non linéaire par retour d'état dynamique qui conduit à des performances nettement supérieur. Les commandes non linéaires par retour d'état statique et par retour d'état dynamique permettent de prendre en compte l'aspect dynamique de l'éolienne et le caractère non linéaire de son comportement aérodynamique.

Abstract

The work presented in this dissertation aims to develop control strategies, based on nonlinear control by static and dynamic state feedback, which make it possible to meet the specific requirements of operating zone II, wind turbines at high speed. Variable and horizontal axis. Where the goal is to optimize the energy efficiency of the system and therefore extract a maximum of wind energy, while minimizing the effort on the control. To achieve this, two approaches are developed. The first consists of a nonlinear control by static state feedback, which leads to results close to that of the optimal. The second approach consists in using the nonlinear control by dynamic state feedback, which leads to much higher performance. The nonlinear commands by static state feedback and by dynamic state feedback make it possible to take into account the dynamic aspect of the wind turbine and the nonlinear character of its aerodynamic behavior.