



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Commande électrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Abdelkarim CHAUCHE

Le : lundi 8 juillet 2019

Contrôle d'un aérogénérateur

Jury :

| | | | |
|-------------------|-----|----------------------|------------|
| Dr. Naima RAHOUA | MAA | Université de biskra | Rapporteur |
| Dr. Hamid DERGHAL | MCB | Université de biskra | Président |
| Dr. Omar CHAROUF | MAA | Université de biskra | Examineur |

Année universitaire : 2018 - 2019



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Commande électrique

Présenté et soutenu par :
Abdelkarim CHAOUCHE

Le : samedi 6 juillet 2019

Contrôle aérogénérateur

Présenté par :
Abdelkarim CHAOUCHE

Avis favorable de l'encadreur :
Dr. Naima RAHOUA *signature*

Avis favorable du Président du Jury

Hamid DERGHAL *Signature*

Cachet et signature

Remerciements

Je remercie tout d'abord «Allah » le tout puissant, de m'avoir donné la santé, le courage et la patience pour mener à bien ce projet de fin d'études.

Je tiens à remercier madame Naima RAHOUA pour son encadrement, sa disponibilité, son suivi, ses conseils et ses critiques constructives malgré ses occupations, et je remercie vivement tous les membres de jures.

Je tiens à remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Pour finir j'aimerais remercier toute ma famille pour leur soutien constant.

Une autre fois Je remercie beaucoup mon encadreur

Mme. Naima RAHOUA:

"جزاك الله عني كل خير"

Dédicaces

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mon frère

A mes sœurs

A ma grande famille

*A tous mes amis (es) d'études surtout ceux
D'électrotechnique promotion 2018/2019*

Listes des symboles

| | |
|---------------------------|--|
| Ω_{turbine} | <i>Vitesse mécanique de la turbine (rd/s)</i> |
| C_{aer} | <i>Couple aérodynamique (N.m)</i> |
| p_v | <i>Puissance du vent (Watt)</i> |
| S | <i>Surface utile traversée par le vent (m²)</i> |
| ρ | <i>Masse volumique (kg/m³)</i> |
| λ | <i>Vitesse réduite spécifique (Ratio)</i> |
| V | <i>Vitesse du vent (m/s)</i> |
| Pare | <i>Puissance aérodynamique (W)</i> |
| C_p | <i>Coefficient de puissance</i> |
| R | <i>Représente le rayon de la pale (m)</i> |
| GSAP | <i>Génératrice synchrone à aimants permanents</i> |
| MPPT | <i>Maximum Power Point Tracker</i> |
| V_a, V_b, V_c | <i>Tension aux phases a, b et c</i> |
| I_A, I_B, I_C | <i>Courant aux phases a, b et c</i> |
| Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C | <i>Courant aux phases a, b et c</i> |
| Ψ_f | <i>Flux des aimants permanents</i> |
| Ψ_d | <i>Flux selon l'axe d</i> |
| Ψ_q | <i>Flux selon l'axe q</i> |

| | |
|--------------|--|
| R_s | <i>Résistance de chaque enroulement du stator</i> |
| V_d | <i>Tension selon l'axe</i> |
| V_q | <i>Tension selon l'axe q</i> |
| I_d | <i>Courant selon l'axe d</i> |
| I_q | <i>Courant selon l'axe q</i> |
| ω | <i>Vitesse de rotation électrique ($\omega = p \cdot \Omega$)</i> |
| L_d | <i>Inductance statorique selon l'axe d</i> |
| L_q | <i>Inductance statorique selon l'axe q</i> |
| C_e | <i>Couple électromagnétique</i> |
| C_m | <i>Le couple moteur appliqué sur la génératrice</i> |
| J | <i>Moment d'inertie total de la machine</i> |
| f | <i>Coefficient de frottement visqueux</i> |
| R_{ch} | <i>Résistance de charge</i> |
| L_{ch} | <i>Inductance de charge</i> |
| C_{em} | <i>Couple électromagnétique</i> |
| C_{em-ref} | <i>Couple électromagnétique référence</i> |
| K_{ass} | <i>Régulateur de vitesse</i> |
| ξ | <i>Coefficient d'amortissement</i> |

Listes des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent | 3 |
| Figure 1.2 : Photographie de deux moulins à vent | 4 |
| Figure 1.3 : Capacité d'énergie éolienne installée dans le monde (REN 21 2016) | 6 |
| Figure 1.4 : Eléments constituant une éolienne à axe horizontal | 8 |
| Figure 1.5 : Technologie éolienne à axe vertical | 11 |
| Figure 1.6 : Eoliennes à axe horizontal | 12 |
| Figure 1.7 : Types d'éoliennes à axe horizontal | 13 |
| | |
| Figure 2.1 : Schéma de la turbine éolienne | 16 |
| Figure 2.2 : Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse de la turbine | 18 |
| Figure 2.3 : Schéma bloc du modèle de la turbine | 19 |
| Figure 2.4 : Vitesse de vent [m/s] | 20 |
| Figure 2.5 : Coefficient spécifique | 20 |
| Figure 2.6 : Courbe de puissance aérodynamique | 20 |
| Figure 2.7 : Coefficient C_p | 20 |
| Figure 2.8 : Schéma de la machine synchrone dans le repère (abc) et (d,q) | 21 |
| Figure 2.9 : Modèle équivalente de la GSAP sur l'axe d-q | 23 |
| Figure 2.10 : Schémas bloc de simulation de la génératrice à aimants permanents à vide. | 25 |
| Figure 2.11 : GSAP sur une charge séparée | 26 |
| Figure 2.12 : Bloc de simulation de la GSAP en charge | 28 |
| Figure 2.13 : GSAP sur une charge séparée | 29 |
| Figure 2.14 : Représentation du redresseur triphasé | 30 |
| Figure 2.15 : la tension du redresseur | 31 |
| Figure 2.16 : Représentation d'un filtre passe bas..... | 31 |
| Figure 2.17 : Schéma bloc du redresseur et du filtre | 32 |
| | |
| Figure 3.1 : Dispositif de commande du système de conversion éolien..... | 33 |
| Figure 3.2 : Stratégies de commande de la turbine étudiée..... | 34 |
| Figure 3.3 : Le schéma bloc de la commande de la vitesse mécanique de turbine..... | 35 |
| Figure 3.4 : Coefficient C_p | 37 |
| Figure 3.5 : Vitesse spécifique..... | 37 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 3.6 : Vitesse de turbine..... | 37 |
| Figure 3.7 : Puissance aérodynamique..... | 37 |
| Figure 3.8 : Tensions statorique..... | 38 |
| Figure 3.9 : Courant statorique..... | 38 |
| Figure 3.10 : Courant de la charge..... | 39 |
| Figure 3.11 : Tension de la charge..... | 39 |
| Figure 3.12 : Puissance de la charge..... | 39 |
| Figure 3.13 : Courant de la charge..... | 40 |
| Figure 3.14 : Tension de la charge..... | 40 |
| Figure 3.15 : Courant de la charge..... | 40 |
| Figure 3.16 : Vitesse de vent..... | 41 |
| Figure 3.17 : Coefficient C_p | 41 |
| Figure 3.18 : Vitesse spécifique..... | 41 |
| Figure 3.19 : Puissance aérodynamique..... | 42 |
| Figure 3.20 : Vitesse de turbine..... | 42 |
| Figure 3.21 : Tensions des statorique..... | 42 |
| Figure 3.22 : Courants statorique..... | 43 |
| Figure 3.23 : Courants de charge..... | 43 |

Listes des tableaux

| | | |
|----------------------|--|---|
| Tableau.1.1 : | Echelon Beaufort | 5 |
| Tableau.1.2 : | Parties fonctionnelles de l'installation éolienne. | 9 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| Résumé | |
| Liste des symboles | |
| Liste des figures | |
| Liste des tableaux | |
| Table des matières | |
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre 01 : Généralité d'un aérogénérateur | |
| 1.1. Introduction..... | 3 |
| 1.2. Définition de l'énergie éolienne | 3 |
| 1.3. Etat de l'art et situation de l'éolien dans le monde actuel | 4 |
| 1.3.1. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne | 4 |
| 1.3.2. Vitesse et direction du vent..... | 5 |
| 1.3.3. La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne | 6 |
| 1.3.4. Constitution d'une éolienne | 7 |
| 1.3.5. Principe de fonctionnement d'une éolienne | 8 |
| 1.3.6. Avantages et désavantages de l'énergie éolienne | 9 |
| 1.3.6.1. Les avantage | 9 |
| 1.3.6.2. Les désavantage..... | 10 |
| 1.3.7. Différents types d'éoliennes et leur utilisation | 10 |
| 1.3.7.1. Eoliennes à axe vertical | 10 |
| 1.3.7.2. Eoliennes à axe horizontal | 12 |
| 1.4. Conclusion | 14 |
| Chapitre 02 : Modélisation de la turbine et GSAP | |
| 2.1. Introduction..... | 16 |
| 2.2. Modèle de la turbine | 16 |
| 2.3. Modèle du multiplicateur de vitesse | 18 |
| 2.4. Equation dynamique de l'arbre | 19 |
| 2.5. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents | 21 |
| 2.5.1. Présentation de la machine synchrone | 21 |
| 2.5.2. Hypothèses essentielles simplificatrices | 21 |
| 2.5.3. Equations de la machine synchrone a aimants dans le repère (abc) et (d,q) | 21 |

Table des matières

| | |
|---|----|
| 2.5.3.1. Equations des tensions | 21 |
| 2.5.3.2. Équations magnétique | 21 |
| 2.5.3.3. Equations des tensions | 23 |
| 2.5.3.4. Equations des flux | 23 |
| 2.5.3.5. Equation mécanique | 24 |
| 2.5.4. Essai à vide | 25 |
| 2.5.5. Modélisation de la génératrice en charge | 26 |
| 2.5.6. Modélisation du redresseur | 30 |
| 2.5.7. Modélisation du filtre..... | 31 |
| 2. 6. Conclusion | 32 |

Chapitre 03 : Commande MPPT d'un aérogénérateur

| | |
|--|----|
| 3.1. Introduction..... | 34 |
| 3.2 La machine synchrone | 34 |
| 3. 3. Le convertisseur | 35 |
| 3. 4. Commande du générateur éolien | 36 |
| 3. 4. 1. Découplage par compensation | 36 |
| 3. 4. 2. Synthèse des différents régulateurs | 37 |
| 3. 4. 3. Régulation des courants | 38 |
| 3. 4. 4. Dimensionnement des régulateurs | 40 |
| 1. Régulateur du courant I_q | 40 |
| 2. Régulateur du courant I_d | 42 |
| 3. Régulation de vitesse | 42 |
| 3. 5. Résultats de simulation | 44 |
| 3.6. Conclusion..... | 48 |
| Conclusion Générale | 50 |
| Bibliographie | |
| Annexe | |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction général

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du 18e siècle, puis du pétrole au milieu du 20e siècle. Avec l'augmentation de la pollution à cause de l'industrialisation croissante de la majorité des pays, et la surpopulation sur l'ensemble du globe, la demande sur l'énergie électrique est de plus en plus croissante et les sources d'énergie traditionnelles de moins en moins abondantes. L'Homme s'est alors orienté vers des énergies renouvelables mais surtout propres et sans danger.

La quantité d'énergie extraite des ressources renouvelables, en particulier de l'énergie éolienne, est aujourd'hui considérée comme une alternative compétitive et nécessaire aux ressources fossiles.

L'utilisation de l'énergie éolienne n'a cessé de croître au cours des dernières années. Cela a conduit à une augmentation de la recherche et du développement d'éoliennes plus grandes et efficaces afin d'offrir de l'énergie renouvelable aux clients.

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à l'étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents. Nous allons également étudier la stratégie de commande MPPT de l'éolienne et optimiser son rendement, tout en connaissant l'effet de la vitesse de vent sur le système de conversion.

Le travail exposé dans ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres principaux :

- ✓ Le premier chapitre donne une généralité sur les systèmes éoliens
- ✓ Le second chapitre est consacré à l'étude et la modélisation de la chaîne de conversion (turbine, génératrice synchrone à aimants permanents, redresseur, filtre).
- ✓ Le troisième chapitre est dédié pour contrôler la puissance aérodynamique de la turbine (commande MPPT) avec une boucle d'asservissement de vitesse munie d'une commande vectorielle permettant d'optimiser l'extraction maximale de l'énergie du vent.

Et on finalisera notre travail par une conclusion générale suivie de quelques perspectives envisagées dans nos travaux futurs.

CHAPITRE 1

Généralité d'un aérogénérateur

1. 1. Introduction

Les dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelable ne cesse d'augmenter car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux ce qui a poussé et motivée l'être humain à trouver des solutions amicale l'énergie éolienne.

Ce chapitre est pour le but de se rappeler sur les systèmes éoliens à travers les concepts physiques régissant leur fonctionnement. Ces rappels sont suivis par une définition de l'énergie éolienne de manière générale, puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies et les statistiques d'évolution de la production et de la consommation de l'énergie éolienne dans le monde ainsi que les différentes technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal).

1. 2. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice[1].Le couplage mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire.[2]

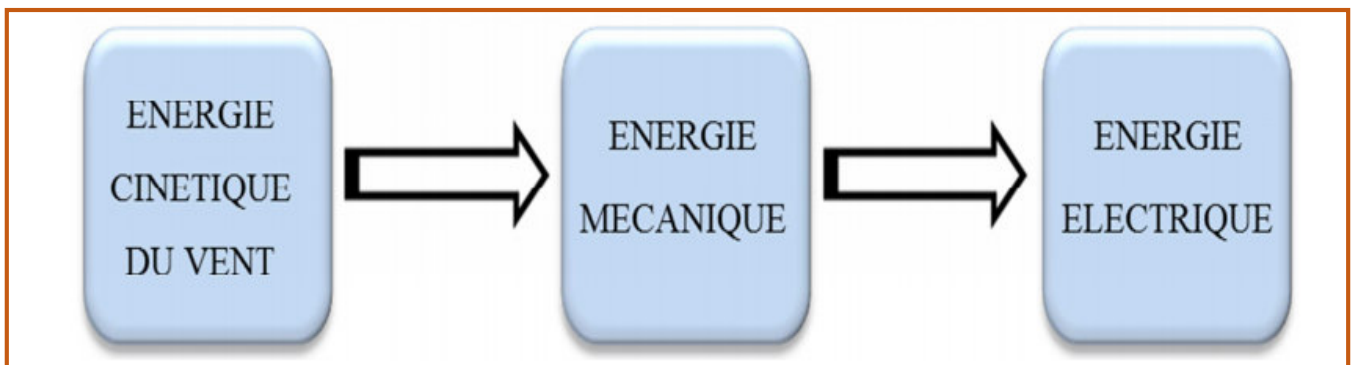


Figure 1.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent. [3]

1. 3. Etat de l'art et situation de l'éolien dans le monde actuel

1. 3. 1. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

Depuis l'Antiquité, les « moulins à vent » convertissent l'énergie éolienne en énergie Mécanique, généralement utilisée pour moudre du grain (figure I.3). De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, souvent utilisées pour irriguer des zones sèches, assécher des zones humides ou abreuver le bétail. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à « Poul La Cour » en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisé (dans les années 40 au Danemark, 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées.

Dans les années 60, environ 1 million d'aérogénérateurs fonctionnaient dans le monde. Cette technologie a été quelque peu délaissée par la suite et il faudra attendre la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes. [4]



Figure 1.2: Photographie de deux moulins à vent. [4]

1. 3. 2. Vitesse et direction du vent

La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers (par exemple offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse.

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre, le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire.

Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques.

Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents la vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres.

➤ Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques-unes au tableau suivant [5].

| Degrés eau fort | Vitesse du vent (m/s) | Vitesse du vent (km/h) | Description générale | Pression sur surface plane (da N/m ²) |
|-----------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|---|
| 0 | 0 à 0.4 | < 1 | Calme | |
| 3 | 3.5 à 5.5 | 12 à 19 | Petite brise | 3.2 (5 m/s) |
| 4 | 5.5 à 8 | 20 à 28 | Jolie brise | 6.4 (7 m/s) |
| 6 | 11.4 à 13.9 | 39 à 49 | Vent frais | 22 (13 m/s) |
| 8 | 17.4 à 20.4 | 39 à 49 | Coup de vent | 52 (20 m/s) |
| 11 | 28.4 à 32.5 | 103 à 117 | Violente température | 117 (30 m/s) |
| 17 | 54.1 à 60 | 202 à 220 | Cyclone | 470 (60 m/s) |

Tableau 1.1: Echelle Beaufort [5].

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude. Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10m/s [5].

1. 3. 3. La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne

En dépit du fait que l'éolien soit restreint aux régions où le vent souffle assez fort, la puissance installée a connu une croissance fulgurante au cours des 10 dernières années. La puissance installée en 2006 dans le monde était environ 74 GW (gigawatts), soit 48 GW en Europe, 1 459 MW au Canada et 11,6 GW aux États-Unis. Selon le Conseil Mondial pour l'énergie éolienne, l'éolien représentait 433 GW de puissance installée en 2015 avec un taux de croissance cumulative de 17 %. Comparé au solaire, avec 100 GW seulement, c'est la méthode de production d'énergie électrique qui montre la croissance la plus marquante parmi les énergies renouvelables. Alors que la figure I.4 montre la puissance éolienne installée dans le monde pour les dix ans passés. [6]

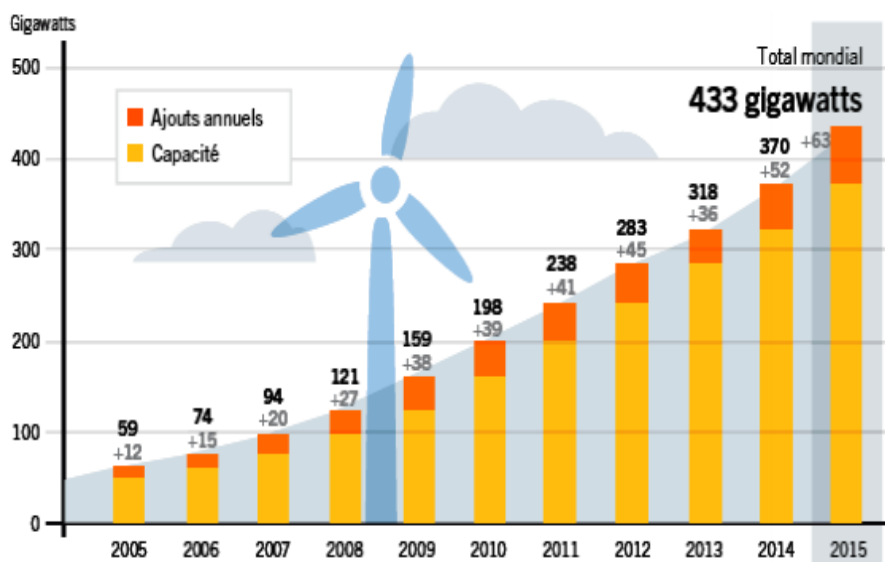


Figure 1.3: Capacité d'énergie éolienne installée dans le monde (REN 21 2016).

1. 3. 4. Constitution d'une éolienne

Une centrale éolienne classique est composée essentiellement des parties suivantes :

Le mât : qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il est important que le mât soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur. A titre d'exemple le **mât** d'une éolienne de 500 kW a une hauteur de 40 à 60m, il peut être plein ou tubulaire. Ce dernier est plus coûteux mais il a l'avantage de permettre un accès aisé à la nacelle pour la maintenance [7]

Le rotor: Fait tourner le mécanisme d'entraînement et le générateur. Les pales doivent être légères, solides et durables, pour résister à l'action des éléments. On les construit habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, en plastique renforcé ou en bois. Le rotor ne tourne pas trop vite. C'est le diamètre des pales qui détermine la quantité d'électricité produite par le système. L'éolienne compte habituellement deux ou trois pales, le rotor à trois pales réduit les contraintes mécaniques que subit le système, mais son coût est plus élevé.

- **Les rotors à pas variable** : le mécanisme est presque idéal, car on optimise la vitesse de rotation et la puissance (presque constante), en fonction du vent disponible. Mais un tel dispositif est complexe et coûteux [7].

- **Les rotors à pas fixe** : ralentir automatiquement à partir d'une certaine vitesse. La conception des pales conduit à un effet aérodynamique qui réduit l'efficacité du rotor. Cette technologie entraîne néanmoins une variation plus importante des vitesses du rotor et exige de réguler davantage le courant de sortie

La fondation : une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grands vent et dans des conditions de givrage [7].

Les pales : Les pales sont une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien. [8] Plusieurs éléments caractérisent ces pales:

- La longueur.
- La largeur.
- Le profil.
- Le matériau.
- Le nombre.

La nacelle : Située en haut de la tour et qui comporte toute l'installation de production d'électricité : le multiplicateur, le (ou les) générateur(s), les systèmes de frein et d'orientation de l'éolienne et tous les équipements automatisés d'asservissement de l'ensemble des fonctions de l'éolienne. La nacelle est une structure en acier ou en fonte à laquelle tous ces éléments sont attachés (Figure 1.5) [8].

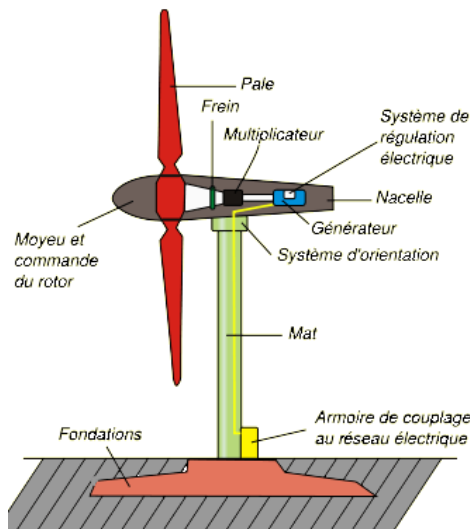


Figure 1.4: Eléments constituant une éolienne à axe horizontal [8].

1. 3. 5. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Les instruments de mesure de vent placés au-dessus de la nacelle conditionnent le fonctionnement de l'éolienne. Grâce aux informations transmises par la girouette qui détermine la direction du vent, le rotor se positionnera pour être continuellement face au vent. Les pales se mettent en mouvement lorsque l'anémomètre (positionné sur la nacelle) indique une vitesse de vent d'environ 10 km/h et c'est seulement à partir de 12 km/h que l'éolienne peut être couplée au réseau électrique. Le rotor et l'arbre dit « lent » transmettent alors l'énergie mécanique à basse vitesse (entre 5 et 20 tr/min) aux engrenages du multiplicateur, dont l'arbre dit « rapide » tourne environ 100 fois plus vite que l'arbre lent. Certaines éoliennes sont dépourvues de multiplicateur et la génératrice est entraînée directement par l'arbre « lent » lié au rotor. La génératrice transforme l'énergie mécanique captée par les pales en énergie électrique.

La puissance électrique produite varie en fonction de la vitesse de rotation du rotor. Dès que le vent atteint environ 50 km/h à hauteur de nacelle, l'éolienne fournit sa puissance maximale. Cette puissance est dite « nominale » [8].

Le tableau suivant décrit les parties fonctionnelles de l'installation éolienne :

| Élément de l'installation | Fonction |
|---------------------------|--|
| Fondation | Ancrer et stabiliser l'éolienne dans le sol |
| Mât | Supporter la nacelle et le rotor |
| Nacelle | Supporter le rotor Abriter le dispositif de conversion de l'énergie ainsi que les dispositifs de contrôle et de sécurité |
| Rotor/pales | Capter l'énergie mécanique du vent et la transmettre à la génératrice |

Tableau 1.2 : Parties fonctionnelles de l'installation éolienne [8].

1.3.6. Avantages et désavantages 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 désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

1.3.6.1. Les avantages

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

- ✓ C'est une énergie renouvelable, le vent est gratuit, à 100 % renouvelable. Certaines sources d'énergie notamment, contribuent à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général.
- ✓ C'est une énergie dont l'utilisation ne pollue pas, ni de gaz à effet de serre, ni de production de déchets « déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire ».
- ✓ L'énergie éolienne es une énergie renouvelable, c'est à dire Que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier[9].
- ✓ Les coûts d'installation ne sont pas très élevés.
- ✓ Utilisable dans tous les endroits fortement exposés aux vents.

1. 3. 6. 2. Les inconvénient

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- ☒ L'énergie change suivant la météo ; la nature du vent stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- ☒ Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.
- ☒ Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- ☒ Le cas d'installations autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou bien de doubler l'installation par un groupe électrogène Diesel, ce qui augmente le coût.
- ☒ Impact visuel: les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le Paysage [10].

1. 3. 7. Différents types d'éoliennes et leur utilisation

Les éoliennes se rangent en deux grandes familles, selon qu'elles tournent autour d'un axe horizontal ou vertical. [10]

1. 3. 7. 1. Eoliennes à axe vertical

Le caractère omni directionnel des éoliennes modernes à axe vertical constitue leur principal avantage sur capter le vent, quelle que soit sa direction.

Cette caractéristique permet d'obtenir des systèmes simples et d'éliminer le problème des forces gyroscopiques sur le rotor d'un éliminateur classique lorsque celle-ci s'oriente en fonction du vent. L'axe vertical de rotation permet également d'installer le générateur et transmissions sur niveau du sol.

Ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connue. Elles peuvent avoir inintérêt dans certains secteurs d'application. Il existe principalement trois technologies VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) : les turbines Darrieux classique ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius, comme montré à la figure I.6, toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales. [10]

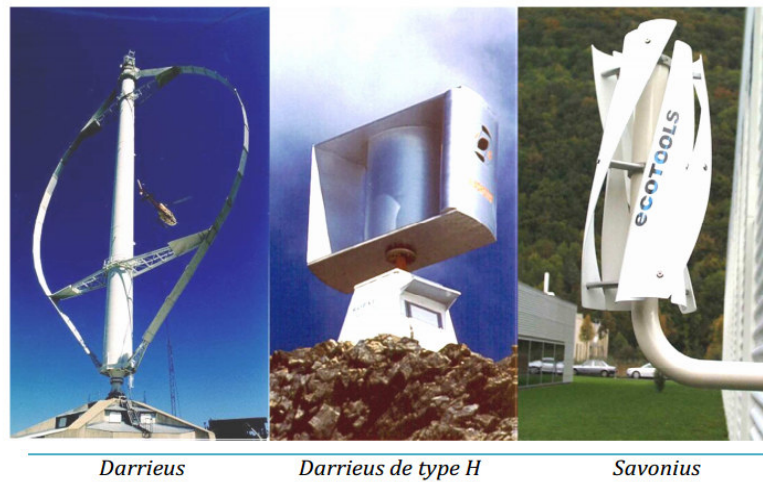


Figure 1.5: technologie éolienne à axe vertical [7].

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit.[10]

a- Avantages

- ✓ La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- ✓ Son axe vertical possède une symétrie de révolution qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- ✓ Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

b- Inconvénient:

- ☒ Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- ☒ La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- ☒ Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour. [10]

1.3.7.2. Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent (Figure 1.7) [7].

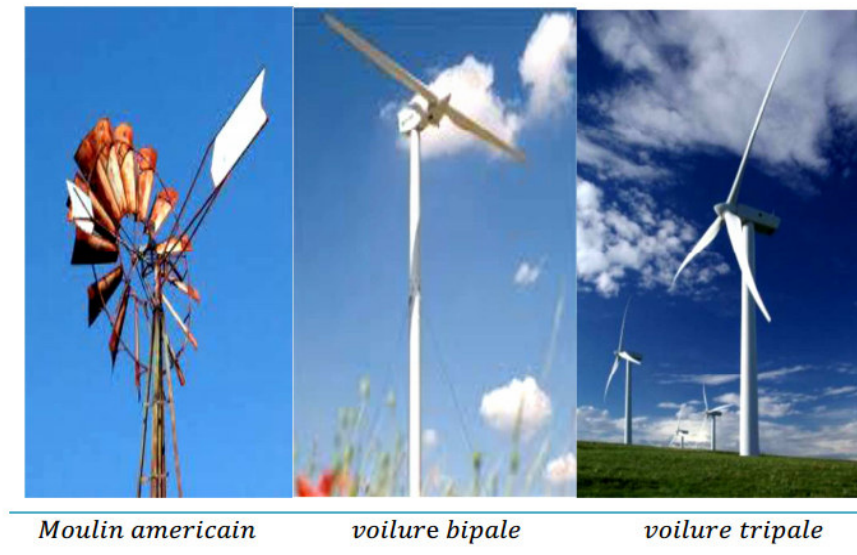


Figure 1.6: Eoliennes à axe horizontal [10].

Le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des Éoliennes à axe vertical ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques. Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal (Figure 1.7) :

Amont : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

Aval : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable.

La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent

toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction. [11]

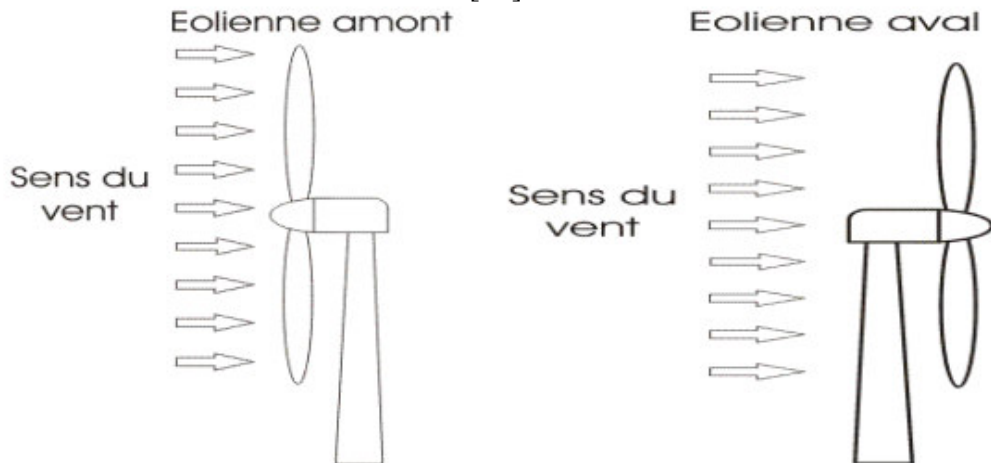


Figure 1.7: Types d'éoliennes à axe horizontal [11].

a- Avantages

- ✓ Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- ✓ Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- ✓ Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

b- Inconvénient

- ☒ Coût de construction très élevé.
- ☒ L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident. Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées.
- ☒ Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple.
- ☒ Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à pas variable (variable pitch)[11].

1. 4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre quelque généralité sur les systèmes éoliens où on a donné un bref historique sur l'utilisation de l'énergie éolienne, la représentation d'une éolienne et son évolution dans le monde, les différents types d'éolienne et leurs principales composantes, les avantages et les inconvénients de l'énergie éolien. Le chapitre suivant est consacré à l'étude et la modélisation de la turbine éolienne et de la génératrice synchrone a aimant permanent.

CHAPITRE 2

Modélisation de la turbine et GSAP

2.1. Introduction

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, électrique et les facteurs déterminant la puissance mécanique, comme la vitesse du vent, la dimension et la forme de la turbine. Un modèle dynamique rassemblant tous ces paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine, et le recours à la modélisation est devenu une nécessité pour contrôler ces performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues.

2.2. Modèle de la turbine

Le dispositif qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à trèveres un multiplicateur de vitesse de gain G (Figure 2.1) [12].

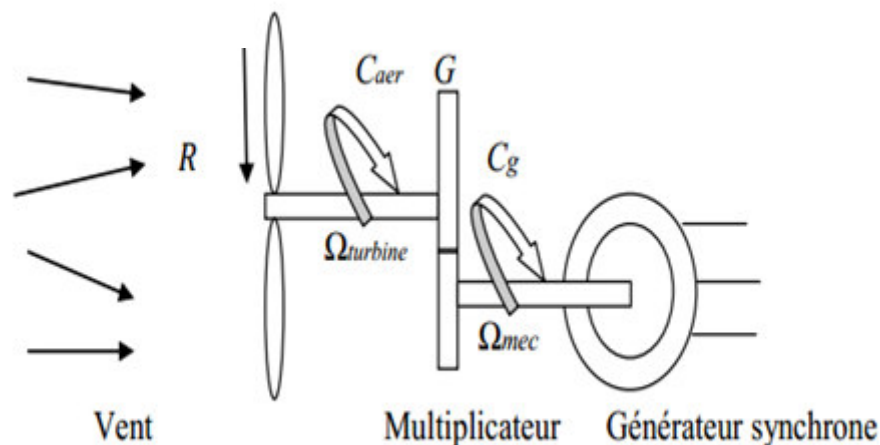


Figure 2.1 : Schéma de la turbine éolienne.

La turbine éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique à partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S balayée par les pales de la turbine, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par :

$$p_v = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (2.1)$$

Où:

* ρ : représente la masse volumique de l'air à peu près égale à 1.23kg/m³

* V : la vitesse du vent (m/s).

* S : la surface traversée par le vent et a pour expression:

$$S = \pi R^2 \quad (2.2)$$

Où:

* R : représente le rayon de la pale (m)

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise la vitesse réduite spécifique (Ratio) λ qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit:

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine}}{V} \quad (2.3)$$

Avec :

* $\Omega_{turbine}$: la vitesse angulaire de rotation des pâles (rad/s).

En utilisant le coefficient de puissance $C_p(\lambda)$, la puissance aérodynamique est

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda) \quad (2.4)$$

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Le coefficient C_p ne peut théoriquement pas dépasser la limite dite de Betz $C_p = 0.59$

Une turbine est typiquement caractérisée par sa courbe $C_p = f(\lambda)$

L'équation analytique de C_p en fonction de λ pour une éolienne de petite puissance choisie pour notre application est la suivante.

$$c_p(\lambda) = a_5 \cdot \lambda^5 + a_4 \cdot \lambda^4 + a_3 \cdot \lambda^3 + a_2 \cdot \lambda^2 + a_1 \cdot \lambda + a_0 \quad (2.5)$$

Avec: $a_0=0.001$, $a_1=6.38.10^{-2}$, $a_2=-9.4.10^{-3}$, $a_3=9.86.10^{-3}$, $a_4=-17.375.10^{-4}$, $a_5=7.9563.10^{-5}$

La figure 2.2 représente le tracé de la caractéristique $C_p(\lambda)$ où apparaît un maximum de 0.406 pour une vitesse réduite spécifique de 6.8.

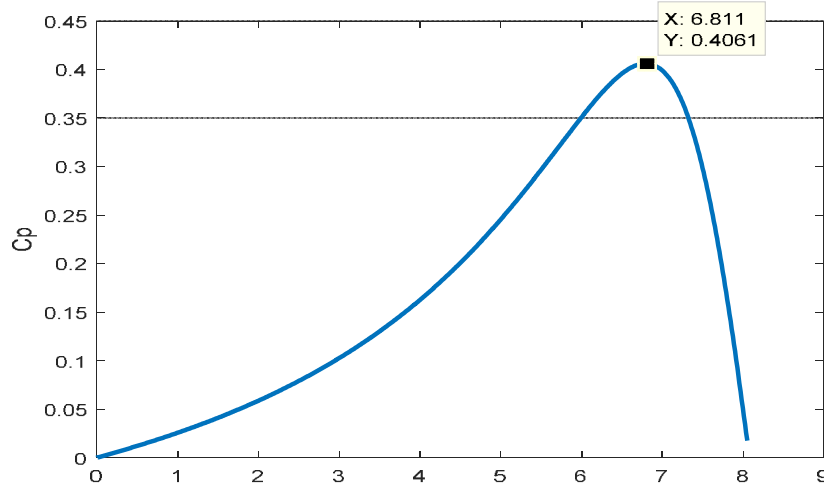


Figure 2.2 : Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse de la turbine.

Le couple aérodynamique entraînant la génératrice s'écrit comme suit:

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} \quad (2.6)$$

En remplaçant (2.3) et (2.4) dans (2.6) on obtient:

$$C_{aer} = \frac{\rho \cdot R^2 \cdot \pi \cdot V^2 \cdot C_p(\lambda)}{2\lambda} \quad (2.7)$$

2.3. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. C'est une sorte de boîte à vitesse qui a pour rôle l'augmentation de la vitesse de la génératrice afin qu'elle atteigne sa vitesse nominale (figure 2.3). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.8)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.9)$$

2.4. Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$. La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine $J_{turbine}$ reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G} + J_g \tag{2.10}$$

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{2.11}$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. C_e couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_f et le couple issu du multiplicateur C_g

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \tag{2.12}$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_f = f\Omega_{mec} \tag{2.13}$$

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté sur la figure (2.3)

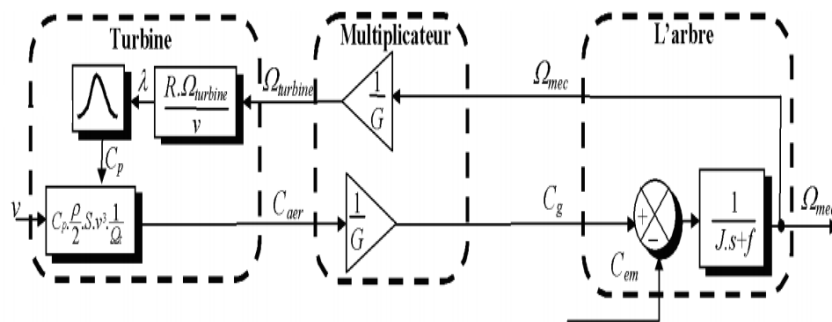


Figure 2.3 : Schéma bloc du modèle de la turbine [13].

➤ **Résultat de simulation de la turbine sans génératrice**

. les figures (2.4.5,6,7) représentent l'évolution de la vitesse du vent, la vitesse réduite spécifique, la puissance aérodynamique et le coefficient C_p en fonction du temps. On remarque que le coefficient C_p n'atteint pas sa valeur maximum, alors on ne peut pas extraire le maximum de puissance.

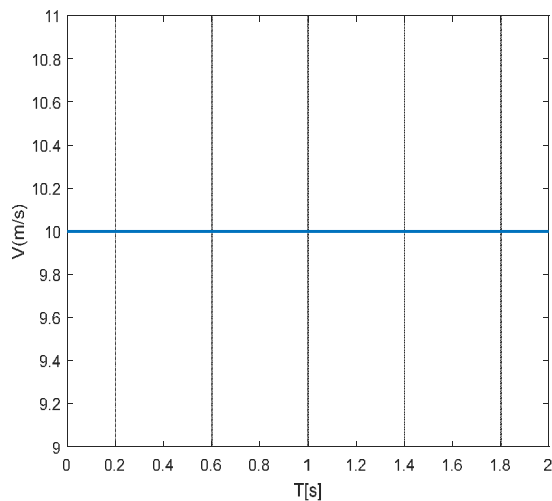


Figure 2.4 : vitesse de vent [m/s].

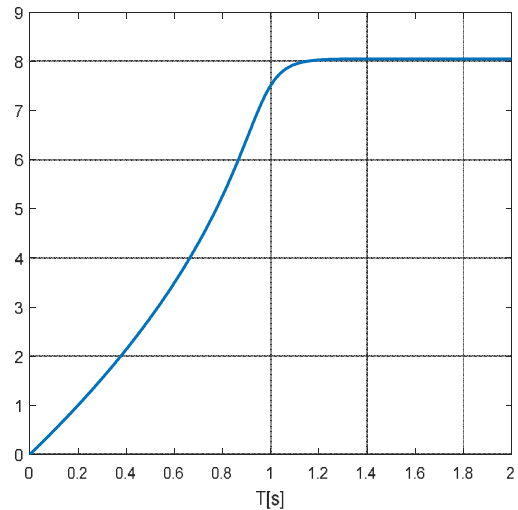


Figure 2.5 : coefficient spécifique.

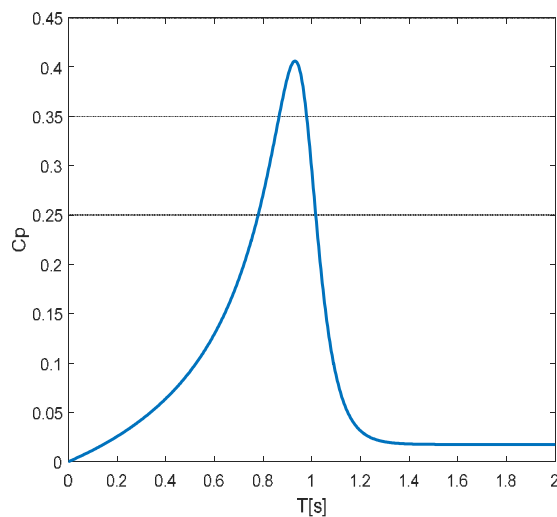


Figure 2.6: Coefficient C_p .

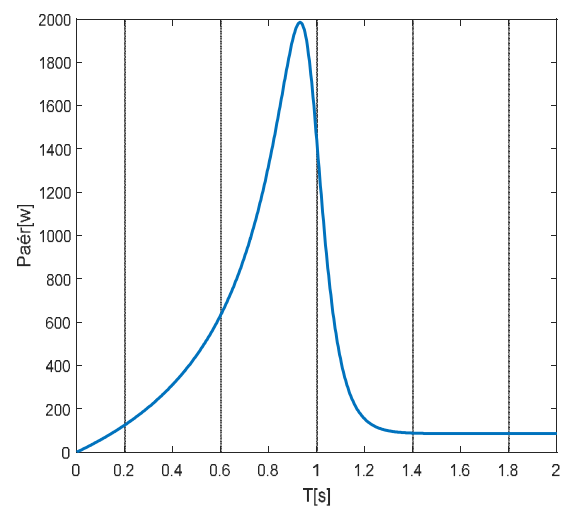


Figure 2.7: puissance aérodynamique.

2.5. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

2.5.1. Présentation de la machine synchrone

Les machines synchrones à aimants se développent de manière importante à l'heure actuelle, grâce à la mise en point d'aimants permanents de grande qualité, permettant l'obtention de couples massiques élevés. En effet, lorsque le nombre de pôles est élevé, les puissances peuvent atteindre quelques centaines de kilowatt. Toutefois, leur domaine d'emploi privilégié reste les puissances inférieures à quelques dizaines de kilowatts, où l'aimant permanent permet d'obtenir, à taille égale, une induction dans l'entrefer plus élevée que les machines à rotor bobiné. Par ailleurs l'emploi d'aimants permanents à la place de l'enroulement inducteur annule les pertes par effet Joule au rotor et augmente le rendement [3]. Avant d'entamer la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent on doit prendre quelque hypothèse simplificatrice.

2.5.2. Hypothèses essentielles simplificatrices

Pour simplifier la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents, nous adopterons les hypothèses simplificatrices suivantes:

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique
- La distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L'effet d'encochage est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

2.5.3. Equations de la machine synchrone à aimants dans le repère (abc) et (d,q)

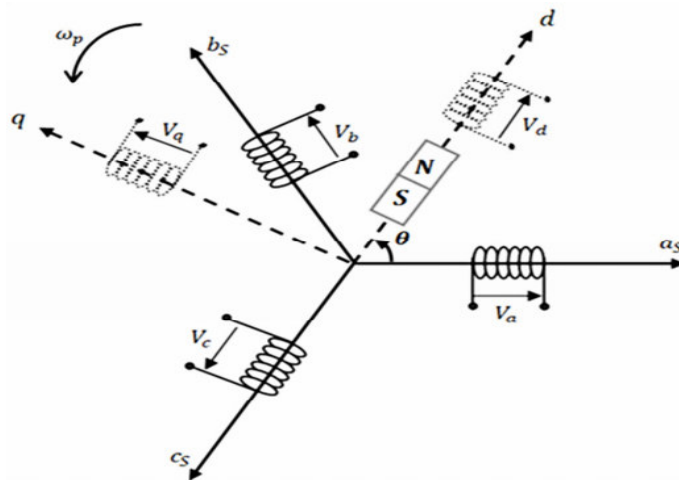


Figure 2.8 : Schéma de la machine synchrone dans le repère (abc) et (d,q).

A partir de la **Figure 2.8** nous écrivons les équations de la machine synchrone dans le repère abc.

2.5.3.1. Equations des tensions

Les équations dynamiques par phase de la machine s'écrivent comme suit:

$$\begin{cases} V_a = R_s I_A + \frac{d\Psi_{sa}}{dt} \\ V_b = R_s I_B + \frac{d\Psi_{sb}}{dt} \\ V_c = R_s I_C + \frac{d\Psi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (2.14)$$

2.5.3.2. Équations magnétique

$$\begin{cases} \Psi_A = L_s I_A + M_{AB} I_B + M_{AC} I_C + \Psi_f \cos(\theta) \\ \Psi_B = L_s I_B + M_{BA} I_A + M_{BC} I_C + \Psi_f \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \Psi_C = L_s I_C + M_{CA} I_A + M_{CB} I_B + \Psi_f \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.15)$$

Les coefficients des équations différentielles sont variables (en fonction de θ) et la résolution analytique du système se heurte à des difficultés pratiquement insurmontables.

Pour simplifier ce système on introduit la transformée de **PARK** qui fait correspondre aux variables réelles leurs composantes:

$$\begin{cases} V_d, V_q, V_0 \\ I_d, I_q, I_0 \end{cases}$$

tel que :

[P]: est la matrice de Park normalisée, définie par

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Les équations de la machine synchrone a aimant permanent dans le repère (d,q) en mode moteur sont représentées par:

2.5.3.3. Equations des tensions

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - \omega_r \Psi_q \\ V_q = R_s I_q + \frac{d}{dt} \Psi_q - \omega_r \Psi_d \end{cases} \quad (2.17)$$

2.5.3.4. Equations des flux

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d I_d + \Psi_f \\ \Psi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (2.18)$$

Le schéma équivalent de la GSAP en mode générateur sur l'axe d et l'axe q est représenté sur la figure 2. 9 d'où on obtient le système suivant :

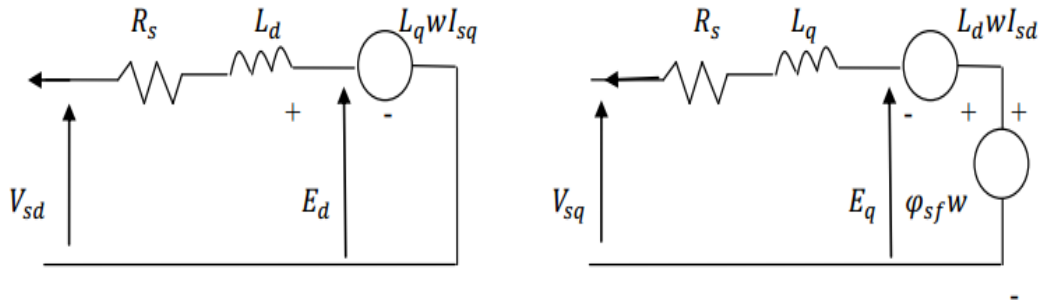


Figure 2.9 : Modèle équivalente de la GSAP sur l'axe d-q [12].

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d - \omega_r L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q + \omega_r (L_d I_d + \Psi_f) \end{cases} \quad (2.19)$$

Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé par la dérivée de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique du rotation du rotor

$$C_{em} = \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} = P \frac{dW_e}{d\theta} \quad (2.20)$$

W_e : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

θ_{geo} : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator)

P : nombre de paires de pôles

Selon Park, l'expression de la puissance transmise est la suivante :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (2.21)$$

En remplaçant V_d , V_q par leurs expressions on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} [-R_s (I_d^2 - I_q^2) - \left(I_d \frac{d}{dt} \Psi_d + I_q \frac{d}{dt} \Psi_q \right) - \frac{d}{dt} \theta (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d)] \quad (2.22)$$

➤ $\frac{3}{2} [R_s (I_d^2 + I_q^2)]$: Représente la puissance dissipée en pertes Joules dans les enroulements du stator.

➤ $\frac{3}{2} [I_d \frac{d}{dt} \Psi_d + I_q \frac{d}{dt} \Psi_q]$: Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.

➤ $\frac{3}{2} [\frac{d}{dt} \theta (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d)]$: Représente la puissance électromagnétique

2.5.3.5. Equation mécanique:

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivant :

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.23)$$

C_m : Le couple moteur appliqué sur la génératrice.

$f\Omega$: Le couple de frottement.

J : Moment d'inertie total de la machine.

f : Coefficient de frottement visqueux.

2.5.4. Essai à vide

$$\begin{cases} I_d = 0 \\ I_q = 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

Les expressions des tensions et couple devient:

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = \omega \Psi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

D'après cette équation on aboutit au schéma de simulation bloc suivant

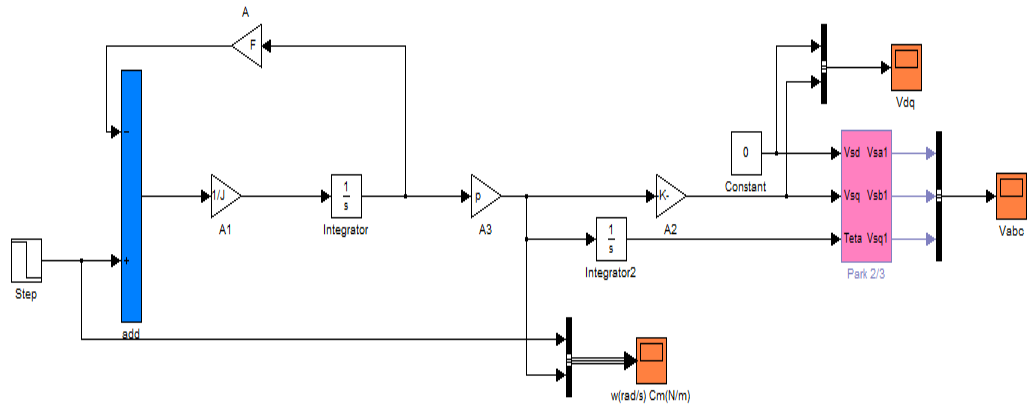
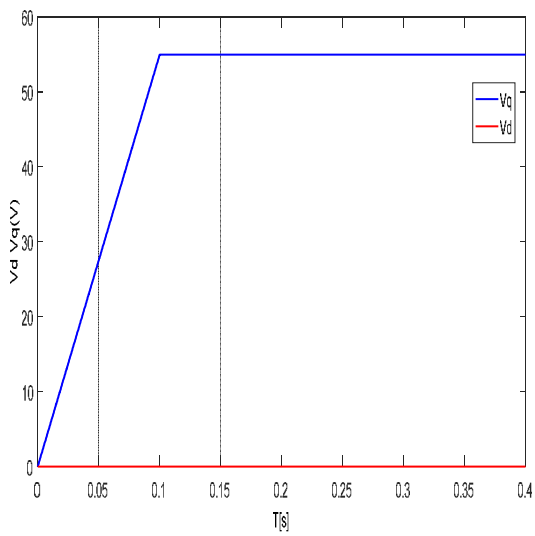


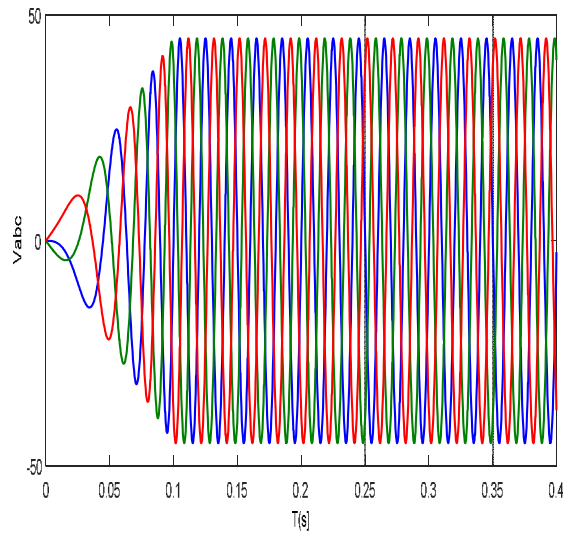
Figure 2.10 : Schémas bloc de simulation de la génératrice à aimants permanents à vide.

➤ Résultats de simulation

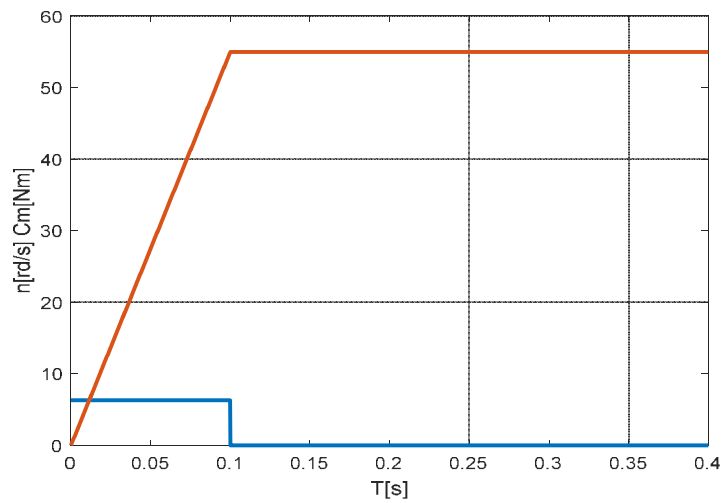
On fait lancer la génératrice à l'aide d'un couple moteur égale à 6.28Nm pour une durée de 0.1s, puis, on la laisse tourner librement. Etant donné que le frottement considéré dans ce cas est nul, on constate d'après la Figure (2.11) que la vitesse est stabilisée à une valeur de 78.5 rad/s, et les tensions de phases sont parfaitement sinusoïdales avec une crête de 55V et une fréquence de 50Hz



a : Composantes V_d V_q



b : Tension statorique



c : vitesse de rotation et couple moteur

Figure 2.11 : GSAP sur une charge séparée.

2.5.5. Modélisation de la génératrice en charge

Le générateur aliment dans ce cas une charge électrique (R_{ch} , L_{ch}). Pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique d'une part, les équations données par (2.21),

D'autre part, l'application des tensions V_d et V_q sur la charge donne :

$$\begin{cases} V_d = R_{ch}I_d + L_{ch}\frac{d}{dt}I_d - \omega_r L_{ch}I_q \\ V_q = R_{ch}I_q + L_{ch}\frac{d}{dt}I_q + \omega_r L_{ch}I_d + \omega_r \Psi_f \end{cases} \quad (2.26)$$

En remplaçant les expressions de V_d et V_q dans (2.26), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch})I_d - (L_d + L_{ch})\frac{dI_d}{dt}I_q + \omega(L_d + L_{ch})I_q \\ 0 = -(R_s + R_{ch})I_q - (L_q + L_{ch})\frac{dI_q}{dt} + \omega(L_d + L_{ch})I_d - \omega\Psi_f \end{cases} \quad (2.27)$$

$$\begin{cases} SI_d = \frac{1}{L_d+L_q} [-(R_s + R_{ch})I_d + \omega(L_q + L_{ch})I_q] \\ SI_d = \frac{1}{L_d+L_q} [-(R_s + R_{ch})I_q - \omega(L_q + L_{ch})I_d] - \omega\Psi_f \end{cases} \quad (2.28)$$

Considérons le flux d'excitation comme Ψ_f grandeur de commande, et les courants I_d, I_q comme variables d'état.

Les équations d'état deviennent :

$$[\dot{x}] = [A][x] + [B][v] \quad (2.29)$$

On cherche à obtenir un système d'équations sous forme d'équations d'état:

$$[x] = [i_d \ i_q]^t, [v] = [0 \ \Psi_f]^t \quad (2.30)$$

Les équations (2.29), peuvent s'écrire sous la forme matricielle

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s+R_{ch}}{L_d+L_{ch}} & \omega \frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} \\ -\omega \frac{L_q+L_{ch}}{L_q+L_{ch}} & -\frac{R_s+R_{ch}}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega \Psi_f}{L_d+L_{ch}} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

On peut écrire les matrices[A]et[B]sous la forme :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s+R_{ch}}{L_d+L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s+R_{ch}}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} \\ -\frac{L_d+L_{ch}}{L_q+L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$[B][v] = \omega \frac{1}{L_q+L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \Psi_f \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

A partir des équations (2.30 à 2.35, et 2.23), on construit le bloc de simulation de la génératrice (figure 2.12).

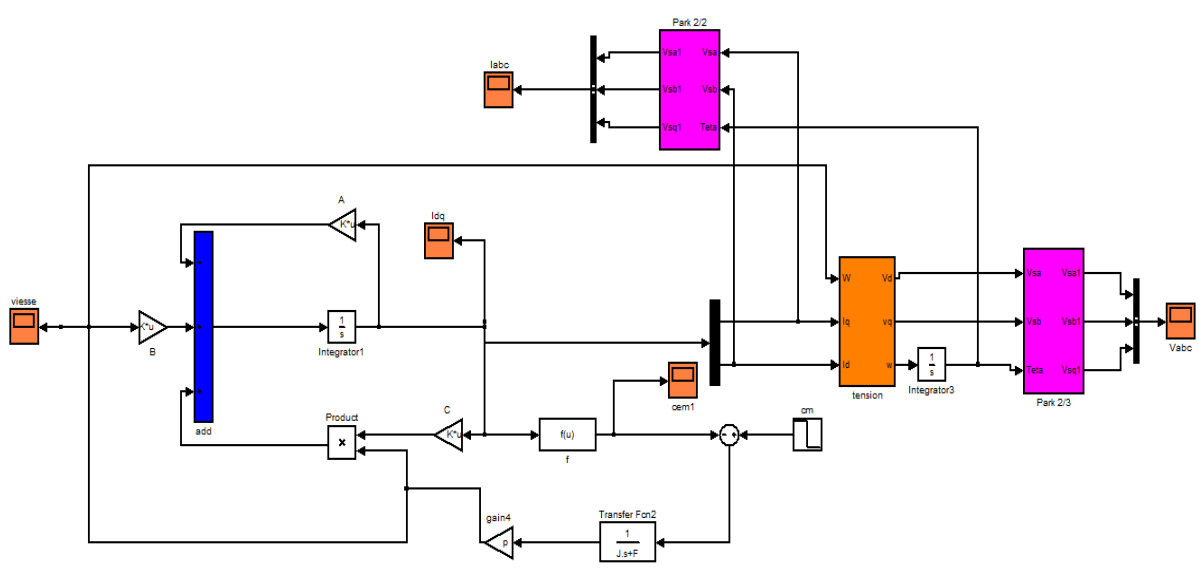
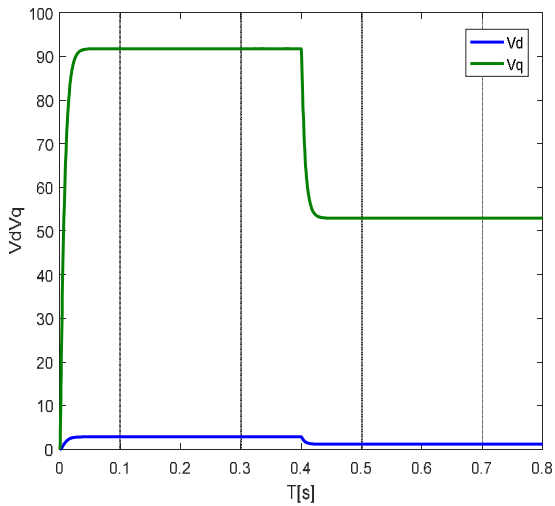


Figure 2.12 : Bloc de simulation de la GSAP en charge.

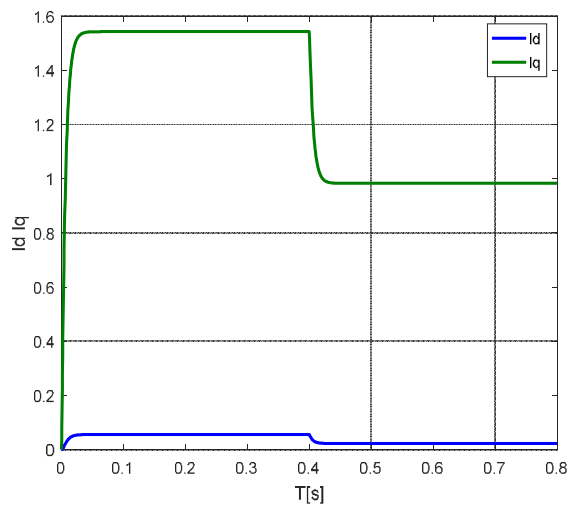
➤ **Résultats de simulation:**

Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents sont appliqués (Figure 2-13-e). On constate sur la figure (2.13.f) que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle de synchronisme, ce qui traduit par des faibles fréquences de tension et courant représentés sur les figures (2.13.d), et (2.13.c). Ce ci est expliqué par le fait que le couple moteur

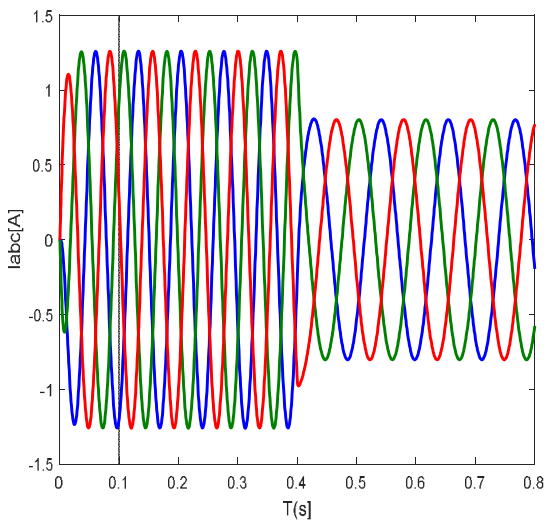
appliqué est insuffisant. En diminuant le couple moteur de 6.28 (Nm), à 4.2 (Nm), la vitesse mécanique varie de 277(tr/mn) jusqu'à 185(tr/mn). La tension et le courant diminuent respectivement de 77.17 (V), à 51.6 (V), et de 1.54 (A), à 1.03 (A). Il est clair donc, que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.



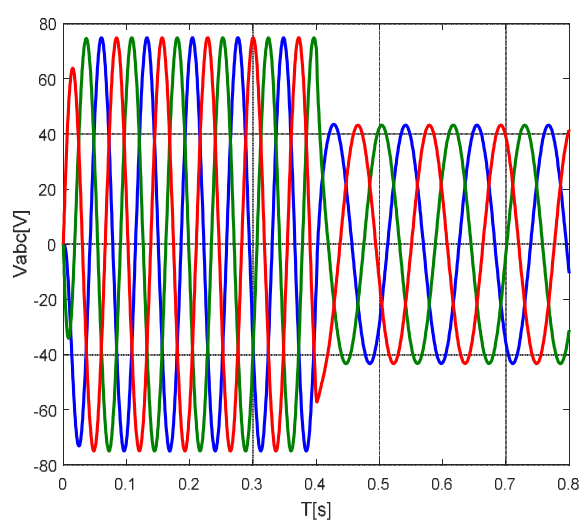
a: Composantes $I_d I_q$



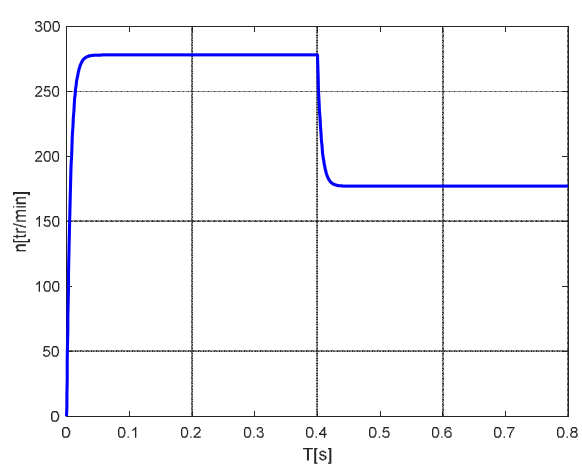
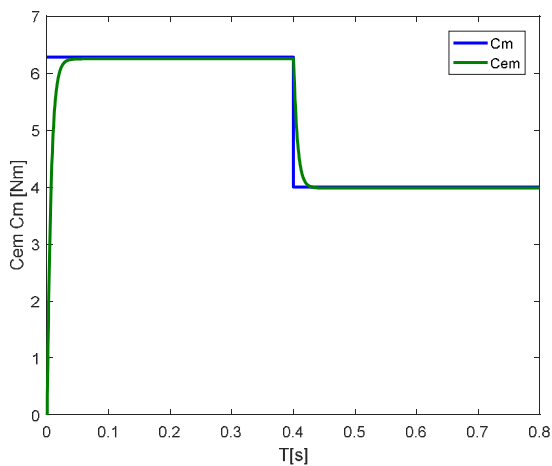
b: Composantes $V_d V_q$



c: courant statorique



d: Tension statorique



e: Couples électromagnétique et moteur

f: vitesse de rotation

Figure 2.13 : GSAP sur une charge séparée.

2.5.6. Modélisation du redresseur

Le redresseur est un convertisseur «alternat if/continu ».Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternative, il est représenté par la figure (2.14).

Ce redresseur comporte trois diodes (D_1, D_2, D_3) à cathode commune assurant l'aller du courant I_d et trois diodes (D_4, D_5, D_6) à anode commune assurant le retour du courant I_d .Le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension :

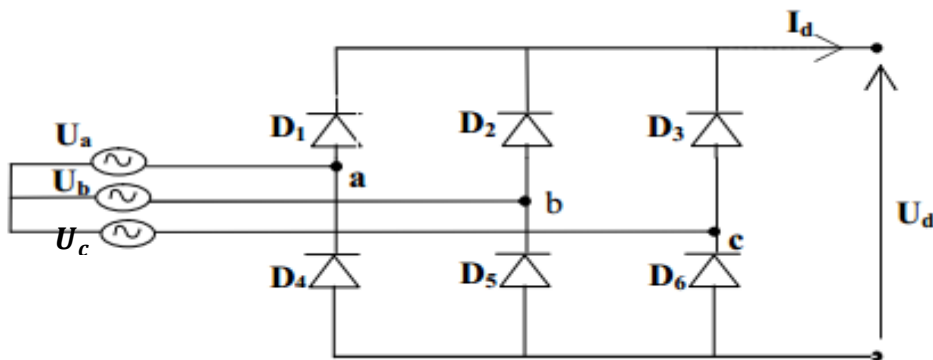


Figure 2.14 : Représentation du redresseur triphasé.

$$\begin{cases} U_a(t) = V_m \sin(2\pi ft) \\ U_b(t) = V_m \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) \\ U_c(t) = V_m \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.34)$$

Et si on néglige l'effet d'empiétement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme suit :

$$U_{red}(t) = \text{Max}[U_a(t), U_b(t), U_c(t)] - \text{Min}[U_a(t), U_b(t), U_c(t)] \quad (2.35)$$

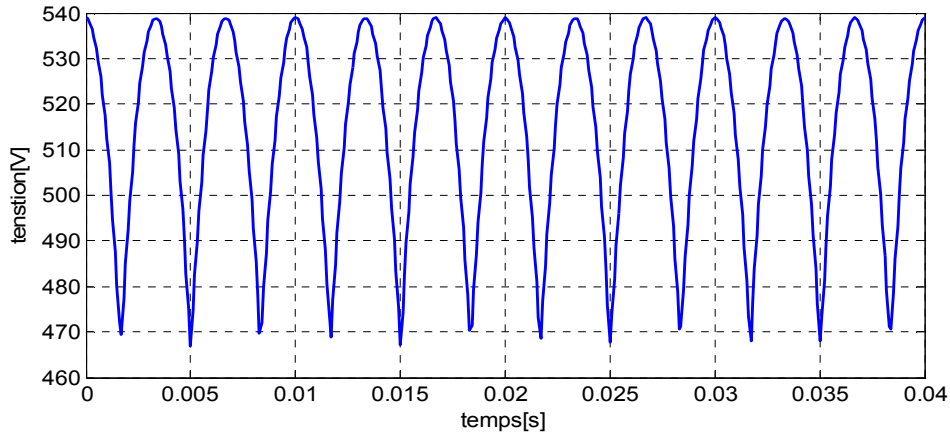


Figure 3.15 : La tension du redresseur.

2.5.7. Modélisation du filtre

On utilise un filtre passe-bas « LC », pour éliminer les hautes fréquences. Ce filtre est schématisé par la figure (2.16).

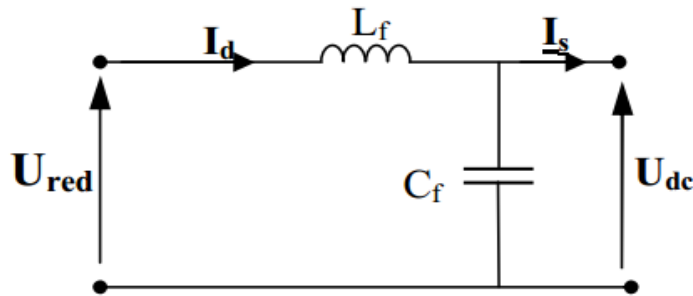


Figure 2.16 : Représentation d'un filtre passe bas [14].

Le modèle du filtre est défini par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} U_{re}(t) = L_f \frac{dI_d(t)}{dt} + U_{dc} \\ \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C_f} [I_d(t) - I_s(t)] \end{cases} \quad (2.36)$$

La fonction du transfert du filtre est donnée par :

$$\frac{U_{dc}(s)}{U_{rd}(s)} = \frac{1}{1+(\sqrt{L_f C_f} s)^2} \quad (2.37)$$

C'est un filtre de deuxième ordre avec une fréquence de coupure égale à :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}}$$

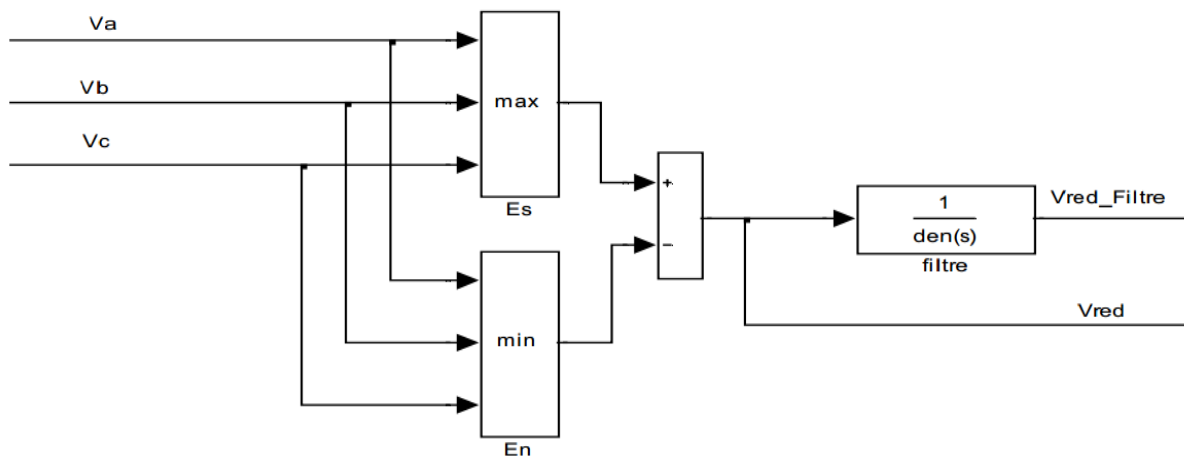


Figure 2.17 : Schéma bloc du redresseur et du filtre [15].

2. 6.Conclusion

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation de la turbine éolienne. Ensuite la modélisation de la machine synchrone dans sa structure générale, avant d'arriver à un modèle définitif de la génératrice synchrone à aimants permanents utilisée au cours de ce travail. Ce modèle a été validé par les résultats de simulation aboutis pour une génératrice à vide, avec une charge. Pour améliorer le rendement d'éolien nous avons présenté dans le prochain chapitre l'étude de la commande MPPT.

CHAPITRE 3

Commande MPPT d'un aérogénérateur

3. 1. Introduction

Après avoir présenté le principe de la conversion de l'énergie éolienne et modélisé les parties essentielles qui sont la turbine, génératrice, et le convertisseur statique, nous attachons dans ce chapitre à présenter le dispositif de commande du système de conversion éolien, à base de la GSAP représenté sur la figure (3.1).

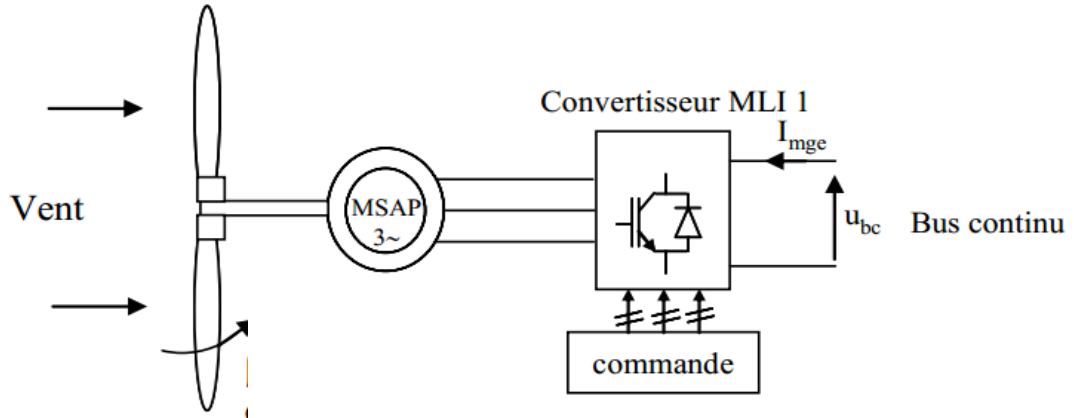


Figure 3.1 : Stucateur de grateur éolien [17].

3. 2. Commande du générateur éolien

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d - \omega_r L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q + \omega_r (L_d I_d + \Psi_f) \end{cases} \quad (3.1)$$

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

avec : $\omega = p\Omega$

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) I_d I_q + I_q \Psi_f] \quad (3.3)$$

Le modèle décrit par les équations précédentes génératrice que la GSAP est un système multi-variable, non linéaire et fortement couplé. Le but principal de la commande vectorielle des machines à courants alternatifs est d'améliorer leurs comportements statiques et dynamiques grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu.

3. 2. 1. Découplage par compensation

L'alimentation en tension est obtenue en imposant les tensions de référence à l'entrée de la commande de l'onduleur. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques sur les bras de l'onduleur de manière à ce que les tensions délivrées par cet onduleur aux bornes du stator de la machine soient les plus proches possible des tensions de référence. Mais, il faut définir des termes de compensation, car, dans les équations statoriques, il y a des termes de couplage entre les axes d et q [17].

Les tensions suivant les axes (d, q) peuvent être écrites sous les formes suivantes :

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d - \omega_r L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q + \omega_r (L_d I_d + \Psi_f) \\ \omega = p\Omega \end{cases} \quad (3.4)$$

La figure (3.2) représente le couplage entre l'axe «d» et «q»

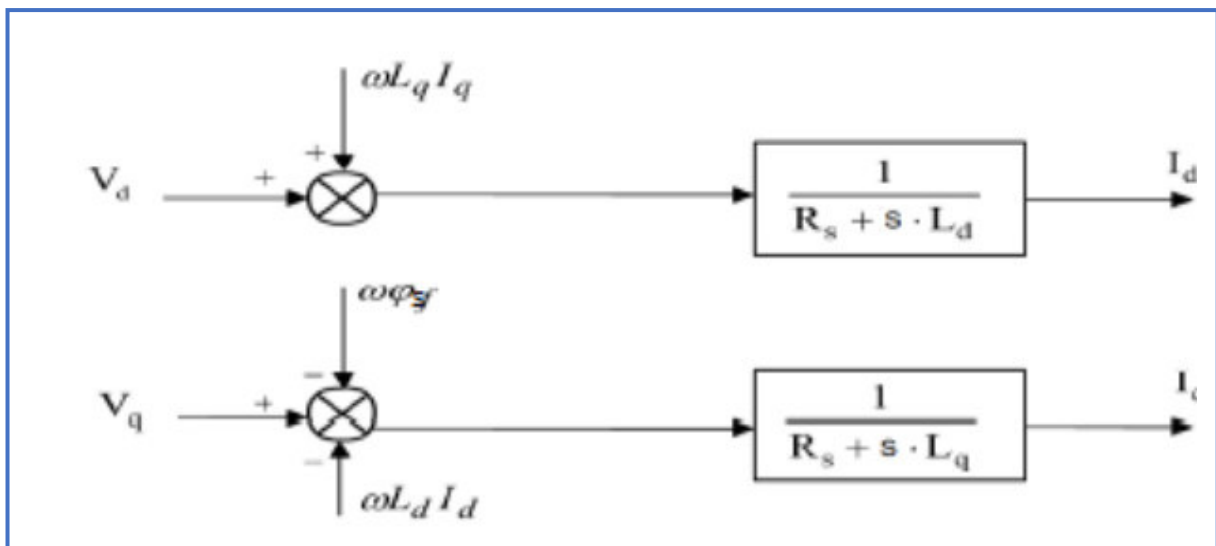


Figure 3.2 : Description du couplage.

Les tensions V_d et V_q dépendent à la fois des courants sur les axes «d» et «q», on est donc amené à implanter un découplage. Ce découplage est basé sur l'introduction des termes compensatoires e_d et e_q .

avec :

$$\begin{cases} e_d = \omega L_q I_q \\ e_q = \omega (L_d I_d + \Psi_f) \end{cases} \quad (3.5)$$

A partir de l'équation (3.5) et (3.6) on a :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_d \\ V_q = V_{q1} + e_q \end{cases} \quad (3.6)$$

avec :

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + sL_d)I_d \\ V_{q1} = (R_s + sL_q)I_q \end{cases} \quad (3.7)$$

On a donc les courants « I_d » et « I_q » sont découplés. Le courant I_d ne dépend que de V_{d1} , et I_q ne dépend que V_{q1} . A partir de l'équation (3.7), les courants I_d et I_q s'écrivent de la façon suivante :

$$\begin{cases} I_d = \frac{V_{d1}}{R_s + sL_d} \\ I_q = \frac{V_{q1}}{R_s + sL_q} \end{cases} \quad (3.8)$$

s : Opérateur de Laplace.

Le principe de régulation consiste à réguler les courants statoriques à partir des grandeurs de référence (désirées) par les régulateurs classiques. Le schéma de principe de régulation des courants statoriques est représenté par la figure ci-dessous : [18]

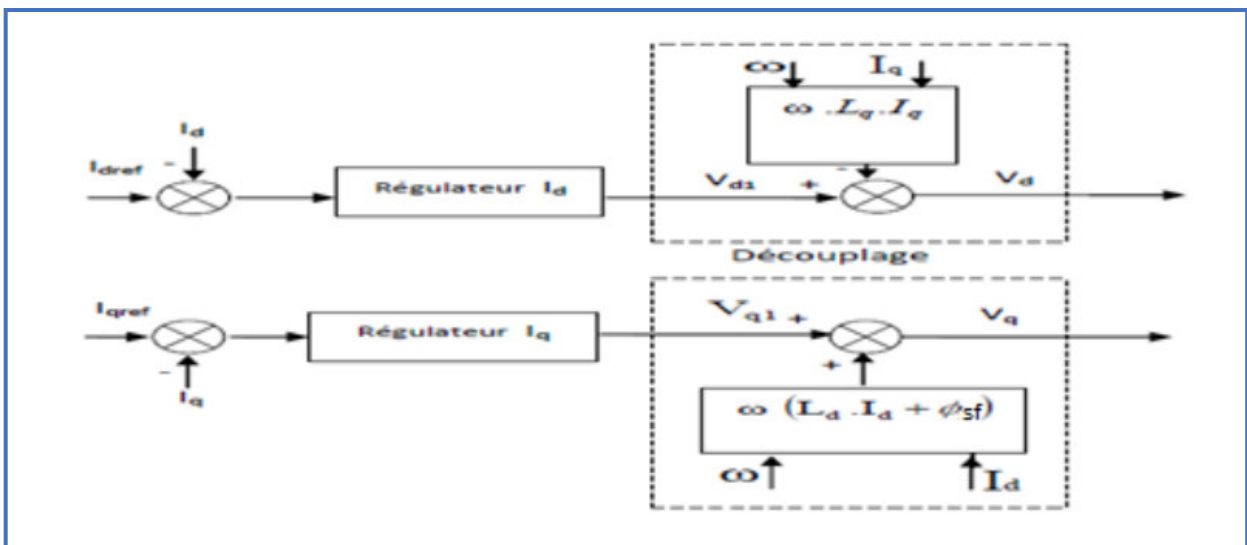


Figure 3.3 : Principe de découplage par compensation.

3.2.2. Description du système global

La référence du courant direct I_{dref} est fixée, et la sortie du régulateur de vitesse

I_{qref} constitue la consigne de couple C_{em} . Les références des courants I_{dref} et I_{qref} sont comparées séparément avec les courants réels de la machine I_d et I_q

Les erreurs sont appliquées à l'entrée des régulateurs classiques de type PI. Un bloc de

découplage génère les tensions de références V_d et V_q . Le système est muni d'une boucle de régulation de vitesse, qui permet de générer la référence de courant I_{qref} . Par contre, le courant I_{dref} est imposé nul. Chaque axe découplé peut être représenté par un bloc de correction $C_i(s)$ avec ($i = d, q$). La figure (3.4) représente le schéma global de la commande vectorielle d'une machine synchrone à aimants permanents avec compensation dans le repère (d, q) :

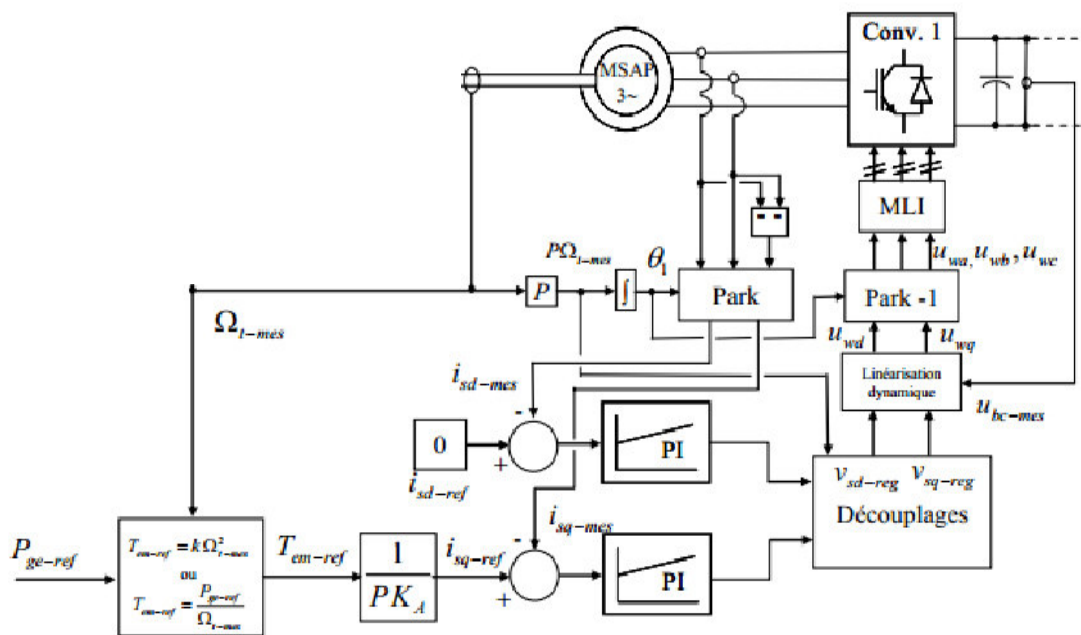


Figure 3. 4: schéma block de la commande générateur éolien.

3. 3. Régulation des courants

Pour calculer les paramètres des régulateurs, on adopte des modèles linéaires continus. Les méthodes classiques de l'automatique sont utilisables. Ces méthodes ont l'avantage d'être simples et faciles à mettre en œuvre. Les éléments fondamentaux pour la réalisation des régulateurs sont les actions P.I.D (proportionnelle, intégrale, dérivée). Les algorithmes, même les plus performants, sont toujours une combinaison de ces actions. Nous considérons que la machine est orientée vectoriellement et complètement découplée. Ceci nous permet d'écrire les équations de la machine d'une manière simple et de calculer les coefficients des régulateurs. Nous nous contentons de régulateurs classiques de type PI dans une structure par boucle imbriquée. Dans ce cas, nous pouvons distinguer deux modes :

- Le mode électrique (mode rapide : boucle interne).
- Le mode mécanique (mode lent : boucle externe).

Pour chacune des boucles de courant, nous proposons de commander la machine par des régulateurs classiques Proportionnel Intégrateur (PI) pour compenser la perturbation du couple résistant au niveau de la réponse de la vitesse de rotation, c'est-à-dire ; ils comportent une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et la grandeur de consigne [19] [20]. Le régulateur (PI) (action proportionnelle-intégrale) est une combinaison d'un régulateur P et d'un régulateur I. Le régulateur (PI) est la mise en parallèle des actions proportionnelle et intégrale comme montre la figure (3.5). La relation entre la sortie $U_r(t)$ et le signal d'erreur $\epsilon(t)$ est donné par la relation suivante :

$$U_r(t) = K_p \epsilon(t) + K_i \int_0^t \epsilon(t) dt \quad (3.9)$$

avec :

K_p : Gain proportionnel

K_i : Gain intégral

Le régulateur (PI) est donné par la figure suivante :

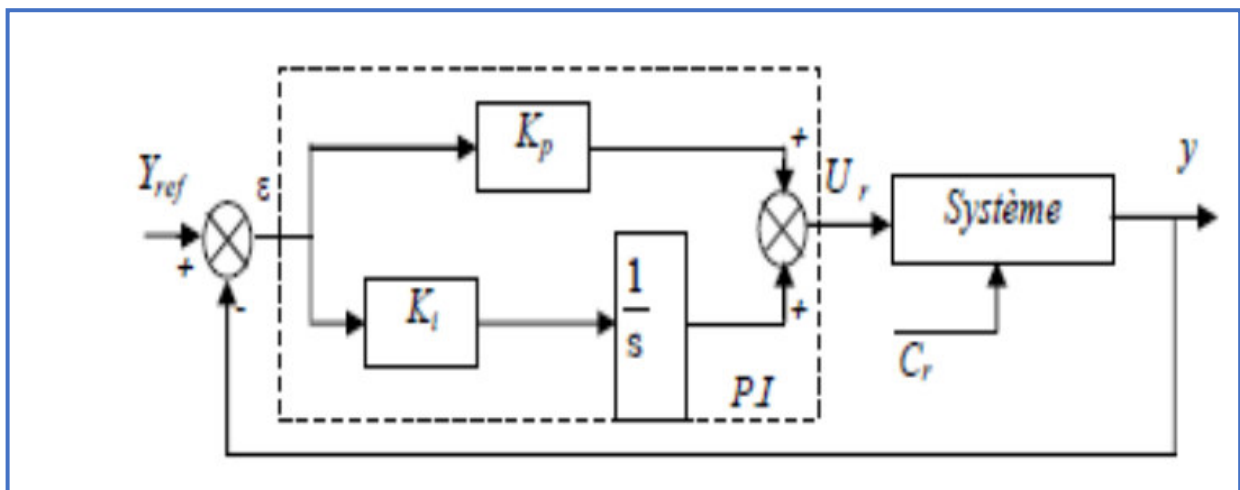


Figure 3. 5: Régulateur PI.

La fonction de transfert sera :

$$\frac{U_r}{\epsilon} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3.10)$$

On peut aussi écrire le régulateur sous la forme suivante :

$$P.I \quad \frac{U_r}{\epsilon} = \frac{1+sT_1}{sT_2} \quad (3.11)$$

$$K_p = \frac{T_1}{T_2} \quad (3.12)$$

$$K_i = \frac{1}{T_2} \quad (3.13)$$

3. 3. 1. Dimensionnement des régulateurs

La machine étant découplée selon deux axes (d,q), la régulation sur l'axe "d" est faite par une seule boucle, tandis que la régulation sur l'axe "q" est faite par deux boucles en cascades l'une interne pour réguler le courant et l'autre externe pour réguler la vitesse.

1. Régulateur du courant Iq

La commande de la MSAP s'effectue en contrôlant les courants Id et Iq. Le système est composé d'une boucle de régulation de vitesse, qui impose la référence Iqref, le courant Id est maintenu nul, la commande est effectuée par les régulateurs (PI) pour avoir l'erreur statique nulle ($\epsilon = 0$).

Sachant que :

$$I_q = \frac{V_{q1}}{R_s + sL_q} \quad (3.14)$$

Et que la forme générale du régulateur (PI) est $\frac{1+sT_1}{sT_2}$ (équation (3.11)), on aboutit au schéma de la figure (3.6) :

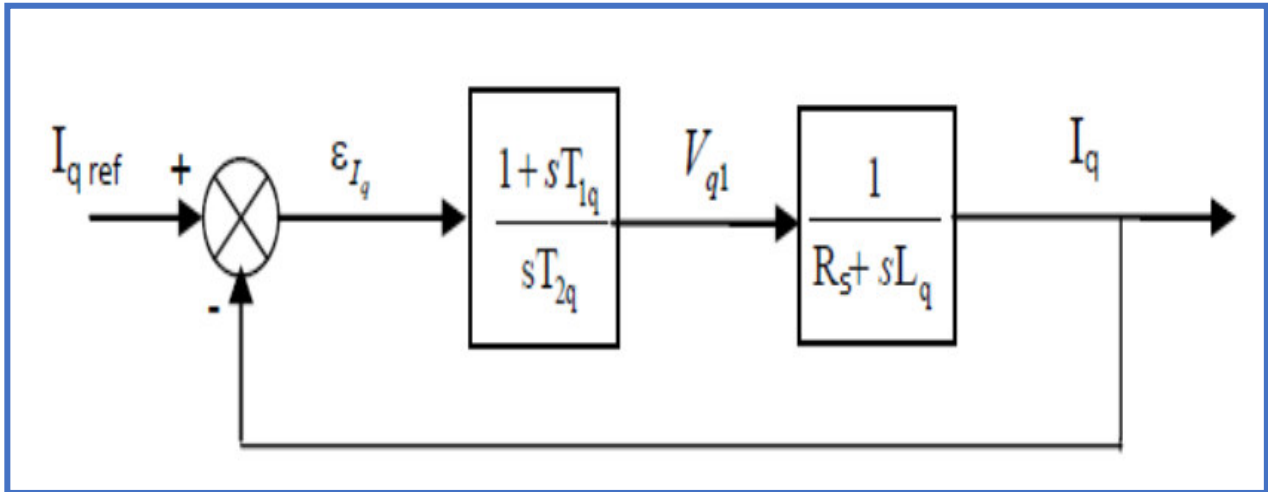


Figure 3. 6: Boucle de régulation du courant I_q .

La fonction de Transfert en boucle ouverte (FTBO) de la figure (3.8) est :

$$FTBO = \frac{1 + sT_{1q}}{sT_{2q}(R_s + sL_q)} \quad (3.15)$$

Par l'utilisation de la méthode de compensation des pôles, on aura :

$$1 + sT_{1q} =: 1 + s \frac{L_q}{R_s} \quad (3.16)$$

ce qui se traduit par la condition :

$$\frac{L_q}{R_s}: \text{ Constante de temps électrique.}$$

Si on remplace la constante par sa valeur, équation (3.15) dans l'équation (3.14), on trouve :

$$FTBO = \frac{1 + sT_{1q}}{sR_s + sT_{2q}} \quad (3.17)$$

Pour la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) :

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO} \quad (3.18)$$

$$FTBF = \frac{1 + sT_{1q}}{1 + sR_sT_{2q}} \quad (3.19)$$

Par identification on trouve :

$$\tau_q = R_s T_{2q} \quad (3.20)$$

Avec le temps de réponse choisi :

$$T_r = 3\tau_q \quad (3.21)$$

$$T_{2q} = \frac{T_r}{3R_s} \quad (3.22)$$

avec :

$\tau_q = \frac{L_q}{R_s}$: Constante de temps électrique de l'axe q de la machine.

On remplace l'équation (3.21) dans (3.14), on obtient :

$$K_i = \frac{\tau_q}{R_s} \quad (3.23)$$

Si on remplace l'équation (3.23) dans (3.24) et on obtient finalement :

$$K_{pd} = \frac{3L_q}{T_r} \quad (3.24)$$

$$K_{id} = \frac{3R_s}{T_r} \quad (3.25)$$

$$T_r = \frac{L_q}{R_s} \quad (3.26)$$

2. Régulateur du courant Id

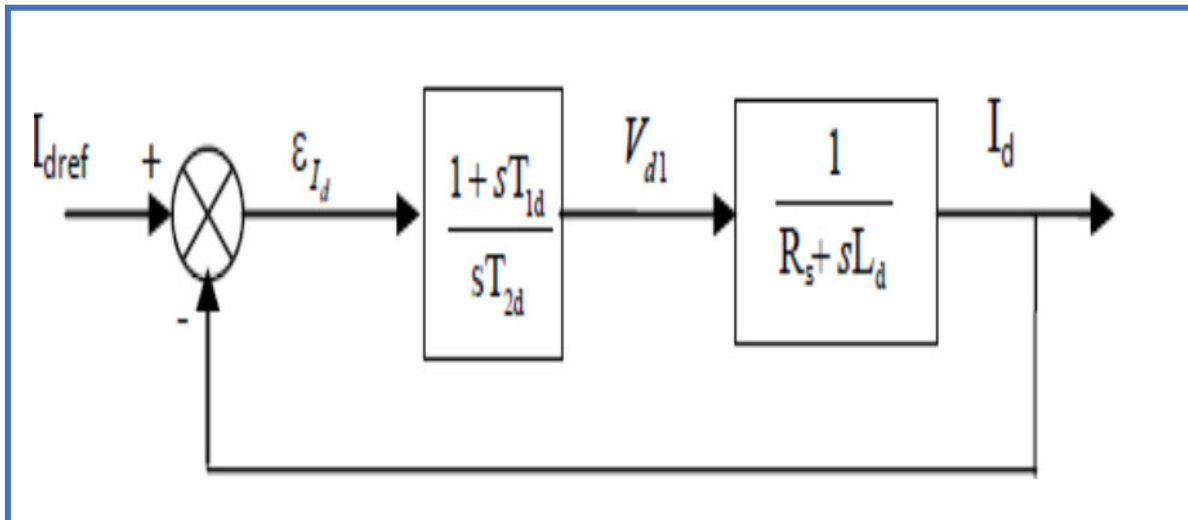


Figure 3. 7: Boucle de régulation du courant Id.

Pour la régulation du courant Id, on suit la même procédure utilisée pour la régulation du courant Iq.

$$K_{pd} = \frac{3L_q}{T_r} \quad (3.27)$$

$$K_{id} = \frac{3R_s}{T_r} \quad (3.28)$$

$$T_r = \frac{L_q}{R_s} \quad (3.29)$$

3. Régulation de vitesse

➤ Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique totale appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence.

$$C_{em-ref} = K_{ass}(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (3.30)$$

K_{ass} : Régulateur de vitesse.

Ω_{ref} : Vitesse de référence.

La vitesse de rotation de la turbine est égale à :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\lambda V}{R} \quad (3.31)$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la vitesse spécifique λ_{opt} et le coefficient de puissance maximale peut se déduire de (3.32) :

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \quad (3.32)$$

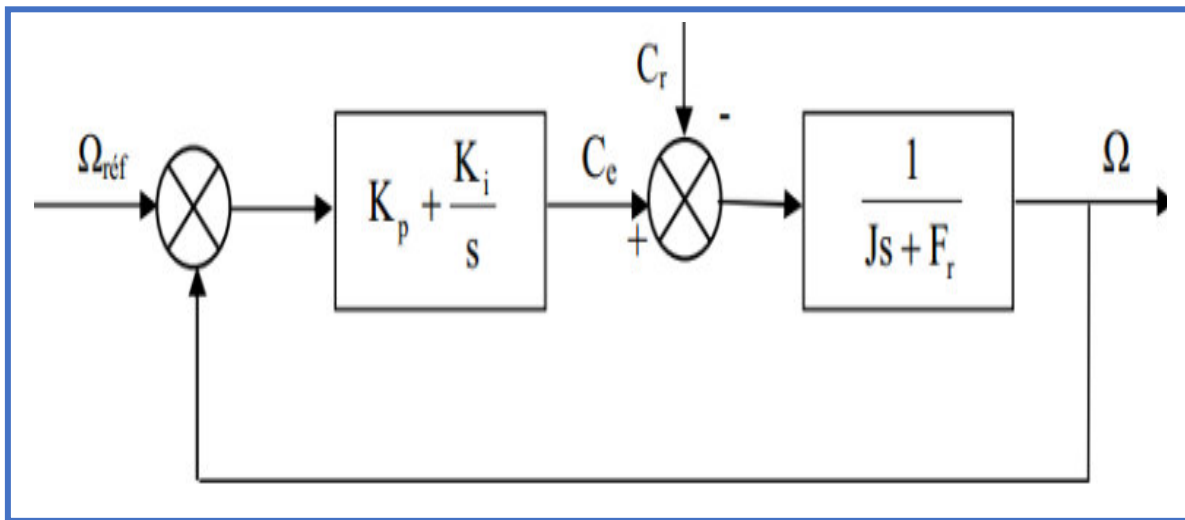


Figure 3. 8: Schéma fonctionnel de régulation de la vitesse.

On propose un correcteur PI, sa fonction de transfert est donnée par:

$$\left(Kp + \frac{Ki}{p}\right) = \frac{Kp}{p} \left(p + \frac{Ki}{Kp}\right) \quad (3.33)$$

On suppose que la perturbation est nulle:

$$C_{mec} = 0 \quad (3.34)$$

La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO_{\Omega} = \frac{Kp}{p} \left(p + \frac{Ki}{Kp} \right) \left(\frac{1}{Jp + ft} \right) \quad (3.35)$$

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

$$FTBO_{\Omega} = \frac{C_{mec}(p)}{\Omega_{ref}(p)} = \frac{Kp(p + \frac{Ki}{Kp})}{J_T p^2 (f_t + Kp)p + Ki} \quad (3.36)$$

La $FTBO_{\Omega}$ possède une dynamique de 2^{eme} ordre, par identification à la forme canonique du 2^{eme} ordre l'équation caractéristique peut être représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0} \right) p + 1 \quad (3.37)$$

Alors :

$$\frac{J_T}{Ki} = \frac{1}{\omega_0^2} \quad (3.38)$$

$$\frac{f + Kp}{Ki} = \frac{2\xi}{\omega_0} \quad (3.39)$$

Alors :

$$Ki = J_T \cdot \omega_0^2 \quad (3.40)$$

$$Kp = \frac{2\xi Ki}{\omega_0} - f_T \quad (3.41)$$

ξ : Coefficient d'amortissement.

Pour obtenir la réponse optimale on choisit le coefficient d'amortissement $\xi = 0.7$

Le temps de réponse à 5% est donné par

$$t_r = \frac{3}{\xi \omega_0} \quad (3.42)$$

On prend le temps de réponse $\frac{1}{2}$ de τ_m pour assurer la rapidité du correcteur avec :

$$\tau_m = \frac{J_T}{f_T} \quad (3.43)$$

τ_m : Constante de temps du système à régler.

Alors :

$$\omega_0 = \frac{3}{\xi \left(\frac{\tau_m}{2} \right)} \quad (3.44)$$

Enfin on peut déduire les valeurs de K_i et K_p .

3. 4. Résultats de simulation

On représente sur les figures suivantes les résultats de simulation suivants :

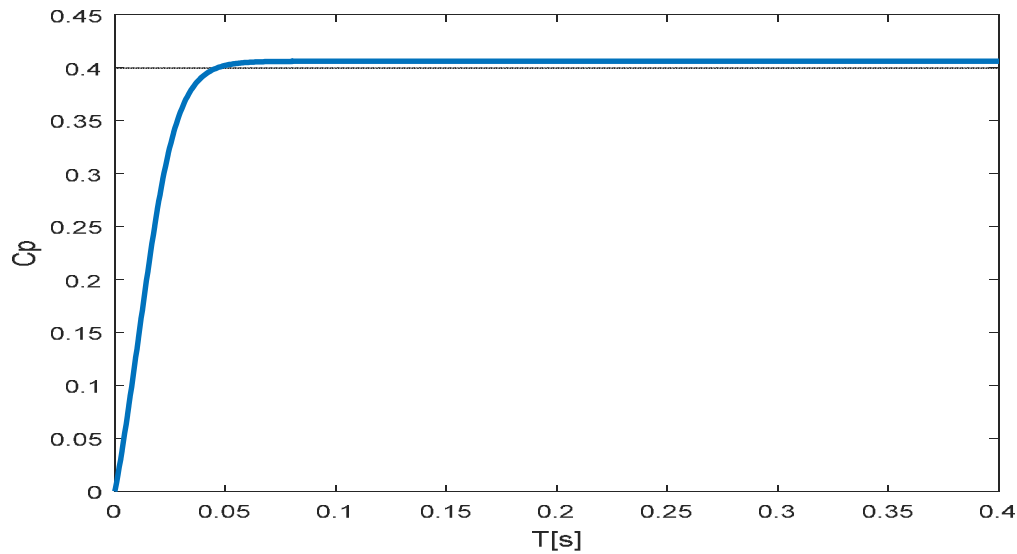


Figure 3. 9 : Coefficient C_p .

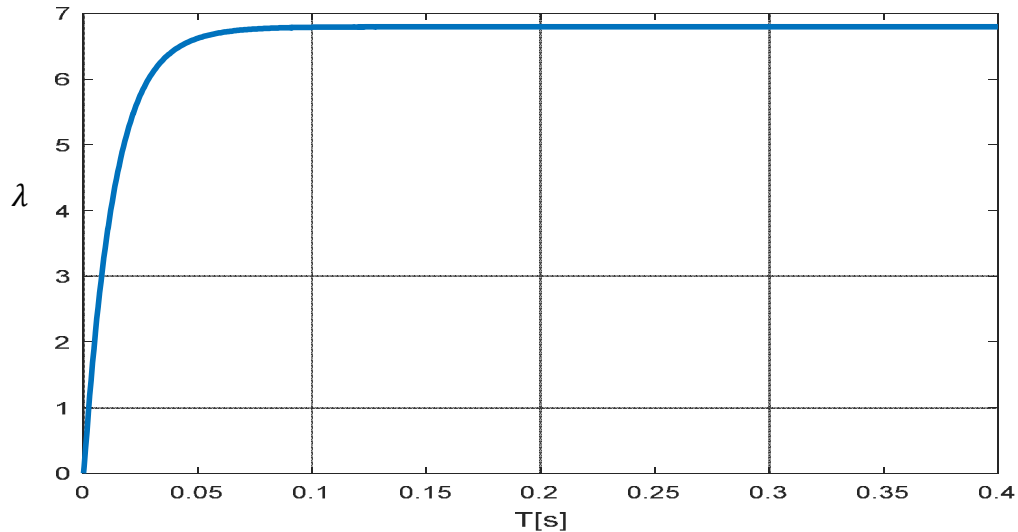


Figure 3. 10 : Vitesse de spécifique.

D'après Les figures (3.4, 3.5) on constate que La commande par asservissement de la vitesse a permis de maintenir la valeur du coefficient de puissance à sa valeur maximale qui est de 0.406 et la vitesse spécifique à sa valeur optimale $\lambda=6.8$.

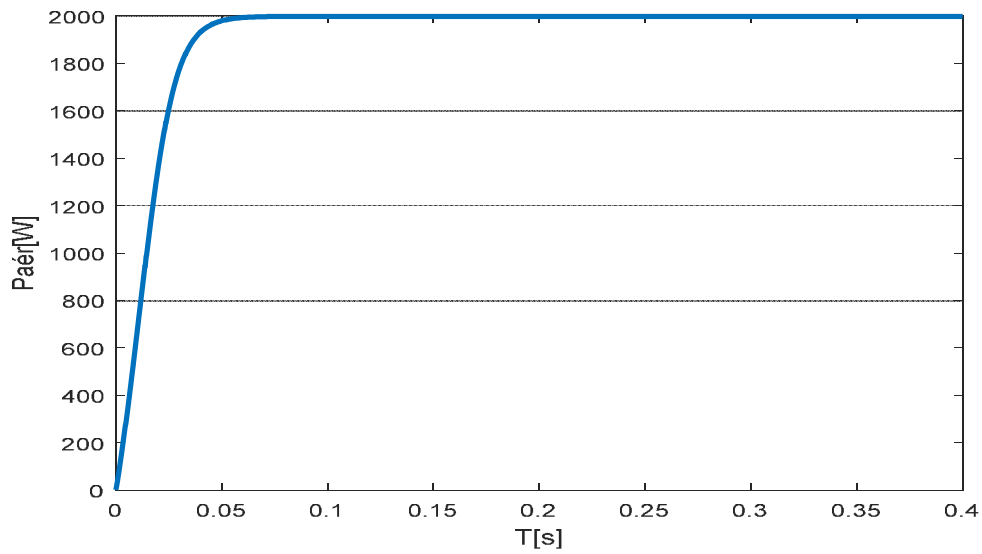


Figure 3. 11 : Puissance aérodynamique

La figure 3.11 : représente l'allure de la puissance aérodynamique. Puisque le coefficient C_p est maintenu à sa valeur maximale alors on peut extraire le maximum de la puissance aérodynamique

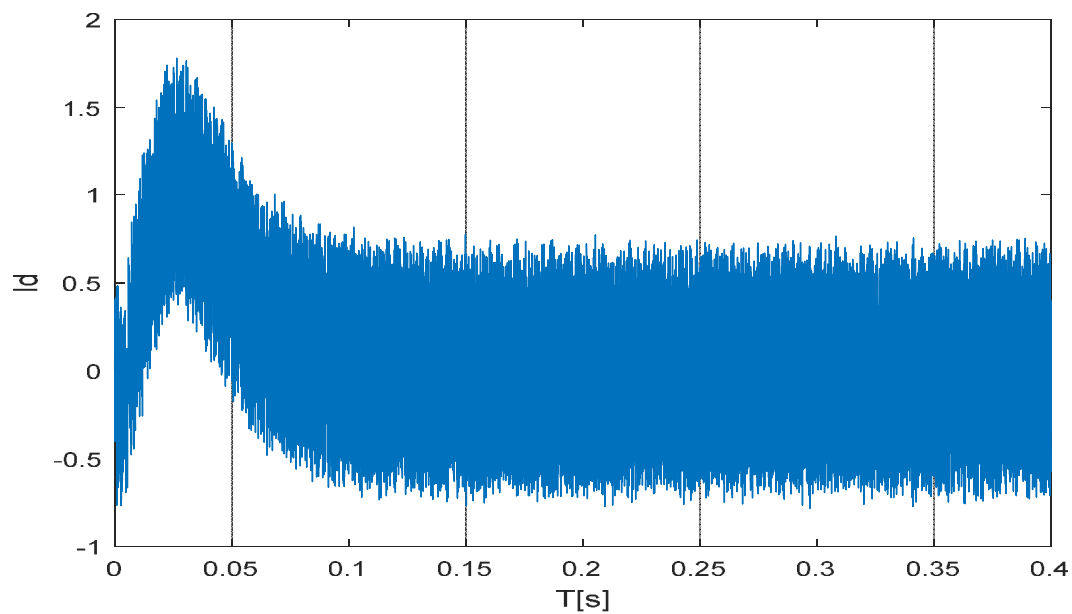


Figure 3. 12: Courant I_d

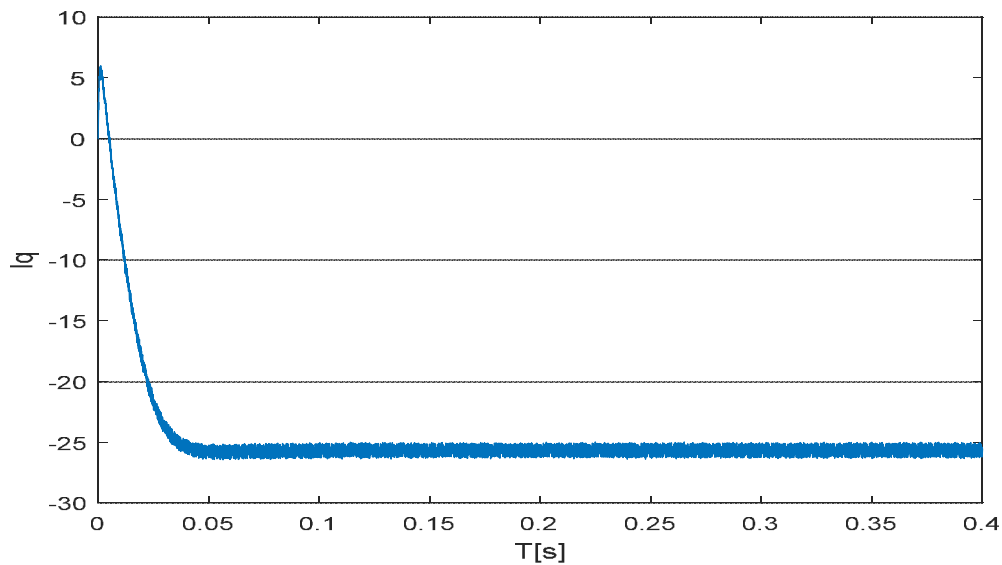


Figure 3.13: Courant I_q

Les figures (3.10,11) : La réponse des deux composantes du courant montre bien le découplage introduit par la commande vectorielle de la GSAP (le courant $I_d = 0$), le courant I_q est l'image du couple.

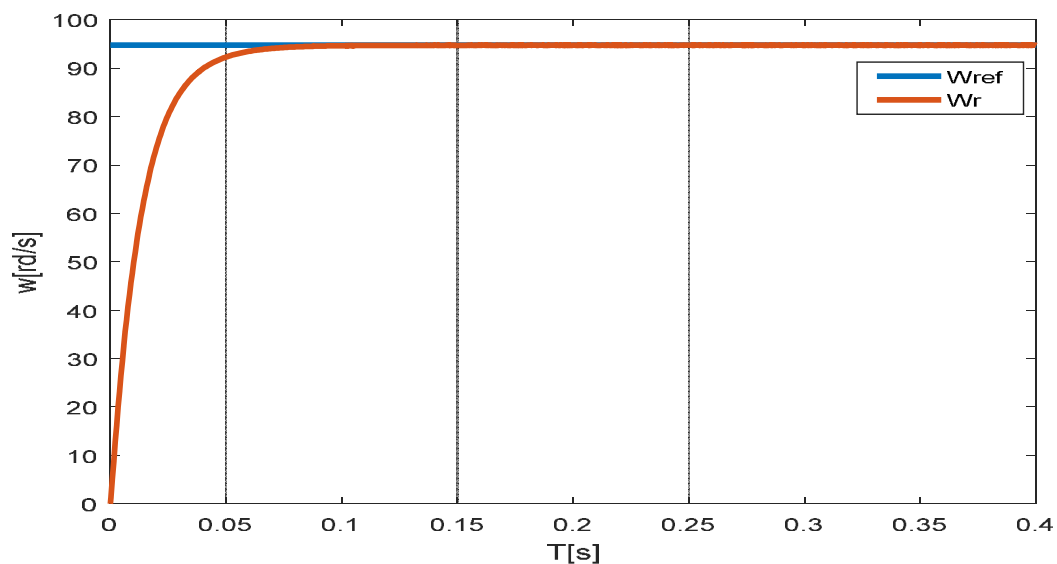


Figure 3.14: Vitesse de la turbine

La figure 3.6 : représente l'allure de la vitesse de la turbine on constat qu'elle tend à suivre sa référence.

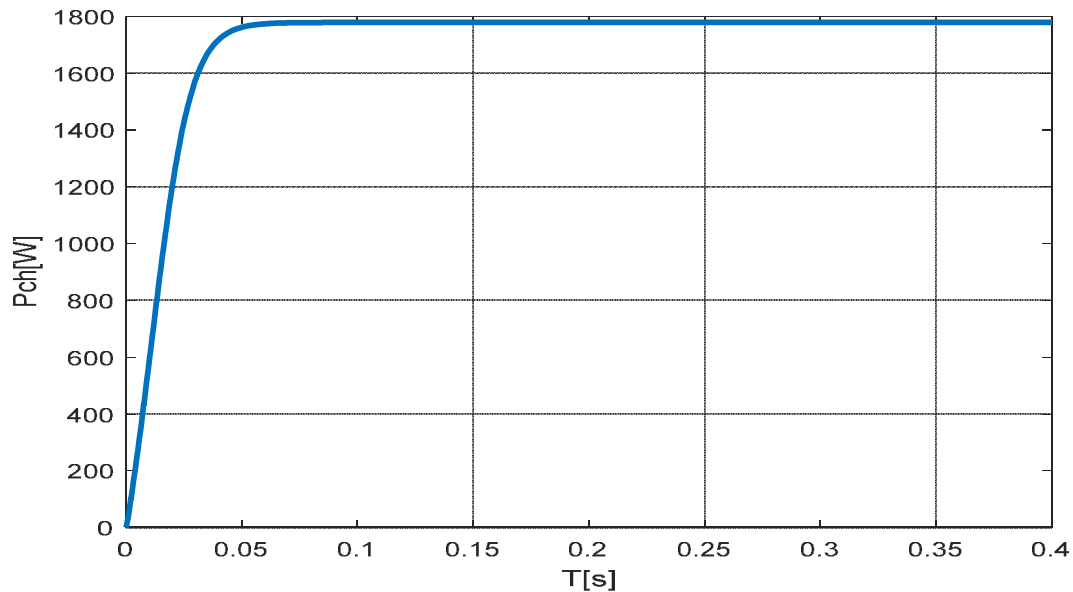


Figure 3. 15 : Puissance de la charge.

La figure (3.14) : Représentent l'évolution dans le temps de allure de puissance de charge, on constate que leur valeur en régime permanent sont constants.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les résultats de simulation de la commande du système de conversion éolienne basé sur la machine synchrone a aimant permanent (GSAP) pour la régulation de la de la vitesse avec la commande MPPT de la turbine pour extraire le maximum de la puissance générée par le générateur

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

A partir de ressource renouvelables, l'énergie éolienne est très importante et peut contribuer de manière significative à la fourniture d'électricité au niveau mondial. On peut dire aussi que la chaîne éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées car elle ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Le présent travail nous a permis de faire une étude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à la base d'une génératrice synchrone à aimant permanent avec la commande MPPT.

Dans le premier chapitre, une brève description sur le système éolien a été présentée.

Nous avons développé dans le deuxième chapitre le modèle de la chaîne de conversion éolienne (le modèle de la turbine éolienne, le modèle de la génératrice synchrone à aimant permanent et le modèle du redresseur). Chaque partie a été validée par des résultats de simulations.

Dans le troisième chapitre on a utilisé la commande MPPT avec asservissement de vitesse munie d'un commande vectorielle vent permettant d'optimiser l'extraction maximale de l'énergie du vent de sorte à ce que le coefficient de puissance. Quelques résultats de simulation ont été ensuite donnés.

En perspective, ce modeste travail peut être poursuivi et complété ceci, par l'étude des points suivants :

- ❖ Nous pouvons, par exemple, envisager une réalisation pratique puis une implantation en site isolé du système éolienne proposé.
- ❖ Etude des autres techniques MPPT utilisant l'intelligence artificielle.
- ❖ Réduire les hypothèses simplificatrices de la turbine, et la GSAP.

Bibliographie

- [1] **CHERIF**, Bennour. Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation. 2012. Thèse de doctorat. Université de Biskra-Mohamed Khider
- [2] **M. KASDI** Rafik M. **HANTAT** Brahim (Commande d'une génératrice asynchrone intégrée dans un système éolien connectée au réseau) 2011/2012 Mémoire de master
- [3] **LATRECHE** Mohammed Tahar (Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien) Mémoire de Magister 24 /06 /2012
- [4] **KASDI**, Rafik, **HANTAT**, Brahim, **AMIMEUR**, (Hocine) Commande d'une génératrice asynchrone intégrée dans un système éolien connectée au réseau). 2012. Thèse de doctorat Université abderrahmane mira béjaia
- [5] **LOPEZ**, Miguel. (Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée). 2008. Thèse de doctorat. Université Paris Sud-Paris.
- [6] **TRAORÉ**, Moussa. Développement d'un simulateur numérique de rotors d'éoliennes: application à une chaîne de conversion éolienne utilisant une machine synchrone à aimants permanents. 2016. Thèse de doctorat. Université du Québec à Rimouski
- [7] **ZIANE**, Khaled. Analyse, Évaluation et Réduction des Risques d'un Parc Éolien. 2017. Thèse de doctorat. Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed.
- [8] **MELLOUL**, A: Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne. Mémoire de magister, Université de Sétif, 2011
- [9] Belabaed Mohammed Benyahia Tariq (Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents) Mémoire master 2015
- [10] **DOUADI**, T. (2011). Etude et commande d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [11] **BOREKBA**, F., & **OMARI**, B. (2017). Modélisation et simulation de la pale d'une petite éolienne appliquée au site d'Adrar (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draia-ADRAR).
- [12] **CHARROUF**, Omar. Optimisation d'un système de dessalement renouvelable. 2012. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [13] **GASSAB SAMIR** «Modélisation d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne» mémoire de magister de l'Université Ferhat Abbas – Sétif, décembre 2011.

Bibliographie

- [14] **ZEIGUEB** Boubaker « commande d'une machine synchrone à aimants permanents sans capteur de vitesse. Utilisation d'un observateur non linéaire » mémoire de magister Université batna 2008.
- [15] **MAZOUZ**, F. (2013). Commande d'un système éolien à base d'un générateur synchrone à aimants permanents (Doctoral dissertation, Université de Batna 2-Mustafa Ben Boulaid).
- [16] **ABDOUNE**, F., & Bouhali, O. (2011). Etude et contrôle des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrones à rotor bobiné (Doctoral dissertation, Université Abderrahmane Mira-Bejaia).
- [18] **M. Merzoug**, "Etude comparative des performances d'un DTC et d'un FOC d'une Machine synchrone à aimants permanents (MSAP) ", Mémoire de Magister, University de Batna, 2007.
- [17] **A. Davigny** "Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie " thèse de docteur, Université des sciences et technologie de lille 2007
- [19] **F. Benchabane**, "Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering", Mémoire de magister, Université mohamed khider de Biskra, 2005.
- [20] **A. Maasoum** "Commande à la commande singulièrement perturbé d'une machine synchrone à aimants permanents (Commande à structure variable CSV) Neuro-Floue", Thèse de doctorat Es-science, Sidi Bel-Abbas, Algérie, 2007.