

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

Modélisation et simulation d'un générateur asynchrone
à turbine éolienne

Devant le jury composé de :

ANNAN Adel Président
CHERIF Hakima Examineur
GUERFI Youcef Encadreur

Présenté par :

- OUBBICHE Mahieddine
- ABIKCHI Mohammed

2017-2018

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

-Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma mère et mon père, qui m'ont beaucoup

-soutenu durant mon cursus d'étude et à qui je serai éternellement reconnaissant-

- A Famille ABIKCHI;

- A Famille OUBBICHE;

-A mon encadreur Monsieur GUERFI Youcef pour son amabilité et sa disponibilité;

-A tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à obtenir mon master en

électromécanique;

- A tous mes amis;

- Enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu.

Remerciement

*Avant tout , nous remercions notre dieu le tout puissant de pour nous donner la force
d'atteindre nous but et d'accomplir nous travail.*

*Avec mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon encadreur GUERFI Youcef
professeur à l'université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued présence et son pragmatisme
exemplaire qui a donné un véritable sens à notre travail.*

*Nous remercions également toutes les mères et les pères et les frères et amis qui ont été
portés au crédit de ce succès et les enseignants à tous les niveaux de l'éducation dans
l'enseignement primaire et moyen, l'enseignement secondaire et l'enseignement supérieur.*

*Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ne mentionnent pas qui prés ou
ont participé à ce jour dans la réalisation de ce travail.*

Sommaire

| | |
|---|------|
| <i>Liste des figures</i> | iv |
| <i>Liste de notations et symboles</i> | viii |
| Introduction générale..... | 1 |

Chapitre I: L'état de l'art

| | |
|--|----|
| I.1. Introduction..... | 3 |
| I.2. Définition de l'énergie éolienne | 3 |
| I.3. Classement d'éolienne selon l'orientation de leur axe de rotation | 3 |
| I.3.1. Eoliennes à axe vertical..... | 3 |
| I.3.2. Eoliennes à axe horizontal | 4 |
| I.4. Constitution d'une éolienne moderne | 5 |
| I.5. La génératrice asynchrone | 6 |
| I.5.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil | 6 |
| I.5.2. Machine asynchrone à double alimentation..... | 7 |
| I.6. Moteurs à combustion interne..... | 8 |
| I.6.1. Le moteur diesel..... | 9 |
| I.6.2. Cycle du moteur | 10 |
| I.6.3. Groupe électrogène diesel | 12 |
| I.7. Généralités sur la machine synchrone | 13 |
| I.7.1. Générateur Synchrone..... | 14 |
| I.7.2. Générateur Synchrone à Rotor Bobiné | 14 |
| I.7.3. Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP) | 14 |
| I.8. Conclusion | 15 |

Chapitre II: Modélisation de la chaîne éolienne (turbine éolienne – générateur asynchrone)

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction..... | 16 |
| II.2. Modélisation du chaîne éolienne | 16 |
| II.2.1. Modélisation du vent | 16 |
| II.2.2. Modélisation de la turbine | 17 |
| II.2.3. Modèle de la Turbine..... | 18 |

| | |
|--|-----------|
| II.2.4. Modèle du multiplicateur..... | 19 |
| II.2.5. Modèle de l'arbre..... | 19 |
| II.3. Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation | 21 |
| II.3.1 Equations électriques | 21 |
| II.3.2. Équations magnétiques | 22 |
| II.3.3. Equation mécanique..... | 23 |
| II.3.4. Modèle de Park | 23 |
| II.3.5. Choix du référentiel | 24 |
| II.3.6. Expression de la puissance et du couple électromagnétique | 26 |
| II.3.7. Couple électromagnétique | 26 |
| II.4. Conclusion | 27 |

Chapitre III: Modélisation d'un générateur diesel (moteur diesel – génératrice synchrone)

| | |
|--|-----------|
| III.1. Introduction | 28 |
| III.2. Modèle du groupe électrogène | 28 |
| III.2.1. Modèle du moteur diesel | 28 |
| III.2.2. Production du couple mécanique..... | 29 |
| III.2.3. Le régulateur de vitesse | 30 |
| III.3. La génératrice synchrone | 33 |
| III.3.1. Equations magnétiques..... | 34 |
| III.3.2. Équations électriques..... | 34 |
| III.3.3. Equations électriques dans le repère de Park (d q)..... | 34 |
| III.3.4. La matrice sous forme d'équation d'état..... | 37 |
| III.4. Conclusion..... | 38 |

Chapitre IV: Simulation et discussion (par MATLAB/SIMILINK)

| | |
|--|----|
| IV.1. Introduction | 39 |
| IV.2. Présentation de l'environnement MATLAB/SIMULINK™ | 39 |
| IV.2.1. Matlab | 39 |
| IV.2.2. simulink..... | 40 |
| IV.3. Avantage de la simulation numérique..... | 40 |
| IV.4. Description | 41 |
| IV.5. Les résultats..... | 43 |

| | |
|----------------------------|----|
| IV.6. discussion | 48 |
| IV.7. Conclusion..... | 49 |
| Conclusion générale | 50 |
| <i>Bibliographie</i> | I |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent [2]. | 3 |
| Figure I.2: Différentes technologies d'éoliennes à axe vertical [1]. | 4 |
| Figure I.3: Différentes technologies d'éoliennes à axe horizontal [1]. | 5 |
| Figure I.4: Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW [3]. | 5 |
| Figure 1.5: Système éolien à base de la machine asynchrone à cage [4]. | 7 |
| Figure 1.6: Machine asynchrone de 4.7 MW, 45tr/mn [5]. | 8 |
| Figure I.7: Les éléments du moteur diesel [1]. | 10 |
| Figure I.8: Composants principaux d'un moteur alternatif à pistons [6]. | 10 |
| Figure I.9: Cycle de fonctionnement d'un moteur diesel à 4 temps [6]. | 11 |
| Figure I.10: Configuration du générateur diesel [7]. | 12 |
| Figure I.11: Différent types des machines synchrones[8]. | 13 |
| Figure II.1: Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie [10]. | 16 |
| Figure II.2: Différent partie de la turbine [10]. | 17 |
| Figure II.3: Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ [10]. | 19 |
| Figure II.4: Modèle de la turbine éolienne [10]. | 20 |
| Figure III.1: Modèle de la partie mécanique du groupe diesel. | 31 |
| Figure III.2: Régulateur de vitesse construit autour d'un régulateur PI. | 32 |
| Figure III.3: Machines synchrones avec différents types d'interaction champ tournant – rotor [14]. | 33 |
| Figure IV.1: Schéma bloc global de système. | 42 |
| Figure IV.2: La tension d'alimentation de la MS. | 43 |
| Figure IV.3: La tension de la charge principal. | 43 |
| Figure IV.4: La tension de la charge secondaire. | 44 |
| Figure IV.5: Le courant de la charge principal. | 44 |
| Figure IV.6: Le courant de la charge secondaire. | 45 |
| Figure IV.7: La puissance de la turbine éolienne. | 45 |
| Figure IV.8: La puissance de la charge principal. | 46 |
| Figure IV.9: La puissance de la charge secondaire. | 46 |
| Figure IV.10: La puissance réactive de générateur synchrone. | 47 |
| Figure IV.11: La vitesse de la MAS. | 47 |
| Figure IV.12: La fréquence. | 48 |

Liste de notations et symboles

| | |
|------------|--|
| GADA | Générateur Asynchrone à Double Alimentation |
| MADA | Machine Asynchrone à Double Alimentation |
| MS | Machine Synchrone |
| GSAP | Générateur Synchrone à Aimants Permanents |
| MSAP | Machine Synchrone à Aimants Permanents |
| MSRV | Machine Synchrone à Réductance Variable |
| RB | Rotor Bobiné |
| MSRB | Machine Synchrone à Rotor Bobiné |
| GD | Groupes Diesel |
| MAS | Machine Asynchrone |
| PID | Proportionnel intégral dérivation |
| CA | Courant Alternatif |
| $V(t)$ | vitesse du vent |
| P_V | puissance mécanique |
| ρ | Masse volumique de l'air |
| P_D | puissance du vent |
| Λ | rapport de vitesse |
| β | l'angle de l'orientation de la pale |
| Ω_T | vitesse linéaire des pales |
| C_T | couple mécanique à la sortie de la turbine |
| C_{mec} | Couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine à celle du générateur |
| C_T | Le couple mécanique à la sortie de la turbine |
| G | Gain ou Rapport de multiplication |
| Ω_g | Vitesse du générateur (rad/s mécanique) |
| J_T | l'inertie totale |
| J_{tur} | l'inertie de la turbine |
| C_{vis} | couple des frottements visqueux |
| C_g | couple issu du multiplicateur |
| f_T | coefficient de frottements visqueux |
| V_s | tension statorique |
| V_r | tension rotorique |
| I_s | courant statorique |

| | |
|--------------------------|---|
| I_r | courant rotorique |
| U_s | tension statorique de la machine synchrone |
| U_f | tension rotorique de la machine synchrone |
| R_s | résistance statorique |
| R_r | résistance rotorique |
| Φ_s | flux statorique |
| Φ_r | flux rotorique |
| L_s | L'inductance propre d'une phase statorique |
| L_r | L'inductance propre d'une phase rotorique |
| M_s | L'inductance mutuelle entre phases statoriques |
| M_r | L'inductance mutuelle entre phases rotoriques |
| C_{em} | Couple électromagnétique |
| p_{ci} | Désigne le pouvoir calorifique inférieur du carburant |
| n_i | Le rendement indiqué du moteur |
| m_f | Le débit de carburant injecté dans la chambre de combustion |
| p_{mf} | La pression moyenne des pertes par frottement |
| p | nombre de paires de pôles. |
| C_y | La cylindrée totale du moteur |
| C_r | Le couple résistant dû à la charge appliquée |
| K_{DI}, K_{DP}, K_{Dr} | paramètre de régulateur |
| T_{Dm} | couple mécanique écrit dans le plan de Laplace |
| T_{De} | la réaction électromagnétique |
| ω_{Dm}^{ref} | La vitesse de référence |
| ω_{Dm} | la vitesse de rotation |
| ω_N | La vitesse de rotation de la turbine |
| d, q | les axes dans le repère de Park |
| abc | les axes dans le repère naturel |
| Ψ_s | flux statorique de MS |
| Ψ_f | flux rotorique de MS |
| θ_s | position des grandeurs statoriques |
| θ_r | position du rotor |
| ω_s | pulsation statorique |
| ω_r | vitesse électrique de rotation |

Introduction générale

Les énergies renouvelables (eau, vent, soleil...) sont aujourd'hui de plus en plus utilisées dans la production de l'électricité. Ces énergies propres et gratuites représentent une bonne alternative aux ressources fossiles. Parmi les sources renouvelables dénombrées, on compte l'énergie éolienne qui connaît, depuis quelques décennies, un formidable développement.

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale. Il y a Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (à axe vertical ou axe horizontal).

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

Le but de ce mémoire est d'apporter une modélisation et simulation d'un générateur asynchrone à turbines éoliennes ; pour ce faire notre choix s'est porté sur une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice asynchrone.

Pour ne pas trop alourdir que l'objectif de notre travail est d'étudier un système composé de deux types de source, celle d'un groupe électrogène et l'autre d'une turbine éolienne, les deux types des sources sont alimenté deux charges (principale et secondaire). Pour atteindre les objectifs fixés nous avons réalisé ce mémoire structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter l'état de l'art de notre système, en commence par les éoliennes et leur différents types puis quelque notion de base sur les génératrices asynchrones, et finalement, généralité sur les moteurs diesels et les groupe électrogènes.

Le second chapitre est consacré à la modélisation de la turbine éolienne, en particulier l'association éolienne – générateur asynchrone "GADA", en commence par la modélisation de la chaine éolienne puis la modélisation de la machine asynchrone.

Le troisième chapitre donnera la modélisation d'un générateur diesel c'est-à-dire la couplément entre les moteurs diesels et les génératrices synchrones, en utilisant les principes des bases ainsi que les équations électriques et mécaniques.

Au dernier chapitre, nous avons présente les résultats de la simulation numérique de système, avec la discussion et l'interprétation des résultats obtenu.

Finalement, une conclusion générale résumera tous les résultats obtenus dans ce présent mémoire.

*CHAPITRE I: L'ÉTAT DE
L'ART*

I.1. Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer; Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. ainsi dans ce chapitre nous allons énoncer en première partie une généralité sur les différents types d'éoliennes, ensuite nous allons nous présenter le moteur diesel [1].

I.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 (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I.1).

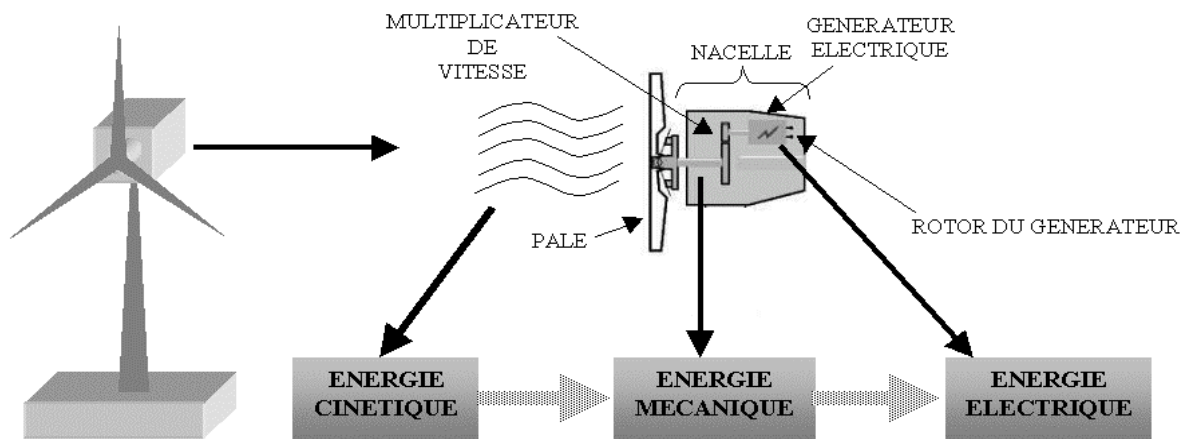


Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent [2].

I.3. Classement d'éolienne selon l'orientation de leur axe de rotation

Il existe deux différents types de systèmes éoliens selon l'orientation de leurs axes de rotation par rapport à la direction du vent.

I.3.1. Eoliennes à axe vertical

Parmi les premières structures développées afin de produire de l'énergie électrique sont les éoliennes à axe verticale. Elles possèdent l'avantage d'avoir des organes de commande et une accessibilité plus simple par la situation de générateur au niveau de sol. Elles peuvent également s'intégrer à l'architecture des bâtiments sans aucune complexité. Ses utilisations

s'adressent aux faibles vitesses du vent et donc pour des petites puissances. Par contre elles ne se conviennent pas autour de la production d'énergie aux grandes puissances.

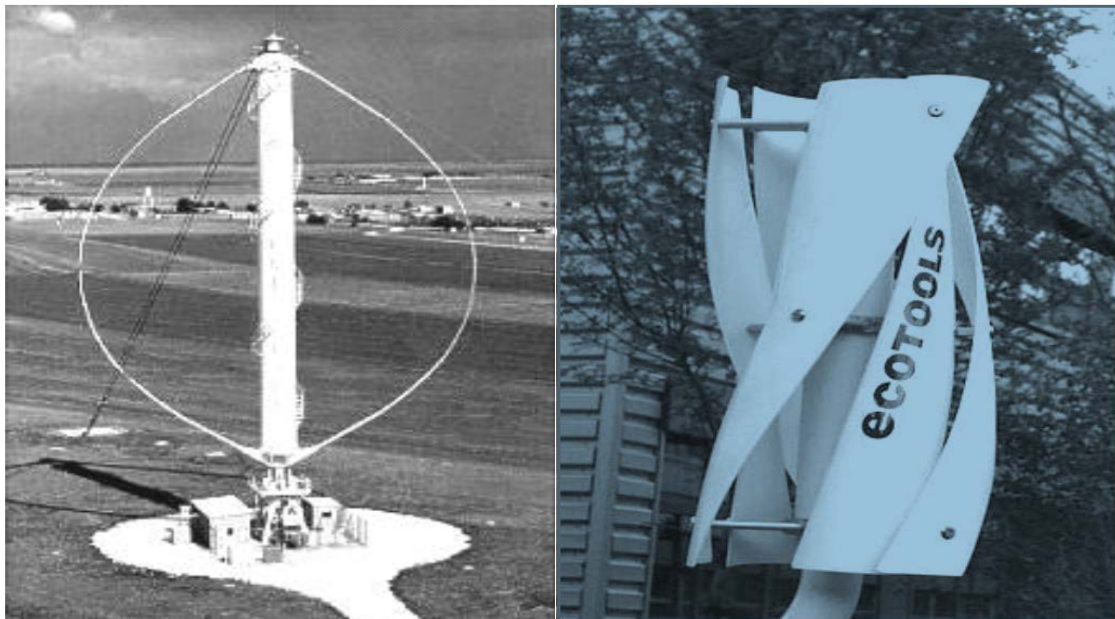


Figure I.2: Différentes technologies d'éoliennes à axe vertical [1].

La Figure I.2 montrent un type particulier de turbine éolienne à un axe verticale avec un rotor Darrieus fonctionne grâce à la portance, se base sur le principe de la variation cyclique d'incidence . Dans la Figure I.2 on trouve le rotor de Savonius basé sur le principe de la traînée différentielle.

I.3.2. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales, le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien voir la Figure I.3 Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité [1].



Figure I.3: Différentes technologies d'éoliennes à axe horizontal [1].

I.4. Constitution d'une éolienne moderne

La Figure I.4 représente une chaîne électromécanique à multiplicateur de vitesse d'une éolienne moderne tripale à axe horizontal de type Nordex N60 (1.3MW) [3].

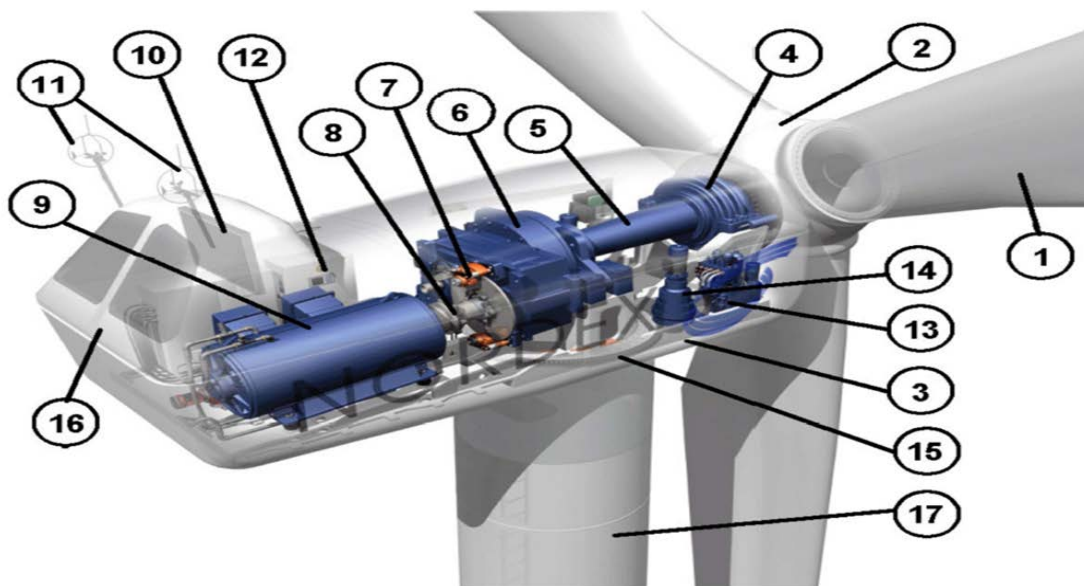


Figure I.4: Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW [3].

Elle est constituée d'une tour (17), supporte la nacelle (3) et le moyeu de la turbine (2) sur lequel sont fixées les pales (1). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales.

La nacelle (3) partiellement accueille la génératrice (9) et son système de refroidissement (10), le multiplicateur de vitesse (6) et différents équipements électroniques de contrôle (12) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation (13), (14), (15) ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne. Le multiplicateur de vitesse comporte un arbre lent (5) muni d'un palier à billes, et un arbre à grande vitesse. Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7) et un accouplement flexible (8) avec le générateur (9). Le tout est protégé par un capot en acier (16).

Un anémomètre et une girouette (11) situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent [3].

I.5. La génératrice asynchrone

Le faible coût et la standardisation de machine asynchrone qui nécessite pas une complexité d'installation à conduit à une très large domination de ce type de génératrices jusqu'à des puissances dépassant les mégawatts. Elle est souvent associée à une batterie de condensateurs et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau . Elle est moins exigeante en termes d'entretien et présente un taux de défaillance très peu élevé.

Dans l'aérogénérateur de dimension conséquente, la vitesse de rotation est peu élevée. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Dans la littérature plusieurs travaux de recherches ont été appliqués pour l'étude de la conversion d'énergie éolienne en utilisant la machine asynchrone comme génératrice [1].

Il existe deux catégories de machine asynchrone: les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

I.5.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses.

Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions

conséquentes (grande puissance et rayon de pâles important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Le changement de la configuration de bobinage du stator (nombres de pôles) et donc l'utilisation des machines de type Dahlander est une solution parfois utilisée (Figure 1.5), mais là encore le rendement est loin d'être optimal sur toute la plage de vent. Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée [4].

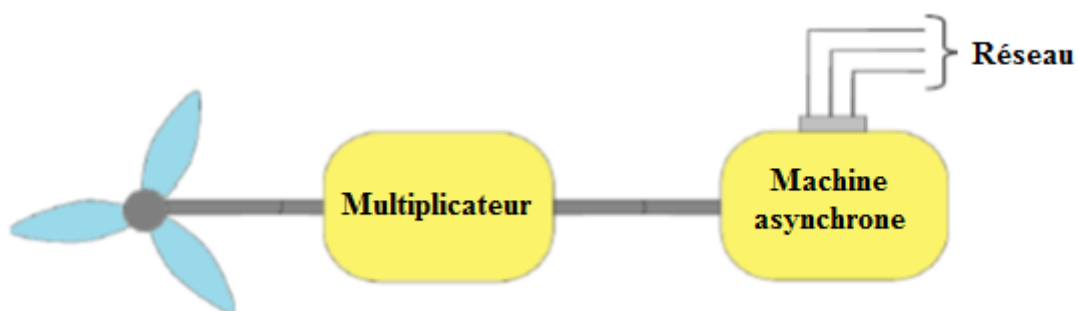


Figure 1.5: Système éolien à base de la machine asynchrone à cage [4].

I.5.2. Machine asynchrone à double alimentation

Pour des grandes puissances ils existent des générateurs asynchrones capable de fonctionner à vitesse réglable, les avantages qui les mise en faveur en comparaison avec des générateurs à vitesse fixe sont:

- une réduction des contraintes mécaniques à cause d'inertie stockée dans la turbine, un phénomène qui crée une élasticité permet de réduire les pulsations du couple.
- une qualité d'alimentation améliorée à cause de la réduction de la pulsation du couple qui empêche à éliminer les variations de puissance.
- une efficacité du système ou la vitesse de la turbine est réglée en fonction de la vitesse du vent pour maximiser la puissance en sortie.
- une commande plus simple avec une simplicité de la construction du système, à voir que pour des vitesses du vent trop faible, l'angle d'inclinaison est généralement fixe et un contrôle de l'angle de tangage est effectué uniquement pour limiter la puissance de sortie.

La machine asynchrone à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone, c'est une solution à vitesse variable. La machine asynchrone à double alimentation MADA à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants, ce qui diminue légèrement leur robustesse ; mais cette machine est un peu plus complexe que l'ancienne machine car elle nécessite un multiplicateur de vitesse . Cette éolienne permet également de contrôler la puissance réactive et de contribuer ainsi à la tenue de la tension si nécessaire [1].



Figure 1.6: Machine asynchrone de 4.7 MW, 45tr/mn [5].

I.6. Moteurs à combustion interne

Les types d'entraînement les plus couramment employés dans les véhicules sont les moteurs à combustion interne. Ils développent leur puissance en convertissant en chaleur l'énergie chimique contenue dans le carburant, puis en transformant cette chaleur en travail mécanique. La conversion de l'énergie chimique en chaleur s'effectue par combustion et transformation de l'énergie calorifique en travail mécanique par l'action de celle-ci sur un fluide moteur dont la pression augmente tout d'abord et dont la détente successive produit un travail.

Les fluides moteurs envisageables sont les liquides qui, par vaporisation, accroissent la pression de travail ou les gaz dont la pression de travail peut être augmentée par compression. La combustion des carburants, généralement composés d'hydrocarbures, requiert de l'oxygène normalement introduit avec l'air d'admission. Si la combustion s'effectue dans la chambre de travail, il s'agit d'une combustion interne. Dans ce cas, les gaz de combustion servent directement de fluide moteur.

Une production continue de travail mécanique ne peut s'obtenir que par un processus cyclique (moteur à pistons) ou par un processus continu d'absorption de chaleur, de détente (production de travail) et de retour du fluide moteur à son état initial (cycle de fonctionnement).

Si le fluide moteur est modifié lors de l'absorption de chaleur, par exemple par l'utilisation d'une partie de ses composants comme agents d'oxydation, il ne peut retrouver son état initial que par remplacement. Ce processus est appelé «cycle ouvert» et se caractérise par un remplacement cyclique des gaz (élimination des gaz de combustion et introduction d'une charge fraîche); C'est pourquoi la combustion interne nécessite toujours un cycle ouvert [6].

I.6.1. Le moteur diesel

L'élément principal dans la construction du groupe diesel est le moteur diesel. On peut se considérer que les premières automobiles furent créées en 1890 construit avec un moteur allemand de Daimler. Mais en 1892 que M. Rudolf Diesel invente le moteur diesel .Il s'agit d'un moteur à allumage par compression ayant un rendement plus élevé que les machines à vapeur et les moteurs à essence à l'époque. Les premiers moteurs diesel rejoignent le monde de l'industrie sont reliés plus précisément avec le marché d'automobile dans les années 1920.

La combustion dans les moteurs diesel s'effectue avec un mélange hétérogène composé d'air et de carburant diesel. Ce mélange est favorable à l'auto-inflammation et n'a donc pas besoin d'étincelle pour s'enflammer. Au début, le diesel est injecté dans le cylindre au moyen d'une pompe à air mais avec les évolutions de la technologie, le carburant est injecté au moyen d'un système haut pression qui pulvérise le carburant .La Figure I.7 montre les différents composants d'un moteur diesel [1].

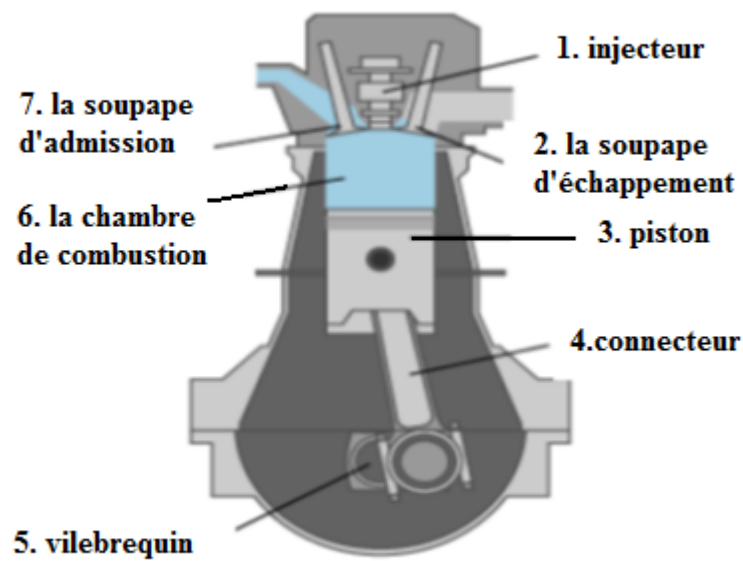


Figure I.7: Les éléments du moteur diesel [1].

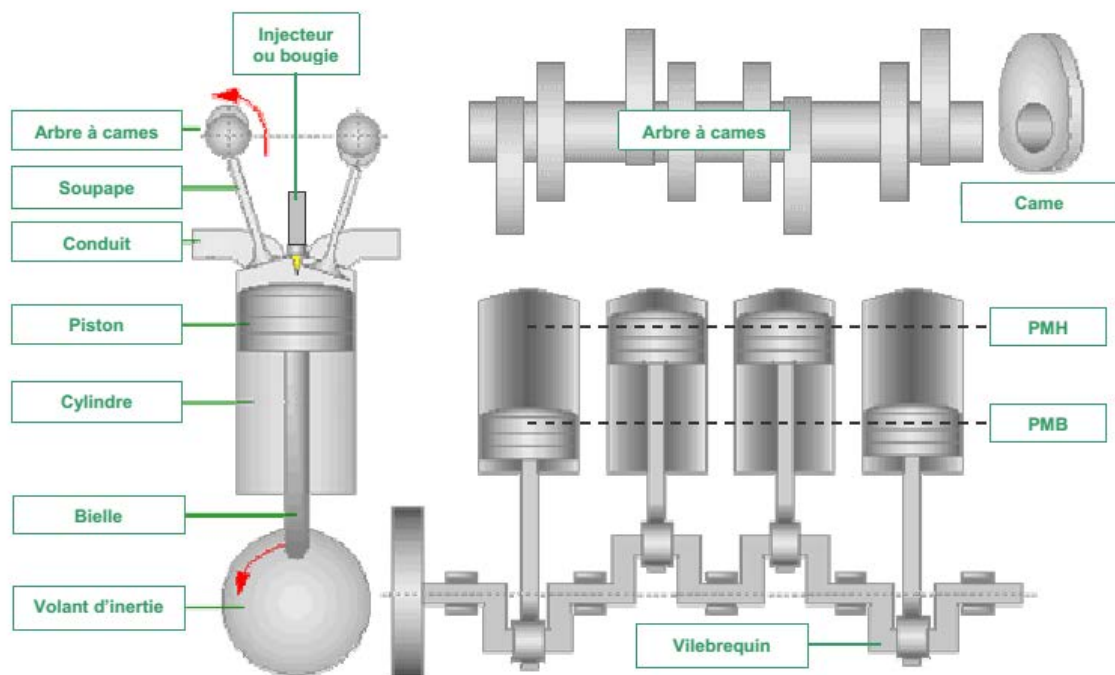


Figure I.8: Composants principaux d'un moteur alternatif à pistons [6].

I.6.2. Cycle du moteur

Dans le cadre de notre étude nous utilisons un moteur diesel à quatre temps, à savoir qu'un cycle moteur (correspondant à une rotation de $2 \times 360^\circ$) comporte les quatre phases suivantes (Figure I.9):

ADMISSION :

- Le piston descend et la soupape d'admission s'ouvre.
- L'air frais s'engouffre dans le cylindre.

COMPRESSION :

- La soupape d'admission se ferme et le piston remonte.
- L'air est comprimé et s'échauffe fortement.
- Lorsque le piston atteint les 9/10ème de sa course environ, une quantité définie de carburant est injectée.

DETENTE :

- Les soupapes sont fermées.
- Le mélange d'air et de carburant contenu dans le cylindre est sous pression.
- La température est suffisamment élevée pour que ce mélange brûle en créant une surpression qui pousse le piston vers le bas.

ECHAPPEMENT :

- La soupape d'échappement s'ouvre.
- Le piston remonte chassant les gaz brûlés vers la sortie d'échappement.

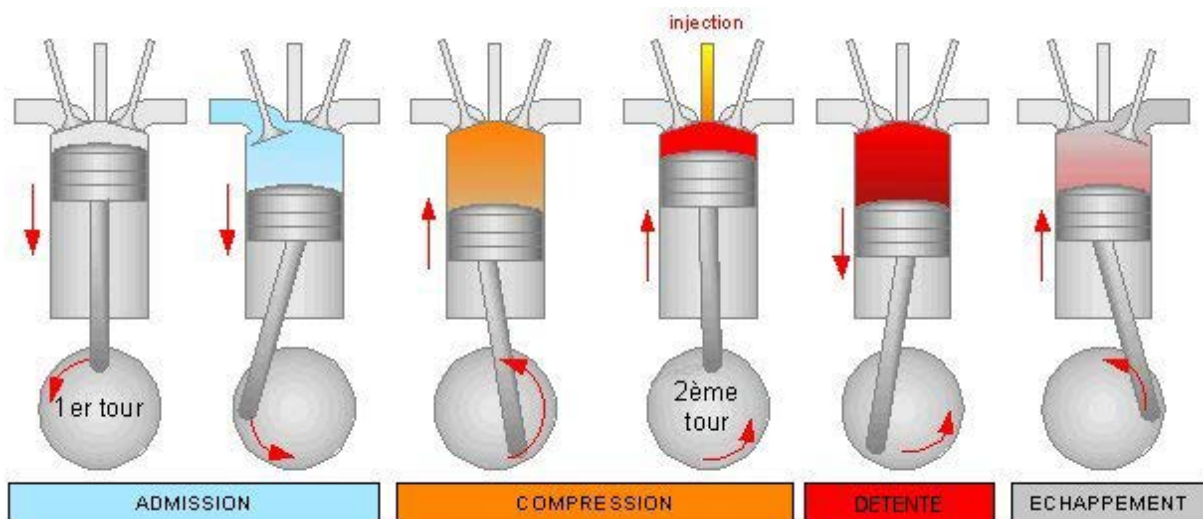


Figure I.9: Cycle de fonctionnement d'un moteur diesel à 4 temps [6].

Dans le cas d'un moteur à quatre cylindres (soit 4 pistons), chacun des pistons effectue les 4 phases décrites précédemment et est décalé de 180° (angle vilebrequin) par rapport au piston

avoisinant. Par exemple (figure I.8), pendant que le premier piston est en fin de phase d'admission, le deuxième est en fin de phase de compression (début de détente), le troisième en fin de phase d'échappement et le quatrième en fin de phase d'explosion (début d'échappement) [6].

I.6.3. Groupe électrogène diesel

Les groupes électrogènes utilisés actuellement pour assurer les besoins en électricité des communautés vivant dans les régions éloignées sont des moteurs fonctionnant au diesel et couplés directement à des générateurs synchrones à rotor bobiné. Pour pouvoir assurer en tout temps la qualité de l'électricité fournie (tension et fréquence stables), un régulateur de tension triphasé agit sur l'excitation des alternateurs synchrones pour s'opposer aux variations de tension. De même, la fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse sur le moteur diesel. Le gouverneur fonctionne en ajustant la quantité de carburant injectée dans les moteurs diesel, pour s'opposer aux variations de la vitesse du moteur et du générateur afin de les garder constantes. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré (Figure I.10). Les réseaux de courant alternatif avec diesel, tout comme ceux interconnectés fournissent pour leurs charges, deux formes d'énergie : active et réactive. La puissance réactive dans un système en CA avec groupe diesel est produite par la génératrice synchrone.

Cela est fait conjointement avec le réglage de tension, en ajustant le courant d'excitation du générateur synchrone. Par conséquent, dans un système d'énergie en CA avec plusieurs groupes diesel (GD), il doit y avoir au moins un GD connecté au réseau, pour fixer la fréquence du réseau et fournir la puissance réactive [7].

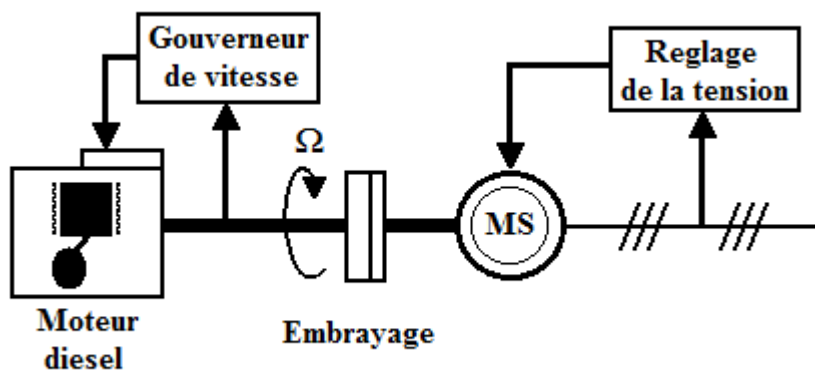


Figure I.10: Configuration du générateur diesel [7].

Quand plusieurs générateurs diesels fournissent de l'énergie au réseau, ceux-ci sont connectés généralement à un bus en CA. Dans ce cas, un système de commande doit être utilisé pour une distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels. Ce système de commande peut prendre une variété de formes, le plus répandu étant le système de commande numérique. Une approche est d'utiliser un seul générateur pour fixer la fréquence (générateur maître) du réseau et laisser les autres à tourner à vitesse fixe (générateurs esclaves), donc fonctionner à un débit de carburant constant. Dans les systèmes traditionnels, le débit de carburant est fixé manuellement par un opérateur. Avec les commandes modernes, le débit peut être ajusté pour optimiser l'usage du carburant [7].

I.7. Généralités sur la machine synchrone

Les machines de type synchrone représentent aujourd'hui une part importante du marché des convertisseurs électromécaniques d'énergie et couvrent une gamme de puissance très large qui s'étend de quelques μW , jusqu'à 1 GW environ. Traditionnellement, les fortes puissances restent le domaine réservé de la production d'électricité. En fonctionnement moteur, en revanche, les puissances installées dépassent rarement quelques dizaines de MW. Le moteur synchrone fonctionnant en vitesse variable le plus puissant connu à ce jour, d'une puissance de 100 MW, a été conçu pour une soufflerie de la NASA (Figure I.11c).



a : moteur industriel à aimants permanents qq kW (doc. aimants Philips).

b : démonstrateur de propulsion navale à aimants permanents, 1.8 MW.

c : rotor de moteur synchrone 100 MW (à 600 tr/mn)

Figure I.11: Différent types des machines synchrones[8].

Historiquement, les premiers aimants permanents ont été utilisés au début du 19ème siècle. De performances très modestes à leurs débuts, les progrès réalisés depuis plus d'un siècle ont contribué au développement des machines à aimants. L'utilisation d'aimants permanents est aujourd'hui quasiment systématique pour les puissances inférieures à 10 kW et s'étendent maintenant vers les fortes puissances (au-delà du MW). Au-delà, le coût d'utilisation

d'aimants devient souvent prohibitif (de l'ordre de 150 euros/kg pour le Nd/FB). Seules quelques applications très spécifiques, comme par exemple la propulsion navale où les contraintes d'encombrement sont majeures, envisagent l'utilisation des aimants pour des fortes puissances (4.5 MW à 120 tr/min) [8].

I.7.1. Générateur Synchron

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques ,groupe électrogène, centrales hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau , sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéro-turbine ou moteur diesel se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite [9].

I.7.2. Générateur Synchron à Rotor Bobiné

Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si la génératrice est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement proportionnelle à la fréquence du réseau. Ces machines présentent aussi le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur un moteur diesel. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées avec un entraînement direct sur moteur diesel.

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau [3].

I.7.3. Générateur Synchron à Aimants Permanents (GSAP)

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

considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

L'inconvénient majeur de l'utilisation de la GSAP est le coût des aimants utilisés. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix [3].

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art du système c'est-à-dire les notions de base de notre système, telle que les types et le classement des éoliennes ainsi que leurs principaux éléments et parties, puis nous avons vu les caractéristiques des machines électriques, synchrones et asynchrones, et finalement, cité les principes de fonctionnement des moteurs diesels et des groupes électrogènes.

*CHAPITRE II:
MODÉLISATION DE LA
CHAÎNE ÉOLIENNE
(TURBINE ÉOLIENNE –
GÉNÉRATEUR
ASYNCHRONE)*

II.1. Introduction

Le schéma global d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne connectée au réseau électrique est décrit par la Figure II.1. Le système éolien a pour but de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [5].

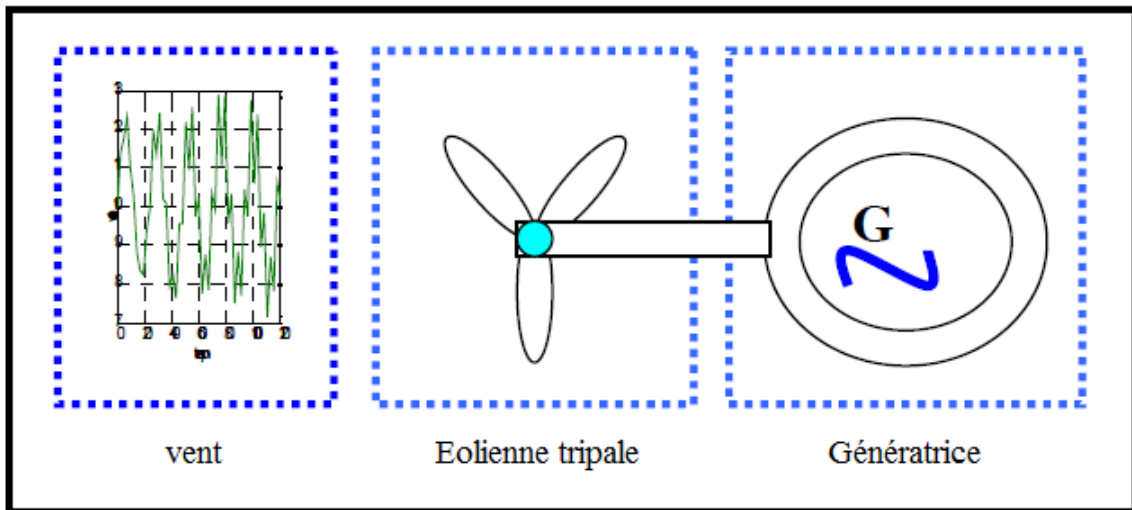


Figure II.1: Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie [10].

Dans le système est:

- Le vent
- La turbine éolienne « Type tripale »
- La génératrice « GADA »

II.2. Modélisation du chaîne éolienne

II.2.1. Modélisation du vent

Le vent est l'énergie primaire des aérogénérateurs. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. C'est donc une variable importante à modéliser car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle.

L'un des principes retenus consiste à générer une série temporelle de la vitesse du vent à partir d'un bruit en entrée. Pour ce faire, la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes:

- Une composante turbulente du vent $V(t)$ qui est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent).
- Une composante lente V_0 ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné.

$$V(t) = V_0 + V_T(t) \quad (\text{II. 1})$$

L'aéro-turbine filtre les fluctuations hautes fréquences. On reconstitue à cet effet un filtre passe bas à la composante de turbulence afin que celle-ci reproduise une caractéristique plus proche de la réalité dont la fonction de transfert est donnée par :

$$G_f = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad (\text{II. 2})$$

La valeur de la constante de temps dépend du diamètre du rotor et également de l'intensité de turbulence du vent et de la vitesse du vent moyenne ($\tau = 2s$) [10].

II.2.2. Modélisation de la turbine

Dans cette partie, il y a la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et le rotor de la génératrice:

- la turbine éolienne se compose de 3 pales orientables;
- le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.
- L'arbre est relié la partie mécanique à la partie électrique ou bien relie la turbine avec le générateur.

Et la figure ci-dessous représente différentes parties de la turbine:

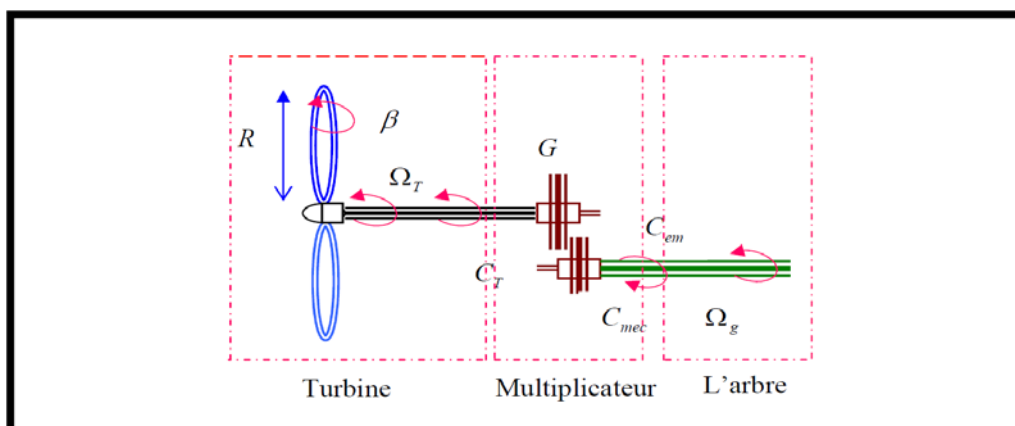


Figure II.2: Différentes parties de la turbine [10].

II.2.3. Modèle de la Turbine

La relation entre la vitesse du vent et la puissance mécanique extraite donne par l'équation suivante:

$$P_V = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{II.3})$$

Où:

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$: Masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression.

V : La vitesse du vent.

L'éolienne ne pouvant récupérer qu'une fraction de la puissance du vent (coefficient de puissance C_p) la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors:

$$P_D = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{II.4})$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure II.3 représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β ; Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent [10]:

$$\lambda = \frac{\Omega_T R}{V} \quad (\text{II.5})$$

Le couple mécanique à la sortie de la turbine est défini par:

$$C_T = \frac{P_D}{\Omega_T} \quad (\text{II.6})$$

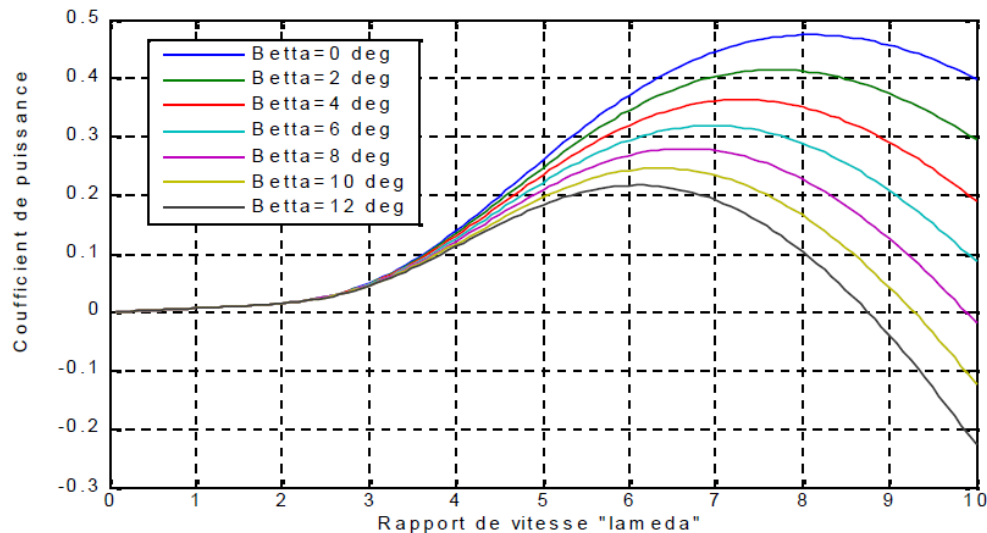


Figure II.3: Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ [10].

II.2.4. Modèle du multiplicateur

Les multiplicateurs utilisés actuellement comportent généralement deux à trois trains d'engrenages épicycloïdaux permettant d'obtenir des rapports de multiplications de l'ordre de 100. ces engrenages sont générateurs de bruit et de pertes mécaniques. Le multiplicateur a pour rôle d'adapter la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice, et pour pouvoir le modéliser, nous allons utiliser un gain de vitesse G qui correspond au rapport de multiplication [11].

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_T \quad (II.7)$$

Avec:

C_{mec} : Couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine à celle du générateur;

C_T : Le couple mécanique à la sortie de la turbine;

G : Gain ou Rapport de multiplication.

Pour la vitesse, on aura:

$$\Omega_g = G\Omega_T \quad (II.8)$$

Ω_g : Vitesse du générateur (rad/s mécanique).

II.2.5. Modèle de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_{tur} et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle

mécanique proposé considère l’inertie totale J_T constituée de l’inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l’inertie de la génératrice [12].

$$J_T = \frac{J_{tur}}{G^2} \tag{II.9}$$

Il est à noter que l’inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l’inertie de la turbine reportée par cet axe. 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:

$$J_T \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{II.10}$$

Où J_T 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_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{II.11}$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f_T :

$$C_{vis} = f_T \Omega_{mec} \tag{II.12}$$

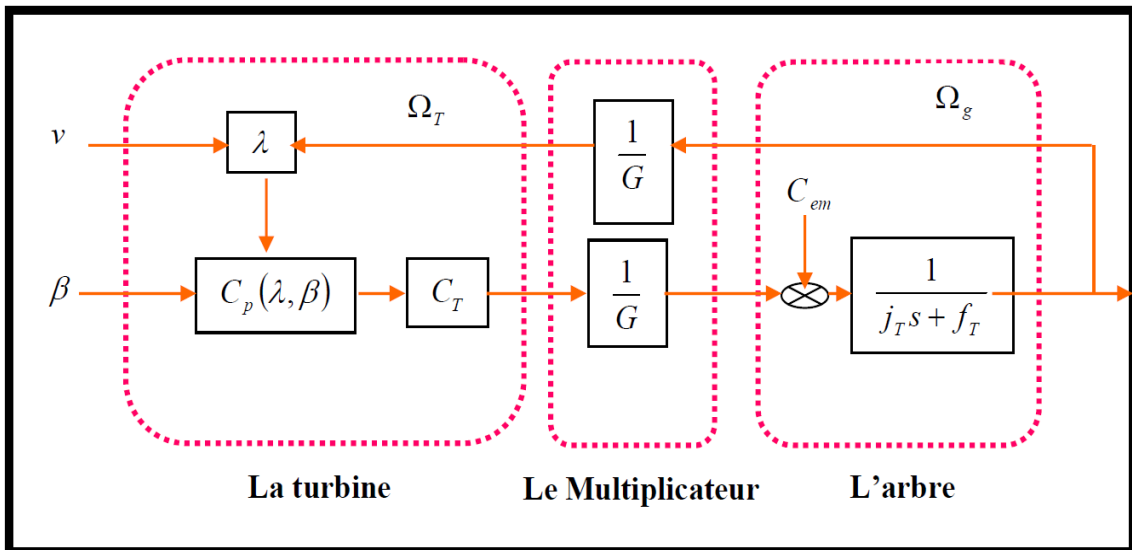


Figure II.4: Modèle de la turbine éolienne [10].

II.3. Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

Dans cette partie on utilise la modélisation de Machine asynchrone à double alimentation, et aussi la modélisation de Park. Et les différentes équations du modèle de la GADA.

La modélisation de Park est construite à partir des équations électriques de la machine. Les hypothèses généralement admises dans le modèle de la machine asynchrone double alimentation sont [10]:

- la parfaite symétrie de la machine.
- l'absence de saturation et de pertes dans le circuit magnétique (l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables)
- la répartition spatiale sinusoïdale des différents champs magnétique le long de l'entrefer. (Son entrefer est constant).
- l'alimentation est réalisée par un système des tensions triphasées symétriques.
- les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.

Dans le cadre des hypothèses simplificatrices et pour une machine équilibrée les équations de la machine s'écrivent comme suit :

II.3.1 Equations électriques

Les équations des tensions des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques sont:

pour le stator:

$$\begin{aligned} V_{sa} &= R_s I_{sa} + \frac{d}{dt} \Phi_{sa} \\ V_{sb} &= R_s I_{sb} + \frac{d}{dt} \Phi_{sb} \\ V_{sc} &= R_s I_{sc} + \frac{d}{dt} \Phi_{sc} \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

pour le rotor:

$$\begin{aligned} V_{ra} &= R_r I_{ra} + \frac{d}{dt} \Phi_{ra} \\ V_{rb} &= R_r I_{rb} + \frac{d}{dt} \Phi_{rb} \\ V_{rc} &= R_r I_{rc} + \frac{d}{dt} \Phi_{rc} \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

En désignant par:

- $V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}, V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$: Les tensions statoriques et rotoriques.
- $I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}, I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}$: Les courants statoriques et rotoriques.
- $\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}, \Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$: Les flux statoriques et rotoriques.
- R_s, R_r : Résistances statoriques et rotoriques.

Sous forme matricielle:

pour le stator:

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad (\text{II.15})$$

pour le rotor:

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \quad (\text{II.16})$$

II.3.2. Équations magnétiques

Les relations entre flux et courants s'écrivent comme suit:

pour le stator:

$$\begin{aligned} \Phi_{sa} &= L_s I_{sa} + M_s I_{sb} + M_s I_{sc} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \\ \Phi_{sb} &= L_s I_{sb} + M_s I_{sa} + M_s I_{sc} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \\ \Phi_{sc} &= L_s I_{sc} + M_s I_{sa} + M_s I_{sb} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \end{aligned} \quad (\text{II.17})$$

pour le rotor:

$$\begin{aligned} \Phi_{ra} &= L_r I_{ra} + M_r I_{rb} + M_r I_{rc} + M_{sr} I_{sa} + M_{sr} I_{sb} + M_{sr} I_{sc} \\ \Phi_{rb} &= L_r I_{rb} + M_r I_{ra} + M_r I_{rc} + M_{sr} I_{sa} + M_{sr} I_{sb} + M_{sr} I_{sc} \\ \Phi_{rc} &= L_r I_{rc} + M_r I_{ra} + M_r I_{rb} + M_{sr} I_{sa} + M_{sr} I_{sb} + M_{sr} I_{sc} \end{aligned} \quad (\text{II.18})$$

Sous forme matricielle on a:

pour le stator:

$$[\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (\text{II.19})$$

pour le rotor:

$$[\Phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{sr}][I_s] \quad (\text{II.20})$$

Avec:

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_S & M & M \\ M & L_S & M \\ M & M & L_S \end{bmatrix} [L_{RR}] = \begin{bmatrix} L_r & M & M \\ M & L_r & M \\ M & M & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

$$[L_{Sr}] = M_{Sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta \end{bmatrix}, [L_{rS}] = [L_{Sr}]^T \quad (\text{II.22})$$

Telle que:

- L_s : L'inductance propre d'une phase statorique.

- L_r : L'inductance propre d'une phase rotorique.

- M_s : L'inductance mutuelle entre phases statoriques.

- M_r : L'inductance mutuelle entre phases rotoriques.

En désignant par L_{sr} la mutuelle inductance entre phases statoriques et rotoriques et par M_{sr} sa valeur lorsque leur axes coïncident.

II.3.3. Equation mécanique

Le couple électromagnétique est donné par la dérivée partielle de la C_o énergie par rapport à l'angle mécanique entre le rotor et le stator. Pour simuler la machine, en plus des équations électriques il faut ajouter l'équation du mouvement du système :

$$C_{em} - C_r = Jg \frac{d\Omega}{dt} + fg\Omega \quad (\text{II.23})$$

II.3.4. Modèle de Park

Les équations précédentes permettent la modélisation de la machine dans le plan (a b c). Elles peuvent être implantées dans un calculateur. Par contre, vu la complexité (36 termes pour l'énergie magnétique) de ces équations non linéaires et multi variable. Pour cela on utilise la transformation de Park qui permettra de rendre simple à les étudier [10].

La matrice $P[\theta]$ de (Park) est donnée sous la forme suivante :

$$P(\theta) = \sqrt{2/3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

L'angle θ dans la matrice $[P]$ prend la valeur (θ_s) pour les grandeurs statoriques et la valeur ($\theta_s - \theta_r$) pour les grandeurs rotoriques.

II.3.5. Choix du référentiel

Pour étudier la théorie des processus transitoires des machines on utilise trois systèmes de Park qui sont des cas particuliers du système d'axes (d, q).

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

$$\begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

La machine asynchrone peut être modélisée dans un repère diphasé (d, q) par le système l'équation:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_r) \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_r) \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Avec:

$$\omega_r = (\omega_s - \omega) \quad (\text{II.28})$$

On remplace (II.28) dans (II.27) on trouve:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

a) Repère lié au stator

Dans ce cas les repères (d, q) sur le stator.

$$\theta_s = 0 \quad (\text{II.30})$$

et:

$$\theta_s = -\theta_r \Rightarrow \theta_r = -\theta \quad (\text{II.31})$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0, \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega_r \quad (\text{II.32})$$

b) Repère lié au rotor

Dans ce cas les repères (d, q) sur le rotor.

$$\theta_r = 0 \quad (\text{II.33})$$

et:

$$\theta_s = \theta + \theta_r \Rightarrow \theta_s = \theta \quad (\text{II.34})$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0, \frac{d(\theta_s)}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega_s \quad (\text{II.35})$$

c) Repère lié au champ tournant

Dans ce cas les repères (d, q) sur le champ tournant.

$$\frac{d(\theta_s)}{dt} = \omega_s \quad (\text{II.36})$$

$$\theta_s = \theta + \theta_r \Rightarrow \theta_r = \theta_s - \theta \quad (\text{II.37})$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta}{dt} = \omega_s - \omega = g\omega_s \quad (\text{II.38})$$

II.3.6. Expression de la puissance et du couple électromagnétique

Le calcul de couple mécanique de la machine asynchrone se base sur la connaissance de la puissance instantanée $P(t)$, soit:

$$P_{em} = V_{sa}I_{sa} + V_{sb}I_{sb} + V_{sc}I_{sc} = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \quad (II.39)$$

$$P_{em} = \left[R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \right] I_{sd} + \left[R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \right] I_{sq} \quad (II.40)$$

$$P_{em} = \underbrace{\{R_s I_{sd}^2 + R_s I_{sq}^2\}}_{(1)} + \underbrace{\left\{ \frac{d\Phi_{sd}}{dt} I_{sd} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} I_{sq} \right\}}_{(2)} + \underbrace{\{\omega_s (\Phi_{sd} I_{sq} - \Phi_{sq} I_{sd})\}}_{(3)} \quad (II.41)$$

1): Représente les pertes par effet joules.

2): Représente la puissance électromagnétique.

3): Représente la puissance électrique transformé en puissance mécanique.

II.3.7. Couple électromagnétique

On a:

$$P_{em} = C_{em}\Omega = \{\omega_s (\Phi_{sd} I_{sq} - \Phi_{sq} I_{sd})\} \quad (II.42)$$

Avec:

$$\omega = p\Omega \quad (II.43)$$

$$P_{em} = \frac{p\Omega}{\Omega} (\Phi_{sd} I_{sq} - \Phi_{sq} I_{sd}) = p(\Phi_{sd} I_{sq} - \Phi_{sq} I_{sd}) \quad (II.44)$$

En faisant appel au flux rotorique:

On a:

$$\Phi_{rd} = L_r I_{rd} + M_{sr} I_{sd} \quad (II.45)$$

Soit:

$$I_{rd} = \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \frac{M_{sr}}{L_r} I_{sd} \quad (II.46)$$

Et:

$$\Phi_{rd} = L_r I_{rd} + M_{sr} I_{sq} \quad (II.47)$$

Soit:

$$I_{rq} = \frac{d\Phi_{ra}}{dt} - \frac{M_{sr}}{L_r} I_{sq} \quad (\text{II.48})$$

On aura:

$$Cem = p \frac{M_{sr}}{L_r} (\Phi_{rd} I_{sq} - \Phi_{rq} I_{sd}) \quad (\text{II.49})$$

On peut écrit aussi:

$$Cem = \frac{3pM}{2} (\Phi_{rd} I_{sq} - \Phi_{rq} I_{sd}) \quad (\text{II.50})$$

II.4. Conclusion

La modélisation est une phase primordiale de son développement, les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes.

Nous avons étudié dans ce chapitre la modélisation d'un système éolienne (turbine, génératrice), la modélisation de la turbine est composé de trois parties (turbine éolienne, multiplicateur, l'arbre). la turbine éolienne est composé de trois pales orientables, ainsi que le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique, et l'arbre assure la liaison entre la partie mécanique et la partie électrique ou bien la liaison entre la turbine et le générateur.

Pour ce système le générateur c'est une génératrice asynchrone double alimentation et on a modélisé le à l'aide de la transformation de Park, ce dernier ramené à un modèle biphasé équivalent, parce que la solution du système est difficile. Donc l'utilisation de la transformation de Park permet de détourner cette difficulté. le modèle de GADA lies au champ.

*CHAPITRE III:
MODÉLISATION D'UN
GÉNÉRATEUR DIÉSEL
(MOTEUR DIÉSEL –
GÉNÉRATRICE
SYNCHRONE)*

III.1. Introduction

Le générateur diesel est principalement constitué d'une turbine diesel entraînant une génératrice, généralement de type synchrone. C'est l'organe de base d'un système éolien diesel, dans la mesure où il est généralement installé en premier. Ainsi, tout ajout au système doit être accordé au fonctionnement de ce générateur. Dans le présent chapitre, nous développons le modèle du sous-système générateur diesel. Nous l'étudierons suivant le découpage généralement employé dans la littérature à savoir: (1) la turbine diesel, (2) la génératrice synchrone. Ces deux composantes seront ensuite couplées au moyen de l'équation mécanique et du couple électromagnétique de la génératrice synchrone.

Les efforts seront essentiellement consacrés à production de modèles d'états permettant une analyse rapide de la stabilité à travers l'évaluation des valeurs propres. Cependant, les fonctions de transfert seront employées pour l'analyse des boucles de régulation à travers les méthodes classiques. Chaque modèle produit sera simulé à l'aide du logiciel Matlab/Simulink et les résultats présentés.

III.2. Modèle du groupe électrogène

III.2.1. Modèle du moteur diesel

La modélisation du moteur diesel doit prendre en considération les pièces du moteur en mouvement, la puissance fournie P_i et les puissances résistantes P_{diss} , le moteur fonctionne à régime constant (pour une charge donnée) afin de maintenir constantes la tension et la fréquence du courant fourni par l'alternateur. Le principe de la conservation d'énergie s'écrit alors comme suit [1]:

$$P_i - P_{diss} = 0 \quad (III.1)$$

La puissance fournie peut être représentée par l'expression suivante :

$$P_i = p_{ci} \cdot n_i \cdot m_f \quad (III.2)$$

Avec:

p_{ci} : Désigne le pouvoir calorifique inférieur du carburant.

n_i : Le rendement indiqué du moteur.

m_f : Le débit de carburant injecté dans la chambre de combustion.

La puissance dissipé totale, inclut d'une part l'effet de frottement des pièces mécaniques en mouvement comme (bielles, pistons, vilebrequin) et d'autre part celui de la charge appliquée sur le moteur, celle de la génératrice. Elle peut être exprimée par la formule suivante :

$$P_{diss} = p_{mf} \cdot \frac{C_y}{4\pi} \cdot \omega + C_r \cdot \omega \quad (III.3)$$

p_{mf} : La pression moyenne des pertes par frottement.

C_y : La cylindrée totale du moteur.

C_r : Le couple résistant dû à la charge appliquée.

La modélisation des frottements au niveau des différents éléments du moteur à fait l'objet de nombreux travaux qui aboutissent à des formes très variées. Vu la complexité pour traiter chaque élément à part, il a été préféré d'utiliser les formules d'évaluations globales de ces pertes. La formule la plus précise qui représente la variation de la puissance de frottement en fonction du régime et de la pression d'air à l'admission du moteur s'écrit comme suit :

$$p_{mf} = \left(1 + \omega \cdot S_{eng} \cdot \left(K_{f1} + K_{f2} \frac{P_{in}}{P_a}\right) + K_{f3} \omega^2\right) P_a \cdot \frac{C_y}{4\pi} \omega \quad (III.4)$$

III.2.2. Production du couple mécanique

le moteur diesel est un ensemble technique très hétérogène. En se focalisant sur la dynamique du couple mécanique en rapport avec l'index du système de pompe de carburant, la turbine diesel peut être réduite à un système du premier ordre caractérisé par un gain statique et une constante de temps. Les mesures pratiques montrent la présence d'un retard du fait de l'intervalle existant entre deux explosions. On en déduit l'expression (III.5) qui représente la dynamique du couple mécanique T_{Dm} écrit dans le plan de Laplace. La variable $z(s) = L[z(t)]$ est l'équivalent dans le plan de Laplace de l'index d'alimentation, T_{D1} est une constante de temps exprimant la limite en vitesse de réaction de la turbine, et la constante de temps T_{D2} exprime le délai de changement de couple [13].

$$T_{Dm}(s) = \frac{K_{Dm}}{1 + sT_{D1}} z(s) e^{-sT_{D2}} \quad (III.5)$$

En normalisant l'équation (III.5), on a $z(t) \in [0,1]$. $z(t)=1$ correspond au fonctionnement en pleine puissance. Pour ce régime, on a une couple mécanique $T_{Dm} = 1$ pu et on en déduit que $K_{Dm} = 1$ pour une équation normalisée. L'index d'alimentation permet d'évaluer la dynamique du débit de carburant dans la turbine moyennant une fonction caractéristique $p(t) = f(z(t))$

[g/kWh]. La fonction de débit de carburant est non linéaire, convexe, avec un minimum absolu en $z(t) = 1$.

En appliquant la transformation de Padé du premier au retard temporel $e^{-sT_{D2}}$ de l'expression (III.5), on a l'expression (III.6). En exploitant la transformation en forme canonique observable. Une telle transformation est particulièrement appréciée pour l'analyse des valeurs propres et l'élaboration des stratégies de commande à partir de l'observation des valeurs propres [13].

$$e^{-sT_{D2}} \sim \frac{2 - sT_{D2}}{2 + sT_{D2}} \Rightarrow T_{Dm}(s) = \frac{1}{1 + sT_{D1}} \frac{2 - sT_{D2}}{2 + sT_{D2}} z(s) \quad (\text{III.6})$$

$$G_{D1}(s) = \frac{T_{Dm}(s)}{Z(s)} = \frac{-s \frac{1}{T_{D1}} + \frac{2}{T_{D2}T_{D1}}}{s^2 + s \frac{T_{D2} + 2T_{D1}}{T_{D2}T_{D1}} + \frac{2}{T_{D2}T_{D1}}} = \frac{b_{D1}s + b_{D0}}{s^2 + a_{D1}s + a_{D0}} \quad (\text{III.7})$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & -a_{D0} \\ 1 & -a_{D1} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} b_{D0} \\ b_{D1} \end{bmatrix} u_1(t) \\ y_1(t) = [0 \quad 1]x(t) \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = -a_{D0}x_2(t) + b_{D0}z(t) \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = x_1(t) - a_{D1}x_2(t) + b_{D1}z(t) \\ y(t) = x_2(t) = T_{Dm}(t) \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} a_{D0} = b_{D0} = \frac{2}{T_{D1}T_{D2}}; b_{D1} = -\frac{1}{T_{D1}} \\ a_{D1} = \frac{T_{D2} + 2T_{D1}}{T_{D1}T_{D2}} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

$x_1(t)$ est une variable interne créer pour les besoins du modèle, tandis que $x_2(t) = T_{Dm}(t)$ est le couple moteur accessible par la mesure. Ce dernier, obtenu à partir de la combustion du mélange carburé dans les cylindres de la turbine, est utilisé pour entrainer en rotation la partie tournante du générateur diesel principalement constitué du vilebrequin, du volant d'inertie et du rotor de la génératrice synchrone. Le modèle du système tournant est schématisé à la Figure III.1. Le couple électromagnétique T_{De} résulte de la connexion d'une charge électrique à la génitrice synchrone et s'oppose au mouvement de la masse tournante.

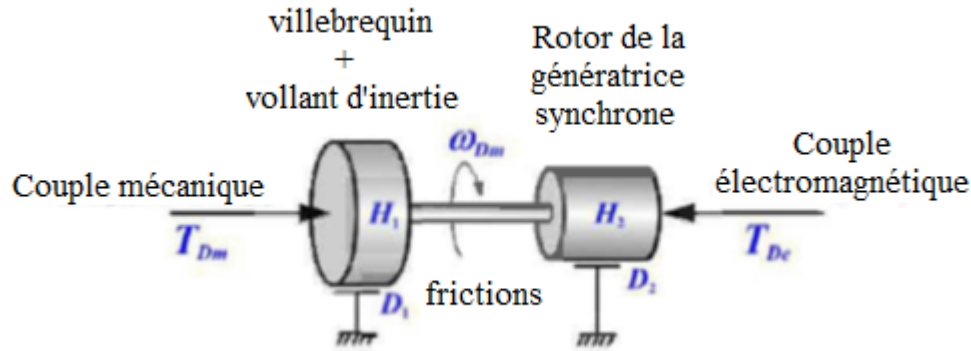


Figure III.1: Modèle de la partie mécanique du groupe diesel.

Chaque masse tournante a une certaine inertie, liée à sa masse, et est soumise à des forces de friction. En ce qui concerne la turbine, les forces de friction sont principalement dues aux frictions des pistons à l'intérieur des cylindres. Les frictions côté génératrice sont généralement négligées par rapport à celles de la turbine. Les moments de torsion des organes de transmission mécanique étant négligés, on définit l'inertie totale $H_D = H_1 + H_2$ et le coefficient de friction total $D_D = D_1 + D_2$. Ces grandeurs sont exprimées en unité normalisée (pu). L'équation caractérisant la dynamique des parties en rotation est donnée par (III.10). Dans (III.11), J_D est l'inertie de la partie tournante en $kg/m^2 \cdot \omega_{mref}$ et S_{ref} sont respectivement la vitesse de rotation et la puissance apparente de base [13].

$$\frac{d\omega_{Dm}}{dt} = \frac{1}{2H_D} (T_{Dm} - T_{De} - D_D \omega_{Dm}) \quad (III.10)$$

Avec
$$H_D = \frac{1}{2} \frac{J_D \omega_{mref}^2}{S_{ref}} \quad (III.11)$$

III.2.3. Le régulateur de vitesse

La vitesse de rotation de la turbine ω_{Dm} est mesurée et comparée à une référence permettant de fixer la fréquence des grandeurs électriques produites par la génératrice. L'organe responsable de la régulation de vitesse est construit autour d'un régulateur PID. Pour les turbines de moyenne et grande puissance, l'un des contrôleurs les plus répandus est de type UG-25 construit par WoodwardTM [13].

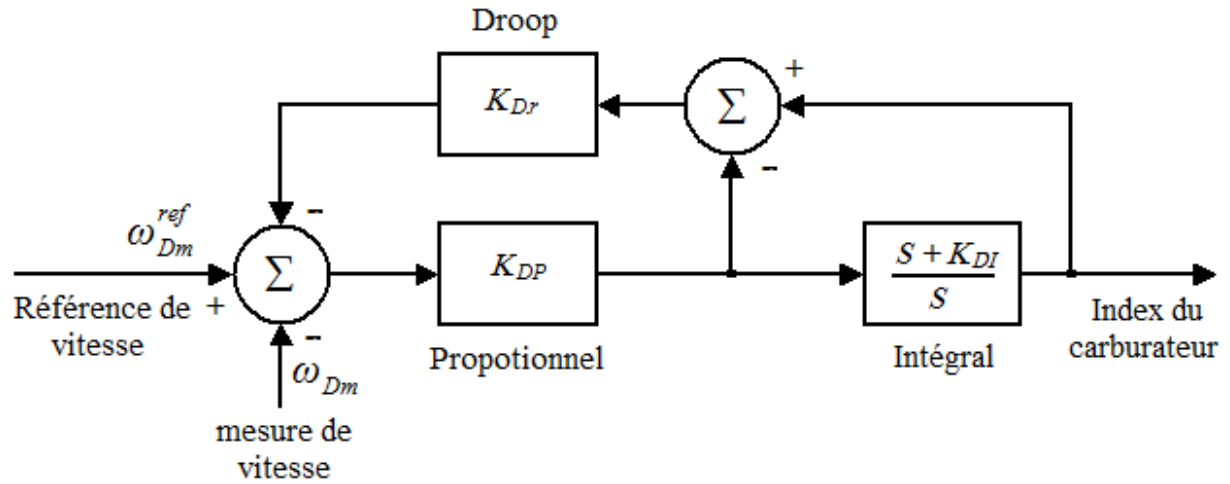


Figure III.2: Régulateur de vitesse construit autour d'un régulateur PI

Nous retenons ici un modèle simplifié dans lequel, tous les délais dues à la mesure et à l'actionneur ont été négligées par rapport aux constantes de temps T_{D1} et T_{D2} . On obtient ainsi la structure construite autour d'un régulateur PI représenté à la Figure III.2; L'action de la partie "Proportionnel" est réglée par le paramètre K_{DP} tandis que K_{DI} permet de régler l'action de la partie "Intégral". Le paramètre de chute de fréquence, réglé par K_{Dr} , permet d'ajuster la chute de fréquence en fonction de la puissance produite. Ceci permet une répartition automatique des puissances dans un système à plusieurs générateurs diesel; On a:

$$K_{Dr} = \frac{\omega_{Dm}^{ref} - \omega_N}{P_N} = \frac{\Delta\omega_{Dm}}{P_N} \quad (III.12)$$

$$\Rightarrow K_{Dr} = \omega_{Dm}^{ref} - 1 \text{ [pu]} \quad (III.13)$$

Où P_N est la puissance nominale et ω_N la vitesse nominale correspondante. En pratique, on a $0 \leq K_{Dr} \leq 10\%$. $K_{Dr} = 0$, le générateur fonctionne en mode isochrone et fixe la fréquence sur le bus de distribution. Lorsque plusieurs générateurs sont connectés en parallèle, un seul d'eux peut être isochrone. Le modèle de la Figure III.2 nous permet d'écrire :

$$G_{D2}(s) = \frac{z(s)}{\omega_{Dm}^{ref}(s) - \omega_{Dm}(s)} = K_{DP} \frac{s + K_{DI}}{s + K_{DP}K_{DI}K_{Dr}} \quad (III.14)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{dx_3(t)}{dt} = -a_{D01}x_3(t) + b_{D01}(\omega_{Dm}^{ref}(t) - \omega_{Dm}(t)) \\ y_2(t) = z(t) = x_3(t) + K_{DP}(\omega_{Dm}^{ref}(t) - \omega_{Dm}(t)) \end{cases} \quad (III.15)$$

$$\text{Avec } \begin{cases} a_{D01} = K_{DP}K_{DI}K_{Dr} \\ b_{D01} = K_{DP}K_{DI}(1 - K_{DP}K_{Dr}) \end{cases}$$

La variable d'état $x_3(t)$ est une variable symbolique créée pour les besoins du modèle et permet d'accéder à la valeur dynamique de l'index $z(t)$ contrôlant le débit de carburant, donc le couple moteur T_{Dm} .

En réarrangeant les équations dynamiques (III.9),(III.10),(III.15) sous forme d'état standard, on obtient un modèle d'état linéaire de la turbine diesel. La vitesse de référence ω_{Dm}^{ref} ; et la réaction électromagnétique T_{De} de la génératrice sont les variables d'entrée du modèle, tandis que la vitesse de rotation ω_{Dm} , l'index d'alimentation Z et le couple mécanique T_{Dm} sont les variables de sortie. On a:

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \\ \frac{dx_3}{dt} \\ \frac{d\omega_{Dm}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -a_{D0} & b_{D0} & -b_{D0}K_{DP} \\ 1 & -a_{D1} & b_{D1} & -b_{D1}K_{DP} \\ 0 & 0 & -a_{D01} & -b_{D01} \\ 0 & \frac{1}{2H_D} & 0 & -\frac{D_D}{2H_D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \omega_{Dm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{D0}K_{DP} & 0 \\ b_{D1}K_{DP} & 0 \\ -a_{D1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2H_D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{Dm}^{ref} \\ T_{De} \end{bmatrix} \quad (III.16)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{Dm} \\ T_{Dm} \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -K_{DP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \omega_{Dm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ K_{DP} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{Dm}^{ref} \\ T_{De} \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

III.3. La génératrice synchrone

Considérons une machine synchrone à pôles saillants, comme représenté sur la figure III.3

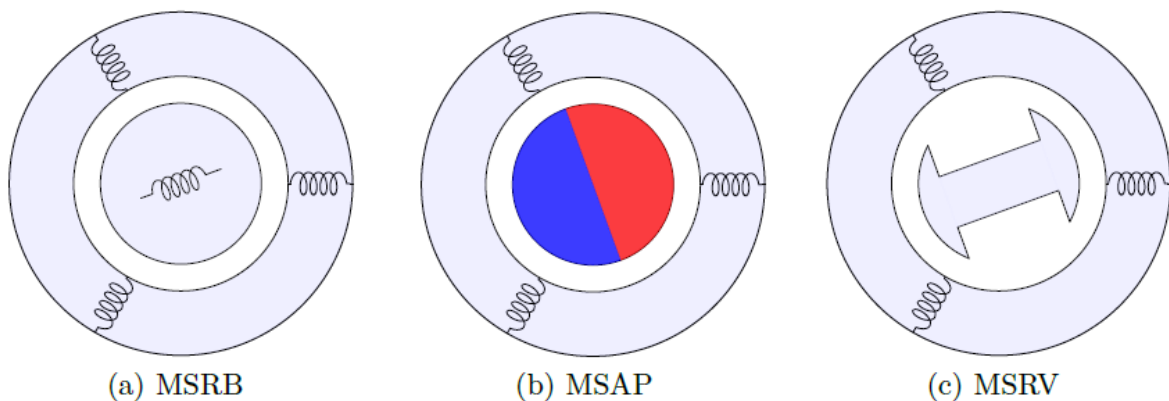


Figure III.3: Machines synchrones avec différents types d'interaction champ tournant – rotor [14].

Il existe aujourd'hui une grande variété de machines synchrones, qui vont de l'alternateur à rotor bobiné de plusieurs centaines de méga-watts, jusqu'au moteur de quelques watts à aimants permanents, en passant par les moteurs à réluctance variable. Dans ce chapitre nous détaillons le modèle de la machine synchrone (MS) à rotor bobiné (RB) à pôles saillants, qui est considérée comme la machine synchrone la plus générale.

Certaines hypothèses classiques sont admises pour la modélisation des machines électriques.

Hypothèse 1: la répartition spatiale des conducteurs statoriques est sinusoïdale, la distribution spatiale de la force magnétomotrice (m.m.f.) l'est aussi ; les harmoniques spatiales de la distribution du flux sont négligées .

Hypothèse 2: les pertes par hystérésis et par courant de Foucault sont supposées nulles ;

Hypothèse 3: les circuits magnétiques sont linéaires (non saturés) ;

Hypothèse 4: la composante homopolaire est supposée nulle pour les grandeurs statoriques, i.e. le système polyphasé est équilibré.

III.3.1. Equations magnétiques

Les flux de la machine s'écrivent comme suit:

$$[\Psi_s] = [L_s][i_s] + [M_{sf}][i_f] \quad (\text{III.18})$$

$$[\Psi_f] = [L_f][i_f] + [M_{fs}][i_s] \quad (\text{III.19})$$

III.3.2. Équations électriques

La loi des mailles, appliquée sur les phases statoriques et rotorique dans les axes abc, donne les équations suivantes [14]:

$$\begin{cases} [v_{sabc}] = [R_s i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{sabc}] \\ [v_f] = [R_f i_f] + \frac{d}{dt} [\Psi_f] \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

III.3.3. Equations électriques dans le repère de Park (d q)

Les deux bobines sur les axes (d , q) tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d , q), nous permettent

de passer du repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine.

En réalité, la transformation de Park n'est qu'une rotation de la transformation de Clark (conservation des amplitudes) ou bien de Concordia (conservation des puissances ou Park Modifiée) définie par la matrice « $[P(\theta)]$ » reliant les grandeurs des deux domaines « abc » et « dq » par l'équation [4]:

$$x_{dq} = [P(\theta)] \cdot x_{abc} \Rightarrow x_{abc} = [P(\theta)]^{-1} \cdot x_{dqo} \quad (\text{III.21})$$

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}; \quad (\text{III.22})$$

$$[v_{abc}] = R_s [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{sabc}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [v_{dq}] \quad (\text{III.23})$$

A partir du modèle de la machine électrique généralisée dans le plan « dq », on peut écrire [15]:

$$\begin{cases} -U_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_r \Psi_{sq} \\ -U_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \omega_r \Psi_{sd} \\ U_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

Pour les flux:

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = L_d i_{sd} + M_{fd} i_f \\ \Psi_{sq} = L_q i_{sq} \\ \Psi_f = L_f i_f + M_{fd} i_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

En tenant compte du système (III.25), le système des tensions devient:

$$\begin{cases} -U_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} (L_d i_{sd} + M_{fd} i_f) - \omega_r L_q i_{sq} \\ -U_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} (L_q i_{sq}) + \omega_r (L_d i_{sd} + M_{fd} i_f) \\ U_f = R_f i_f + \frac{d}{dt} (L_f i_f + M_{fd} i_{sd}) \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

Mise sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} -U_{sd} \\ -U_{sq} \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_r L_q & 0 \\ \omega_r L_d & R_s & \omega_r M_{fd} \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_{fd} \\ 0 & L_q & 0 \\ M_{fd} & 0 & L_f \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

A vide, les courants des phases statoriques sont nuls ($i_{sd} = i_{sq} = 0$), alors le système (III.26) devient:

$$\begin{cases} -U_{sd} = M_{fd} \frac{di_f}{dt} \\ -U_{sq} = \omega_r \cdot M_{fd} i_f \\ U_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

Il ne reste donc qu'une seule équation différentielle représentant l'état de la génératrice synchrone fonctionnant à vide,

$$\frac{di_f}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} i_f + \frac{U_f}{L_f} \quad (\text{III.29})$$

Dans le cas où la génératrice alimente une charge R-L avec une tension d'excitation $U_f=220V$; Le système est de la forme (III.27), avec:

$$\begin{cases} U_{sd} = R_{ch} i_{sd} + L_{ch} \frac{di_{sd}}{dt} \\ U_{sq} = R_{ch} i_{sq} + L_{ch} \frac{di_{sq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

Si on remplace les expressions de U_{sd} , U_{sq} dans le système (III.28), on obtient le système suivant:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + R_{ch}) & -\omega_r L_q & 0 \\ \omega_r L_d & (R_s + R_{ch}) & \omega_r M_{fd} \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (L_d + L_{ch}) & 0 & M_{fd} \\ 0 & (L_q + L_{ch}) & 0 \\ M_{fd} & 0 & L_f \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} \quad (\text{III.31})$$

le système (III.31) peut s'écrire sous la forme:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} = [L]^{-1} \left(- \begin{bmatrix} (R_s + R_{ch}) & 0 & 0 \\ 0 & (R_s + R_{ch}) & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} - \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -L_q & 0 \\ L_d & 0 & M_{fd} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} (L_d + L_{ch}) & 0 & M_{fd} \\ 0 & (L_q + L_{ch}) & 0 \\ M_{fd} & 0 & L_f \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_f \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (III.32)$$

III.3.4. La matrice sous forme d'équation d'état

le système (III.32) est de la forme:

$$\frac{d}{dt} [X] = [A][X] + [B][U] \quad (III.33)$$

Avec:

$$\begin{aligned} [A] &= -[L]^{-1}[Z] \quad \text{et} \quad [B] = [L]^{-1} \\ [X] &= \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [U] = \begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \\ U_f \end{bmatrix} \\ [Z] &= \begin{bmatrix} (R_s + R_{ch}) & 0 & 0 \\ 0 & (R_s + R_{ch}) & 0 \\ 0 & 0 & L_f \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -L_q & 0 \\ L_d & 0 & M_{fd} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ [L]^{-1} &= \begin{bmatrix} (L_d + L_{ch}) & 0 & M_{fd} \\ 0 & (L_q + L_{ch}) & 0 \\ M_{fd} & 0 & L_f \end{bmatrix}^{-1} \end{aligned}$$

Dans le cas de l'absence des enroulements amortisseurs, l'expression du couple est:

$$C_e = \frac{3}{2} p \left((L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} + M_{fd} i_f i_{sq} \right) \quad (III.34)$$

III.4. Conclusion

La modélisation permet de guider les développements par une quantification des phénomènes. En outre elle est d'un apport précieux en permettant d'une part de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement et d'autre part de prévoir des comportements de système plus variés que ceux de l'observation expérimentale.

Au cœur de ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'un générateur diesel. La première partie étant réservée à la modélisation du moteur diesel et le second à la modélisation de la génératrice synchrone. Le but de la dernière partie est de montrer comment la machine synchrone peut être utilisée dans des applications d'entraînements réglés. La machine synchrone n'est pas un système simple, car de nombreux phénomènes compliqués interviennent dans son fonctionnement, comme la saturation, les courants de *Foucault*, l'effet pelliculaire ...etc. Cependant, nous n'allons pas tenir compte de ces phénomènes, car d'une part, leur formulation mathématique est difficile, d'autre part, leur incidence sur le comportement de la machine est considérée comme négligeable dans certaines conditions. Ceci nous permet d'obtenir des équations simples, qui traduisent fidèlement le fonctionnement de la machine.

D'abord on commence par poser les équations en grandeurs de phases. Puis, en appliquant la transformation de *Park*, un système réduit est obtenu qui nous servira pour la simulation numérique de notre système.

*CHAPITRE IV:
SIMULATION ET
DISCUSSION (PAR
MATLAB/SIMILINK)*

IV.1. Introduction

Le principe est semblable à celui utilisé pour la simulation analogique mais tout ce qui était réalisé avec du "matériel" sera remplacé par un logiciel exécuté par un ordinateur.

Le réglage des paramètres effectué à l'aide du clavier est beaucoup plus aisé que sur les simulateurs analogiques, une liaison "physique" avec l'extérieur est possible grâce aux cartes de conversion analogique numérique d'entrée et numérique de sortie.

IV.2. Présentation de l'environnement MATLAB/SIMULINK™

MATLAB est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Le noyau de calcul est associé à l'environnement SIMULINK, permettant une modélisation basée sur des schémas-blocs.

Des bibliothèques spécialisées sont disponibles (les "Toolboxes") pour la plupart des domaines scientifiques nécessitant des moyens de calcul importants : automatique, traitement de signal, mathématiques appliquées, télécommunications, etc.

Des modules temps réel, développés autour des produits dSPACE (Real Time Interface, TRACE, COCKPIT) sont également proposés et rendent l'environnement de travail particulièrement attractif : l'utilisateur dispose en effet de tous les outils nécessaires à l'élaboration d'une application sur procédé réel, de la simulation à la supervision.

IV.2.1. Matlab

Un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc. il peut être utilisé de façon interactive ou en mode programmation. En mode interactif,

L'utilisateur a la possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter les résultats sous forme numérique ou graphique. En mode programmation, il est possible d'écrire des scripts (programmes) comme avec d'autres langages l'utilisateur peut aussi créer ses propres fonctions pouvant être appelées de façon interactive ou par des scripts. Ces fournissent à MATLAB un atout inégalable : son extensibilité. Ainsi, l'environnement

MATLAB peut facilement être étendu. Dans MATLAB, l'élément de base est la matrice. L'utilisateur ne s'occupe pas des allocations de mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime partie du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le Fortran. MATLAB s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire MATLAB est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique. Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage. MATLAB est une abréviation de MATrix LABoratoire. écrit à l'origine, en Fortran, par Cleve Moler, MATLAB était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets LINPACK et EISPACK.

IV.2.2. Simulink

(SIMULINK) est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires ; une (MATLAB), dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes. On distingue alors particulièrement bien les contre-réactions, les couplages réciproques, les non-linéarités, etc. les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques, à savoir addition, soustraction, multiplication avec un coefficient, intégration et différentiation, ainsi que la multiplication et la division de deux variables et la fonction non linéaire d'une variable. SIMULINK possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme de graphiques ou de valeurs numériques en cours de simulation. Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être modifiés en ligne, c'est-à-dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement. SIMULINK est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (bibliothèques) classés par catégories. Les principales bibliothèques sont montrées dans le tableau.

IV.3. Avantage de la simulation numérique

Grâce aux performances des logiciels par exemple Matlab, Matrix, Sysst, ..., nous permet de simuler les modèles non linéaires, ces logiciels permettent aussi de :

- Tracer le schéma fonctionnel sur l'écran de l'ordinateur.
- Entrer en mémoire les valeurs des coefficients des fonctions de transfert.
- Simuler les entrées.
- Enregistrer les grandeurs significatives.
- Tracer les réponses temporelles ou fréquentielles à l'écran puis les sortir sur "papier" à l'aide d'une imprimante en mode graphique.

Dans cette étude nous avons utilisé le *MATLAB/SIMULINK* comme moyen de simulation de notre système.

IV.4. Description

Un modèle générique du système est présenté dans ce travail (Figure IV.1). Cette technologie a été développée par Hydro-Québec pour réduire le coût de l'approvisionnement en électricité dans les collectivités nordiques éloignées. La pénétration optimale du vent (capacité de vent installée / demande électrique maximale) pour ce système dépend du coût de livraison du combustible et des ressources éoliennes disponibles sur le site. Notre système utilise une machine synchrone de 480 V, 300 kVA, une éolienne entraînant un générateur à induction de 480 V, 275 kVA, une charge client de 50 kW et une charge secondaire variable (0 à 446,25 kW).

Aux basses vitesses du vent, le générateur d'induction et le générateur synchrone à moteur diesel sont nécessaires pour alimenter la charge. Lorsque l'énergie éolienne dépasse la demande de charge, il est possible d'arrêter le générateur diesel. Dans ce mode tout-vent, la machine synchrone est utilisée comme condenseur synchrone et son système d'excitation contrôle la tension du réseau à sa valeur nominale. Un banc de charge secondaire est utilisé pour réguler la fréquence du système en absorbant l'énergie éolienne qui dépasse la demande du consommateur.

Le bloc éolien utilise une table de conversion 2D pour calculer la sortie du couple de la turbine (T_m) en fonction de la vitesse du vent (w_{Wind}) et de la vitesse de la turbine (w_{Turb}). Lorsque vous avez ouvert cette démonstration, les caractéristiques $P_m(w_{Wind}, w_{Turb})$ ont été automatiquement chargées dans votre espace de travail (tableau

psbwindgen_char). Pour afficher les caractéristiques de la turbine, double-cliquez sur le bloc situé sous le bloc d'éolienne.

Le bloc de charge secondaire se compose de huit ensembles de résistances triphasées connectés en série avec des commutateurs à thyristor GTO. La puissance nominale de chaque ensemble suit une progression binaire de sorte que la charge peut varier de 0 à 446,25 kW par pas de 1,75 kW. Les GTO sont simulés par des commutateurs idéaux.

La fréquence est contrôlée par le bloc du régulateur de fréquence. Ce contrôleur utilise un système PLL (Phase Locked Loop) triphasé standard pour mesurer la fréquence du système. La fréquence mesurée est comparée à la fréquence de référence (60 Hz) pour obtenir l'erreur de fréquence. Cette erreur est intégrée pour obtenir l'erreur de phase. L'erreur de phase est ensuite utilisée par un contrôleur proportionnel-dérivateur (PD) pour produire un signal de sortie représentant la puissance de charge secondaire requise. Ce signal est converti en un signal numérique de 8 bits commandant la commutation des huit charges secondaires triphasées. Afin de minimiser les perturbations de tension, la commutation est effectuée au passage à zéro de la tension.

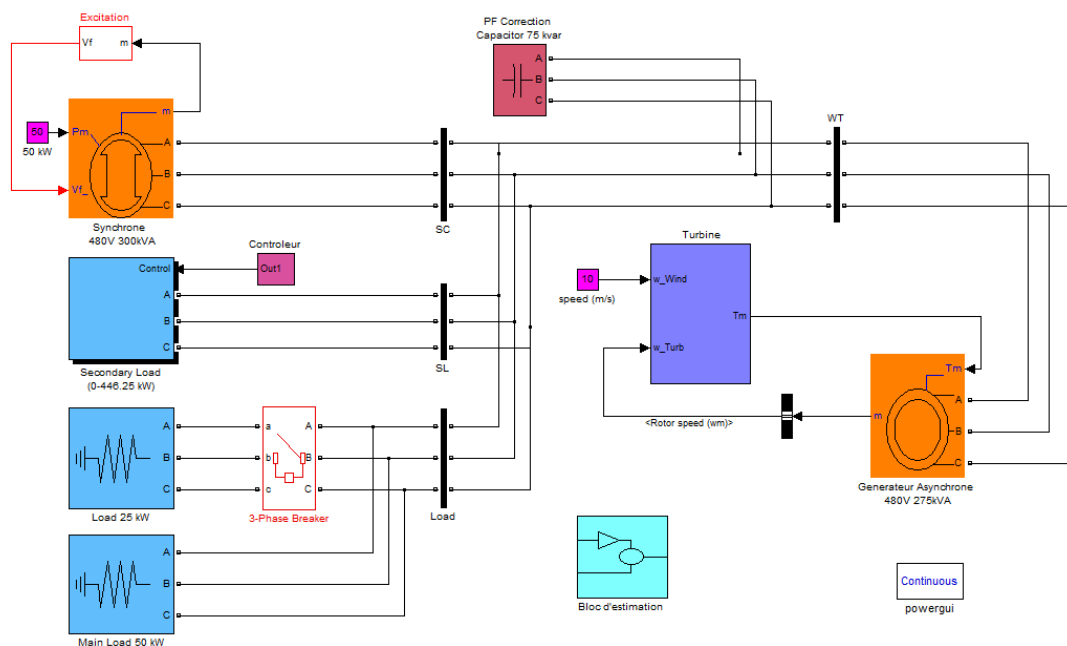


Figure IV.1: Schéma bloc global de système.

IV.5. Les résultats

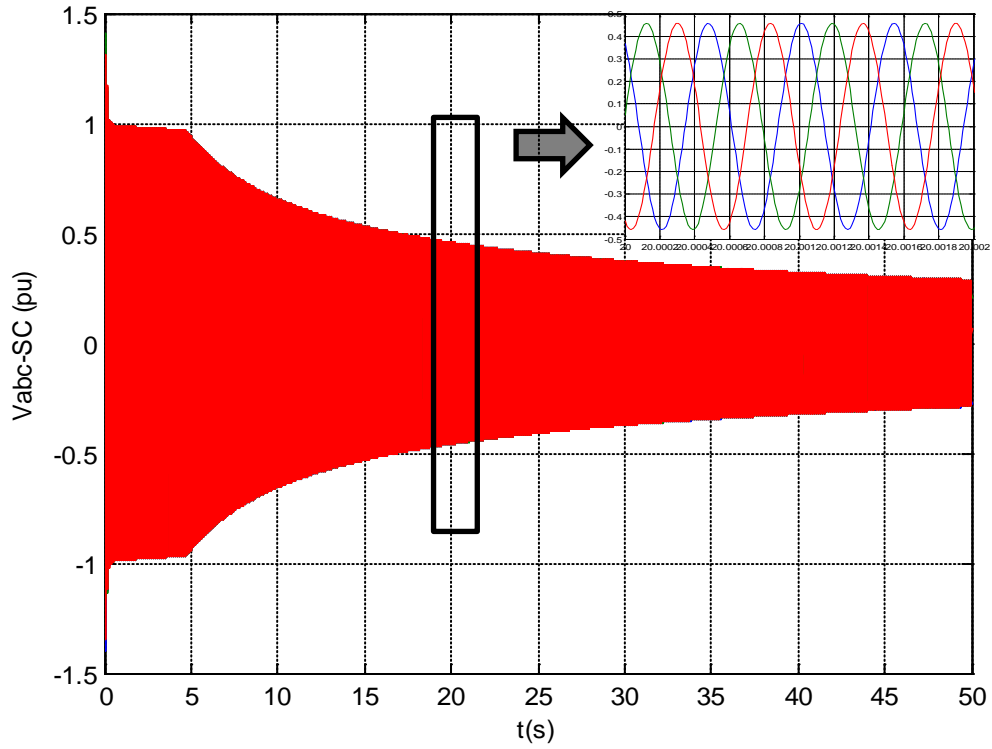


Figure IV.2: La tension d'alimentation de la MS.

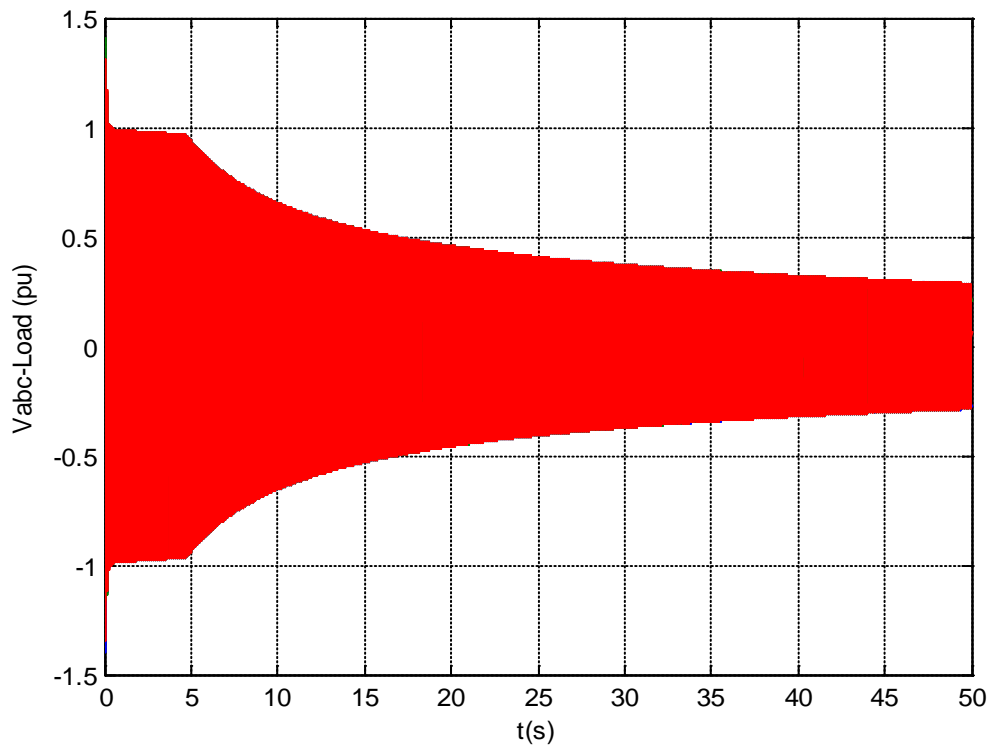


Figure IV.3: La tension de la charge principal.

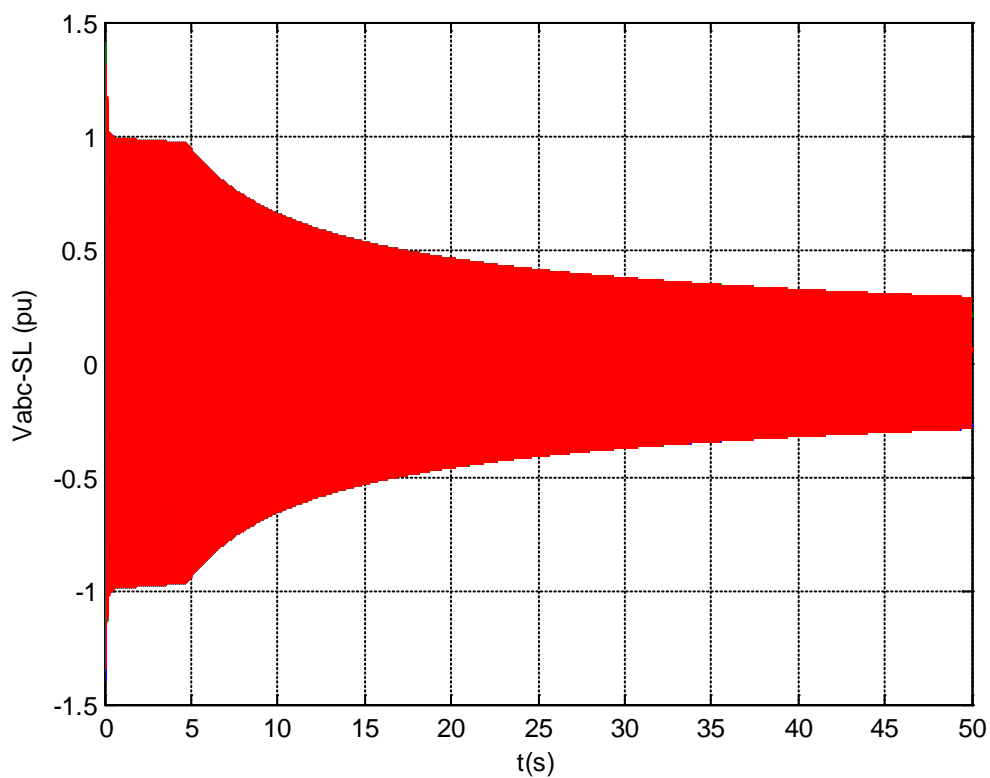


Figure IV.4: La tension de la charge secondaire.

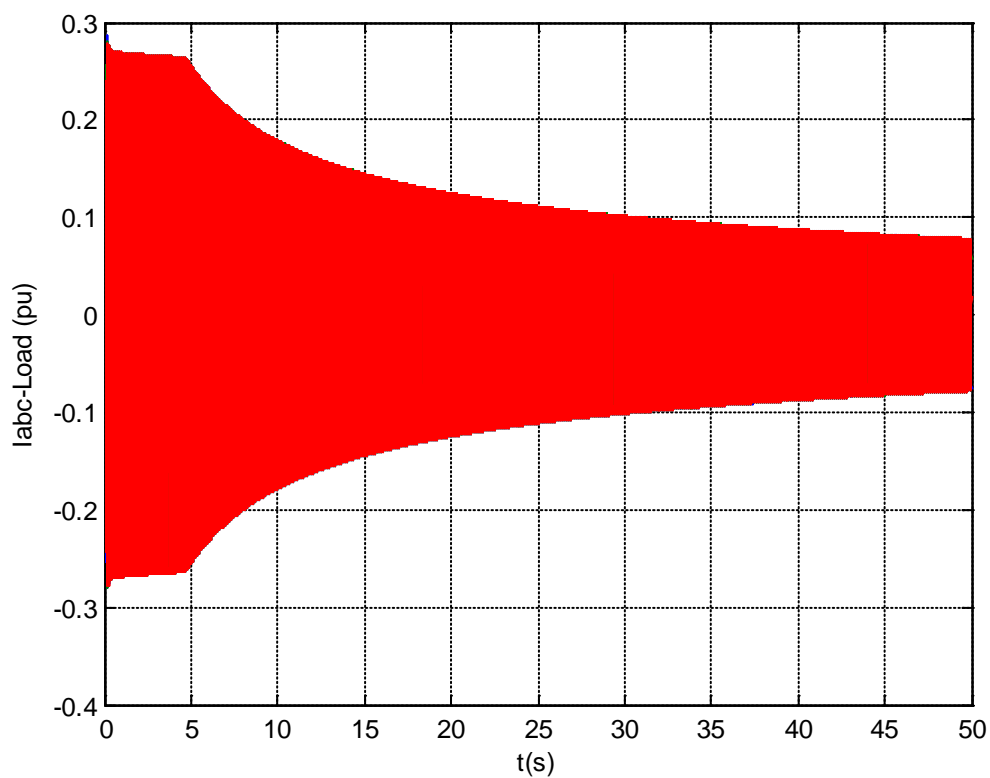


Figure IV.5: Le courant de la charge principal.

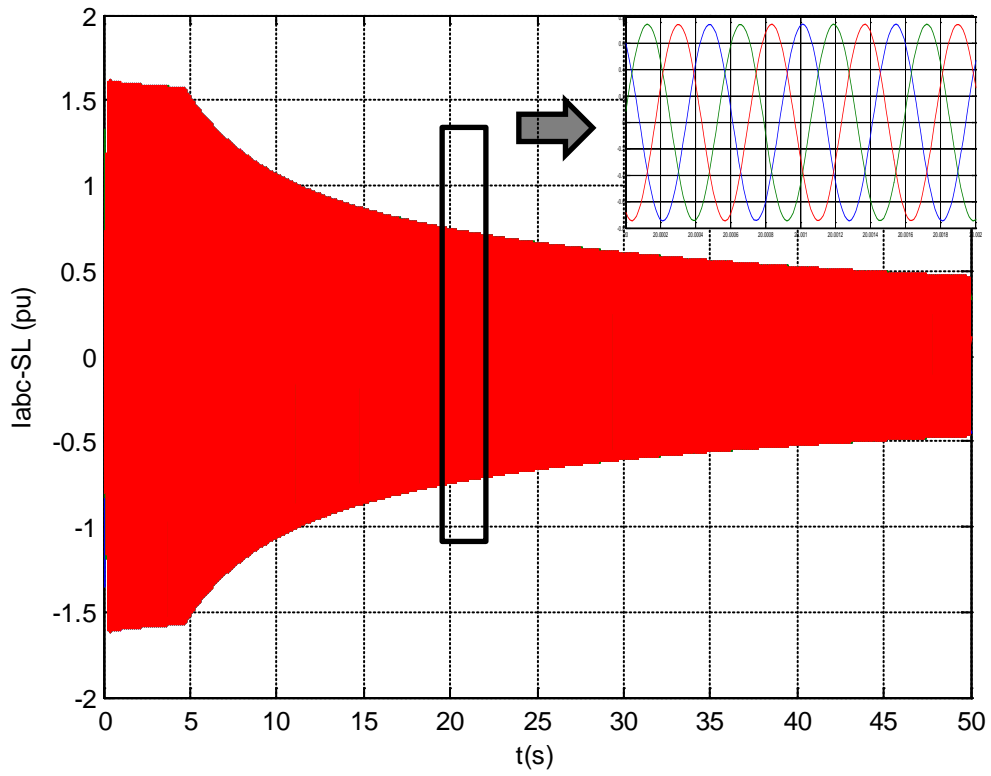


Figure IV.6: Le courant de la charge secondaire.

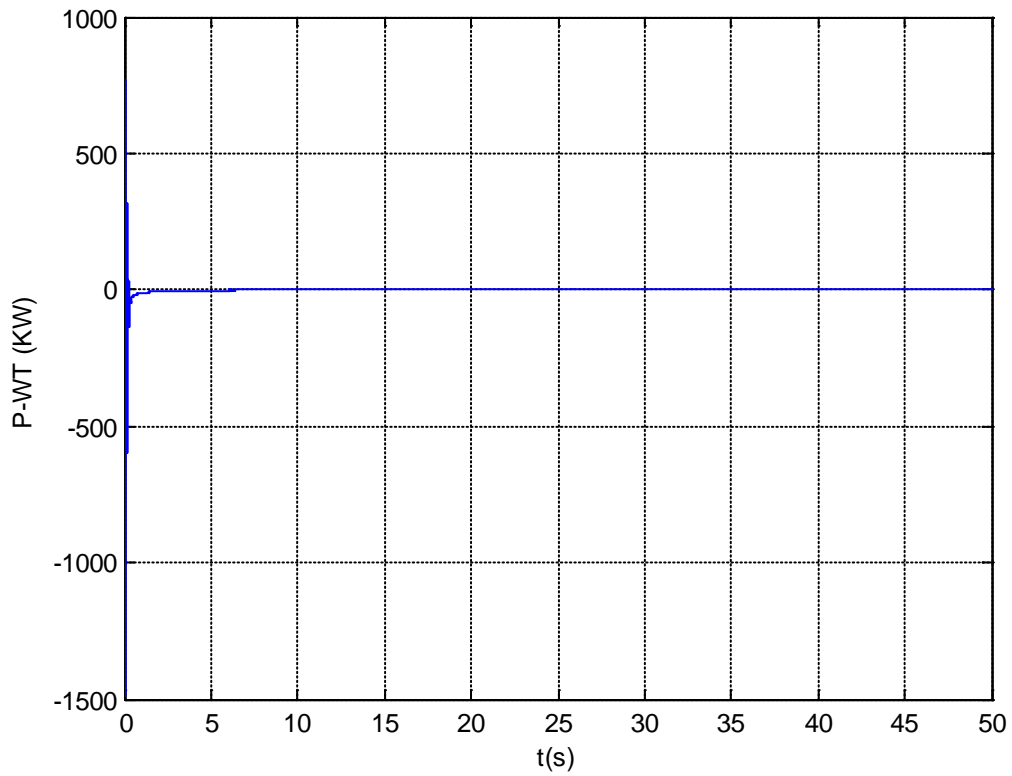


Figure IV.7: La puissance de la turbine éolienne.

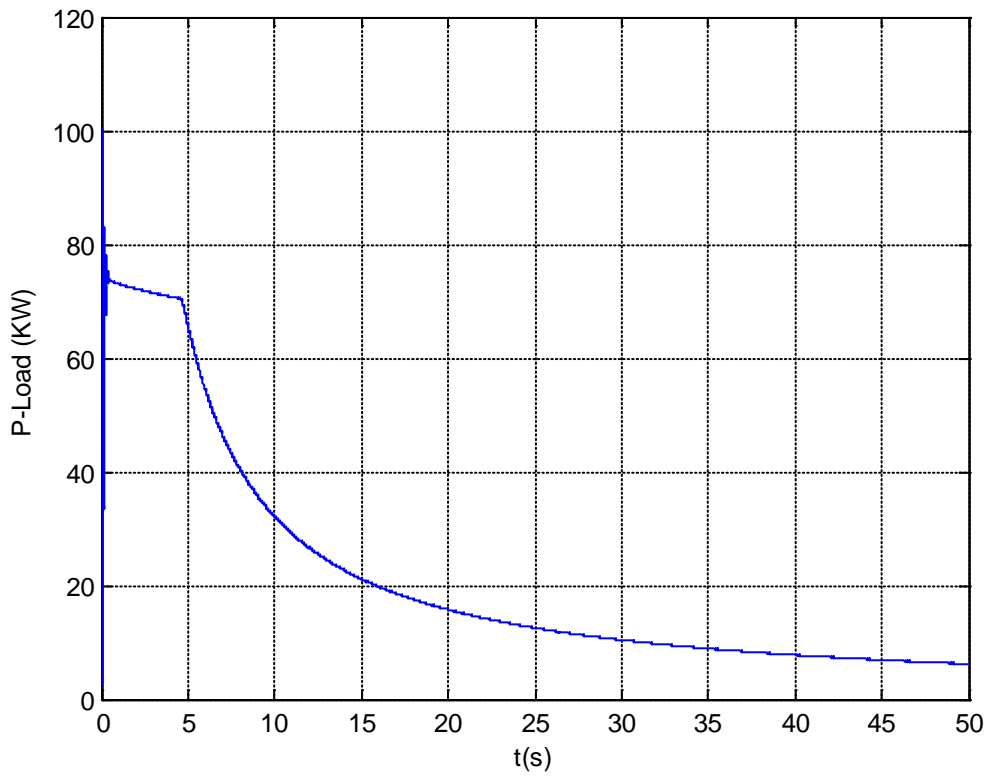


Figure IV.8: La puissance de la charge principal.

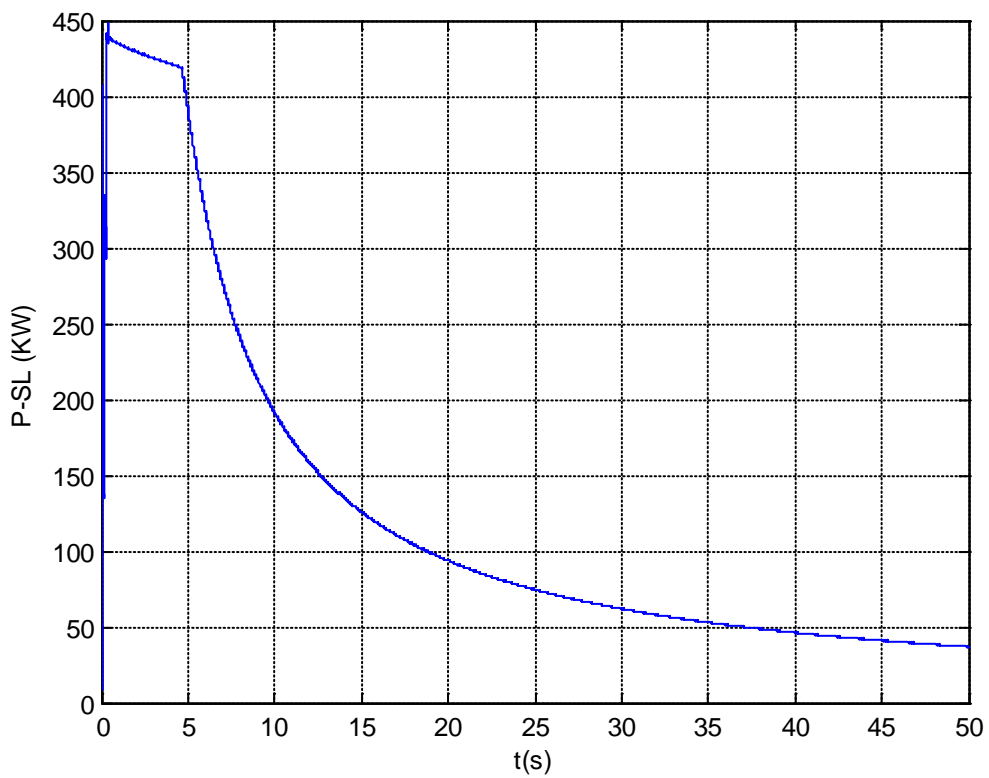


Figure IV.9: La puissance de la charge secondaire.

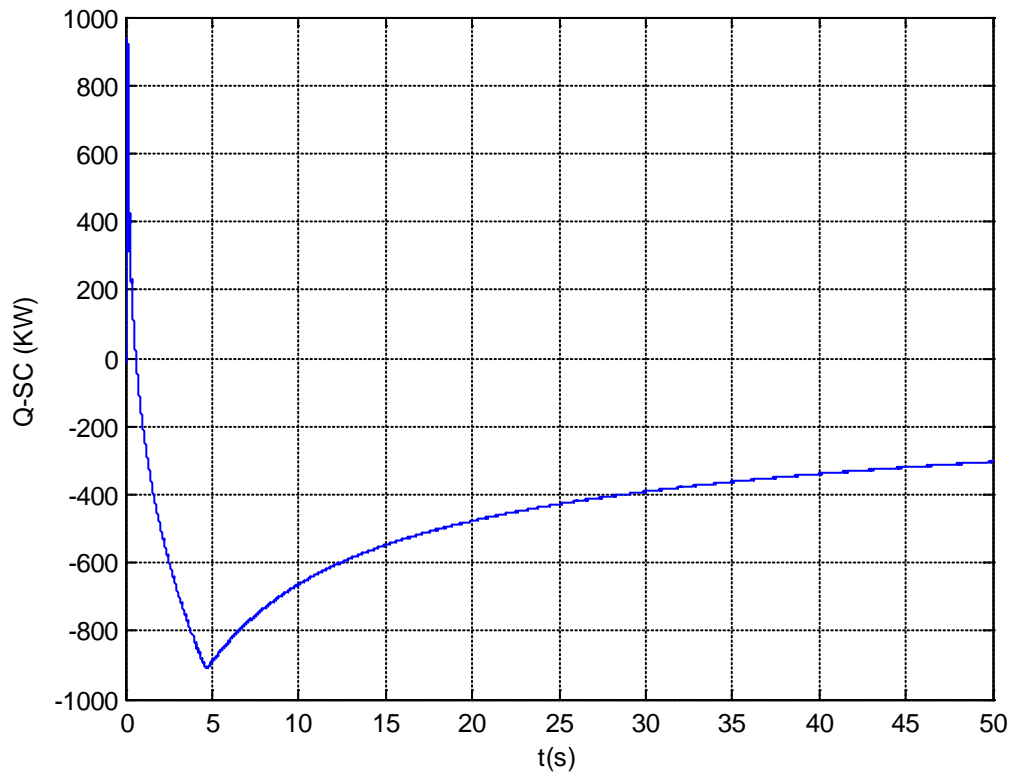


Figure IV.10: La puissance réactive de générateur synchrone.

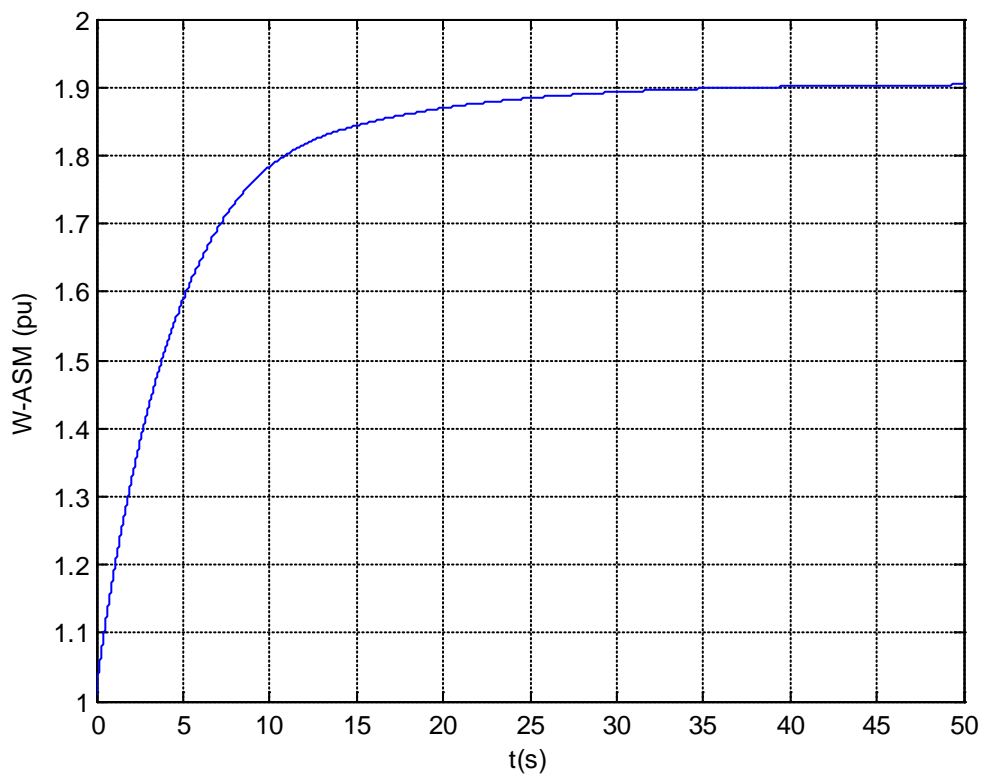


Figure IV.11: La vitesse de la MAS.

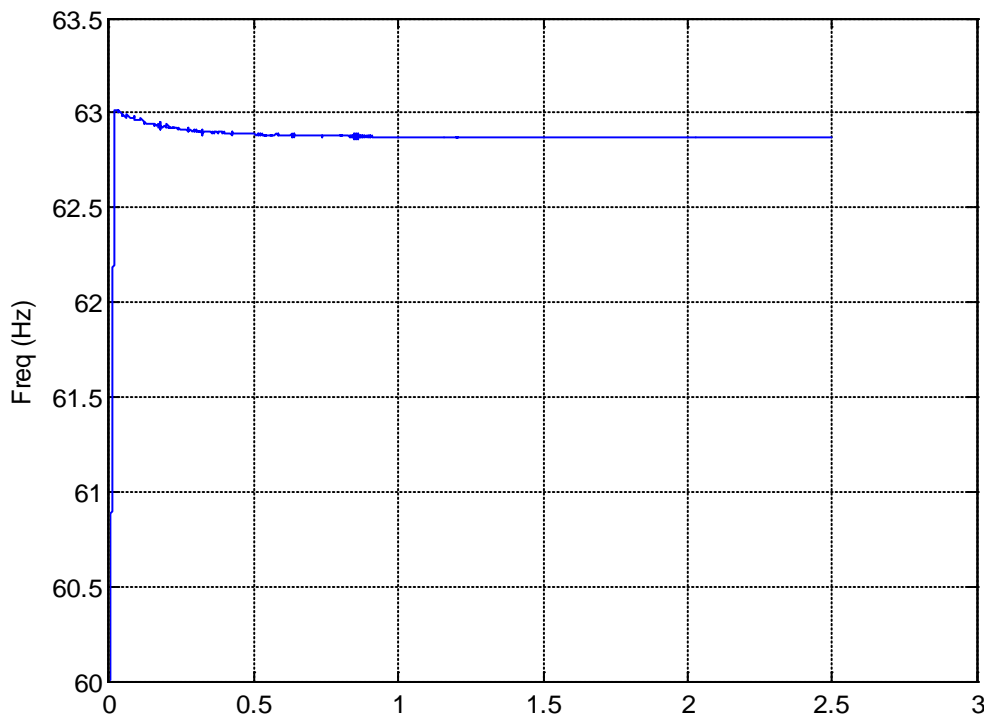


Figure IV.12: La fréquence.

IV.6. discussion

Pour la démonstration, la vitesse du vent (10m / s) est telle que l'éolienne produit suffisamment de puissance pour alimenter la charge. Le générateur diesel (non simulé) est arrêté et la machine synchrone fonctionne comme un condensateur synchrone avec son entrée de puissance mécanique (P_m) réglée à zéro. La démonstration illustre les performances dynamiques du système de régulation de fréquence lorsqu'une charge supplémentaire de 25 kW est activée.

Comme la machine asynchrone fonctionne en mode générateur, sa vitesse est légèrement supérieure à la vitesse synchrone (1.011 pu). Selon les caractéristiques de la turbine, pour une vitesse de vent de 10 m / s, la puissance de sortie de la turbine est de 0,75 pu (206 kW). En raison des pertes de machine asynchrones, l'éolienne produit 200 kW. Comme la charge principale est de 50 kW, la charge secondaire absorbe 150 kW pour maintenir une fréquence constante de 60 Hz. À $t = 0,2$ s, la charge supplémentaire de 25 kW est activée. La fréquence chute momentanément à 59,85 Hz et le régulateur de fréquence réagit pour réduire la puissance absorbée par la charge secondaire afin de ramener la fréquence à 60 Hz. La tension reste à 1 pu et aucun scintillement n'est observé.

IV.7. Conclusion

Ce chapitre permet essentiellement de retrouver les résultats désirés tel que: Le courant de la charge secondaire, la tension d'alimentation de la MS, les puissance des charges principal et secondaire et celle de la turbine éolienne ainsi que la puissance réactive de générateur synchrone, la vitesse de la MAS et finalement la fréquence obtenu.

D'après les analyses des résultats de simulation obtenu on constate que on a atteint les objectifs fixés qui sont principalement deux:

- Le premier c'est d'assuré une alimentation permanente vert les charges.
- Le second est de réalisé un système adaptatif au variation de la vitesse du vent.

Conclusion générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

Do nos jour, une grande partie de production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les futures générations[16].

Par l'énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des micro turbines.

Le problème major de énergie renouvelable c'est qu'elle est dépendante des conditions climatiques, cette dernière est variable tout le temps. On à deux solutions pour cette problématique, soit de coupler les générateurs par un système de stockage pour assurer la continuité d'alimentation en énergie, ou bien d'installer un groupe électrogène fonctionne d'une façon complémentaire avec le générateur qui utilise les sources renouvelables, et c'est le cas de notre travail.

Donc notre système c'est une turbine éolienne alimenté avec un générateur diesel à vitesse variable, la variation de vitesse est inversement proportionnelle à la vitesse de la turbine pour assurer la continuité d'alimentation d'énergie en terme présence et valeur.

Comme nous avons dit au quatrième chapitre et d'après les analyses des résultats de simulation obtenu on constate que on a atteint les objectifs fixés qui sont principalement deux:

- Le premier c'est d'assuré une alimentation permanente vert les charges.
- Le second est de réalisé un système adaptatif au variation de la vitesse du vent.

le travail qui nous avons réalisée peut faire exécuté pratiquement au niveau des sites isolés ou dans les endroits sensibles comme par exemple les hôpitaux de campagne. Mais ce travail reste incomplète, par ce que l'utilisation de deux types de source reste insuffisante, donc on propose d'ajouter une nouvelle type de source au système comme par exemple les PV.

Bibliographie

- [1] Omar FEDDAOUI, *Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables*, mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, 2013-2014.
- [2] Frédéric POITIERS, *ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE -Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau*, Thèse de Doctorat , Université Nantes, 2003.
- [3] Mohammed Tahar LATRECHE, *Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien*, Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Setif, 2012.
- [4] Hassen BOUKHAMKHAM, *Diagnostic des défaillances dans une machine asynchrone utilisée dans une chaîne éolienne*, Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2011.
- [5] Ramdane LATEB, *MODELISATION DES MACHINES ASYNCHRONES ET SYNCHRONES A AIMANTS AVEC PRISE EN COMPTE DES HARMONIQUES D'ESPACE ET DE TEMPS : Application à la propulsion marine par POD*, Thèse de Doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006.
- [6] Zahi SABEH, *Diagnostic à base de modèle : application à un moteur diesel suralimenté à injection directe*, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine- Centre de Recherche en Automatique de Nancy, 2006.
- [7] Hussein IBRAHIM, *ETUDE ET CONCEPTION D'UN GENERATEUR HYBRIDE D'ELECTRICITE DE TYPE ÉOLIEN-DIESEL AVEC ÉLÉMENT DE STOCKAGE D'AIR COMPRIMÉ*, Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ DU QUEBEC À CHICOUTIMI, 2010.
- [8] Nicolas BERNARD, *MACHINE SYNCHRONE : DE LA BOUCLE OUVERTE A L'AUTOPILOTAGE*, 3EI.n° 30. 2002. pp. 24-39.
- [9] Naouel HAMDI, *Modélisation et commande des génératrices éoliennes*, Mémoire de Magister, Université MENTOURI de CONSTANTINE, 2008.
- [10] Saliha MAGHSEL, *CONTRIBUTION A LA MODELISATION ET LA COMMANDE D'UNE TURBINE EOLIENNE*, Mémoire de Magister, UNIVERSITE DU 20 AOÛT 1955 – SKIKDA 2010-2012.
- [11] Mouloud BOUARAKI, *Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF*, Mémoire de Magister, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 2011/2012.
- [12] Hacene GUERGAT, *Etude éolienne à base d'une machine asynchrone double stator type BDFM*, Mémoire de Magister, UNIVERSITE DU 20 AOÛT 1955 – SKIKDA, 2014.

- [13] TOMMY ANDY THEUBOU TAMEGHE, *MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN SYSTÈME DE JUMELAGE ÉOLIEN-DIESEL ALIMENTANT UNE CHARGE LOCALE*, Mémoire de LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 2012.
- [14] Mohamad KOTEICH, *Modélisation et Observabilité des Machines Électriques en vue de la commande sans capteur mécanique*, Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 2016.
- [15] Rachid ABDESSEMED, *Modélisation et simulation des machines électriques*. ellipses. 2011, France.
- [16] Angel Cid Pastor, *Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques*, thèse de doctorat de l'institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Septembre 2006.

Résumé

Titre du mémoire : Modélisation et simulation d'un générateur asynchrone à turbine éolienne.

Master : Electromécanique.

Auteur : OUBBICHE Mahieddine et ABIKCHI Mohammed.

Mots clés : générateur diesel, turbine éolienne, génératrice synchrone, génératrice asynchrone.

Résumé :

le travail effectué porte sur une étude d'un système d'alimentation de énergie électrique pour deux types des charges, une principale et l'autre secondaire, et cela par deux types des sources électriques. La première source est une turbine éolienne et la seconde est un générateur diesel à vitesse variable fonctionne comme un complément pour assurer une continuité d'alimentation par l'énergie électrique en terme présence et valeur. la simulation de système a été faite, et tous les résultats sont effectué et interprété.

Report title: Modeling and simulation of wind turbine asynchronous generator.

Keywords: diesel generator, wind turbine, synchronous generator, asynchronous generator.

Abstract:

The work carried out concerns a study of an electric power supply system for two types of loads, one main and the other secondary, and this by two types of electric sources. The first source is a wind turbine and the second is a variable speed diesel generator that works as a complement to ensure continuity of power supply by electricity in terms of presence and value.

the system simulation was done, and all the results are done and interpreted.

عنوان المذكرة: نمذجة و محاكاة مولد غير متزامن لتوربين الرياح.
الكلمات المفتاحية: مولد الديزل ، توربين الرياح ، مولد متزامن ، مولد غير متزامن.

الملخص:

يتعلق العمل المنجز بدراسة نظام تزويد الطاقة الكهربائية لنوعين من الأحمال ، أحدهما رئيسي والآخر ثانوي ، وهذا بواسطة نوعين من المصادر الكهربائية. المصدر الأول هو توربين الرياح ، والثاني هو مولد ديزل متغير السرعة يعمل كمكمل لضمان استمرارية الإمدادات بالطاقة الكهربائية من حيث التواجد والقيمة. تم تنفيذ محاكاة النظام ، وتم إنجاز جميع النتائج وتفسيرها.