

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA



Faculté De Technologie
Département de Génie Électrique
Spécialité : Électrotechnique



En vue de l'obtention du diplôme master en électrotechnique
Spécialité : Energies renouvelables

Thème

ETUDE D'UN ÉMULATEUR ÉOLIEN

Réalisé par :

TABET Celia

LAHCENE Assalasse

Encadré par :

Pr. T. Rekioua

Mr. S. Ihammouchen

Promotion 2022/2023

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier tout le personnel de l'université de Bejaia pour L'écoute, l'accompagnement et la formation dont nous avons pu bénéficier.

*Nous souhaiterions remercier notre promoteur **Pf T. REKIDUA** Directeur du laboratoire de technologie industrielle et de l'information (LTII) pour son accueil chaleureux et ses conseils pertinents, ainsi que notre Co-promoteur **Mr. S IHAMMOUCHEN** pour sa patience, sa persévérance, sa sincérité et son encadrement de qualité.*

*Nous remercierons très sincèrement le **Pf D. Rekioua** pour la transmission de son savoir au cours des deux années de notre formation, sans oublier l'ensemble du personnel du laboratoire pour leur accueil et leur bienveillance, et particulièrement **Mr. A. Oubelaid**.*

Nous adresserons aussi un merci à nos camarades avec qui nous avons passé des moments inoubliables tout au long de notre parcours,

Pour finir, nous souhaitons remercier du fond du cœur nos parents pour leurs efforts inestimables, leurs sacrifices, leurs amours et surtout d'avoir toujours cru en nous

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

Mes précieux grands parents Chabour Chabane et Saadia, Tabet Ferhat et Tamazouzt

Mes cher parents Dahbia et Nacer

Ma cher sœur Louiza

Mes très chers cousins Yidhir, Yanis, Massi, Thisiri, Djedjiga et Alycia

Mes sœurs de cœur Amina et Kenza

Mes oncles paternel Boussad et Lyazid ainsi que leurs femmes

Ma petite cousine Dyhia

Mes aimables oncles et tantes maternels

Mes amis Massilia, Kamelia, Aida, Djamila, Nada et Warda.

Celia TABET

Dédicaces

Ce mémoire de fin d'études est dédié à vous, qui avez été les piliers de ma vie et les sources de mon soutien inconditionnel. Votre amour, votre patience et votre encouragement ont été les moteurs qui m'ont poussé à aller au-delà de mes limites et à poursuivre mes rêves.

À ma mère, qui a été ma plus grande inspiration et ma meilleure amie.

À la mémoire de mon père, qui continue de vivre dans mon cœur.

À mes frères et sœurs et ma future femme, qui ont été mes compagnons de route et mes partenaires de confiance.

À ma famille et mes amis, qui ont été toujours été présente pour moi.

Que cette dédicace soit le témoignage de ma gratitude éternelle envers chacun de vous. Votre présence dans ma vie a fait de moi la personne que je suis aujourd'hui, et je vous en suis infiniment reconnaissant.

LAHCENE ASSALASSE

Tables des matières

Tables des matières.....	I
Introduction générale.....	1
I. Chapitre I : Généralités sur les systèmes de conversion d'énergie éolien	2
I.1 Introduction.....	3
I.2 L'énergie éolienne.....	3
I.3 Les aérogénérateurs.....	3
I.3.1 Les composants d'une éolienne	4
I.3.2 Types et applications des éoliennes	5
I.3.3 Phases de fonctionnement d'une éolienne.....	8
I.3.4 Avantages et inconvénients	9
I.3.5 Topologies des systèmes de conversion de l'énergie éolienne (SCEE).....	9
I.4 Machine asynchrone.....	11
I.5 Les convertisseurs statiques associés aux aérogénérateurs	12
I.5.1 Redresseur (AC/DC)	12
I.5.2 Les convertisseurs DC/DC	13
I.6 Conclusion	15
II. Chapitre II : Modélisation et contrôle de la chaîne de conversion éolienne	16
II.1 Introduction.....	17
II.2 Modèle de la turbine.....	17
II.3 Modélisation de la machine asynchrone.....	20
II.3.1 Hypothèses simplificatrices	20
II.3.2 Modèle généralisé triphasé de la MAS.....	21
II.3.3 Les équations de la machine asynchrone.....	21
II.3.4 Transformation de PARK.....	23
II.3.5 Modélisation de la MAS dans le repère de PARK.....	24
II.3.6 Choix du référentiel.....	25
II.4 Modélisation du redresseur	26
II.5 Modélisation du convertisseur DC/DC	27
II.6 Modélisation du l'onduleur.....	29
II.6.1 Simulation de l'onduleur	30
II.7 Le filtrage.....	31
II.8 Stratégies de contrôle du SCEE	33
II.8.1 Contrôle coté aérogénérateur	33
II.8.2 Contrôle coté charge.....	35

II.9	Conclusion	36
III.	Chapitre III : Simulation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne	37
III.1	Introduction	38
III.2	Présentation du système global étudié	38
III.3	Simulation de la turbine associée à la GAS	38
III.3.1	Résultats et discussions	39
III.4	Simulation coté DC.....	42
III.4.1	Le redresseur.....	42
III.4.2	Hacheur élévateur (Boost).....	43
III.4.3	Le Bus DC	44
III.4.4	Résultats et discussions	44
III.5	Simulationcoté charge (AC).....	45
III.5.1	Onduleur avec charge.....	45
III.5.2	Dimensionnement du filtre	45
III.5.3	Résultats et discussions	45
III.6	Conclusion.....	47

Liste des figures

Chapitre I Généralités sur les systèmes de conversion d'énergie éolien

Figure (I.1): schéma de conversion de l'énergie éolienne.....	3
Figure (I.2) les composants modernes d'une éolienne	4
Figure (I.3) Schéma d'une éolienne horizontale présentant différentes configurations de pales.	5
Figure (I.4) éolienne [22].....	6
Figure (I.5) schéma d'une éolienne à axe verticale du type darrieus.	6
Figure (I.6) schéma d'une éolienne à axe verticale du type savonius	7
Figure (I.7) champs d'éoliennes ofshore	7
Figure (I.8) exemples d'éoliennes offshore	7
Figure (I.9) Évolution de la taille et de la puissance des éoliennes offshore entre 1985 et 2015	8
Figure (I.10) : zones de fonctionnement d'une éolienne	8
Figure (I.11) schéma d'une éolienne à vitesse fixe.	10
Figure (I.12) schéma d'une éolienne à vitesse fixe	10
Figure (I.14) caractéristiques couple/vitesse d'une GAS auto-excitée.....	12
Figure (I-13) Symbole d'un convertisseur AC/DC.....	13
Figure (I-14) Symbole d'un convertisseur DC/DC.....	13
Figure (I-15) schéma d'un convertisseur Buck.	13
Figure (I-16) schéma d'un convertisseur Boost.....	14
Figure (I-17) schéma d'un convertisseur (Buck-Boost).....	14
Figure (I.18). Schéma bloc d'un onduleur monophasé	14
Figure(I. 19). Schéma bloc d'un onduleur triphasé.....	15

Chapitre II Modélisation et contrôle de la chaîne de conversion éolienne

Figure (II. 1) Variation de C_p en fonction de la vitesse λ et de l'angle de calage β	18
Figure (II. 2) Schéma de simulation de la turbine éolien sous MATLAB/SIMULINK.....	19
Figure (II. 3) Puissance de la turbine en fonction de la vitesse du vent	20
Figure (II. 4) : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.	21
Figure (II. 5) : passage d'un système d'axes (abc) a un Système d'axes déphasés (dq)	24
Figure (II. 6) Représentation des axes biphasés (α , β), (x, y) et (d, q)	25
Figure (II. 7) Redresseur triphasé à diodes double alternance PD3	26
Figure (II. 8) Tension simple de phase et tension de sortie de redresseur.....	27
Figure (II. 9) Schéma électrique d'un hacheur boost.....	27
Figure (II. 10) Schéma électrique d'un hacheur boost.....	28
Figure (II. 11) Schéma électrique d'un hacheur K fermé.....	28
Figure (II. 12) Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert	29
Figure (II. 13) Allure des tensions V_m de la modulatrice et V_p de la porteuse	30
Figure (II. 14) allure de la tension de sortie de l'onduleur, (a) modulation unipolaire, (b) modulation bipolaire.....	31
Figure (II. 15) Schéma équivalent d'un filtre LC.....	32
Figure (II. 16) Schéma fonctionnel du contrôle proposé à la turbine.....	33
Figure (II. 17) Schéma fonctionnel de la MPPT associée à la turbine	33

Figure (II. 18) Régulation du bus DC.....	34
Figure (II. 19) Organigramme de la Mppt basée sur la P&O.	34
Figure (II. 20) Schéma de contrôle coté charge	35
Figure (II. 21) générations des signaux de commande.....	35
Figure (II. 22) Schéma de fonctionnel du contrôle coté charge	36

Chapitre III Simulation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

Figure (III. 1) Le schéma du système global	38
Figure (III. 2) Modèle Simulink du système éolien complet. Fait un schéma que montre uniquement.....	39
Figure (III. 3) (a) allure du couple électromagnétique, (b) la vitesse de rotation	39
Figure (III. 4) (a) allures des tensions V_{abc} , (b) allures des courant I_{abc}	40
Figure (III. 5) a : Allure de puissance active P, b : Allure de la puissance réactive Q.....	41
Figure (III. 6) schéma bloc du redresseur	43
Figure (III. 7) Schéma bloc du hacheur Boost	43
Figure (III. 8) a. Allure de la tension redressée V_{dc} , b. Allure de la tension V à la sortie du Boost.....	44
Figure (III. 9) schéma bloc de l'onduleur plus charge	45
Figure (III. 10) la tension de l'onduleur, (a) avant filtrage, (b) après filtrage	46
Figure (III. 11) (a), le courant de charge. (b) tension de charge	46

Liste des tableaux

Liste des Tableaux

Tableau 1. Influence de la variation de la capacité d'excitation sur la GAS	41
Tableau 2. Influence de la variation de la vitesse du vent sur la GAS	42
Tableau 3. Caractéristiques de la machine asynchrone	42
Tableau 4. Paramètres de la turbine.	42

Nomenclature

ρ : La densité du vent.

λ : Vitesse spécifique.

Ω_2 : Vitesse de rotation après multiplicateur.

Ω_s : Pulsation de synchronisme

ω : la vitesse rotorique

Ω_g : Vitesse de glissement

β : Angle de calage

J : Moment d'inertie

ϕ : Flux statorique, rotorique

θ : Angle électrique

m : Quantité d'air en mouvement

P_v : Puissance du vent

C_p : Coefficient de puissance

R : Rayon de l'aérogénérateur

V_v : Vitesse du vent

K : Rapport multiplicateur

P_{mg} : Puissance mécanique

p : Nombre de paires de pole

g : Glissement

n_s : Vitesse angulaire [tr/min]

f_s : La fréquence de synchronisme ou de commutation

T_e : couple électromagnétique

P : Puissance active

Q : Puissance réactive

C : La capacité

R : La résistance

L : L'inductance

S_n : La puissance apparente

Γ_t : Couple de la turbine éolienne

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions appliquées aux trois phases statoriques.

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$: Flux totaux à travers ces enroulements.

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Tensions rotoriques.

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Courants rotoriques.

$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$: Flux rotoriques.

R_s : Résistance d'une phase statorique.

R_r : Résistance d'une phase rotorique.

$[L_s]$: Matrice des inductances statoriques.

$[L_r]$: Matrice des inductances rotoriques.

$[Msr]$: Matrice des inductances mutuelles statoriques.

$[Mrs]$: Matrice des inductances mutuelles rotoriques.

L_s : Inductance propre d'une phase statorique.

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

θ : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statoriques et les axes rotoriques qui sont choisis comme axes des références.

M : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase Correspondent du rotor.

J : moment d'inertie du moteur asynchrone.

K_f : Coefficient de frottement visqueux.

C_r : Couple résistant.

ω : vitesse rotorique.

ΔT : est le retard du temps requis par la commande pour ajuster la puissance sortante P_{ch} à la puissance entrante P_c

C_{ex} : la capacité d'excitation.

Introduction générale

Introduction générale

Actuellement, la demande d'énergie électrique augmente rapidement dans le monde. D'autre part, les sources d'énergie conventionnelles s'épuisent rapidement, leurs coûts augmentent et elles provoquent la contamination de l'environnement. Pour relever ces défis, l'attention s'est portée sur les sources d'énergie renouvelables et propres, comme le vent, le soleil, les piles à combustible, etc. [1].

L'énergie éolienne est une importante source d'énergie verte renouvelable. En effet, elle est omniprésente, respectueuse de l'environnement et disponible gratuitement. En outre, elle se caractérise par sa grande fiabilité et sa rentabilité [2]. L'énergie électrique est produite à partir du vent à l'aide d'une éolienne et d'un générateur électrique [1]. Elle peut être utilisée pour des charges autonomes ou injectée dans le réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique de puissance approprié. Grâce à toutes ces caractéristiques, la capacité de production d'énergie éolienne a augmenté rapidement, avec une croissance annuelle moyenne d'environ 30 %, dans le monde, au cours de la dernière décennie [3]. En Algérie, une première ferme éolienne d'une puissance de 10 MW a été implantée à Adrar et mise en service en juin 2014.

La présence croissante des éoliennes a stimulé les chercheurs en génie électrique à explorer des techniques visant à améliorer l'efficacité de la conversion de l'énergie électromécanique et à améliorer la qualité de l'énergie générée.

Dans ce contexte, ce mémoire présente une étude axée sur l'application des machines asynchrones dans les systèmes éoliens. Le premier chapitre offre une vue d'ensemble des systèmes d'énergie éolienne, élucidant les équations et les principes fondamentaux qui régissent leur fonctionnement. Ensuite, une étude est menée pour évaluer l'état actuel de la conversion électromécanique, englobant différents types de générateurs et les convertisseurs qui leur sont associés.

Le second chapitre se penche sur la modélisation mathématique des composants du système de conversion de l'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone auto-excitée. En outre, il explore les méthodes de contrôle précises nécessaires pour gérer efficacement les différents composants du système et améliorer la qualité de l'énergie produite ainsi satisfaire la demande de charge.

Le dernier chapitre constitue une étape cruciale de notre étude, où nous nous consacrons à la présentation détaillée et à l'analyse approfondie des résultats obtenus à partir de nos simulations à l'aide du logiciel Matlab. Où, nous avons entrepris des simulations rigoureuses pour évaluer la performance et l'impact de notre système, en tenant compte de divers paramètres et variables.

Nous clôturons ce travail par une conclusion générale qui récapitulera les principaux enseignements tirés de cette étude. De plus, nous formulons des recommandations concrètes pour orienter les travaux futurs

I. Chapitre I

Généralités sur les systèmes de conversion d'énergie éolien

I.1 Introduction

L'énergie éolienne, parmi les sources d'énergie renouvelable les plus anciennes et répandues, est également considérée comme l'une des plus respectueuses de l'environnement.

Son principe repose sur l'exploitation de la puissance du vent pour générer de l'électricité ou d'autres formes d'énergie mécanique. En favorisant la diminution des émissions de gaz à effet de serre, l'énergie éolienne joue un rôle essentiel dans la transition vers une économie plus durable et moins dépendante des combustibles fossiles.

Ce premier chapitre se concentre principalement sur l'éolienne et ses différents types, leur structure et son mode de fonctionnement. Ainsi que sur la machine asynchrone à cage et ses différents constituants. On finit par la présentation de quelques convertisseurs statiques utilisés.

I.2 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent [1].

C'est une énergie qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le vent, est disponible partout dans le monde et totalement gratuite [1].

Dans ce chapitre, on se penche principalement sur les différents types d'éolienne et leurs principes de fonctionnement.

I.3 Les aérogénérateurs

Un aérogénérateur est un système de conversion d'énergie cinétique du vent en énergie électrique [2].

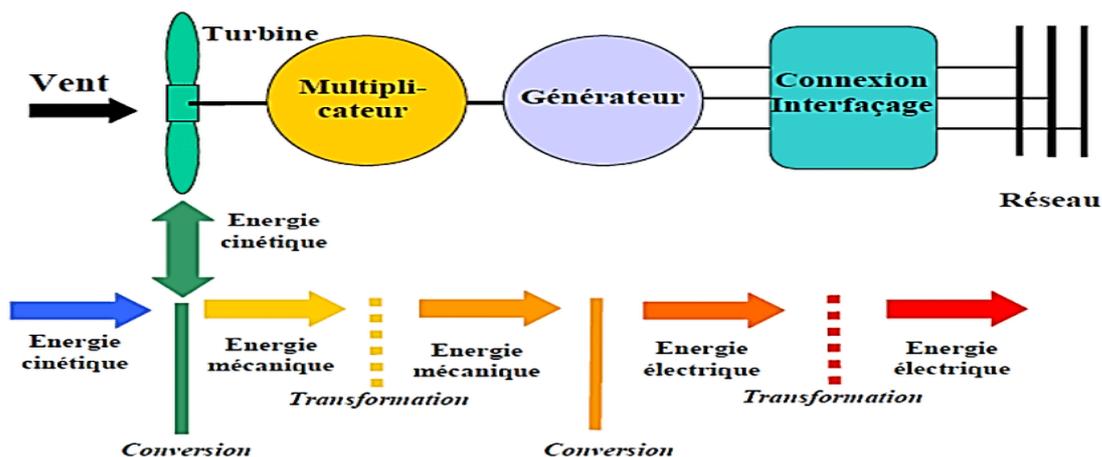


Figure (I.1): schéma de conversion de l'énergie éolienne

Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- Un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande) [2].

I.3.1 Les composants d'une éolienne

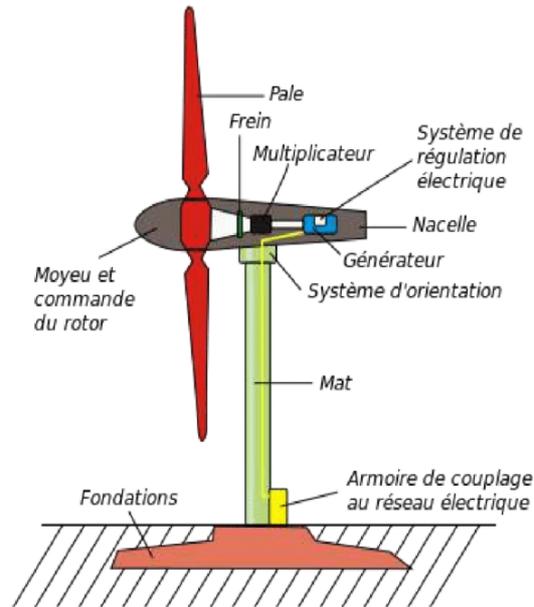


Figure (I.2) les composants modernes d'une éolienne

A. Le rotor : est la partie de l'éolienne qui tourne sous l'effet de la force du vent. Il se compose d'un moyeu auquel sont fixées les pales. Pour les éoliennes utilisées pour produire de l'électricité, le nombre de pales est généralement de 1 à 3. Les rotors à trois pales sont les plus courants, car ils offrent un bon équilibre entre le coût, les vibrations, la visibilité et le bruit. [3], Il existe deux principaux types de rotors utilisés dans les éoliennes :

- ✓ **Rotors à vitesse fixe**, généralement équipés d'un système d'orientation des pales. Cela permet au générateur (généralement un moteur asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner de manière quasi synchrone et d'être connecté directement au réseau sans aucune électronique de puissance [3].
- ✓ **Rotor à vitesse variable**, coût réduit grâce au système d'orientation simplifié des pales. Les principales caractéristiques des pales sont leur géométrie, qui détermine les performances aérodynamiques, et les matériaux utilisés pour les fabriquer. Actuellement, les matériaux composites tels que les fibres de verre et plus récemment les fibres de carbone sont largement utilisées en raison de leur légèreté et de leur grande résistance mécanique [3].

B. La nacelle : La nacelle abrite les pièces mécaniques reliant le rotor au générateur, produisant de l'électricité grâce à la rotation de l'arbre du rotor. Cette énergie mécanique est convertie en énergie électrique par un générateur. Les freins à disque assurent la sécurité en arrêtant l'éolienne au-delà d'une certaine vitesse de vent pour éviter les dommages [3].

C. Le mât : Le mât d'une éolienne soutient les équipements nécessaires à la production d'électricité. Il est composé de pièces métalliques fixées au sol sur une fondation en béton. Son objectif est de minimiser les perturbations près du sol en maintenant le mât aussi haut que possible. Les éoliennes les plus puissantes peuvent atteindre des hauteurs de 135 mètres, avec un rotor de 127 mètres. En général, un compromis est fait en choisissant un mât légèrement plus grand que le diamètre du rotor [3].

I.3.2 Types et applications des éoliennes

I.3.2.1 Éolienne a axe horizontale

Les éoliennes horizontales sont le type d'éoliennes le plus courant et le plus représentatif des énergies renouvelables. On le voit souvent sur la route. Ce type d'éolienne capte le vent à l'aide de pales assemblées en forme d'hélice. Ces pales tournent autour d'un mât qui est placé horizontalement au sol, d'où le nom [4].

Dans ce type d'éolienne, la force des pales en rotation est utilisée pour entraîner un générateur situé au sommet de l'éolienne [4].

Le principal avantage de ce type d'éolienne est son efficacité, surtout lorsqu'elle est équipée d'un système qui positionne les pales en fonction du vent. De plus, ces éoliennes sont considérées comme puissantes et nécessitent peu de frais de maintenance [4]. Cependant, le principal inconvénient de ces éoliennes est le bruit qu'elles génèrent. De plus, selon la hauteur du mât, l'installation peut être compliquée, ce dont il faut tenir compte lors du choix d'un tel mécanisme [4].

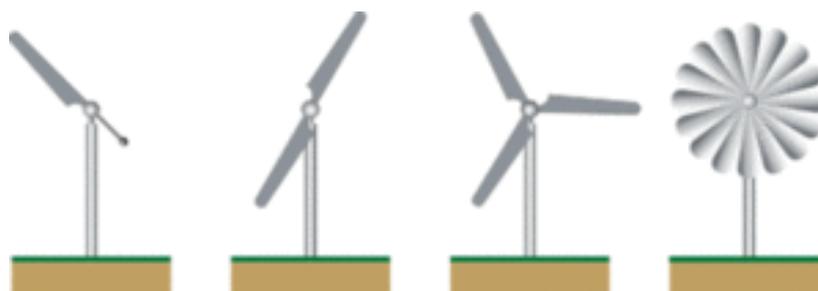


Figure (I.3) Schéma d'une éolienne horizontale présentant différentes configurations de pales.

I.3.2.2 Eolienne a axe verticale

Contrairement à l'éolienne horizontale, l'éolienne verticale tourne autour d'une tige placée verticalement. L'un des principaux avantages de ce type d'éolienne est sa capacité à capturer des vents faibles et à produire de l'énergie même avec une faible vitesse du vent. [4]



Figure (I.4) éolienne à axe verticale [22].

Parmi les éoliennes verticales, deux types se démarquent :

A. L'éolienne Darrieus

L'éolienne Darrieus est basée sur un rotor en forme de H, cylindrique ou hélicoïdal, qui tourne autour d'une tige fixe. Ce type d'éolienne verticale présente de nombreux avantages, notamment : Elle peut être installée dans des zones très ventées et produit peu de bruit par rapport aux autres éoliennes sur le marché. L'inconvénient de ce type d'éolienne est qu'elle a besoin d'un vent relativement fort pour commencer à tourner et donc à produire de l'énergie [4].

Eolienne Darrieus

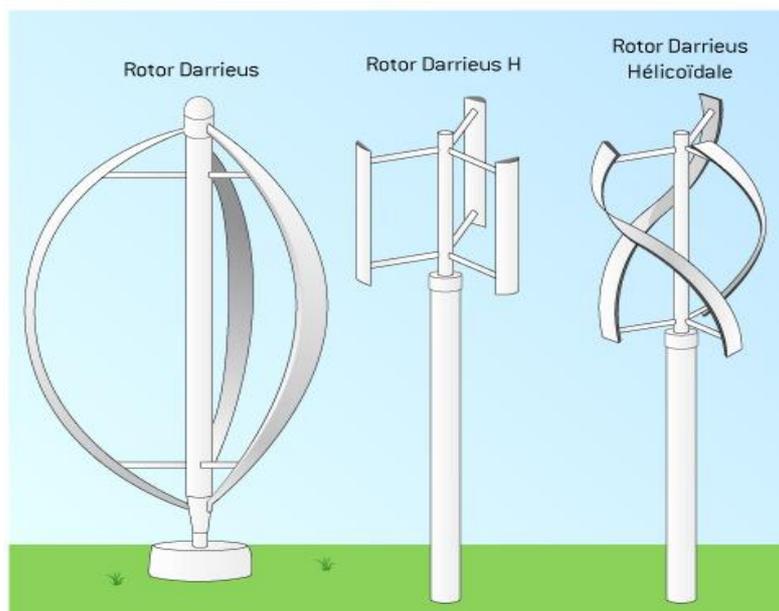


Figure (I.5) schéma d'une éolienne à axe verticale du type darrieus.

B. L'éolienne Savonius

Ce type d'éolienne est particulièrement simple à installer car elle est peu encombrante. Le principe repose sur la rotation de deux demi-cylindres qui s'entraînent mutuellement, même avec un vent très léger. Outre son esthétisme design, qui facilite la projection des installateurs avec cette éolienne, l'éolienne Savonius fonctionne très bien avec des vents très faibles, contrairement à l'éolienne Darrieus [4].

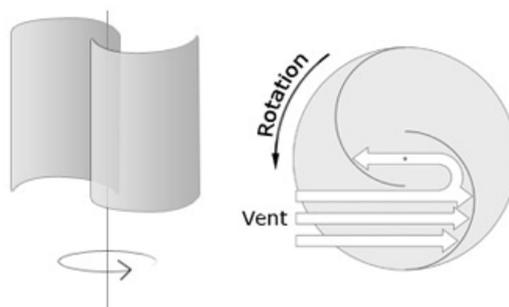


Figure (I.6) schéma d'une éolienne à axe verticale du type savonius

I.3.2.3 L'éolienne Offshore

Une éolienne offshore est une éolienne installée en mer à plus de 10 km de la côte et reliée au réseau par un câble sous-marin. Le fonctionnement d'une éolienne offshore est similaire au fonctionnement d'une éolienne terrestre, mais avec une différence majeure : elle est placée en mer pour utiliser plus efficacement l'énergie du vent qui fait tourner ses pales [1].



Figure (I.7) champs d'éoliennes offshore

Les premiers modèles d'éoliennes offshore étaient en fait des éoliennes offshore installées en mer. Les industriels développent alors des éoliennes spécifiquement adaptées au milieu marin et à ses contraintes [1].



Figure (I.8) exemples d'éoliennes offshore

Le coût de fabrication et d'installation des éoliennes offshore est plus élevé que celui des éoliennes offshore conventionnelles, mais leur efficacité est également plus élevée. En effet, les vents en mer sont plus forts et plus réguliers que ceux sur terre, ce qui permet de produire jusqu'à 60 % d'énergie en plus par rapport aux éoliennes terrestres, principalement en raison de la taille plus importante des éoliennes (les éoliennes en mer sont de 2 à 3 fois plus puissantes que les éoliennes terrestres) [1].

Il est important de noter qu'une éolienne ne commencera à produire de l'énergie que lorsque la vitesse du vent dépasse 10 km/h. Ainsi, un site avec un vent moyen de 30 km/h est huit fois plus productif qu'un site avec un vent moyen de 15 km/h [1]. Étant donné que l'énergie éolienne est de nature intermittente, il est également préférable de faire tourner les éoliennes aussi régulièrement que possible [1].

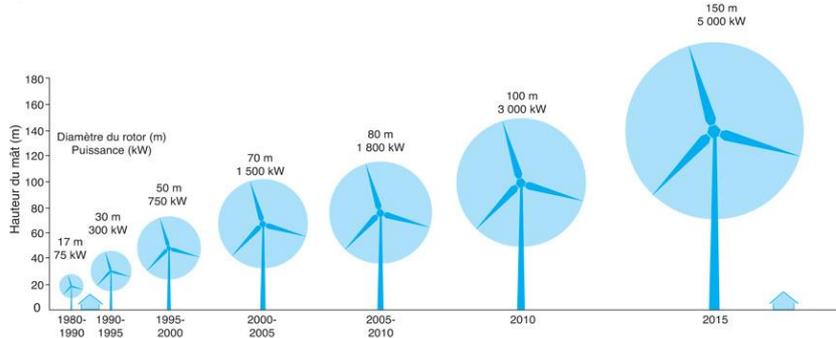


Figure (I.9) Évolution de la taille et de la puissance des éoliennes offshore entre 1985 et 2015

I.3.3 Phases de fonctionnement d'une éolienne

Les zones de fonctionnement d'une éolienne sont définies en fonction de la vitesse du vent, les caractéristiques des zones de fonctionnement d'une éolienne sont représentées dans la figure suivante :

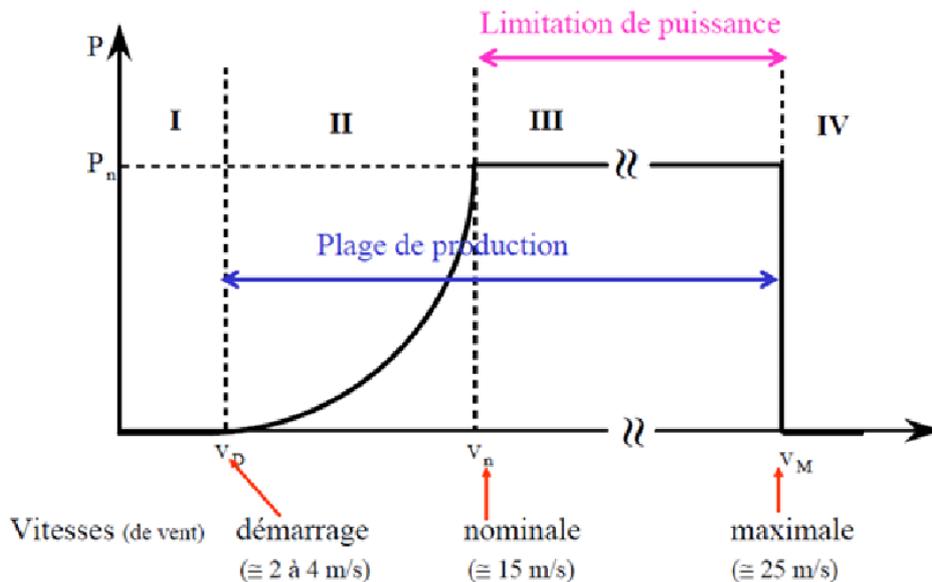


Figure (I.10) : zones de fonctionnement d'une éolienne

- ✓ **Zone I** : $V < V_D$: La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.
- ✓ **Zone II** : $V_D < V < V_n$: Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.
- ✓ **Zone III** : $V_n < V < V_M$: La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine (P_n). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

Avec :

V_D : La vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine ;

V_n : La vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice ;

V_M : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales [5].

I.3.4 Avantages et inconvénients

Parmi les avantages, on peut citer ce qui suit :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles ;
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO₂ ;
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire ;
- Le mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires ;
- Lorsque de grands parcs d'éoliens sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et autres utilisations ;
- Une énergie qui n'émet quasiment pas de gaz à effet de serre. Chaque MWh d'électricité produit par l'énergie éolienne réduit de 0.8 à 0.9 tonnes les émissions de CO₂ produites chaque année en comparaison de la production d'électricité avec le charbon ou le diesel ;
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de traces [21].

L'éolien a quelques inconvénients :

- La nature 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 coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés [21].
- Le bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des multiplicateurs [21].

I.3.5 Topologies des systèmes de conversion de l'énergie éolienne (SCEE)

La conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique peut être réalisée à l'aide de différentes topologies de systèmes. En fonction de la vitesse de fonctionnement, il existe deux principaux types :

I.3.5.1 Les systèmes à vitesse fixe

Malgré sa simplicité, le système d'exploitation à vitesse fixe peut être bruyant en raison des changements de caractéristiques aérodynamiques résultant de l'orientation des pales et limite la

plage de vitesses de vent utilisables. Dans ce cas, cependant, la connexion directe au réseau n'est plus possible en raison du caractère variable de la fréquence des tensions statoriques [7].

La solution classique consiste à utiliser deux convertisseurs (redresseur et onduleur) reliés par un étage de tension continue. Cependant, son principal inconvénient est l'utilisation de convertisseurs de puissance "complexes". Contrairement aux appareils à vitesse fixe, qui utilisent principalement des générateurs à induction à cage d'écureuil, les éoliennes à vitesse variable peuvent mettre en œuvre d'autres convertisseurs électromécaniques. Une machine à induction à cage courte peut être utilisée pour un fonctionnement à vitesse variable en ajoutant un convertisseur de fréquence comme indiqué sur la figure (I-14).

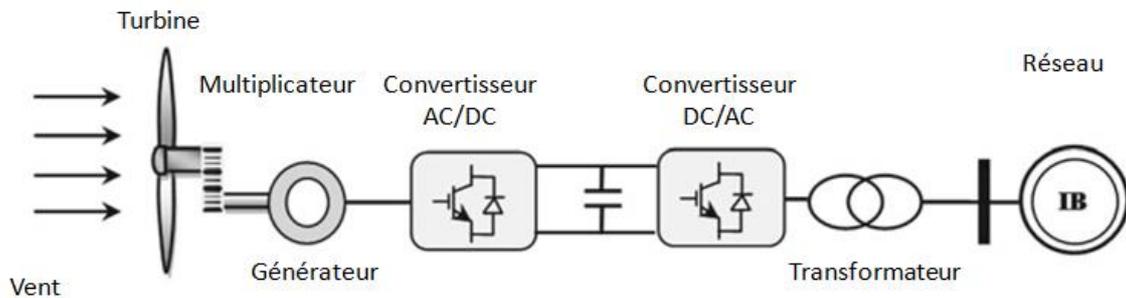


Figure (I.11) Structure d'une éolienne à vitesse fixe.

On peut remplacer la génératrice dans les éoliennes à vitesse fixe par la machine asynchrone à cage d'écureuil.

I.3.5.2 Les systèmes à vitesse variable

En général, ces éoliennes utilisent une machine asynchrone à cage d'écureuil directement connectée à un réseau électrique puissant, qui impose sa fréquence (50 Hz) aux grandeurs statoriques. Pour permettre le fonctionnement en mode générateur, la vitesse de rotation de la machine doit être supérieure à la vitesse de synchronisation (glissement négatif). Le système d'orientation des pales (contrôle du pas) maintient alors une vitesse de rotation constante de la machine [6]. Outre la simplicité de raccordement, cette solution présente les avantages d'une machine asynchrone à cage, robuste et standardisée et pouvant être produite en grande quantité dans une large gamme de débits. Cependant, une machine à induction en cage nécessite brièvement une puissance réactive pour magnétiser son rotor. Pour limiter la demande de puissance réactive du réseau, des banques de capacité lui sont ajoutées, comme le montre la Figure (I-15) [6].

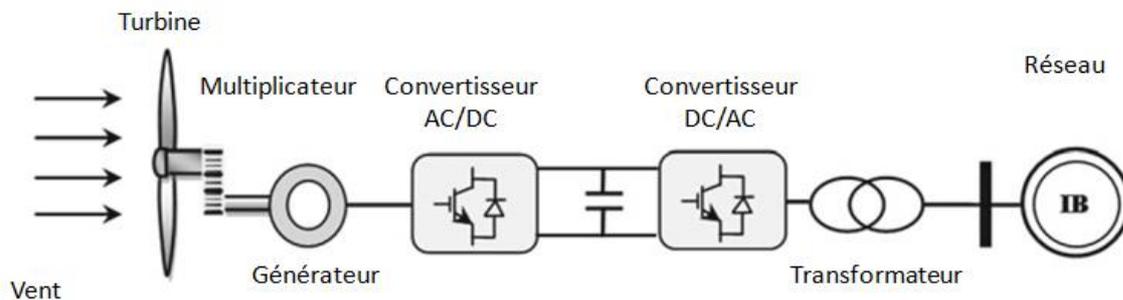


Figure (I.12) Structure d'une éolienne à vitesse variable

On peut remplacer la génératrice dans les éoliennes à vitesse variable par :

- ✓ La machine asynchrone à double alimentation.
- ✓ La machine asynchrone à cage.
- ✓ La machine synchrone à aimants permanent.

I.4 Machine asynchrone

Les moteurs asynchrones, communément appelés moteurs à induction, sont constitués d'un stator et d'un rotor, le rotor est constitué de tôles d'acier au silicium et les bobinages comportent des encoches. Le stator est fixe et contient les enroulements connectés à l'alimentation. Le rotor est monté sur l'arbre rotatif. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou fermés en permanence en cas de court-circuit, il existe deux types de rotors : les rotors bobinés et les rotors à cage d'écureuil [9].

Cependant, nous considérons que sa construction est électriquement équivalente à un rotor bobiné avec des enroulements court-circuités. Voir Figure [9]. Dans cette section, nous proposons de fournir des informations détaillées sur les composants d'un moteur asynchrone. Cette description nous permettra de comprendre comment le système est physiquement réalisé [9]. Les machines asynchrones triphasées peuvent être divisées, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes : Le stator, qui est la partie fixe de la machine où l'alimentation électrique est connectée. Le rotor, qui est la partie en rotation responsable de l'entraînement de la charge mécanique. Les paliers, qui constituent la partie mécanique permettant la rotation de l'arbre moteur [9].

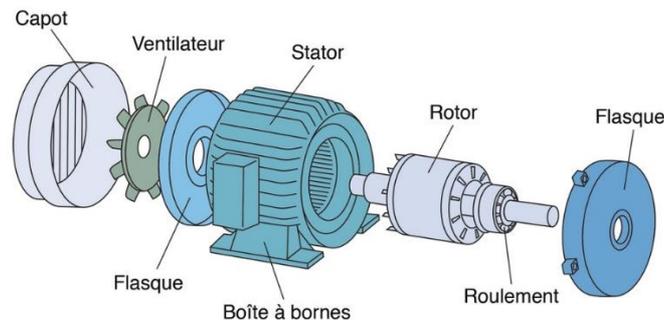


Figure (I.13) schéma d'une machine asynchrone à cage

Génératrices asynchrones auto-excitées

Les génératrices asynchrones auto-excitées sont des machines électriques utilisées pour la production d'énergie électrique dans diverses applications, y compris les éoliennes. Elles sont basées sur le principe de l'induction électromagnétique, où un champ magnétique variable induit un courant électrique dans les bobines du stator [23].

Lorsqu'une génératrice asynchrone auto-excitée fonctionne en mode génératrice, elle convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. La courbe couple/vitesse (fig I.14) ou glissement est une représentation graphique de la relation entre le couple (force produite par la génératrice) et la vitesse de rotation du rotor par rapport à la vitesse de synchronisme. Le

glissement est défini comme la différence entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor, exprimée en pourcentage de la vitesse de synchronisme [23].

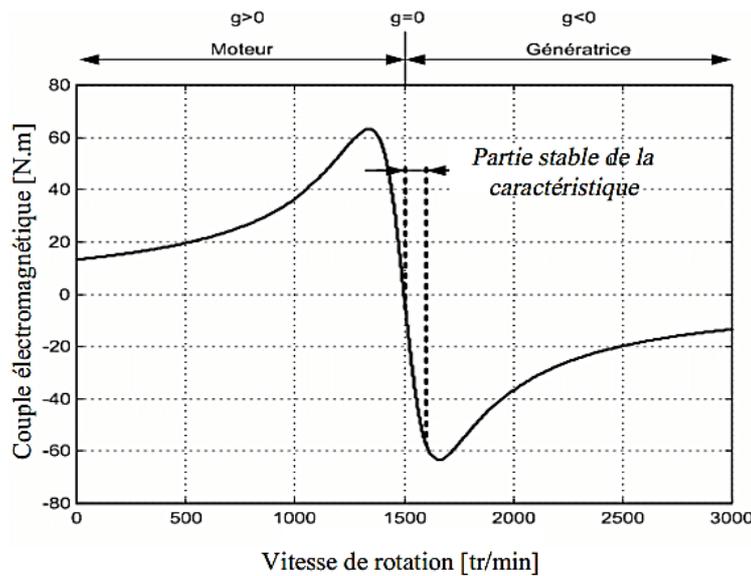


Figure (I.14) caractéristiques couple/vitesse d'une GAS auto-excitée.

Le fonctionnement en mode génératrice des génératrices asynchrones auto-excitées peut être

1. Contrôle de la puissance : Le contrôle de la puissance produite par la génératrice asynchrone auto-excitée peut-être effectué en ajustant la vitesse de rotation du rotor. Une augmentation de la vitesse de rotation augmente la puissance générée, tandis qu'une diminution de la vitesse réduit la puissance produite.

En ce qui concerne leur application aux éoliennes, les génératrices asynchrones auto-excitées sont souvent utilisées en raison de leur simplicité de construction, de leur coût relativement bas et de leur capacité à fonctionner dans une plage de vitesses variable. Les éoliennes transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui est ensuite convertie en énergie électrique par la génératrice asynchrone auto-excitée. Le glissement permet à la génératrice de s'adapter aux variations de la vitesse du vent, assurant ainsi une production d'énergie optimale [23].

I.5 Les convertisseurs statiques associés aux aérogénérateurs

Pour sélectionner un convertisseur statique, il est important de prendre en compte plusieurs facteurs en fonction des besoins spécifiques de l'application. Ces facteurs comprennent le type de conversion, la puissance nominale, l'efficacité, les tensions d'entrée et de sortie, les fonctionnalités de protection, l'environnement d'exploitation et le coût.

Dans notre cas, nous avons opté pour les convertisseurs statiques les plus populaires et largement utilisés.

I.5.1 Redresseur (AC/DC)

Un redresseur est un type de convertisseur statique utilisé pour convertir une tension alternative (AC) en une tension continue (DC). Il est souvent utilisé pour alimenter des

dispositifs électroniques ou des systèmes qui nécessitent une alimentation en courant continu [3].

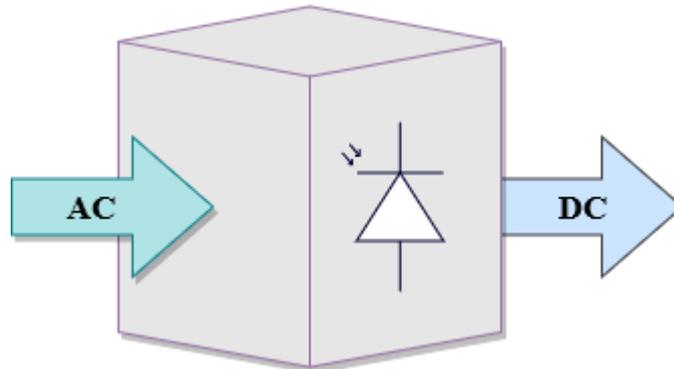


Figure (I-15) Symbole d'un convertisseur AC/DC

I.5.2 Les convertisseurs DC/DC

Un hacheur permet de régler le transfert d'énergie d'une source continue vers la charge avec un rendement élevé. Selon la structure, il peut être abaisseur ou élévateur de tension et, dans certaines conditions, renvoyer de l'énergie à l'alimentation. Il est utilisé dans les alimentations et pour le pilotage des moteurs [].

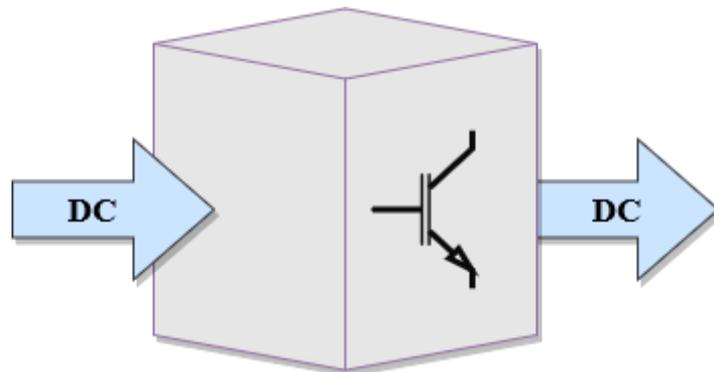


Figure (I-16) Symbole d'un convertisseur DC/DC

Il existe trois types essentiels de Hacheurs :

- a) **Hacheur série (Buck)** : Un convertisseur abaisseur ou hacheur série est un dispositif qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure.

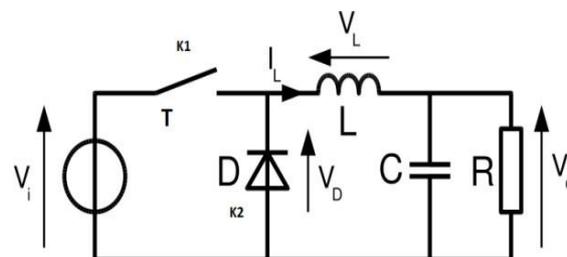


Figure (I-17) schéma d'un convertisseur Buck.

- b) **Hacheur parallèle (BOOST)** : Un hacheur élévateur est aussi appelé "voltage booster". La figure (I.22) montre un schéma de circuit simple de "BOOST".

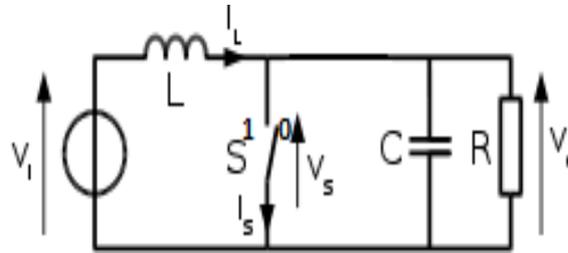


Figure (I-18) schéma d'un convertisseur Boost.

- c) **Hacheur abaisseur-élevateur (buck-boost) :** La figure (I.23) montre un schéma de circuit simple de "BUCK-BOOST".

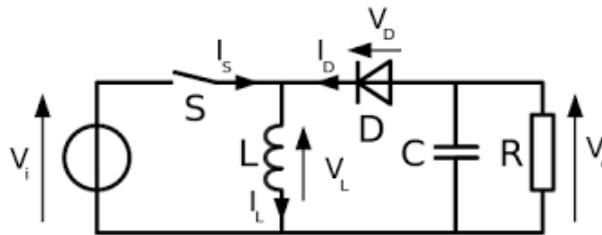


Figure (I-19) schéma d'un convertisseur (Buck-Boost)

I.9.3. Onduleur

Un onduleur est un circuit statique qui convertit la puissance électrique continue en puissance alternative, ou de valeur de courant et de fréquence souhaitées. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais peut être très proche de la forme d'onde souhaitée [12].

On distingue deux types d'onduleur selon la source de tension :

- ✓ **Onduleur monophasé :** Ce type d'onduleur, qui fournit une tension alternative monophasée en sortie, est généralement utilisé comme alimentation de secours. Selon leur topologie, on peut distinguer deux classes d'onduleurs monophasés [12].

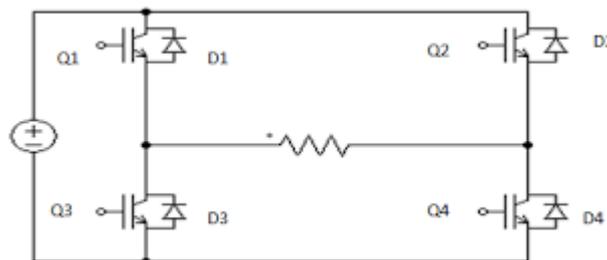
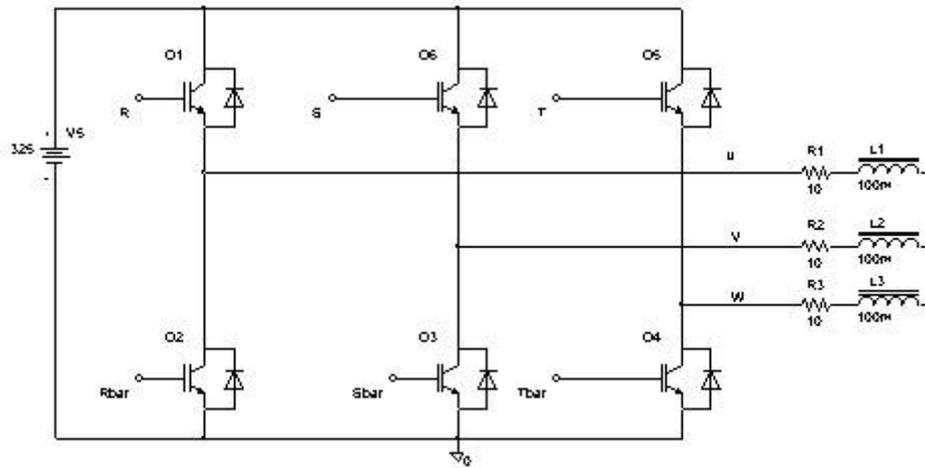


Figure (I.20). Schéma bloc d'un onduleur monophasé

- ✓ **Onduleur triphasé :** Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour les applications à forte puissance. La structure de ce convertisseur est constituée de trois onduleurs monophasés demi-pont (ou pont) connectés en parallèle, donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés l'une par rapport à l'autre. [12]



Figure(I. 21). Schéma bloc d'un onduleur triphasé

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a exposé quelques généralités sur l'éolienne, après un rappel des notions de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. On a aussi vu :

Les différents composants d'une éolienne (le rotor ; la nacelle ; le mat), ainsi que ses différents types ; éoliennes à axe horizontale ; éolienne à axe verticale et éolienne en mer (offshore), expliquer le fonctionnement de l'aérogénérateur, énumérer ses avantages, et inconvénients, aborder le contrôle électrique au niveau de la génératrice et la transmission du réseau, en mettant en évidence deux approches principales : l'entraînement à vitesse fixe et l'entraînement à vitesse variable.

La génératrice asynchrone auto-excitée et son utilisation pour la production de l'énergie électrique dans les éoliennes. Ainsi que les convertisseurs statiques tel que ; le redresseur ; le hacheur ; et l'onduleur.

II. Chapitre II

Modélisation et contrôle de la chaîne de conversion éolienne

II.1 Introduction

La modélisation mathématique des systèmes de conversion de l'énergie éolienne est le sujet de ce chapitre. Nous commençons par l'éolienne, en donnant son modèle aérodynamique et son coefficient de puissance sur la base d'idées théoriques. Ensuite, nous aborderons la modélisation des machines asynchrones ainsi que des convertisseurs statiques associés aux éoliennes tels que le redresseur triphasé, le convertisseur DC/DC et l'onduleur monophasé. Enfin, nous examinerons les techniques de contrôle du système, tant du côté du générateur que du côté de la charge.

II.2 Modèle de la turbine

A. Modèle du vent

Une éolienne est un élément tridimensionnel aux formes complexes, en mouvement et immergé dans un flux d'air. Cependant, il est important que le modèle en question décrive la dynamique mécanique réelle de l'aile, et pas seulement le comportement quasi-statique. Les ailes éoliennes convertissent l'énergie de la masse d'air en mouvement et transmettent une énergie mécanique caractérisée par une vitesse de rotation et un couple mécanique [14].

La puissance extraite par une éolienne est donnée par la relation suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (II.1)$$

$$P_{éol} = 0.5 C_p(\lambda) \rho S V^3 \quad (II.2)$$

D'où l'expression du couple

$$\Gamma_t = \frac{P_{éol}}{\Omega_{tr}} = \frac{C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3}{2 \cdot \Omega_{tr}} \quad (II.3)$$

Avec :

C_p : Coefficient de puissance qui est fonction de la vitesse spécifique λ

λ : Vitesse spécifique, qui représente le rapport entre la vitesse linéaire de l'extrémité d'une pale et de la vitesse du vent $= \Omega'w.p$:

ρ : La densité du vent en [Kg/m³].

S : La surface balayé par les pales de l'éolienne [m²].

Ω : La vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine éolienne [rad/s].

V : Vitesse du vent [m/s].

R : Rayon d'une pale de la turbine

Γ_t : Couple de la turbine éolienne

Le coefficient de puissance représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (II.1) représente la variation de ce coefficient en fonction de la ration de vitesse, et de l'angle de l'orientation de la pale β [14]

$$\lambda = \frac{\Omega_{tr} \cdot R}{V} \quad (II.4)$$

Ou Ω_{tr} est la vitesse de turbine

L'expression du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ est donné dans la formule suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5109 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4 \cdot \beta - 5 \right) \cdot \exp \left(\frac{-21}{\lambda_i} - 0.0068 \cdot \lambda \right) \quad (II.5)$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda_i + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (II.6)$$

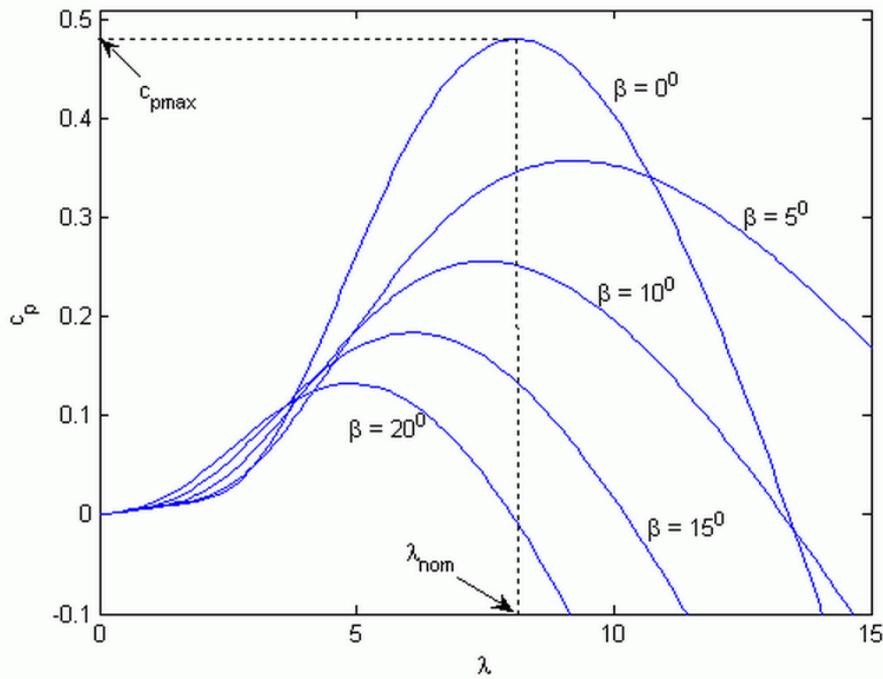


Figure (II. 1) Variation de C_p en fonction de la vitesse λ et de l'angle de calage β

B. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte une vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [11] :

$$C_g = \frac{C_s}{G} \quad (II.7)$$

Avec :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.8)$$

C. 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 $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie total J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice. [11]

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (II.9)$$

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. A titre illustratif, pour une éolienne vestas de 2MW, une pale a une longueur de 39m et pèse 6.5 tonnes. 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 [11] :

$$J. \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.10)$$

Où :

J est l'inertie total qui apparait sur le rotor de la génératrice. Ce 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 [11].

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.11)$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottement f [11] :

$$C_{vis} = f. \Omega_{mec} \quad (II.12)$$

D. Schéma de simulation

La figure suivante illustre un modèle basé sur les caractéristiques de puissance de la turbine en régime permanent.

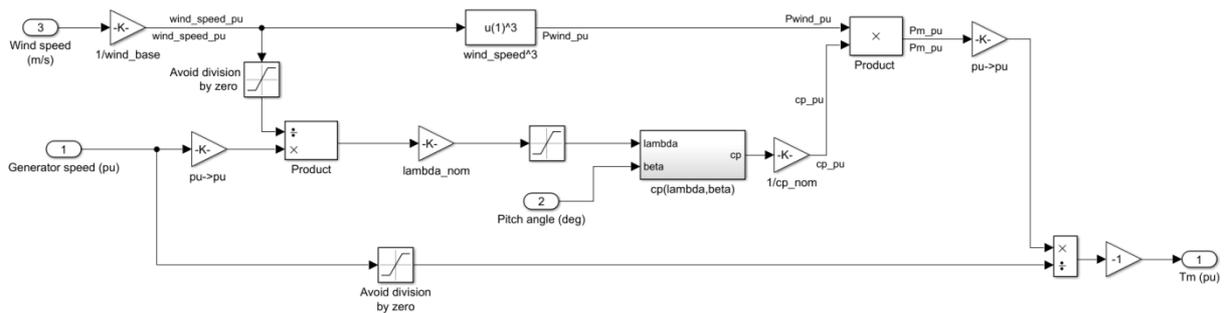


Figure (II. 2) Schéma de simulation de la turbine éolien sous MATLAB/SIMULINK

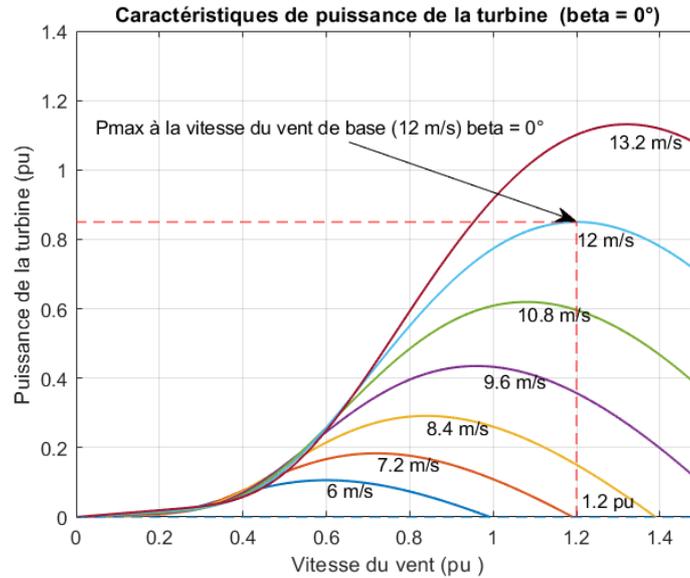


Figure (II. 3) Puissance de la turbine en fonction de la vitesse du vent

II.3 Modélisation de la machine asynchrone

La machine asynchrone, aussi appelée machine à induction, est étudiée en appliquant les principes simplifiés de l'électromagnétisme. Ces hypothèses permettent de simplifier considérablement les calculs tout en restant valables dans la plupart des cas de fonctionnement normal des machines asynchrones.

Le modèle de Park constitue une approche pratique pour simplifier davantage la représentation d'une machine asynchrone. En choisissant judicieusement le repère de Park, il devient possible de créer un modèle plus précis de la machine asynchrone [13].

II.3.1 Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone repose sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont les suivantes :

- ✓ Les circuits magnétiques sont symétriques.
- ✓ La répartition de l'induction dans l'entrefer est supposée sinusoïdale.
- ✓ Les phénomènes de saturation sont négligés, ce qui permet de considérer le flux magnétique comme une fonction linéaire des courants.
- ✓ L'effet de l'encoche est négligeable.
- ✓ L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

En conséquence de ces hypothèses, plusieurs conséquences importantes peuvent être mentionnées :

- ✓ L'additivité du flux.
- ✓ La constance des inductances propres.
- ✓ La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques. [13]

II.3.2 Modèle généralisé triphasé de la MAS

Le modèle de la machine asynchrone triphasé est illustré par le schéma de la (Figure II.3) avec les armatures statoriques et rotoriques sont munies chacune d'un enroulement triphasé, sont trois enroulements du stator : A, B et C, et pour les trois enroulements rotoriques : a, b et c. Et θ : Angle entre l'axe de la phase statorique (A) et la phase rotorique (a).

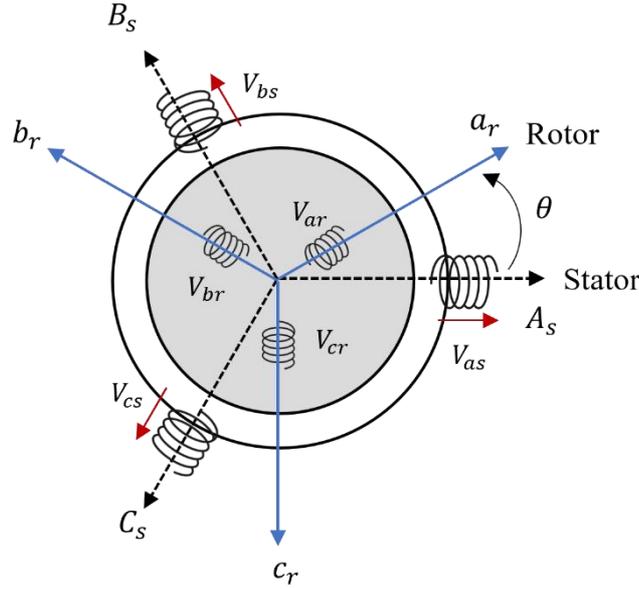


Figure (II. 4) : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.

Au niveau de la méthode de modélisation mathématique, notre machine est à deux paires de pôles, le passage à plusieurs paires de pôles s'effectue de manière simple en divisant l'angle par le nombre de cette paire de pôles, on dit alors l'angle électrique. Le stator sera composé de 3 bobines identiques (A_s , B_s et C_s) qui sont périodiquement déphasées de $2\pi/3$ rad. Le rotor sera considéré comme équivalent à 3 bobines identiques (a_r , b_r et c_r) court-circuitées sur elles-mêmes, qui sont également souvent déphasées de $2\pi/3$ rad [13].

II.3.3 Les équations de la machine asynchrone

a) Système d'équations électriques

$$\begin{aligned}
 V_{ar} &= R_r \cdot i_{ar} + \frac{d}{dt} \phi_{ar} & V_{as} &= R_s \cdot i_{as} + \frac{d}{dt} \phi_{as} \\
 V_{br} &= R_r \cdot i_{br} + \frac{d}{dt} \phi_{br} & V_{bs} &= R_s \cdot i_{bs} + \frac{d}{dt} \phi_{bs} \\
 V_{cr} &= R_r \cdot i_{cr} + \frac{d}{dt} \phi_{cr} & V_{cs} &= R_s \cdot i_{cs} + \frac{d}{dt} \phi_{cs}
 \end{aligned} \quad (II.13)$$

V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : Tensions appliquées aux trois phases statoriques.

i_{as}, i_{bs}, i_{cs} : Courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\phi_{as}, \phi_{bs}, \phi_{cs}$: Flux totaux à travers ces enroulements.

V_{ar}, V_{br}, V_{cr} : Tensions rotoriques.

i_{ar}, i_{br}, i_{cr} : Courants rotoriques.

$\phi_{ar}, \phi_{br}, \phi_{cr}$: Flux rotoriques.

R_s : Résistance d'une phase statorique.

R_r : Résistance d'une phase rotorique.

Les équations (II.13) peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante [13] :

- Pour le stator

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (II.14)$$

- Pour le rotor

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (II.15)$$

b) Système d'équations magnétiques

Les hypothèses simplificatrices citées précédemment conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants de la machine asynchrone, ces relations s'écrivent comme suit [15].

- Au stator

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (II.16)$$

- Au rotor

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

Tel que

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$$

Avec :

$[L_s]$: Matrice des inductances statoriques.

$[L_r]$: Matrice des inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles statoriques.

$[M_{rs}]$: Matrice des inductances mutuelles rotoriques.

Où :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix} \quad (II.18)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} I_r & M_r & M_r \\ M_r & I_r & M_r \\ M_r & M_r & I_r \end{bmatrix} \quad (II.19)$$

Ainsi :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (II. 20)$$

Avec :

L_s : Inductance propre d'une phase statorique.

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

θ : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statoriques et les axes rotoriques qui sont choisis comme axes des références.

M : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondante du rotor [13].

c) Système d'équations mécaniques

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire de la variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse). Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante [15].

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot P \cdot I_s \cdot \frac{V_s}{X_s} \quad (II. 21)$$

L'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \omega \quad (II. 22)$$

Tel que :

J : moment d'inertie du moteur asynchrone.

K_f : Coefficient de frottement visqueux.

C_r : Couple résistant.

ω : vitesse rotorique.

C_{em} : Couple électromagnétique.

II.3.4 Transformation de PARK

Le principe de cette transformation consiste à appliquer aux grandeurs électriques (tension, courant) et à la grandeur magnétique (flux) un changement de variables faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et l'axe d et q [15].

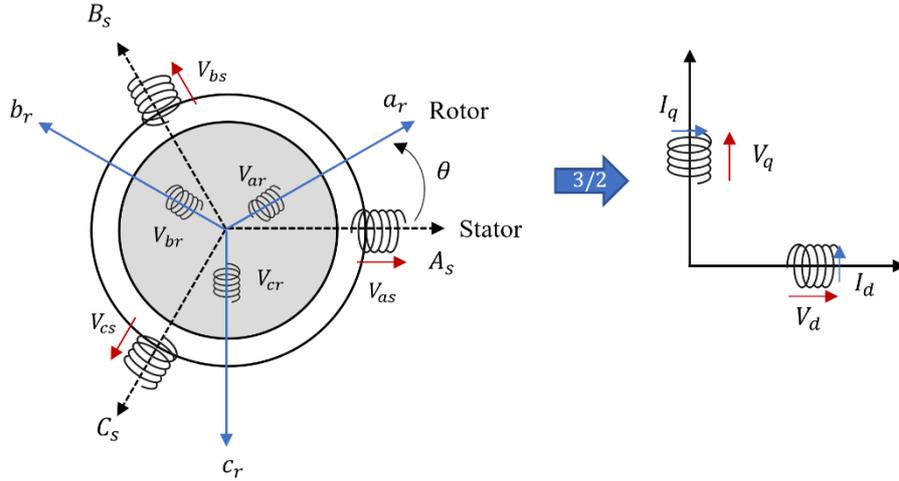


Figure (II. 5) : passage d'un système d'axes (abc) a un Système d'axes déphasés (dq)

Cette transformation est définie par sa matrice $[P(\theta)]$ telle que :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

La matrice de transformation de PARK écrite sous cette forme est orthogonale, ce qui conduit à l'égalité des valeurs efficaces des grandeurs physiques dans les deux repères. De ce fait, la conservation de la puissance pour ce changement de repère est vérifiée. L'orthogonalité nous permet d'écrire [14] :

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

II.3.5 Modélisation de la MAS dans le repère de PARK

En appliquant la transformation de PARK aux équations, nous obtenons le système d'équations suivant :

a) Equations des tensions

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_p \phi_{qs} \\ V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_p \phi_{ds} \end{aligned} \quad (II.25)$$

$$\begin{aligned} 0 &= R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_p - \omega) \phi_{qr} \\ 0 &= R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_p - \omega) \phi_{dr} \end{aligned} \quad (II.26)$$

Avec :

$$\omega_p = \frac{d\theta_p}{dt} \quad \text{et} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

b) Equations des flux

Les relations entre les flux et les courants sont donnés par [15] :

$$\begin{aligned} \Phi_{dr} &= L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} &= L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{aligned} \quad (II.27)$$

Et :

$L_s = I_s - M_s$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = I_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique.

$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M$: Inductance mutuelle cyclique entre rotor et stator.

II.3.6 Choix du référentiel

Ce qui rend la transformation de Park intéressante, est que l'orientation du repère (u, v) peut être n'importe lequel. Il existe trois choix importants, le repère (u, v) peut être fixé au stator, au rotor ou au champ tournant, Selon l'objectif de l'application. Le schéma de la figure (II.6) représente les trois référentiels biphasés particuliers du système [13].

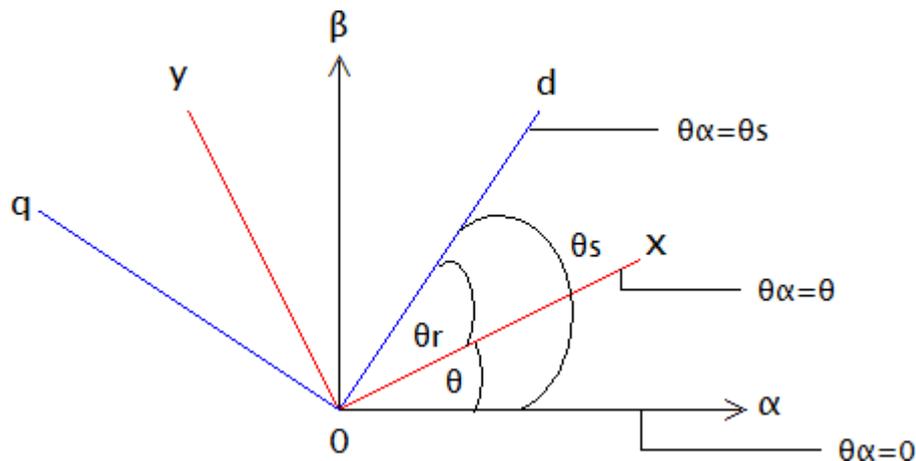


Figure (II. 6) Représentation des axes biphasés (α, β), (x, y) et (d, q)

Référentiel fixe par rapport au stator (α, β), Référentiel fixe par rapport au rotor (x, y), et Référentiel fixe par rapport au champ tournant (d, q).

II.3.7 Modélisation de capacité d'excitation (Auto-amorçage)

Le modèle décrivant le fonctionnement en générateur s'obtient en rajoutant les équations de l'auto excitation au lieu de l'équation mécanique.

On ajoute au modèle de la machine l'équation de condensateur.

$$\begin{cases} V_{as} = \frac{1}{C} \int i_{as} dt \\ V_{bs} = \frac{1}{C} \int i_{bs} dt \\ V_{cs} = \frac{1}{C} \int i_{cs} dt \end{cases} \quad (\text{II. 28})$$

L'auto-excitation de la machine asynchrone par banc de capacité est constituée de trois condensateurs fixes reliés aux bornes du générateur soit en triangle soit en étoile, permettant une plus grande sécurité de fonctionnement du système de production d'énergie éolienne, que la charge soit monophasé ou triphasé.

II.4 Modélisation du redresseur

Le redresseur est un convertisseur « alternatif/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 suivante [13] :

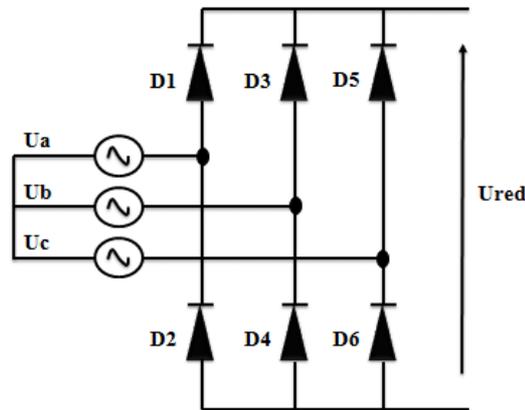


Figure (II. 7) Redresseur triphasé à diodes double alternance PD3

Ce redresseur comporte trois diodes (D1, D3, D5) à anode commune assurant le passage du courant I_d dans un sens, et trois diodes (D2, D4, D6) à cathode commune assurant le passage du courant I_d dans l'autre sens. Si l'on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension [13].

$$\begin{aligned} V_1 &= V_m \cdot \sin(\omega t - \varphi) \\ V_2 &= V_m \cdot \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_3 &= V_m \cdot \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (\text{II. 29})$$

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

$$U_{red} = \text{Max}(V_1, V_2, V_3) - \text{Min}(V_1, V_2, V_3) \quad (\text{II. 30})$$

Cette tension est représentée par la figure (II.8)

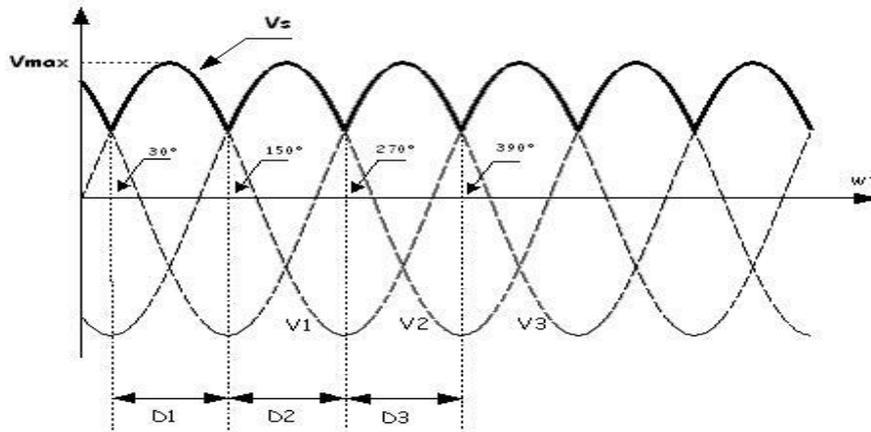


Figure (II. 8) Tension simple de phase et tension de sortie de redresseur

II.5 Modélisation du convertisseur DC/DC

Généralement dans ce type de convertisseur la source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [26].

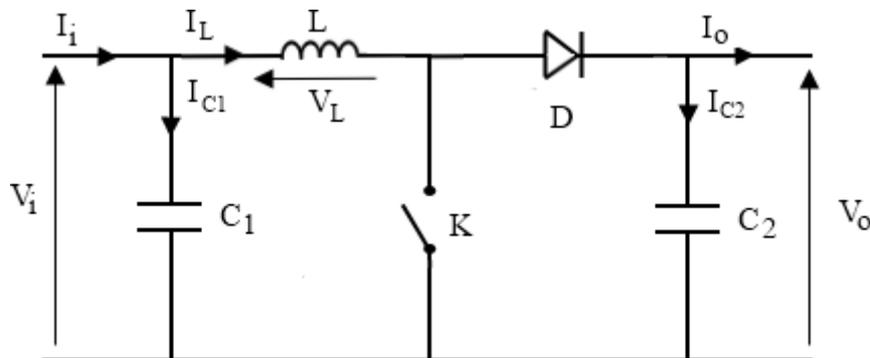


Figure (II. 9) Schéma électrique d'un hacheur boost

1. Fonctionnement

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors $V_K = V_0$. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [27] :

$$V_0(1 - \alpha) = V_i \quad (II. 31)$$

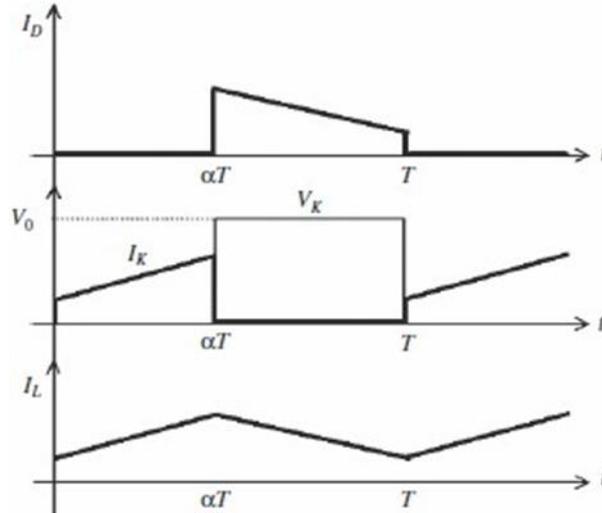


Figure (II. 10) Schéma électrique d'un hacheur boost

2. Modèle mathématique équivalent

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions de l'Hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (II.11), présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c-à-d entre $[0, \alpha T e]$ [24].

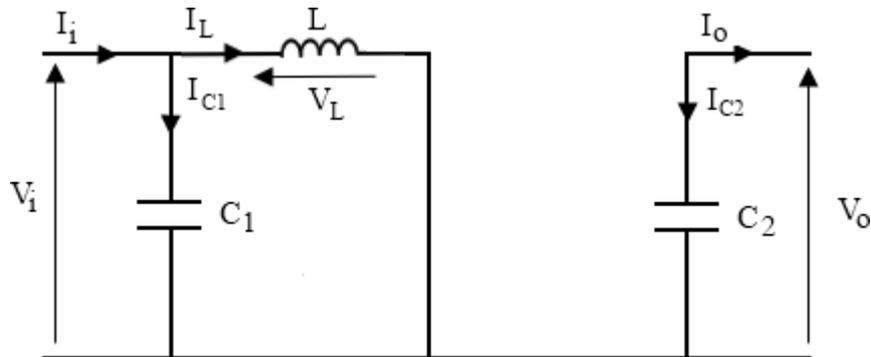


Figure (II. 11) Schéma électrique d'un hacheur K fermé

Comme pour le circuit boost, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (II. 32)$$

$$I_{C1}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (II. 33)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (II. 34)$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant :

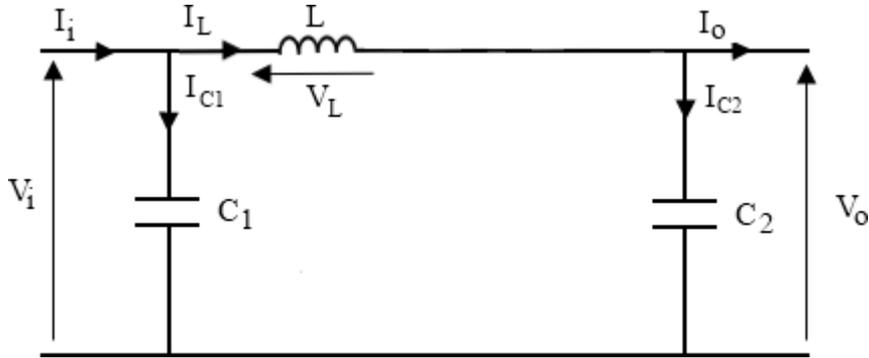


Figure (II. 12) Schéma électrique d'un hacheur K ouvert

II.6 Modélisation de l'onduleur

Se composant d'une source de tension continue et des interrupteurs commandés avec un circuit composé de diodes l'onduleur monophasé dont La figure (II-6) montre le circuit équivalent.

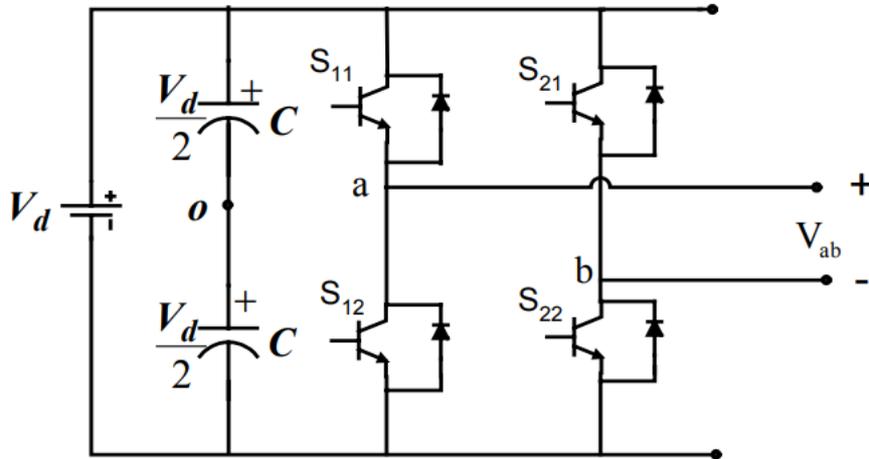


Figure (II-13) : Schéma d'un onduleur monophasé à pont complet.

$$\frac{V_{dc}}{2}(S_{11} - S_{12}) = V_{an} + V_{n0} = V_{a0} \quad (II. 35)$$

$$\frac{V_{dc}}{2}(S_{21} - S_{22}) = V_{bn} + V_{n0} = V_{b0} \quad (II. 36)$$

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \quad (II. 37)$$

Les tensions V_{an} et V_{bn} sont les tensions de sortie des phases A et B vers un point n arbitraire, V_{n0} est la tension neutre entre le point n et le point médian du réseau. Point arbitraire n, V est la tension neutre entre le point n et le point médian de la source de courant continu.

Ainsi, d'après les équations II.34, II.35 et II.36, les expressions des signaux de modulation sont obtenues comme suit

$$M_{11} = \frac{2(V_{an} + V_{n0})}{V_{dc}} \quad (II. 38)$$

$$M_{21} = \frac{2(V_{bn} + V_{n0})}{V_{dc}} \quad (II.39)$$

Les équations II.38 et II.39 donnent l'expression générale des signaux de modulation pour les convertisseurs DC/AC monophasés. Les différents types de schémas de modulation présentés dans la littérature peuvent être obtenus à partir de ces équations en utilisant les définitions appropriées pour V_{an} , V_{bn} et V_{n0} . En utilisant ce concept, différents schémas de modulation ont été proposés [22].

II.6.1 Simulation de l'onduleur

a) La simulation d'un onduleur monophasé a été réalisée dans l'environnement Matlab/Simulink. La figure ci-dessous présente le schéma bloc de la simulation.

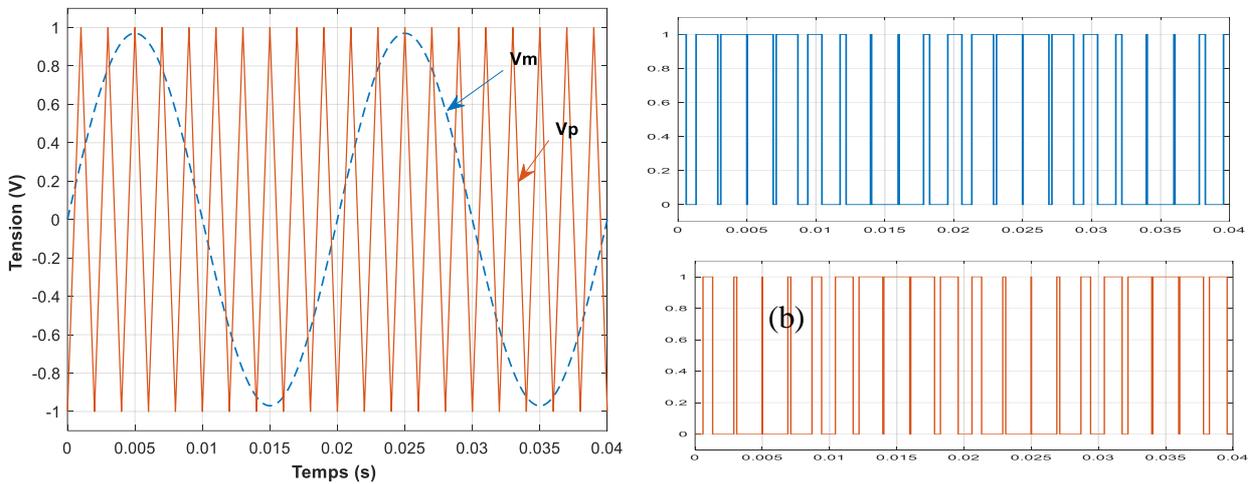


Figure (II. 13) a. Allure des tensions V_m de la modulatrice et, b. V_p de la porteuse

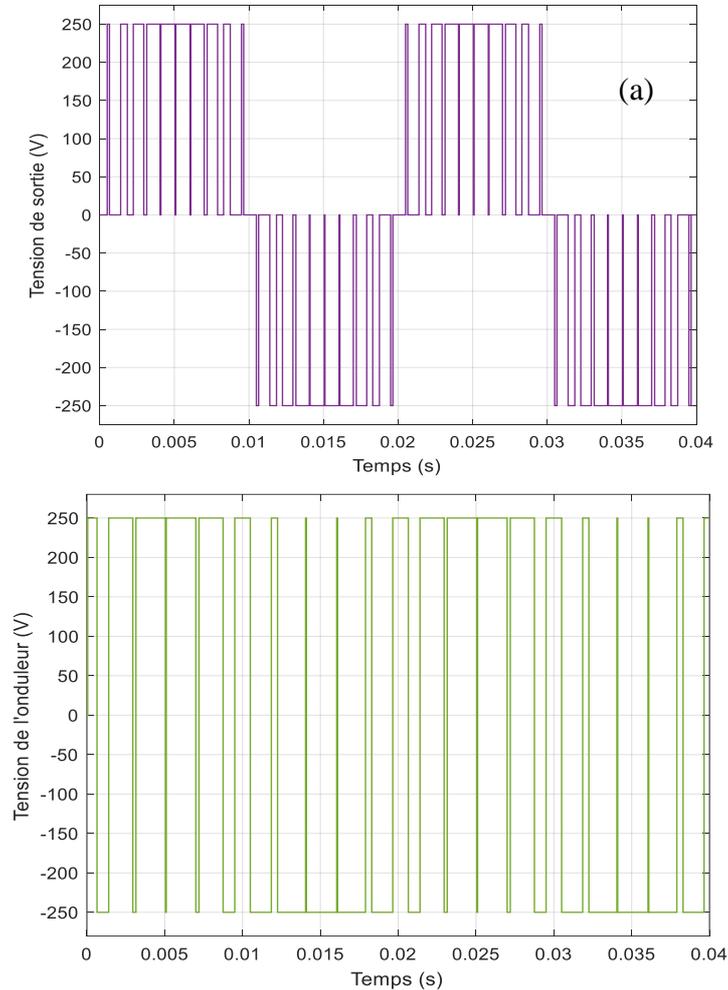


Figure (II. 14) allure de la tension de sortie de l'onduleur, (a) modulation unipolaire, (b) modulation bipolaire

II.7 Le filtrage

Un filtre LC passe-bas est un circuit électronique qui atténue les hautes fréquences et laisse passer les basses fréquences. Il est composé d'une inductance et d'un condensateur pour créer une réactance variable en fonction de la fréquence du signal. L'inductance a une impédance élevée aux hautes fréquences, tandis que la capacité a une impédance faible. Cette différence d'impédance permet au filtre de bloquer ou d'atténuer les hautes fréquences. Le point de coupure du filtre dépend des valeurs de l'inductance et de la capacité. Cependant, les filtres LC passe-bas ont des limites, pouvant causer des distorsions et affecter la phase du signal, ce qui doit être pris en compte lors de leur utilisation [19].

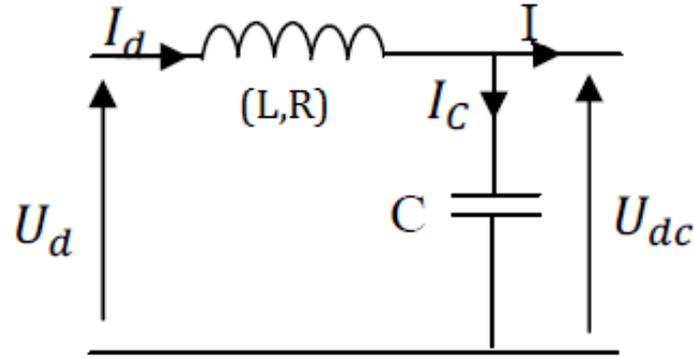


Figure (II. 15) Schéma équivalent d'un filtre LC

➤ Equations filtre LC passe bas

Les courants dans le condensateur sont donnés par :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{red} - I_{dc} \quad (II. 41)$$

Considérons l'énergie stockée dans le condensateur est donnée comme suit :

$$W = \frac{1}{2} C \cdot V_{dc}^2 \quad (II. 42)$$

Sa variation peut être exprimée comme suit :

$$\frac{dW}{dt} = C \cdot V_{dc} \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (II. 43)$$

Nous obtenons l'équation d'équilibre des puissances suivante en multipliant par V_{dc} :

$$\frac{dW}{dt} = P_c - P_{ch} = \Delta P \quad (II. 44)$$

P_c : Puissance active à la sortie du redresseur.

P_{ch} : puissance active consommée par la charge.

À partir des équations (II.42) et (II.42), et pour une variation maximale de la tension continue la valeur du condensateur peut être approchée comme suit :

$$C_{max} \geq \frac{\Delta P \cdot \Delta T}{\Delta V_{dc-max} \cdot V_{dc}} \quad (II. 44)$$

ΔT : est le retard du temps requis par la commande pour ajuster la puissance sortante P_{ch} à la puissance entrante P_c [13]

II.8 Stratégies de contrôle du SCEE

II.8.1 Contrôle coté aérogénérateur

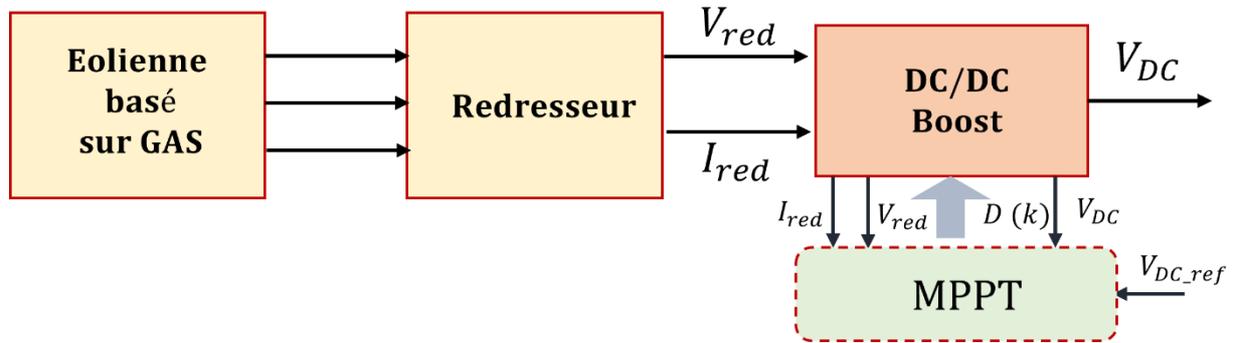


Figure (II. 16) Schéma fonctionnel du contrôle proposé à la turbine

II.8.1.1 Contrôle coté turbine

En ce qui concerne les éoliennes utilisées pour générer de l'électricité, il est essentiel qu'elles soient en mesure d'exploiter efficacement l'énergie éolienne disponible afin de produire une puissance maximale. Cette optimisation de la production d'électricité à partir du vent est connue sous le nom de recherche du point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT). L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet d'atteindre cette puissance maximale de manière plus efficace. Par conséquent, il est essentiel de développer des stratégies de contrôle qui permettent de maximiser la puissance électrique générée, c'est-à-dire le couple, en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à une valeur de référence. La figure (II.18) représente le schéma fonctionnel qui vise à maximiser la puissance extraite en contrôlant la vitesse. Dans ce schéma, le régulateur utilisé pour contrôler la vitesse est un régulateur proportionnel-intégral (PI).

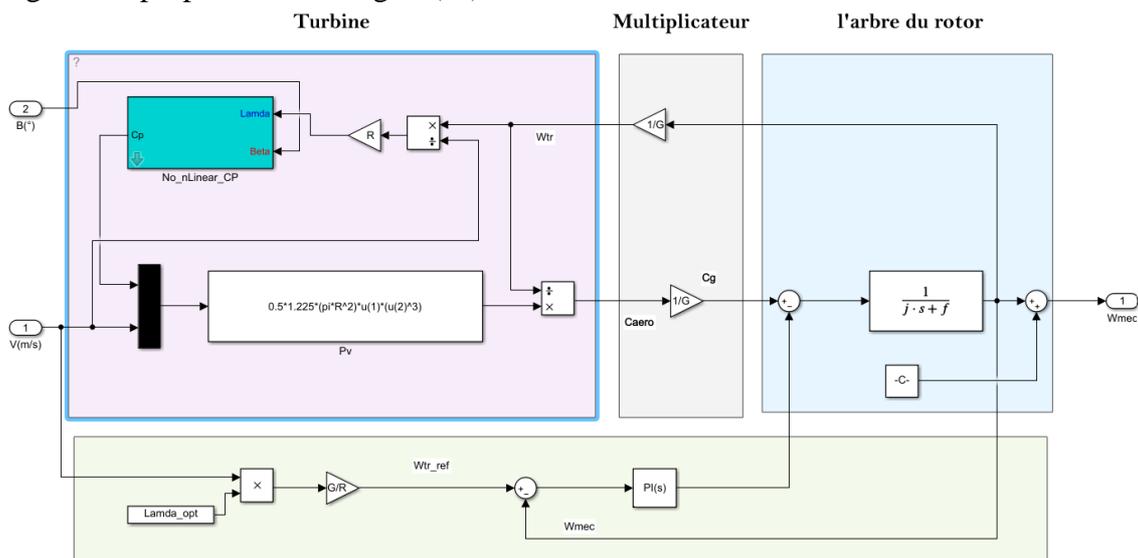


Figure (II. 17) Schéma fonctionnel de la MPPT associée à la turbine

II.8.1.2 Contrôle et régulation du Bus DC

La tension continue non régulée provenant du redresseur du GAS doit être convertie en une tension continue plus élevée pour le bus continu, comme illustré dans la figure (II.18). Cela est accompli à l'aide d'un convertisseur élévateur DC/DC.

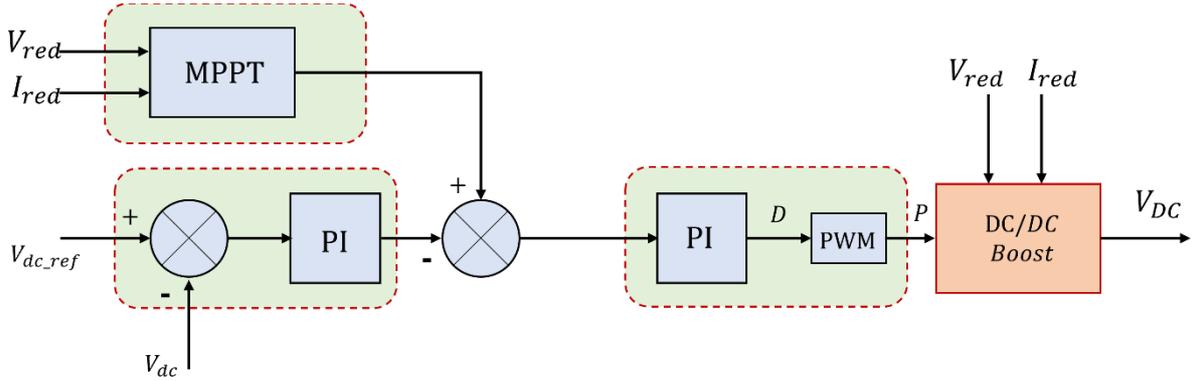


Figure (II. 18) Régulation du bus DC.

Le convertisseur DC-DC (Boost) règle la tension du bus DC à l'aide des algorithmes de contrôle MPPT et du contrôleur PI.

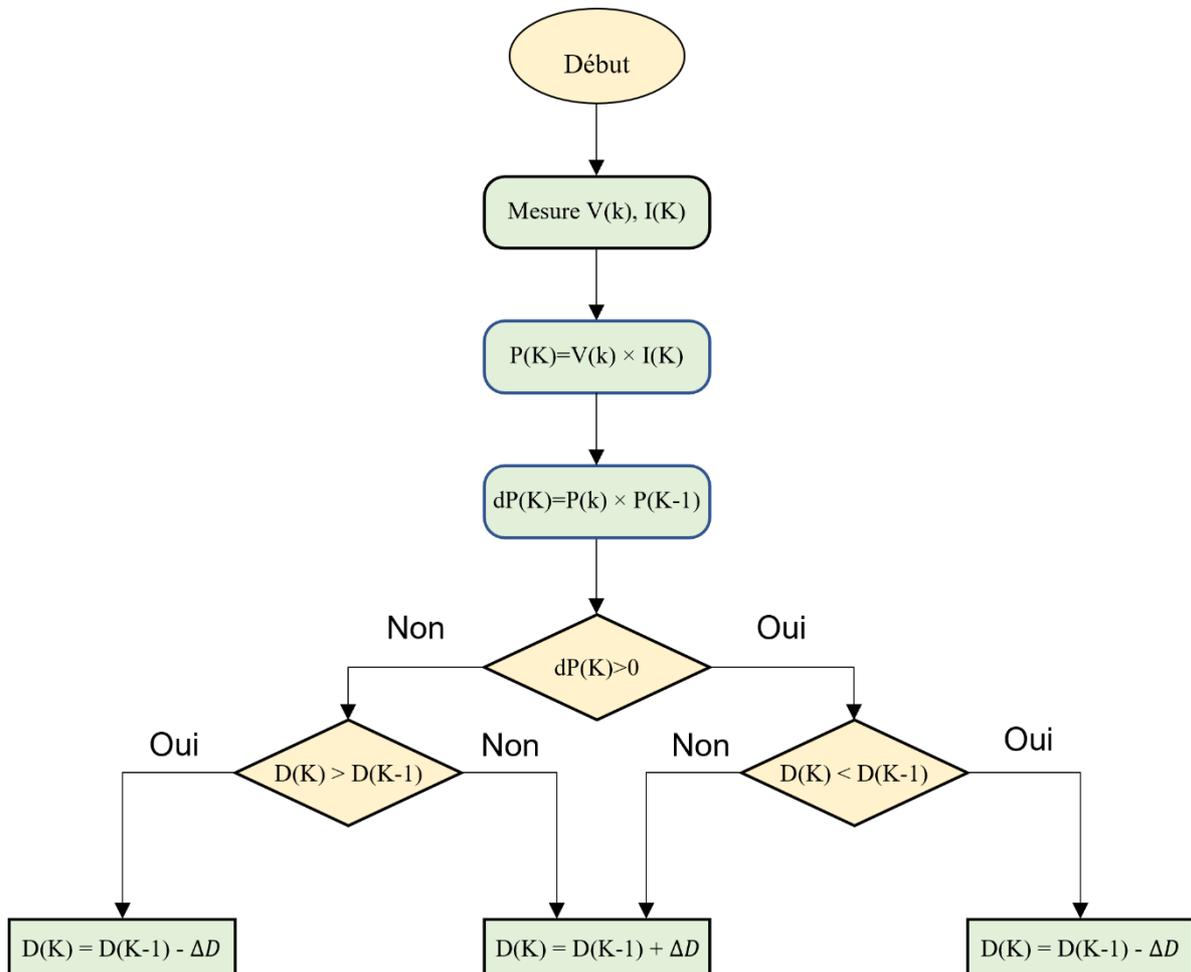


Figure (II. 19) Organigramme de la Mppt basée sur la méthode P&O.

II.8.2 Contrôle coté charge

Le contrôle de l'onduleur, plus précisément le contrôle de la tension dans la boucle interne du courant, joue un rôle essentiel dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. Dans notre cas, elle régule la tension fournie à la charge connectée au système, ce qui garantit un fonctionnement stable et efficace de la conversion d'énergie.

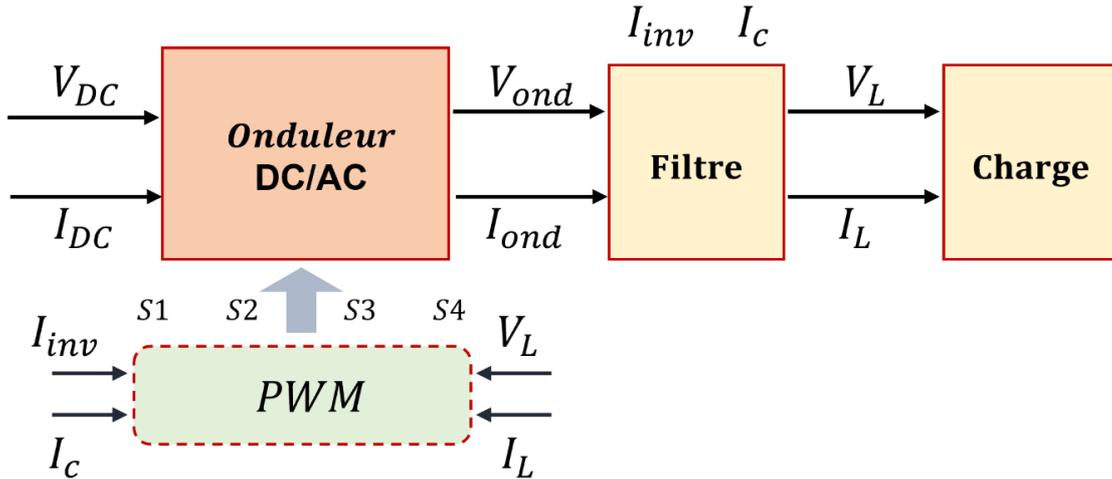


Figure (II. 20) Schéma de contrôle coté charge

Dans la figure (II.21), on a présenté la boucle interne du courant du contrôle de l'onduleur qui est chargée de maintenir la tension de sortie de l'onduleur dans des limites spécifiées en ajustant le courant qui traverse le convertisseur. Elle fonctionne en utilisant un régulateur de boucle de rétroaction qui compare la tension de sortie réelle de l'onduleur avec la tension de référence souhaitée.

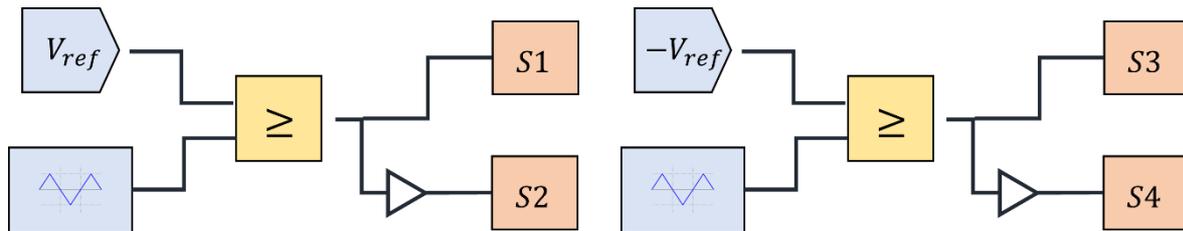


Figure (II. 21) générations des signaux de commande

La boucle de tension est responsable du contrôle de la tension de sortie de l'onduleur. Son objectif principal est de maintenir la tension de sortie à une valeur de référence prédéfinie, généralement fixe.

La boucle de courant, quant à elle, est responsable de contrôler le courant qui circule à travers le convertisseur. Elle fonctionne en maintenant le courant de sortie du convertisseur à un niveau souhaité, souvent en régulant la modulation de largeur d'impulsion (MLI).

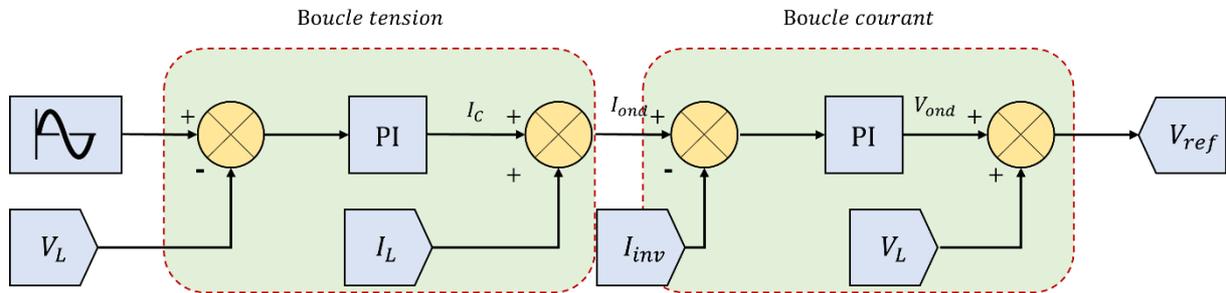


Figure (II. 22) Schéma fonctionnel du contrôle coté charge

II.9 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a été consacré à la modélisation mathématique d'un système de conversion de l'énergie éolienne. Nous avons débuté par présenter le modèle aérodynamique de l'éolienne, puis déterminer son coefficient de puissance à partir de concepts théoriques.

Ensuite, nous avons exploré la modélisation des machines asynchrones ainsi que des convertisseurs statiques associés aux éoliennes, tels que le redresseur triphasé, le convertisseur DC/DC et l'onduleur monophasé.

Enfin, nous avons examiné les techniques de contrôle du système, tant du côté du générateur que du côté de la charge.

Ces différentes modélisations et techniques de contrôle sont essentielles pour optimiser l'efficacité et la performance des systèmes de conversion d'énergie éolienne.

III. Chapitre III

Simulation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

III.1 Introduction

La simulation est une méthode efficace et rentable qui est souvent utilisée dans la recherche préliminaire et comparative, aussi bien pendant la phase de développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes.

Actuellement, on compte plusieurs outils de simulation, parmi eux MATLAB/SIMULINK, qui sont utilisés dans l'industrie et dans les milieux universitaires.

Dans ce dernier chapitre, grâce au logiciel Sim Power Systems/MATLAB, toute la chaîne de conversion du vent sera prise en charge afin de confirmer le bon fonctionnement du système proposé.

III.2 Présentation du système global étudié

Pour mener des études sur les systèmes éoliens dans les laboratoires, on n'utilise pas directement les éoliennes, mais plutôt des émulateurs, car ils sont flexibles, facile à régler et peuvent reproduire les mêmes caractéristiques que celles de la turbine. La structure de simulation la plus utilisée ces derniers temps, est celle des moteurs asynchrones à cage. Il est basé sur le système de conversion d'énergie que montre la figure (III.1).

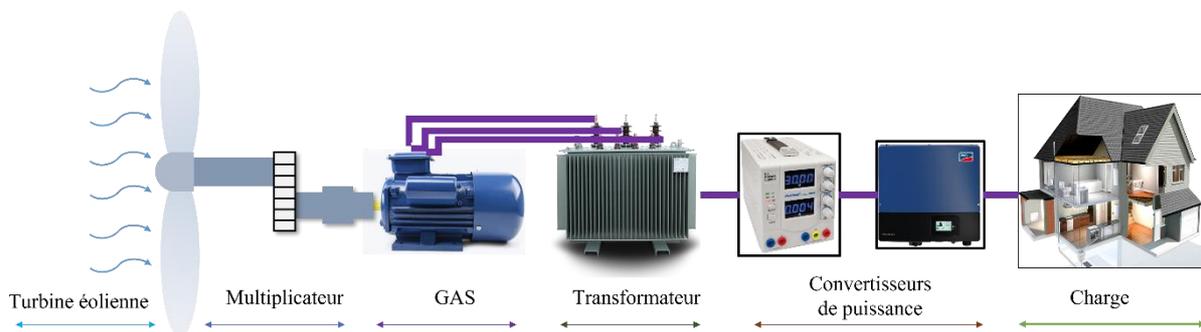


Figure (III. 1) Le schéma du système global

Les chercheurs remplacent le vent et la turbine éolienne par un moteur dans le but de produire un couple mécanique, afin d'émuler le comportement de la turbine éolienne par une vitesse de rotation. Le couple généré par la turbine est connecté à la génératrice asynchrone triphasée. Pour que la sortie de la chaîne éolienne délivre une énergie électrique, il faut la présence d'une compensation réactive (banc de capacité) ainsi que d'un redresseur (AC-DC), d'un hacheur Buck (DC-DC), afin d'abaisser la tension redressée V_{dc} , d'un filtre LC passe bas, pour réduire le taux d'harmoniques et enfin, d'un onduleur monophasé (DC-AC).

III.3 Simulation de la turbine associée à la GAS

Le schéma bloc de la simulation de l'émulateur d'éolien dans l'environnement Matlab/SIMULINK, est illustré par la figure (III.2).

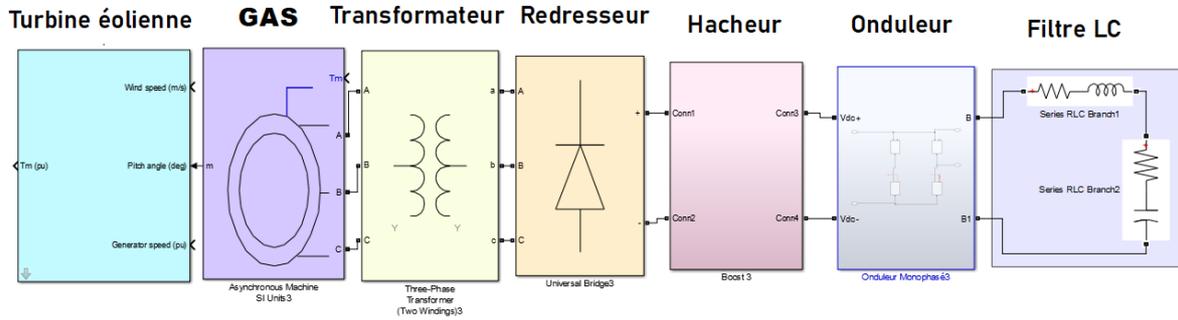


Figure (III. 2) Modèle Simulink du système éolien complet. Fait un schéma que montre uniquement Ce modèle sera exploité dans la commande du système éolien étudié.

III.3.1 Résultats et discussions

Les schémas ci-dessous illustrent les variations du couple électromagnétique, de la vitesse de rotation du rotor, de la tension et du courant de la génératrice (V_{abc} ; I_{abc}), ainsi que des puissances active et réactive développées par cette dernière.

a. Allures du couple électromagnétique et de la vitesse de rotation

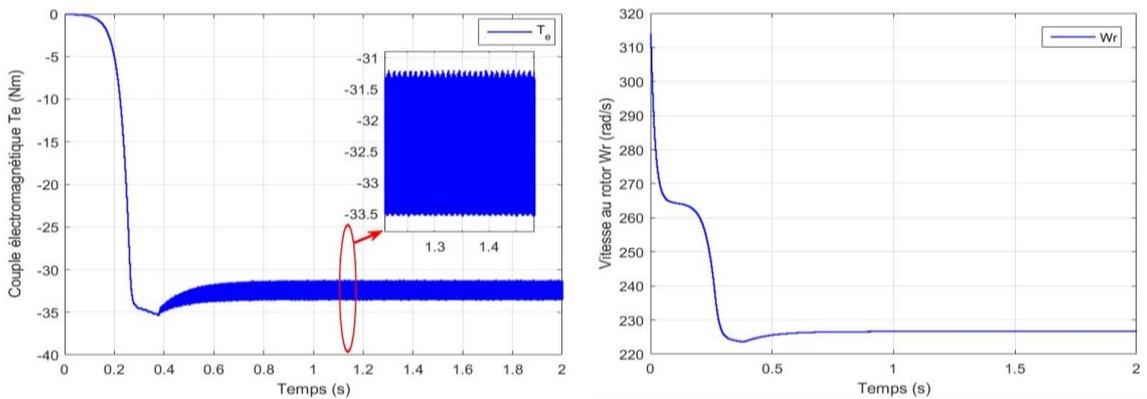


Figure (III. 3) (a) allure du couple électromagnétique, (b) la vitesse de rotation

La figure (III.3-a) représente le couple développé par la machine asynchrone, on peut voir que la réponse du couple est rapide. Aussi on peut voir sur le zoom de la figure que la bande hystérésis est d'une taille de 2 Nm, ce qui est admissible.

La figure (III.3-b) montre la vitesse au niveau du rotor de la machine à induction, on remarque qu'après une période transitoire de 0.5 seconde la machine atteint son régime permanent et sa vitesse se converge vers 227 rad/s. Il est important de noter que durant l'intervalle $[0 ; 0.45]$, la vitesse de la machine n'est pas stable et cela revient au fait que la machine n'a pas encore atteint son régime permanent.

b. Allures des tensions (V_{abc}) et des courant (I_{abc}) de la génératrice

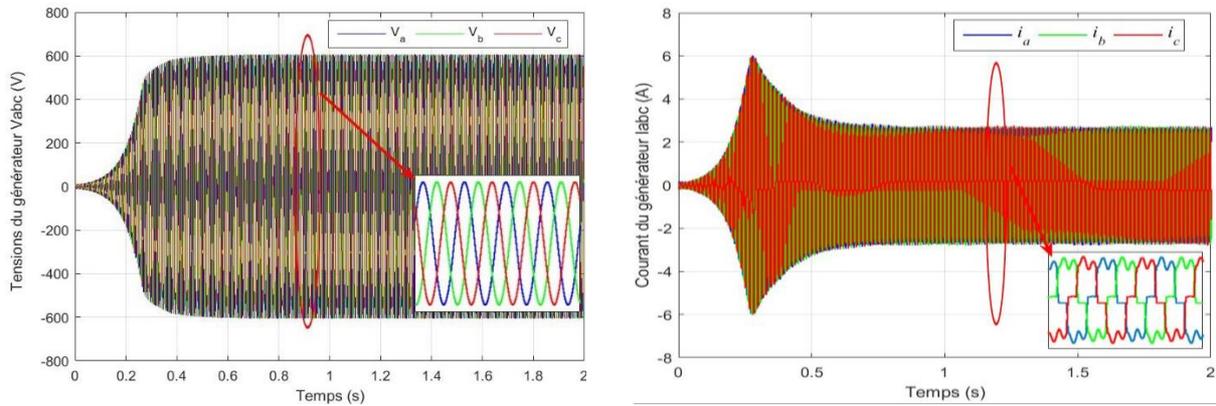


Figure (III. 4) (a) allures des tensions V_{abc} , (b) allures des courant I_{abc}

De la figure (III.4-a) on distingue que la GAS développe trois signaux sinusoïdaux des tensions V_a , V_b et V_c déphasés, qui varient de 600 à -600V. Il est important de noter que les valeurs spécifiques des tensions peuvent varier en fonction des caractéristiques de la génératrice, des paramètres du réseau électrique et des conditions de fonctionnement. La tension générée par la génératrice peut également être influencée par des éléments tels que la charge connectée, la régulation de la tension, phénomène d'auto-amorçage, et les paramètres du système électrique global.

Les tensions de phase de la GAS sont montrées ci-dessous. On remarque qu'elles ont une même amplitude égale à 400 volts. A partir du zoom sur la figure susmentionnée, on peut aussi voir que les tensions de phases sont de nature sinusoïdale et elles sont séparées de 120° l'une de l'autre.

Les courants de phase de la GAS sont illustrés dans la figure (III.4.a) ou on peut voir clairement qu'ils ont une amplitude égale à 3 A. Le zoom sur la figure (III.4.b) démontre que les courant sont d'une nature sinusoïdale avec une légère et admissible déformation.

Les courants présentés durant cette étape sont pollués d'harmoniques, Comme mentionné, les courants de phase sont de nature sinusoïdale avec une légère déformation admissible. Cette déformation peut être causée par des harmoniques indésirables présents dans le système électrique. Ces harmoniques peuvent être générés par les caractéristiques non linéaires de la charge, des interférences électromagnétiques ou d'autres sources.

On remarque aussi qu'il y'a un pic de courant de 6 à -6A à 0.3s, il est possible que le système ait traversé une phase de transition ou de régime transitoire. Pendant cette période, des changements brusques peuvent se produire dans le système électrique, ce qui peut entraîner des pics de courant temporaires.

c. Allure des puissances P et Q développées par la génératrice (GAS)

La figure (III.32) : représente les puissances active et réactive de la génératrice Asynchrone.

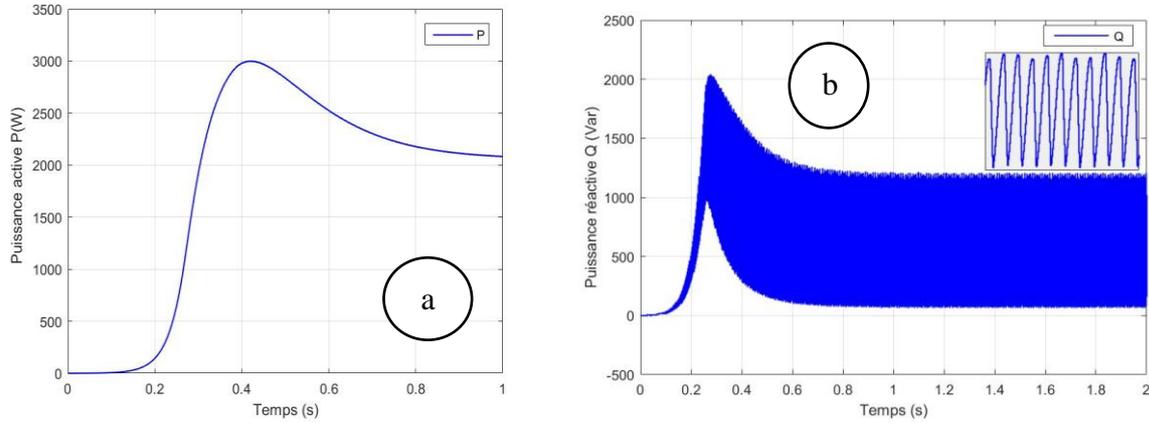


Figure (III. 5) a : Allure de puissance active P, b : Allure de la puissance réactive Q

a. L'influence de la variation de la capacité d'excitation sur la GAS

La capacité d'excitation d'une génératrice asynchrone fait référence à l'excitation du circuit magnétique de la machine, qui peut être contrôlée par le réglage du courant de champ ou de l'excitation du stator. Cette excitation joue un rôle crucial dans la génération de la tension de sortie de la génératrice.

Lorsque la capacité d'excitation est augmentée, cela a tendance à augmenter le flux magnétique dans la machine, ce qui entraîne une augmentation de la tension développée. Cela peut être bénéfique dans certaines situations où une tension de sortie plus élevée est nécessaire pour alimenter des charges spécifiques ou pour compenser les pertes dans le système.

Inversement, lorsque la capacité d'excitation est réduite, le flux magnétique diminue, ce qui entraîne une diminution de la tension développée par la génératrice. Cela peut être souhaitable dans certaines applications où une tension plus basse est requise ou lorsqu'une réduction de la puissance générée est nécessaire.

Il est important de noter que la variation de la capacité d'excitation peut avoir des effets sur d'autres paramètres de fonctionnement de la génératrice asynchrone, tels que la puissance réactive, le facteur de puissance et l'efficacité globale du système. Par conséquent, des ajustements appropriés de la capacité d'excitation doivent être effectués en tenant compte des exigences de fonctionnement spécifiques et des performances attendues du système.

Dans le tableau ci-dessous, on observera l'influence de C_{ex} sur la GAS

Tableau 1. Influence de la variation de la capacité d'excitation sur la GAS

V_v [m/s]	C_{ex} [μ F]	R [Ω]	V [V]	I [A]	P [W]	Q [var]	T_e [N.m]
12	100	100	0	0	0	0	-0.3948
12	200	100	243.2	1.426	964	556.6	-0.2916

12	300	100	276.2	6.785	4451	1068	-34.31
12	400	100	329	2.187	1951	1127	-8.423
12	500	100	351.9	1.657	1814	1047	-21.789

Tableau 2. Influence de la variation de la vitesse du vent sur la GAS

V_v [m/s]	C_{ex} [μ F]	R [Ω]	V [V]	I [A]	P [W]	Q [var]	Te [N.m]
18	300	100	380.7	8.931	7213	3807	-55.51
12	300	100	276.2	6.785	4451	1068	-34.31
10	300	100	202.5	3.869	2755	2351	-21.29
8	300	100	143.7	3.427	1079	921.6	-8.423
5	300	100	8.476	0.09496	1.49	1.177	-0.1349

Tableau 3. Caractéristiques de la machine asynchrone

Désignation	Symbole	Valeur
Puissance nominale	P_n	4000W
Tensions nominale	V_n	400V
Fréquence de commutation	f_n	50Hz
Résistance statorique	R_s	1.405 Ω
Inductance statorique	L_s	0.005839H
Résistance rotorique	R_r'	1.395 Ω
Inductance rotorique	L_r'	0.005839H

Tableau 4. Paramètres de la turbine.

Désignation	Symbole	Valeur
Puissance mécanique	P_m	5000W
Puissance apparente	S_n	5000/0.9VA
Vitesse de base de la turbine	V_v	6m/s
Rendement maximale	η	85%

III.4 Simulation coté DC

III.4.1 Le redresseur

Ci-dessous on présente le schéma bloc du redresseur :

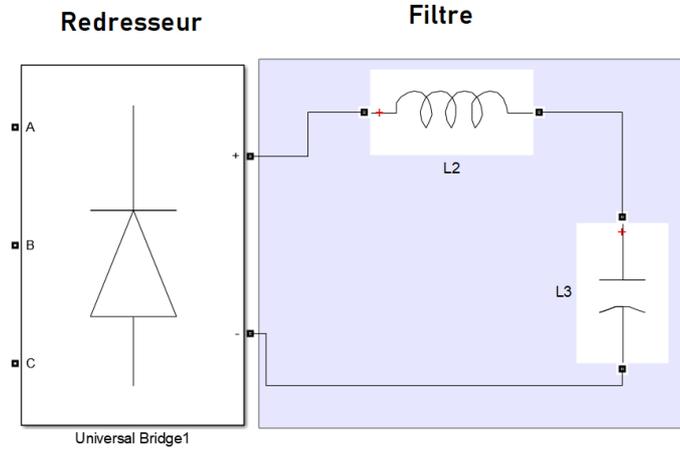


Figure (III. 6) schéma bloc du redresseur

III.4.2 Hacheur élévateur (Boost)

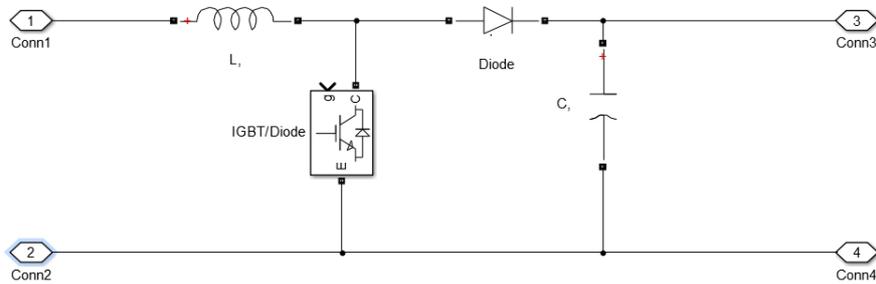


Figure (III. 7) Schéma bloc du hacheur Boost

III.4.2.1 Dimensionnement du boost

$$D = \left(1 - \left(\frac{V_{in} n}{V_{out}} \right) \right) \quad (III. 1)$$

Avec :

D : est le rapport cyclique.

V_{in} : la tension à l'entrée du convertisseur.

V_{out} : la tension à la sortie.

$$I_0 = \left(\frac{P_0}{V_{out}} \right) \quad (III. 2)$$

$$R_{min} = \frac{V_{out}}{I_0} \quad (III. 3)$$

$$C_{min} = \frac{I_0 D}{f_s \Delta V} \quad (III. 4)$$

$$L_{min} = V_{in} \times \frac{V_{out} - V_{in}}{dI \times f_s \times V_{out}} \quad (III. 5)$$

Où:

f_s : la fréquence de commutation.

I_0 : Le courant de sortie

ΔV : la chute de tension tolérée.

ΔI : la chute de courant tolérée.

III.4.3 Le Bus DC

le modèle de tension DC est donné comme suit :

$$CV_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = P_{ge} - P_L \quad III.6$$

Tel que

C : la capacité

P_{ge} : puissance active du générateur

P_L : puissance active de la charge

III.4.4 Résultats et discussions

L'allure de la tension du bus continue est illustrée dans la figure (III.8) montrée ci-dessous. On remarque que V_{DC} suit bien sa référence qui est égale à 190 V. Aussi, on peut dire qu'il est stable et insensible aux variations de la charge ce qui améliore d'avantage la performance du système étudié.

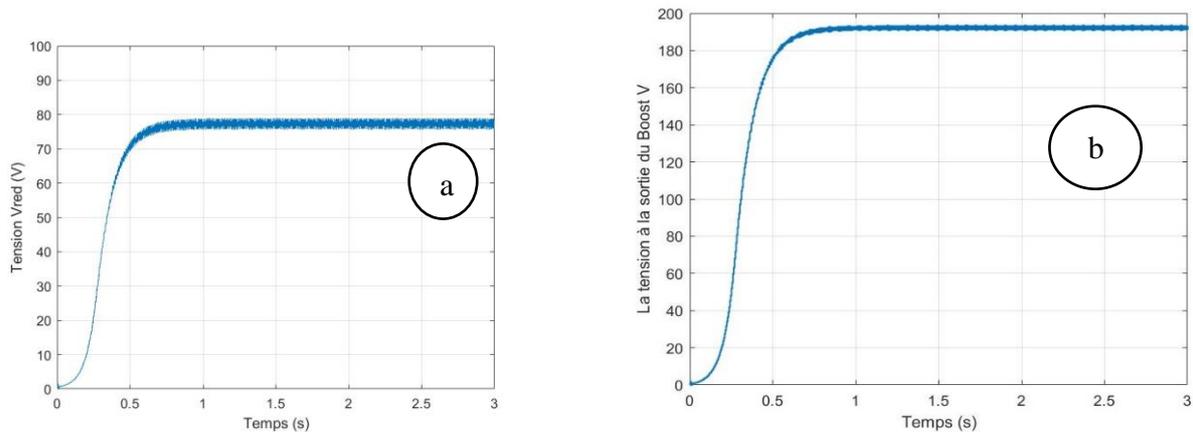


Figure (III. 8) a. Allure de la tension redressée V_{red} , b. Allure de la tension V à la sortie du Boost

Après environ 0.5 s, un régime permanent est atteint. Ce qui nous fournit une tension V_{dc} d'environ 200V, qu'on devra élever à l'aide du hacheur Boost, à une tension V d'environ 500V.

III.5 Simulation coté charge (AC)

III.5.1 Onduleur avec charge

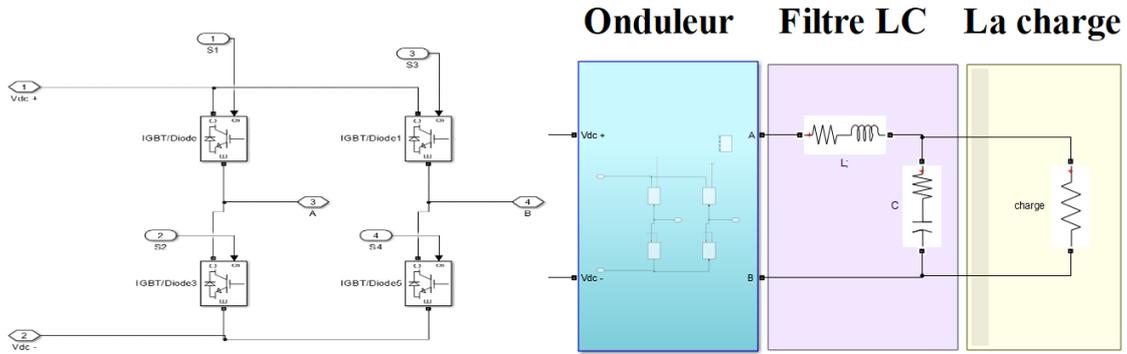


Figure (III. 9) schéma bloc de l'onduleur plus charge

III.5.2 Dimensionnement du filtre

$$L = \frac{V_{dc}}{U \times f_s \times I_{rppmax}} \quad III.6$$

$$C = \left[\frac{10}{2\pi \times f_s} \right]^2 \times \frac{1}{L} \quad III.7$$

$$R = \frac{U}{I} = 24.2 \Omega \quad III.8$$

L : L'inductance

C : La capacité

R : La résistance

I_{rppmax} : Le courant de rappel maximal

f_s : Fréquence de commutation

U : la tension de sortie

I_0 : le courant de sortie

III.5.3 Résultats et discussions

Dans cette partie de l'étude, nous avons effectué des mesures pour évaluer les taux de distorsion harmonique (THD_{av} et THD_{apr}) ainsi que les caractéristiques des courants et des tensions générées par l'onduleur I_{in} et V_{in} , ainsi que ceux de la charge V_L et I_L . Les résultats obtenus sont les suivants :

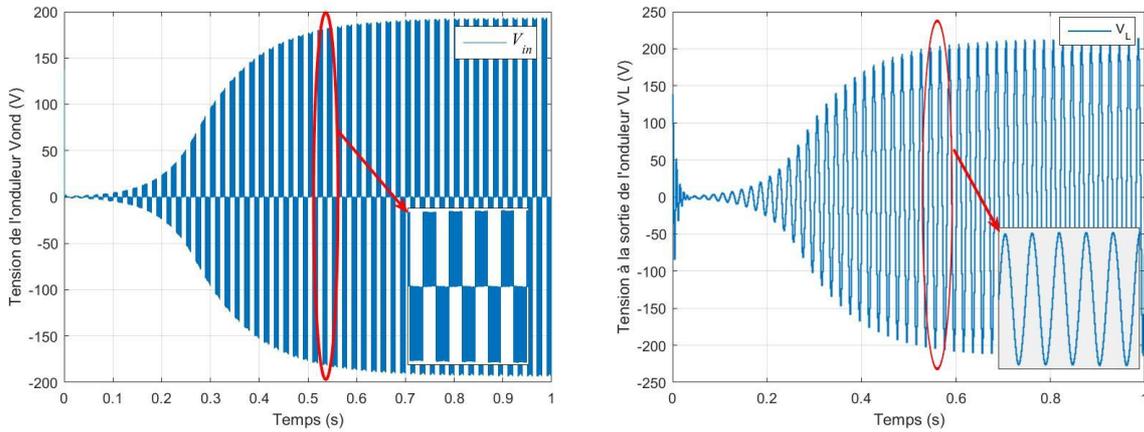


Figure (III. 10) (a).Tension composée à la sortie de l'onduleur (avant filtrage), (b).Tension à la charge VL (après filtrage)

Le taux de distorsion harmonique moyen avant le filtrage (THDav) a été mesuré à 2,369% Cependant, le taux de distorsion harmonique après filtrage (THDapr) a été mesuré à 1,431%. Ces paramètres sont utilisés pour évaluer la qualité du signal après et avant l'application d'un filtrage. Une valeur plus basse de THDapr indique une réduction significative de la distorsion harmonique après le filtrage.

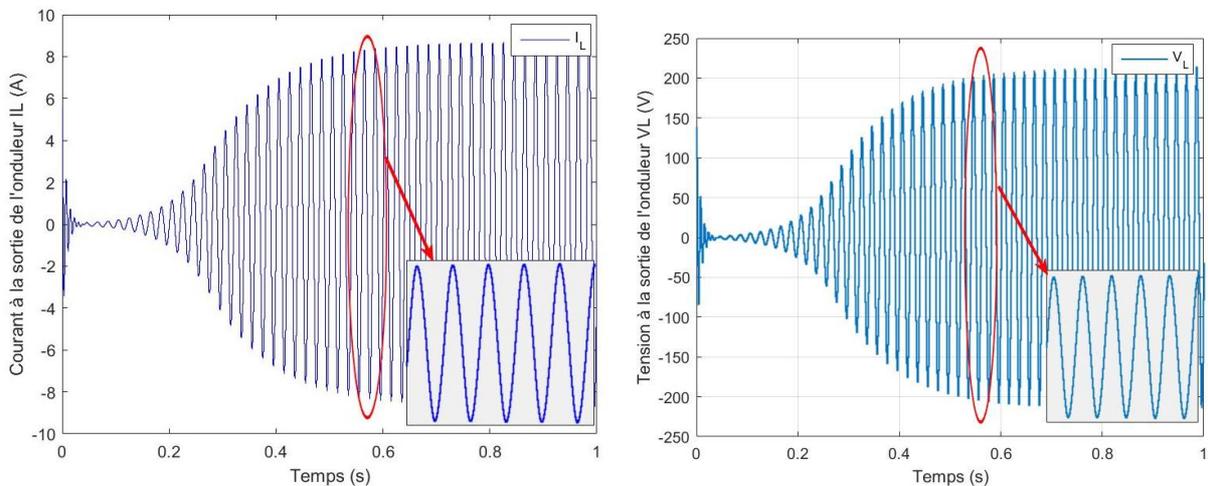


Figure (III. 11) (a), le courant de charge. (b) tension de charge

En ce qui concerne les courants et les tensions, on observe que le courant à l'entrée de l'onduleur présente une forme d'onde unipolaire, avec une amplitude de 20 A. De même, la tension à l'entrée de l'onduleur présente une forme d'onde unipolaire, avec une amplitude de 200 V.

En ce qui concerne les courants et les tensions, on observe que le courant à la sortie de l'onduleur présente une forme d'onde unipolaire, avec une amplitude de 8A. De même, la tension à la sortie de l'onduleur présente une forme d'onde unipolaire, avec une amplitude de 220 V

Ces résultats soulignent l'importance de l'application d'un filtrage dans les systèmes d'onduleurs. L'application d'un filtrage dans un tel système est essentielle pour garantir le bon

fonctionnement des dispositifs électriques et maintenir la qualité de l'énergie électrique fournie par l'onduleur

III.6 Conclusion

Dans cette section, il a été déduit que la turbine éolienne connectée à un Générateur Asynchrone à (GAS) n'est pas suffisant pour obtenir une tension de charge VL. Par conséquent, plusieurs convertisseurs statiques et méthodes de contrôle ont été employés.

Dans un premier temps, le redresseur (AC/DC) a été utilisé pour convertir les tensions générées par la machine asynchrone V_{abc} en une tension continue V_{in} à l'entrée du hacheur Boost (DC/DC). Cette conversion a pour but de hausser la tension en V_{dc} afin de l'appliquer à l'entrée de l'onduleur monophasé (DC/AC), qui à son tour la convertit en une tension alternative. Cette tension alternative passe ensuite par un filtre LC passe-bas afin de minimiser au maximum les harmoniques présentes. Au final, on obtient une tension de charge VL qui va alimenter notre charge

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de notre étude a porté sur l'application des machines asynchrones dans les systèmes éoliens, dans le contexte de la demande croissante d'énergie électrique et de la recherche de sources d'énergie renouvelables et propres. On a souligné l'importance de l'énergie éolienne en tant que source d'énergie verte renouvelable, mettant en évidence ses avantages tels que sa disponibilité gratuite, son respect de l'environnement, sa fiabilité et sa rentabilité.

Au cours de cette étude, on a investigué en détail les systèmes d'énergie éolienne, en analysant les équations et les principes fondamentaux qui régissent leur fonctionnement. Une étude a été réalisée sur l'état actuel de la conversion électromécanique, en examinant différents types de générateurs et les convertisseurs associés à notre système.

Puis une modélisation mathématique a été faite sur les différents composants d'un système de conversion de l'énergie éolienne qui repose sur une machine asynchrone auto-excitée. Notre recherche a porté sur l'exploration des méthodes de contrôle précises afin de gérer efficacement ces composants et d'améliorer la qualité de l'énergie produite. L'objectif était de répondre aux exigences de l'utilisateur en termes de performance et de satisfaction.

Une réalisation des simulations approfondies a été faite, à l'aide du logiciel Matlab pour évaluer la performance et l'impact de notre système, en tenant compte de divers paramètres et variables. Les résultats obtenus ont permis de valider nos modèles et de démontrer l'efficacité de l'utilisation des machines asynchrones dans les systèmes éoliens.

En résumé, notre étude a contribué à une meilleure compréhension des systèmes éoliens et de l'application des machines asynchrones dans ces systèmes. Elle a également identifié des pistes d'amélioration pour optimiser la conversion de l'énergie électromécanique et améliorer la qualité de l'énergie générée.

Pour les travaux futurs, nous recommandons de poursuivre la recherche dans ce domaine en se concentrant sur l'optimisation des systèmes éoliens, l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques et l'amélioration des techniques de contrôle pour une meilleure gestion des flux d'énergie. De plus, l'exploration de nouvelles technologies émergentes telles que le stockage d'énergie et l'intelligence artificielle peut également être envisagée pour maximiser l'efficacité des systèmes éoliens.

Références

- [1] Site: <https://www.edf.fr/>, consulté le 15 mai 2023.
- [2] Zeghdi, Z. Barazane, L. Miloudi, K. Abdelmalek, S. Chems, A. Larabi, A. : « Amélioration des Performances d'une Chaîne de Conversion d'Énergie Éolienne par la Technique MPPT »
- [3] F. POITIERS. « *Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone à cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau.* » 2003. Thèse de doctorat. Université de Nantes.
- [4] Site: <https://www.totalenergies.fr/>, consulté le 15 mai 2023.
- [5] C. Serir « cours énergie renouvelable 1er année master » Université de Bejaïa
- [6] M, Bachani, « Identification paramétrique de la machine asynchrone » mémoire de magister, 2013, Université des sciences et de technologie d'Oran
- [7] R.Lakhdar « modélisation, identification expérimentale et commande vectorielle d'un moteur asynchrone triphasé à cage » mémoire de fin d'étude, 2015, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [8] S. FERGANI, I. BOUMRAR, H. HENINI, N. BENTOUATI, « Etude Par Simulation D'un Emulateur D'une Turbine Eolienne » mémoire de fin d'étude de l'université de Médéa.
- [9] S. NEZLIOUI, Y. YAKOUB « Diagnostic des défauts de court-circuit statorique d'une machine asynchrone » mémoire de fin d'étude, université mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.
- [10] M. Mechalikh, C. Hamada « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » mémoire de fin d'étude ; université KASDI MERBAH de OUARGLA.
- [11] S. El Aimani « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille.
- [12] A. BESSAM « Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque » mémoire de fin d'étude, de l'UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA
- [13] D. Azzag, Z. Bounaim « Etude d'un émulateur éolien » 2021, mémoire de fin d'étude, de l'université de Bejaïa
- [14] E. Favio DOMINGUEZ, BERMUDEZ « Simulation numérique de parcs d'hydroliennes à axe vertical carénées par une approche de type cylindre actif » thèse doctorat, de l'université de Grenoble Alpes.
- [15] T. Rekioua, D. Rekioua et R. Abdelli « Performances improvements and torque ripple minimization for VSI fed induction machine with direct control torque » 2011, Department of Electrical Engineering, University of Bejaïa, Route de targa Ouzemmour, Laboratory LTII, Algeria.
- [16] C. R. Kelber, et W. Schumacher « Adjustable speed constant frequency energy generation with doubly-fed induction machines » 2000, In Proceedings of the European Conference Variable Speed in Small Hydro, Grenoble, France.
- [17] C. Serir « cours techniques d'optimisation et de contrôle de puissance »
- [18] H. Aouaou, S. Cherfi « Etude des défauts dans les convertisseurs statiques » Mémoire de fin d'étude, de l'UNIVERSITÉ AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA.

-
- [19] H. Semmaoui « Conception d'un lien de communication pour BioMicroRobot » mémoire de fin d'étude, de l'université de Sherbrooke.
- [20] Wu, B., Lang, Y., Zargari, N., & Kouro, S. (2011). *Power conversion and control of wind energy systems*. John Wiley & Sons.
- [21] Abad G, Lopez J, Rodriguez ML, Marroyo L, Iwanski G « Doubly fed induction machine modeling and control for wind energy generation» Wiley-IEEE Press; 2011.
- [22] Site :<https://www.choisir.com/>. Consulté le 01 juin 2023.
- [23] I. Sebihi, K.Hafsi « Etude du générateur asynchrone auto-excitée pour l'utilisation dans le système éolienne » mémoire fin d'étude de l'UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.

Résumé

Cette étude concerne un système d'émulateur éolien qui vise à reproduire et à réguler la génération d'énergie éolienne, et qui passe par ces des principales étapes : La turbine éolienne entraîne la génératrice asynchrone pour produire une tension alternative triphasée V_{abc} , qui est abaissée en utilisant un transformateur pour l'adapter aux besoins du système, puis cette tension alternative V_{abc} est convertie en tension continue à l'aide d'un redresseur. Ce qui permet d'obtenir une tension continue V_{dc} , ensuite elle est augmentée (boostée) l'aide d'un convertisseur DC-DC, afin d'atteindre une valeur souhaitée pour l'alimentation du système, pour être utilisée comme entrée de l'onduleur, qui convertit la tension continue en une tension alternative, appelée V_{in} , qui est adaptée pour alimenter la charge. La tension V_{in} est finalement utilisée pour alimenter une charge spécifique à travers un filtre passe-bas LC. Ce filtre permet de lisser la tension et d'éliminer les harmoniques indésirables. Le but de cette étude est de concevoir et de contrôler un système de simulation éolienne qui reproduit les caractéristiques de la production d'énergie éolienne de manière précise et régulée. En utilisant différents composants tels que turbine, générateur asynchrone, transformateur, redresseur, bus DC élévateur, onduleur et filtre passe-bas LC, il est possible de créer un système qui génère de la tension et de la puissance de manière stable et contrôlée, similaire à une véritable éolienne. Cette recherche peut impliquer une analyse des performances, une simulation, des tests expérimentaux et des stratégies de contrôle pour garantir que le système de simulation du vent fonctionne de manière optimale et efficace tout en répondant aux exigences spécifiques à l'application.

Abstract

This study focuses on a wind emulator system designed to replicate and regulate wind power generation. It involves several main stages: The wind turbine drives an asynchronous generator, producing a three-phase AC voltage V_{abc} . This voltage is then stepped down using a transformer to adapt it to the system's requirements. The AC voltage V_{abc} is subsequently converted into DC voltage using a rectifier, resulting in a DC voltage V_{dc} . To achieve the desired power level for the system, the DC voltage is boosted using a DC-DC converter. The boosted voltage serves as input to an inverter, which converts it back into AC voltage called V_{in} , suitable for powering the load. Finally, the V_{in} voltage is employed to supply a specific load through an LC low-pass filter. This filter smooths the voltage and eliminates any undesirable harmonics. The objective of this study is to design and control a wind simulation system that accurately reproduces the characteristics of wind power generation in a regulated manner. By utilizing various components such as the turbine, induction generator, transformer, rectifier, DC step-up bus, inverter, and LC low-pass filter, it is possible to create a stable and controlled system that generates voltage and power, mimicking a real wind turbine. The research may involve performance analysis, simulations, experimental testing, and the development of control strategies to ensure optimal and efficient operation of the wind simulation system while meeting specific application requirements.

Қеуісін

Бұл зерттеу желдеткіш жүйесін жобалауға бағытталған, жел энергиясын қайталау және реттеу мақсатын қойып. Оның негізгі кезеңдері: жел турбинасы асинхрон генераторды қозғатып, үш фазалы AC кернеуін V_{abc} өндiредi. Бұл кернеу жүйенің талаптарына сәйкестендірілуі үшін трансформатор арқылы төмендетіледі. AC кернеу V_{abc} одан соң диодтық түрлендіргіш арқылы DC кернеуіне V_{dc} айналады. Жүйенің қажетті қуатын қолдану үшін DC кернеуін DC-DC түрлендіргіші арқылы арттырып (boost) алады. Арттырылған кернеу инвертерге кіріс ретінде қолданылады, инвертер AC кернеуін V_{in} ретінде шығарады, жүктеме қоректендіруге қолайлы. Соңында, V_{in} кернеуі жүктемеге LC төмен өткізгіш сүзгі арқылы беріледі. Бұл сүзгі кернеуді тегістейді және қажетсіз гармоникаларды жоюға көмектеседі. Бұл зерттеудің мақсаты жел энергиясын дәл қайталайтын жел энергиясының сипаттамаларын реттелген түрде қайталайтын жел симуляция жүйесін жобалау және бақылау болып табылады. Турбина, индукция генераторы, трансформатор, түрлендіргіш, DC өсірілу шинасы, инвертер және LC төмен өткізгіш сүзгі сияқты әртүрлі құрамдас бөліктерді пайдаланып, нақты жел турбинасы сияқты тұрақты және бақыланатын жүйе құруға мүмкіндік береді. Зерттеу жұмысына өнімділік талдауы, симуляциялар, эксперименттік тексерулер және жел симуляция жүйесінің оптималды және тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз ету мақсатында бақылау стратегияларының дамуы кіреді.