



Faculté : TECHNOLOGIE
Département : Électrotechnique
Domaine : Science de la Technologie
Filière : ÉLECTROTECHNIQUE
Spécialité : Commandes Électriques

Mémoire
Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème :

**Modélisation, Simulation, et Optimisation d'une chaîne
éolienne sous Matlab/Simulink**

Présenté par : KHETTACHE Mehdi

Encadrant : BENAMIMOUR Tariq MAB UBMA

Jury de Soutenance :

MERABET Leila	MCA	UBMA	Présidente
BENAMIMOUR Tariq	MAB	UBMA	Encadrant
KELAIAIA Mounia Samira	Pr	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

*Je tiens à remercier **Dieu** pour m'avoir donné la force et la patience pendant
mes années d'études.*

*Un grand merci à mon directeur de recherche, le **Dr. BENAMIMOUR TARIQ**,
pour son soutien et ses idées précieuses.*

*Je suis reconnaissant envers **les membres du jury** pour leur évaluation de mon
travail.*

*Un merci spécial à **tous les professeurs** du département d'électrotechnique.*

*Et enfin, un grand merci à **ma famille** et **mes amis** pour leur soutien constant.*

Sommaire

Introduction Générale	1
-----------------------	---

Chapitre I : L'ENERGIE EOLIENNE

I.1 Historique (État de l'art)	4
I.1.1 Évolution des énergies renouvelables	4
I.1.2 Historique de l'énergie éolienne	4
I.1.3 Avancements dans la modélisation des éoliennes	5
I.2 L'Énergie éolienne	6
I.2.1 Introduction	6
I.2.2 Principes fondamentaux de l'énergie éolienne	6
I.2.3 Rôle des éoliennes dans la production d'énergie	8
I.2.4 Avantages et défis associés	9
I.3 Chaîne de Conversion	10
I.3.1 Composants de la chaîne de conversion éolienne	10
I.3.2 Principe de fonctionnement	12
I.3.3 Conversion de l'énergie éolienne	12
I.4 Types des turbines éoliennes	13
I.4.1 Éoliennes à axe vertical	13
I.4.2 Éoliennes à axe horizontal	14
I.5 Machines électriques utilisées	15
I.5.1 Machines asynchrones	15
I.5.2 Machine asynchrone à double alimentation (MADA)	15
I.5.3 Machines synchrones	16
I.5.4 Machine à reluctance variable (MRV)	16
I.5.1 Machine à aimants permanents	16
I.6 Conclusion	16

Chapitre II : MODELISATION D'UN SYSTEME DE CONVERSION EOLIENNE

II.1 Introduction	18
II.2 Modélisation de la partie mécanique	18
II.2.1.1 Modélisation de la Turbine	19
II.2.1.2 Modélisation du Multiplicateur	21
II.2.1.3 Modélisation de l'Arbre Mécanique	21
II.3 Stratégie de Commande de la Turbine Eolienne	22
II.4. Modélisation de Machine à Réluctance Variable 4/6	23
II.4.1 Principe de fonctionnement de la MRV	23
II.4.2 Modélisation par éléments finis	24
II.4.2.1 Introduction	24
II.4.2.2 Choix d'un modèle d'étude	25
II.4.2.3 Techniques de résolution	26
II.4.2.4 Logiciel de résolution	27
II.4.3 Mise en œuvre & Exploitation des résultats	29
II.4.3.1 Paramètres dimensionnels et physiques MRVDS 6/4	29
II.4.3.2 Exploitation des résultats	31
II.4.3.2.1 Résultats graphiques	31
II.4.3.2.2 Analyse des caractéristiques	34
II.5 Conclusion	36

Chapitre III : SIMULATION DU SYSTEME GRV-CONVERTISSEUR- TURBINE EOLIENNE

III.1 Simulations de la GRV sous MATLAB/Simulink	38
III.1.1 Modèle non linéaire de la GRV	38
III.1.2 Convertisseur de la GRV	40
III.1.3 Schéma bloc de la simulation sous MATLAB/Simulink	41
III.1.4 Résultats de simulation de la GRV	45
III.2 Simulations de l'éolienne sous Matlab/Simulink	55
III.2.1 Schéma bloc de la turbine sous Matlab	55
III.2.2 Résultats de simulation	56
III.2.3 Simulations de la GRV en association avec la turbine	58
III.3 Méthode d'optimisation appliquées à l'éolienne	59
III.4 Conclusion	62
Conclusion Générale	63
Bibliographie	64

Liste de figures

CHAPITRE I :

Figure (I.1) : Conversion de l'énergie cinétique du vent	7
Figure (I.2) : Principaux organes du système de conversion éolien	7
Figure (I.3) : Éoliennes	8
Figure (I.4) : Composant d'une éolienne à axe horizontal	10
Figure (I.5) : Éléments attachés à une nacelle	11
Figure (I.6) : Conversion de l'énergie cinétique du vent	13
Figure (I.7) : Éolienne à axe vertical	14
Figure (I.8) : Éolienne à axe horizontale	15

CHAPITRE II :

Figure (II.1) : La chaîne de conversion éolienne globale basée sur GRV 6/4	19
Figure (II.2) : CP en fonction de λ pour différentes turbines	20
Figure (II.3) : Évolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative	20
Figure (II.4) : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne	22
Figure (II.5) : Caractéristiques puissance, vitesse de vent	22
Figure (II.6) : Machine à réluctance variable ; structure élémentaire	23
Figure (II.7) : Les différentes Positions du rotor relatives aux deux réluctances extrêmes	24
Figure (II.8) : Organigramme résumant les différentes étapes de calcul dans FEMM	28
Figure (II.9) : Définition des paramètres dimensionnels du prototype.	29
Figure (II.10) : Dessin de la géométrie de la machine sous FEMM	30
Figure (II.11) : Caractéristique magnétique B(H) du matériau NO20	30
Figure (II.12) : Maillage de la MRVDS selon FEMM	31
Figure (II.13) : Distribution des lignes de champ pour les deux positions extrêmes	31
Figure (II.14) : Densité du champ magnétique en conjonction	32
Figure (II.15) : Densité du champ magnétique en opposition	32
Figure (II.16) : Caractéristiques flux $\Phi(i)$ paramétrées avec la position	34

Figure (II.17) : Caractéristiques couple $C(\Theta)$ paramétrées selon l'excitation	34
Figure (II.18) : Caractéristiques inductance $L(\Theta)$ paramétrées selon l'excitation	35
Figure (II.19) : Caractéristiques flux $\Phi(\Theta)$ paramétrées selon l'excitation	36

CHAPITRE III :

Figure (III.1) : Structure simplifiée d'une GRV 6/4	38
Figure (III.2) : Convertisseur triphasé en demi-pont asymétrique	40
Figure (III.3) : Structure interne du bloc GRV	42
Figure (III.4) : Intérieur du bloc Phase A.	42
Figure (III.5) : Calcul du courant de la phase (A)	43
Figure (III.6) : Calcul d'inductance de la phase (A)	43
Figure (III.7) : Circuit de puissance du convertisseur	43
Figure (III.8) : Convertisseur, bus continu et charge	44
Figure (III.9) : Circuit de commande du convertisseur	44
Figure (III.10) : Le Contrôleur	45
Figure (III.11) : Capteur de position	45
Figure (III.12) : La tension de la phase A	46
Figure (III.13) : Les tensions des trois phases	47
Figure (III.14) : L'inductance de la phase A	47
Figure (III.15) Les inductances des trois phases	48
Figure (III.16) : Les Courants des trois phases	49
Figure (III.17) : L'allure du courant de la phase A pour différentes vitesses d'excitation	49
Figure (III.18) : courant généré par la phase 1 pour différentes valeurs de θ_{off} à 9000rad/s	50
Figure (III.19) : Les impulsions de la phase A	50
Figure (III.20) : Les impulsions triphasées	51
Figure (III.21) : La position des impulsions par rapport à l'inductance	52
Figure (III.22) : L'influence des impulsions sur la tension et l'inductance de la machine	52
Figure (III.23) : Tension du bus continu	53
Figure (III.24) : Le flux en fonction du courant (phase A)	53
Figure (III.25) : Le flux de la phase A	54
Figure (III.26) : Les flux des trois phases	54
Figure (III.27) : Le couple électromagnétique de la GRV	55

Figure (III.28) : Schéma bloc de la turbine à vitesse fixe ($V=8\text{m/s}$)	55
Figure (III.29) : Schéma bloc de la turbine à vitesse variable	56
Figure (III.30) : Vitesse de la turbine fixe	57
Figure (III.31) : Vitesse de la turbine variable	57
Figure (III.32) : Simulation d'une GRV6/4 en association avec une turbine tripale	58
Figure (III.33) : Profil du courant, impulsion et inductance de la première phase	58
Figure (III.34) : Couple des trois phases de la machine	59
Figure (III.35) : L'algorithme P & O	60

Notations et Symboles

β	Angle de l'orientation de pale
C_p	Coefficient de puissance
C_t	Couple de la turbine
C_g	Couple du générateur
C_{em}	Couple électromagnétique
ρ	Densité d'air
G	Gain du multiplicateur
P_{aer}	Puissance aérodynamique
P_v	Puissance du vent
Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine
Ω_{mec}	Vitesse de rotation du générateur
θ_s, θ_r	Angle du stator et du rotor
f	Coefficient de frottement
V_k	Tension appliquée sur chaque phase
i_k	Courant dans la phase k
$\psi(\theta, i_k)$	Flux statorique totalisé
L_{min}	Valeur minimale de l'inductance
L_{max}	Valeur maximal de l'inductance
N_r	Nombre des dents rotoriques
N_s	Nombre des dents statorique
K_i	Gain intégral
K_p	Gain proportionnel

Introduction Générale

L'énergie éolienne est devenue l'une des sources d'énergie renouvelable les plus prometteuses et les plus rapidement développées à l'échelle mondiale. Elle tire profit de la force du vent pour générer de l'électricité, offrant une solution durable et respectueuse de l'environnement pour répondre aux besoins énergétiques croissants de notre société. Au fil des décennies, le secteur de l'énergie éolienne a connu une croissance spectaculaire, devenant un pilier majeur de la transition énergétique vers un avenir plus durable et décarboné [1].

Cependant, malgré ses avantages indéniables, l'énergie éolienne présente également des défis, notamment en ce qui concerne son intermittence et sa dépendance aux conditions météorologiques. Les périodes de vents faibles ou de vents excessivement forts peuvent affecter la production d'électricité, nécessitant des solutions de stockage de l'énergie et des stratégies d'intégration intelligente dans les réseaux électriques. Des efforts considérables sont en cours pour résoudre ces défis et rendre l'énergie éolienne plus fiable et prévisible [3].

Des recherches approfondies ont été menées pour optimiser la conception des éoliennes, améliorer leur efficacité et réduire leurs coûts de production. De plus, des progrès significatifs ont été réalisés dans le stockage de l'énergie éolienne et son intégration dans les réseaux électriques, permettant une utilisation plus fiable et flexible de cette source d'énergie renouvelable. De nouveaux modèles économiques et réglementaires émergent également pour soutenir le déploiement massif de l'énergie éolienne, favorisant son adoption à grande échelle dans le cadre de la transition énergétique mondiale vers une économie bas-carbone [4].

Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude de l'énergie éolienne, où l'objectif est la modélisation et la simulation d'une chaîne éolienne.

Pour cela, nous avons organisé notre mémoire de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens et les composants qui les constituent de façon générale, incluant les différents générateurs utilisés.

Dans ***le deuxième chapitre***, nous présentons une modélisation mathématique de différentes parties de la turbine éolienne. Nous aborderons en détail la modélisation de la machine à reluctance variable.

Dans *le troisième chapitre*, nous allons présenter les résultats de simulation obtenus avec leurs discussions.

Nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale récapitulant ce qui a été fait et présente les perspectives de travail.

Chapitre I :

L'ENERGIE

EOLIENNE

I.1 ETAT DE L'ART

I.1.1 Évolution des énergies renouvelables :

Depuis les premières utilisations historiques de l'énergie renouvelable, telles que les moulins à vent et les systèmes hydrauliques, jusqu'à nos jours, l'évolution des énergies renouvelables a été marquée par une série de développements technologiques, économiques et politiques significatifs. Cette évolution a été largement influencée par les préoccupations croissantes concernant le changement climatique, la sécurité énergétique et la durabilité environnementale [5].

Au début du XXe siècle, les énergies renouvelables représentaient la principale source d'énergie dans de nombreuses régions du monde. Cependant, avec l'avènement de l'ère industrielle et l'exploitation généralisée des combustibles fossiles, les énergies renouvelables ont été progressivement reléguées au second plan. Ce n'est qu'à partir des années 1970 que l'intérêt pour les énergies renouvelables a été ravivé, principalement en raison des crises pétrolières et des préoccupations croissantes concernant la dépendance aux combustibles fossiles et les impacts environnementaux associés [6].

Au cours des dernières décennies, des progrès significatifs ont été réalisés dans le développement et le déploiement des énergies renouvelables. Les technologies solaires photovoltaïques et thermiques, les éoliennes, les centrales hydroélectriques et d'autres sources d'énergie renouvelable sont devenues de plus en plus compétitives sur le marché de l'énergie, grâce à des innovations technologiques, à des économies d'échelle et à des politiques de soutien gouvernemental [7].

Aujourd'hui, les énergies renouvelables occupent une place de plus en plus importante dans le mix énergétique mondial. Elles contribuent de manière significative à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, à la création d'emplois et au développement économique durable. Cependant, malgré ces progrès, les énergies renouvelables font toujours face à des défis tels que la variabilité des ressources, les coûts de stockage et les infrastructures de réseau limitées [8].

I.1.2 Historique de l'énergie éolienne :

L'utilisation du vent comme source d'énergie remonte à l'Antiquité, lorsque les premiers moulins à vent ont été développés pour moudre le grain et pomper l'eau. Ces premiers dispositifs étaient des structures simples, constituées de pales fixées à un axe vertical, qui capturaient le

vent et le convertissaient en mouvement rotatif. Les premières traces d'éoliennes remontent à l'Empire romain et ont été largement utilisées dans toute l'Europe médiévale [9].

Au cours des siècles suivants, l'énergie éolienne a continué à être utilisée pour une variété de tâches, des moulins à grain aux pompes à eau en passant par les scieries. Cependant, c'est au XIXe siècle que l'énergie éolienne a commencé à être utilisée pour la production d'électricité. En 1887, le scientifique écossais James Blyth a construit la première éolienne pour générer de l'électricité, alimentant l'éclairage de sa maison à Mary Kirk, en Écosse [10].

Les premières éoliennes électriques commerciales sont apparues au début du XXe siècle, principalement aux États-Unis et en Europe. Cependant, le développement de l'énergie éolienne a été entravé par l'essor des combustibles fossiles bon marché et l'absence de politiques de soutien à l'énergie renouvelable. Ce n'est qu'à partir des années 1970, avec la montée des préoccupations environnementales et la crise pétrolière, que l'énergie éolienne a commencé à regagner de l'attention [11].

Depuis lors, l'industrie éolienne a connu une croissance exponentielle, stimulée par des avancées technologiques majeures, telles que l'utilisation de turbines à axe horizontal à grande échelle et le développement de parcs éoliens offshore. Aujourd'hui, l'énergie éolienne est devenue l'une des sources d'énergie renouvelable les plus importantes et les plus compétitives sur le marché mondial de l'énergie, contribuant de manière significative à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la lutte contre le changement climatique [12].

I.1.3 Avancements dans la modélisation des éoliennes :

La modélisation des éoliennes a connu des avancées significatives au cours des dernières décennies, permettant une meilleure compréhension du comportement des éoliennes et une optimisation de leur conception et de leur performance. Ces progrès ont été rendus possibles grâce aux développements dans les domaines de la mécanique des fluides, de l'aérodynamique, de la dynamique des structures et de la modélisation informatique [13].

Les modèles numériques sont devenus des outils essentiels pour simuler le fonctionnement des éoliennes dans diverses conditions de vent et de charge. Ces modèles prennent en compte une multitude de facteurs, tels que la forme des pales, l'orientation de l'éolienne, les conditions atmosphériques locales et les effets de turbulence. Ils permettent aux concepteurs d'évaluer et de comparer différentes configurations d'éoliennes, de prédire leur performance et de diagnostiquer les problèmes potentiels [14].

En plus des modèles numériques, les avancées dans les techniques de mesure ont également contribué à améliorer la modélisation des éoliennes. Les données obtenues à partir de lidars (radars laser) et d'autres instruments de mesure permettent de valider et de calibrer les modèles numériques, ainsi que de collecter des informations précieuses sur le comportement réel des éoliennes dans leur environnement [15].

Parallèlement, la modélisation des éoliennes s'est également étendue pour inclure des aspects tels que l'intégration des éoliennes dans les réseaux électriques, la prévision de la production d'électricité éolienne à court et à long terme, et l'analyse de l'impact des parcs éoliens sur l'environnement et la faune avoisinante [16].

Ces avancées dans la modélisation des éoliennes ont permis de maximiser leur efficacité énergétique, de réduire les coûts de production et d'accroître la fiabilité et la durabilité des installations éoliennes. Elles jouent un rôle crucial dans la transition vers une énergie plus propre et plus durable, en permettant une utilisation plus efficace et plus répandue de l'énergie éolienne dans le monde entier [17].

I.2 L'Énergie éolienne

I.2.1 Introduction

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui utilise la force du vent pour produire de l'électricité. Cette forme d'énergie propre et durable est de plus en plus utilisée dans le monde entier pour répondre aux besoins croissants en électricité tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

I.2.2 Principes fondamentaux de l'énergie éolienne

Le fonctionnement de l'énergie éolienne repose sur le principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette transformation s'effectue au travers d'une série d'étapes orchestrées par l'éolienne, sans nécessiter une intervention humaine directe après sa mise en marche (Fig. I.1) [01].



Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [01].

Tout commence lorsque le vent, se déplaçant à travers l'atmosphère, rencontre les pales de l'éolienne. Ces pales sont conçues pour capturer l'énergie cinétique du vent et la convertir en un mouvement de rotation. L'aspect crucial ici est la conception aérodynamique des pales, qui permet de maximiser l'extraction de l'énergie du vent à travers un phénomène connu sous le nom de portance. La forme et l'orientation des pales jouent un rôle déterminant dans l'efficacité de cette étape [18].

Une fois que le vent a mis en mouvement les pales, ce mouvement de rotation est transmis à un arbre principal, qui est à son tour connecté à un générateur. Dans ce générateur, le mouvement de rotation mécanique est converti en énergie électrique grâce à l'induction électromagnétique. Ce processus implique le déplacement d'un conducteur à travers un champ magnétique, générant ainsi un courant électrique (Fig. I.2) [02].

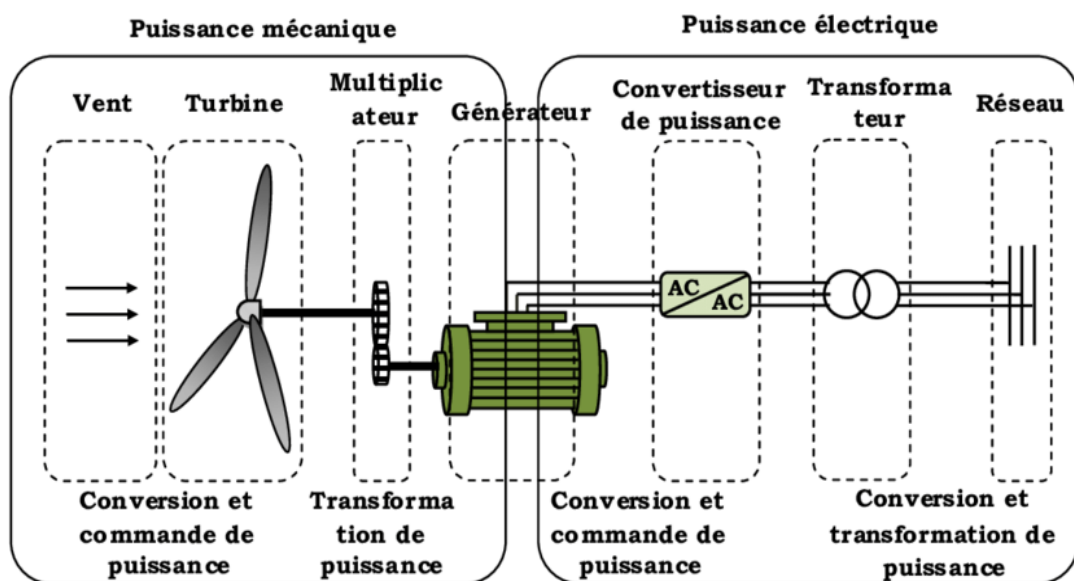


Figure I.2 : Principaux organes du système de conversion éolien [02].

L'électricité produite est ensuite conditionnée pour correspondre aux normes et exigences du réseau électrique. Cela inclut l'ajustement de la tension et la conversion du courant alternatif produit par le générateur en un courant compatible avec le réseau électrique. Ce dernier point est essentiel pour assurer une injection sûre et efficace de l'énergie éolienne produite dans le réseau électrique, permettant ainsi sa distribution et son utilisation finale [19].

I.2.3 Rôle des éoliennes dans la production d'énergie

Les éoliennes jouent un rôle essentiel dans la diversification du bouquet énergétique et la transition vers des sources d'énergie plus durables. En tant que technologie de production d'électricité propre et renouvelable, elles contribuent à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à atténuer les impacts environnementaux associés aux sources d'énergie conventionnelles telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel (Fig. I.3) [03].



Figure I.3 : Éoliennes [03].

La contribution des éoliennes à la sécurité énergétique est également significative. Leur déploiement à grande échelle permet de diversifier les sources d'approvisionnement en électricité, réduisant ainsi la dépendance à l'égard des combustibles fossiles importés et des fluctuations des prix sur les marchés internationaux [20].

Un aspect souvent négligé du rôle des éoliennes est leur capacité à fournir une source d'énergie distribuée et décentralisée. Contrairement aux grandes centrales électriques, les éoliennes peuvent être installées à différentes échelles, des parcs éoliens commerciaux aux petites éoliennes domestiques, permettant ainsi de répondre aux besoins énergétiques locaux de manière plus efficace et adaptable [21].

I.2.4 Avantages et défis associés

L'énergie éolienne possède des atouts distincts qui favorisent sa croissance et son développement parmi les autres sources d'énergie, lui conférant ainsi un rôle crucial à jouer dans l'avenir, à condition de minimiser les impacts liés à ses inconvénients mentionnés ci-dessous.

I.2.4.1 Avantages :

- *Réduction des émissions de gaz à effet de serre et de la pollution atmosphérique* : L'énergie éolienne offre une alternative propre aux combustibles fossiles, contribuant ainsi à réduire les émissions de CO₂ et d'autres polluants atmosphériques néfastes [22].
- *Ressource inépuisable et abondante* : L'énergie éolienne repose sur une ressource renouvelable disponible en abondance, offrant ainsi une source d'électricité constante et fiable à long terme [23].
- *Création d'emplois et stimulation économique* : L'industrie éolienne génère des emplois locaux dans la fabrication, l'installation, la maintenance et la gestion des parcs éoliens, stimulant ainsi les économies régionales et nationales [24].

I.2.4.2 Défis :

- *Impact sur la faune aviaire et terrestre* : Les parcs éoliens peuvent avoir des effets néfastes sur les populations d'oiseaux et de chauves-souris, entraînant des collisions avec les pales des éoliennes et perturbant les habitats naturels.
- *Nécessité d'une infrastructure de transmission améliorée* : L'intégration efficace de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques existants nécessite souvent des investissements importants dans l'expansion et la modernisation des infrastructures de transmission [25].
- *Variabilité et intermittence* : L'énergie éolienne est sujette à des fluctuations intermittentes en raison de la nature variable du vent, ce qui peut poser des défis pour assurer la stabilité et la fiabilité du réseau électrique [26].

I.3 Chaîne de Conversion

I.3.1 Composants de la chaîne de conversion éolienne :

Différentes configurations d'aérogénérateurs peuvent présenter des disparités significatives. Cependant, une éolienne « traditionnelle » est généralement composée de trois composants principaux : Comme illustré dans la figure I.4 [27].

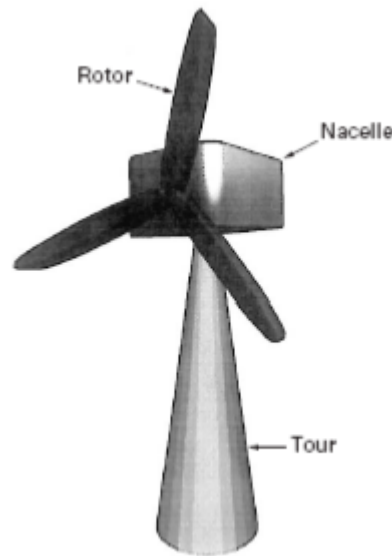


Figure I.4 : Composant d'une éolienne à axe horizontal.

Rotor :

Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu, il fait tourner le mécanisme d'entraînement construites habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, plastique renforcé ou en bois.

Le nombre de pales varie de un à trois, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, l'impact visuel et le bruit. Deux types de rotors sont distingués :

a. Rotors à pas fixe :

Ils sont souvent munis d'un système d'orientation des pales permettant une connexion directe au réseau ou à la charge sans dispositif d'électronique de puissance, c'est un mécanisme presque idéal assurant une optimisation de la vitesse disponible. Mais un tel dispositif est complexe et coûteux.

b. Rotors à pas variable :

Ils sont coûteux car le dispositif d'orientation des pales est dans la plupart des cas Supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire.

- ❖ **Mât** : Elle a pour fonction d'une part de soutenir l'ensemble (rotor + nacelle) afin d'éviter que les pales ne se touchent au sol, et d'autre part de placer le rotor à une hauteur adéquate, afin de libérer le rotor du gradient de vent qui se trouve à proximité du sol, ce qui améliore la capture de l'énergie. En général, le mât est constitué d'un tube d'acier de 60 à 100 mètres de haut, où se trouvent l'échelle d'accès et les câbles électriques de connexion au réseau.
- ❖ **Nacelle** : Elle est située en haut du mât, elle comporte toute l'installation de production d'électricité : le multiplicateur, le générateur, les systèmes de frein et d'orientation de l'éolienne et tous les équipements automatisés d'asservissement de l'ensemble des fonctions de l'éolienne. La nacelle est une structure en acier ou en fonte à laquelle tous ces éléments sont attachés entre eux et le générateur. Les pales doivent être légères, solides et durables, elles sont construites habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, plastique renforcé ou en bois. La figure I.5 montre la nacelle et ces éléments [28].

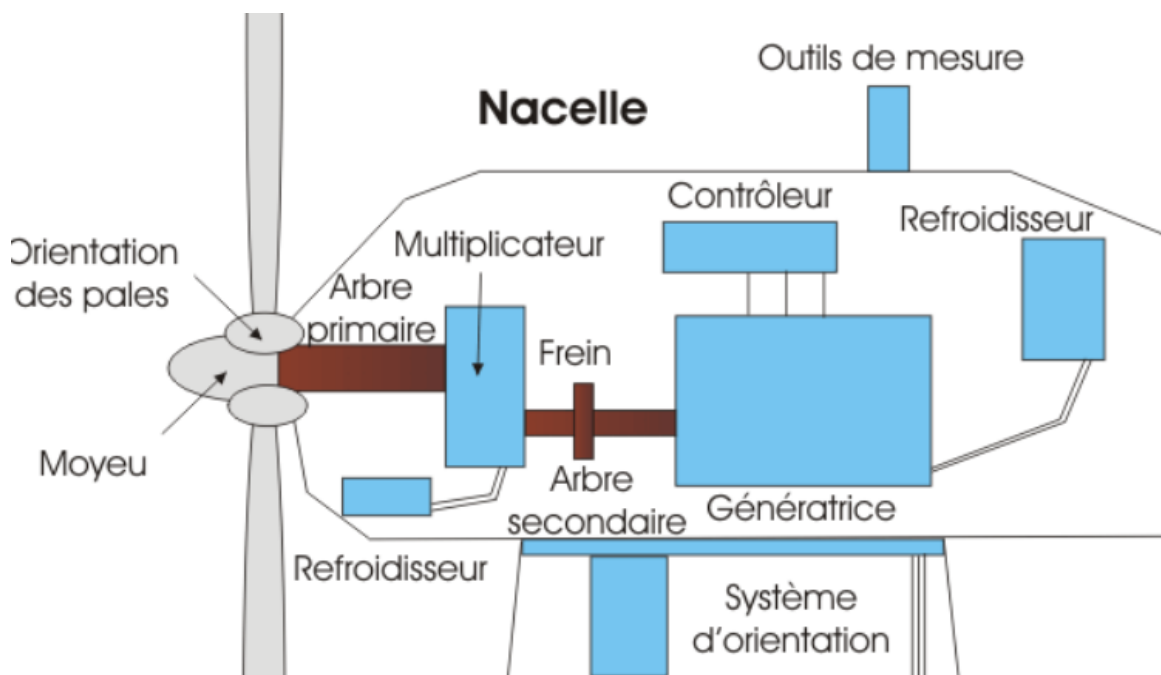


Figure I-5 : Éléments attachés à une nacelle. [28]

- ❖ **Arbre** : Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
- ❖ **Multiplicateur** : Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. Il est équipé d'un frein mécanique à disque qui peut être activé en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou lors de la maintenance de l'éolienne.
- ❖ **Système de refroidissement** : Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile (ou eau) pour le multiplicateur [28].
- ❖ **Génératrice (ou alternateur)** : C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Différents types de génératrices peuvent être rencontrés [28].

I.3.2 Principe de fonctionnement :

Un aérogénérateur, ou éolienne, est un appareil qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique capable d'être transmise sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique grâce à un générateur. [29].

I.3.3 Conversion de l'énergie éolienne :

L'énergie cinétique est convertie en énergie électrique en deux étapes : au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la transformer en énergie mécanique, puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la transforme en énergie électrique. (figure I.6) [30].

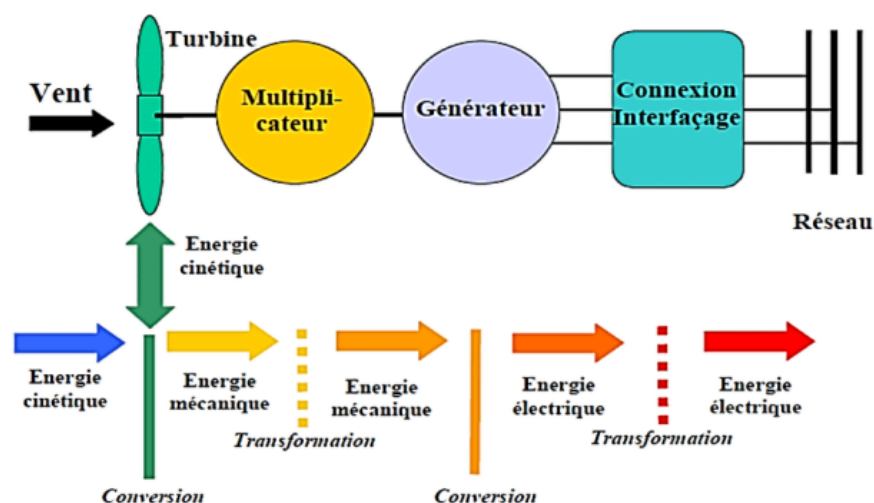
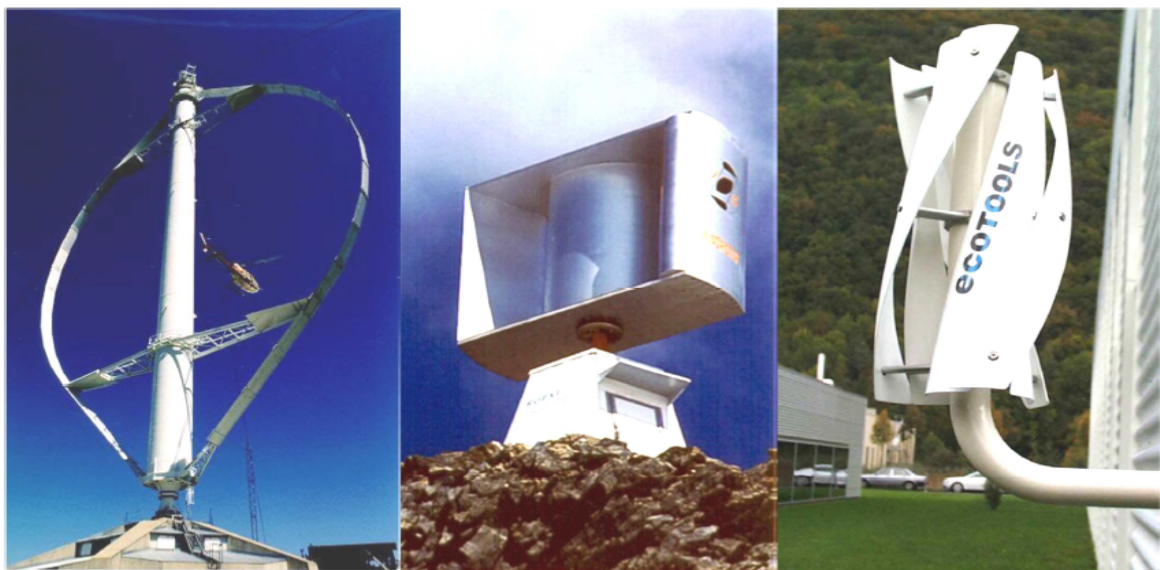


Figure I-6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [29]

I.5 Types des turbines éoliennes

I.5.1 Éolienne à axe vertical :

Les premières éoliennes à axe vertical ont été créées pour générer de l'électricité, ce qui est paradoxalement en contradiction avec le moulin à vent traditionnel à axe horizontal. Elles ont l'avantage d'être situées au niveau du sol, ce qui facilite leur accessibilité. Il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut être installée facilement sur le toit d'une maison moderne, avec des avantages tels que : faible impact visuel, quasiment pas de bruit et une grande tolérance aux vents forts. Certains systèmes permettent aux ailes de se déchauffer plus ou moins afin d'accroître l'étendue des vitesses d'action. L'éolienne forme un cylindre lorsque la vitesse du vent est faible, lorsque la vitesse est trop élevée, les ailes sont entièrement déployées. Bien qu'il y ait eu quelques grands projets industriels, les éoliennes à axe vertical demeurent cependant marginales et peu utilisées, voire aujourd'hui abandonnées. [31]



Darrieus

Darrieus de type H

Savonius

Figure I.7 : Éolienne à axe vertical. [32]

I.5.2 Éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes horizontales reposent sur l'ancienne technologie des moulins à vent. Elles se composent de différentes pales profilées aérodynamiquement, semblables aux ailes d'avion. Dans cette situation, la portance ne sert pas à maintenir un avion en vol, mais à produire un couple moteur qui provoque la rotation. On utilise généralement entre 1 et 3 pales pour produire de l'électricité, le rotor tripale étant le plus couramment employé car il offre un compromis entre

le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce genre d'éolienne est devenu le plus populaire par rapport à celles à axe vertical, car ils sont moins coûteux, moins soumis aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol favorise l'efficacité. [31]

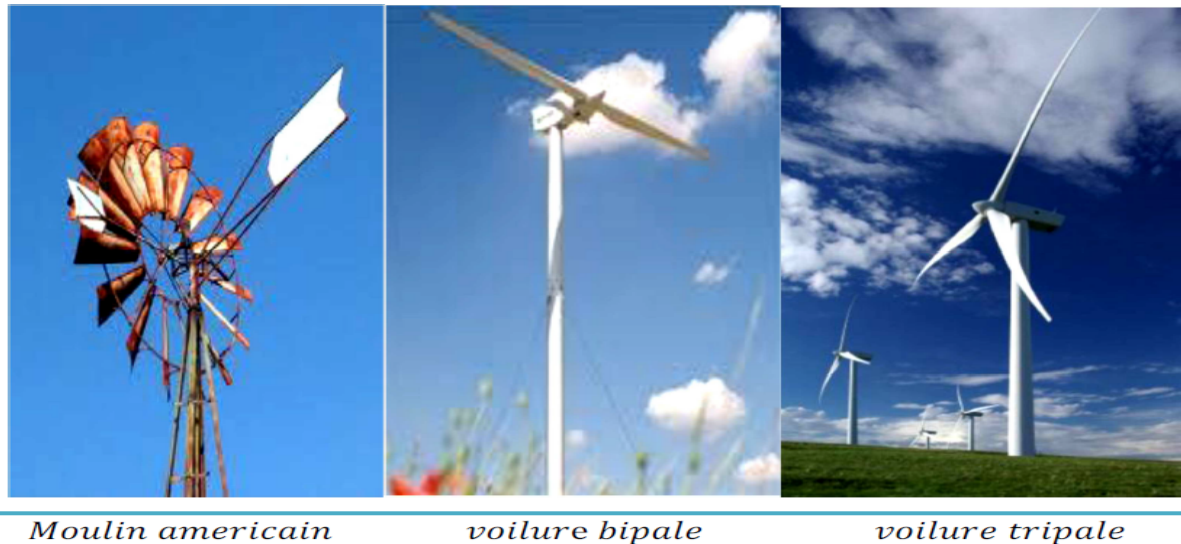


Figure I.8 : Éolienne à axe horizontale. [32]

I.5 Machines électriques utilisées :

I.5.1 Machines asynchrones :

Les machines asynchrones sont robustes, simple à fabriquer et moins coûteuses. Les aérogénérateurs de forte puissance tournent à des vitesses de rotations relativement faibles, d'où la nécessité d'insérer un multiplicateur de vitesse mécanique entre la turbine et la machine asynchrone. Lorsque cette dernière est directement connectée au réseau, et pour qu'elle lui fournisse de l'énergie ; elle doit être entraînée à une vitesse de rotation légèrement supérieur à celle de synchronisme [33].

I.5.2 Machine asynchrone à double alimentation (MADA) :

La constitution du stator de la MADA est la même pour la machine synchrone ou asynchrone à cage d'écureuil. L'originalité de la MADA provient du fait que le rotor n'est plus à cage, ce dernier est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités reliées à des bagues conductrices. Cette machine nous offre l'avantage de passer d'un fonctionnement

à un autre tout à fait acceptable. Effectivement la MADA est une machine généralisée (peut fonctionner en asynchrone ou synchrone). [32]

I.5.3 Machines synchrones :

La machine synchrone est constituée d'un stator comportant des enroulements induit et d'un rotor porte un inducteur (bobine ou à aimants permanents).

L'alimentation de l'inducteur se fait par une petite génératrice inversée au bout d'arbre (excitatrice). (Absence du système balais-collecteurs). La tension statorique est proportionnelle au courant d'excitation et la vitesse de rotation de la turbine, la fréquence de la tension de sortie dépend aussi de la vitesse de rotation de cette dernière [33].

I.5.4 Machine à reluctance variable (MRV) :

La machine à reluctance variable, est une machine synchrone à pôles saillants, démunie de bobinage d'excitation et fonctionnant exclusivement sur le couple de reluctance. Cette machine permet de supprimer totalement ou partiellement le multiplicateur de vitesse Suite à la diversité des applications des MRV, ces dernières se divisent en deux catégories [33].

- Machine à stator lisse
- Machine à double denture

I.5.5 Machine à aimants permanents :

La machine à aimants permanents est un système permettant de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa. Elle est constituée d'un rotor et d'un stator dont l'un porte des aimants permanents. Ce type de machine est utilisé dans les grandes éoliennes à attaque directe [33].

I.6 Conclusion :

Ce chapitre a exploré les divers types d'éoliennes, leurs caractéristiques et leurs composants. Nous avons examiné les éléments constitutifs des turbines éoliennes ainsi que les différentes machines associées.

Dans le chapitre suivant, nous entreprendrons la modélisation mathématique d'un type spécifique de ces turbines éoliennes.

Chapitre II :

Modélisation

D'un Système

De Conversion

Éolienne

II.1 Introduction :

Aujourd'hui, la plupart des machines synchrones utilisées dans l'éolien sont des Machines Synchrones à Aiment Permanent (MSAP). Par rapport à la machine à excitation, la MSAP présente un meilleur rendement et un meilleur couple massique. Toute fois son inconvénient majeur réside dans le prix des aimants terres rares (assemblage).

Pour cette raison, il devient nécessaire de se tourner vers d'autres solutions, notamment l'utilisation des génératrices à reluctance variable communément appelées SRG (Switched Reluctance Generator).

Ce type de machine a été d'abord utilisé comme moteur électrique, conçu notamment pour les horlogeries dans les années 1850, depuis la dite machine a trouvé d'autres champs d'application toujours en moteur. Ce pendant cette machine n'a pas pris sa place jusque-là parmi les autres types de machines à cause de la difficulté à la commander.

Depuis l'avènement de l'électronique de réglage et l'apparition de la micro-informatique, ces machines commençaient à susciter un regain d'intérêt. Aujourd'hui de plus en plus de travaux se font sur l'application de la SRG dans des systèmes éoliens. On notera qu'on dépit du potentiel de la SRG, elle n'a pas encore trouvé son application dans l'éolien.

II.2. Modélisation de la partie mécanique

La figure II.1 représente le système mécanique à modéliser. Nous commençons par la représentation de la puissance extractible P_{en} en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement. Le dispositif étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînent une génératrice GRV 6/4 à travers un multiplicateur de vitesse de gain G .

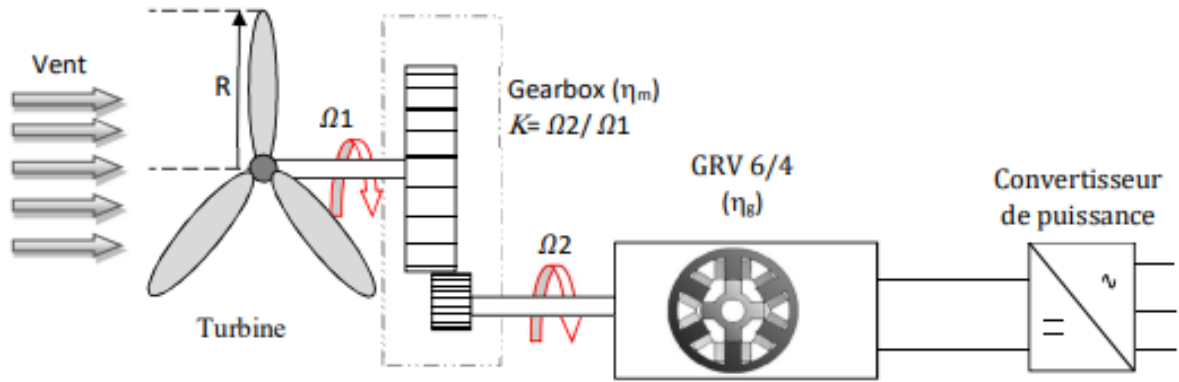


Figure II.1 La chaîne de conversion éolienne globale basée sur GRV 6/4. [34]

II.2.1 Modélisation de la Turbine :

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante [35] :

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

Où :

- ρ est la densité d'air ($\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$).
- S est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale R ou $S = \pi R^2$.
- V est la vitesse du vent.

La puissance aérodynamique, qui est convertie par une turbine du vent, P_{aer} dépend du coefficient de puissance C_p . Elle est donnée par [36].

$$P_{aer} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{II.2})$$

La capacité de la turbine éolienne à convertir l'énergie capturée du vent est limitée à un certain pourcentage, représenté par $C_p(\lambda, \beta)$, qui dépend du rapport de vitesse λ et de l'angle d'orientation des pales β .

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ est une mesure du rendement aérodynamique de la turbine éolienne, et il est influencé par les caractéristiques spécifiques de cette dernière. Sa description peut être formulée comme suit [37].

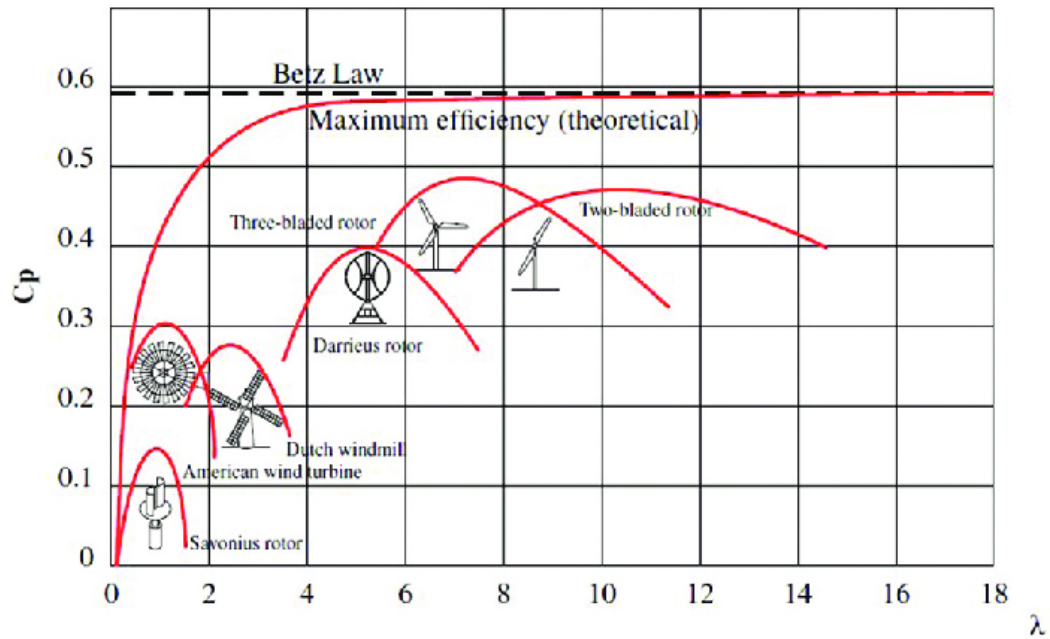


Figure II.2 C_p en fonction de λ pour différentes turbines.

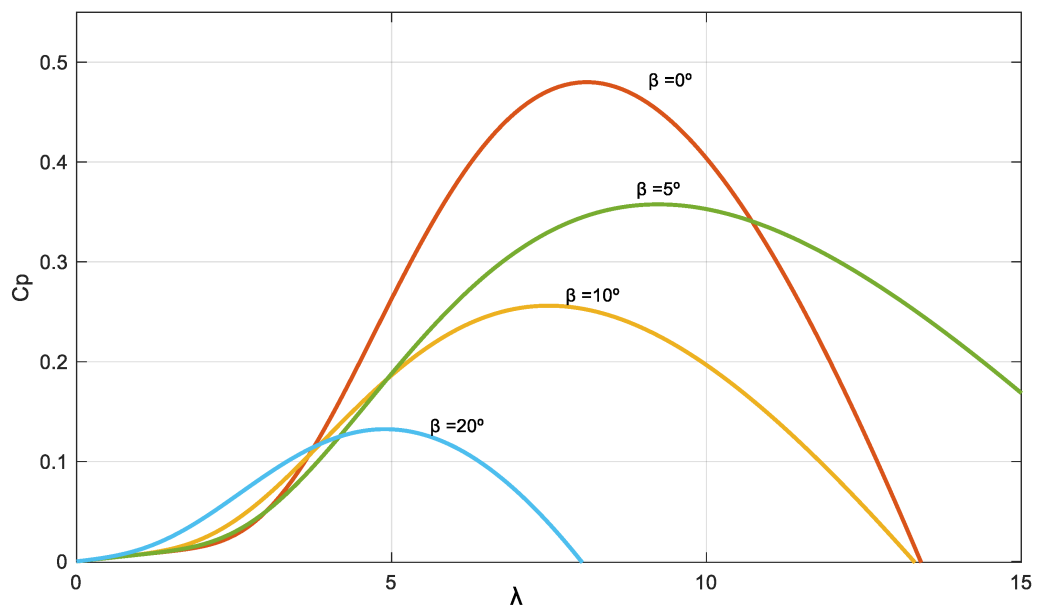


Figure II.3 Évolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative

Ainsi comme il est illustré dans la figure (II.3), il est possible de constater que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci ($C_p = 0.49$) est atteint pour une $\lambda = 9$, et de l'angle d'orientation des pales $\beta = 0$. Grâce à cette valeur, la turbine opère avec le rendement théorique maximal. Après notre travail, nous élaborerons une commande appropriée afin d'atteindre ce point de fonctionnement [38].

Le couple de la turbine est le rapport de la puissance aérodynamique à la vitesse de rotation de la turbine Ω_t :

$$c_t = \frac{p_{aer}}{\Omega_t} \quad (II.3)$$

Le ratio de vitesse λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales (la vitesse de rotation de la turbine) et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (II.4)$$

II.2.1.2 Modélisation du Multiplicateur :

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour but d'adapter la vitesse de la turbine, assez lente, à celle que nécessite la génératrice il est modélisé par les deux équations suivantes :

$$C_g = \frac{1}{G} C_{aero} \quad (II.5)$$

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \Omega_{mec} \quad (II.6)$$

Où :

– C_g Est le couple du générateur

– Ω_{mec} Est la vitesse de rotation du générateur.

II.2.1.3 Modélisation de l'Arbre Mécanique :

L'arbre se compose d'une masse qui correspond à l'inertie du rotor de la turbine, supportant les pales et le moyeu, ainsi qu'une petite inertie représentant le rotor du générateur. Dans le modèle mécanique proposé, l'inertie totale J est la somme de l'inertie du générateur J_g et de l'inertie de la turbine J_t rapportée au rotor du générateur, où...

$$J = J_g + J_t G^2 \quad (II.7)$$

$$C_m = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (II.8)$$

$$C_m = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.9)$$

Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux f .

$$C_{vis} = f \Omega_{mec} \quad (II.10)$$

En remplaçant (II.9) et (II.11) dans (II.10), nous aurons :

$$C_g - C_{em} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \Omega_{mec} \quad (II.11)$$

Où C_{em} est le couple électromagnétique.

Le schéma bloc correspondant à la modélisation de la turbine éolienne se déduit aisément des équations ci-dessus et est représenté par la figure II.3.

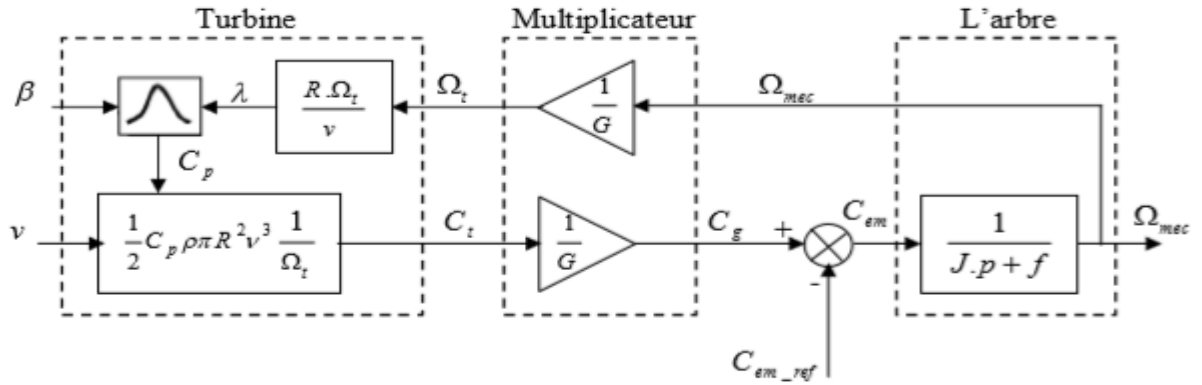


Figure II.4 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne

II.3 Stratégie de Commande de la Turbine Eolienne :

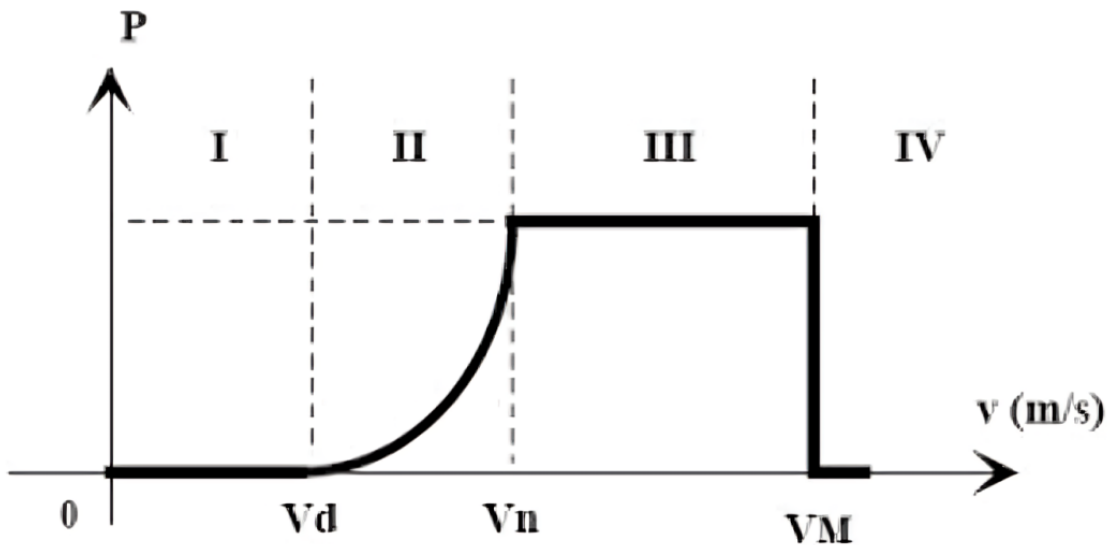


Figure II.5 : Caractéristiques puissance, vitesse de vent [39].

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale V_n , au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale V_{max} qui pourrait endommager la turbine. On peut définir quatre zones de fonctionnement :

- ❖ **la zone I** : le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine.
- ❖ **la zone II** : la puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent.
- ❖ **la zone III** : la vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et la puissance P fournie reste égale à P_n .
- ❖ **la zone IV** : la vitesse de vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\beta = 90^\circ$)

II.4. Modélisation de Machine à Réluctance Variable 6/4

II.4.1 Principe de fonctionnement de la MRV

Le principe de fonctionnement d'une machine à réluctance variable peut être décrit à partir d'une structure monophasée élémentaire identique à celle présentée ci-dessous Figure II.6 [40].

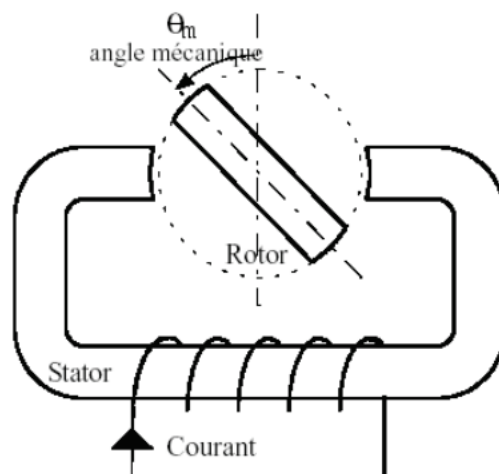


Figure II.6 Machine à réluctance variable ; structure élémentaire

Le mouvement de la machine est obtenu par la tendance du rotor à s'aligner avec l'axe magnétique de la phase statorique. Cette structure possède deux positions rotoriques remarquables :

- Une position d'opposition pour laquelle le circuit magnétique présente une réluctance maximale ou inductance minimale, Figure (II.7.a)
- Une position de conjonction où la réluctance est minimale donc inductance maximale, Figure (II.7.b)

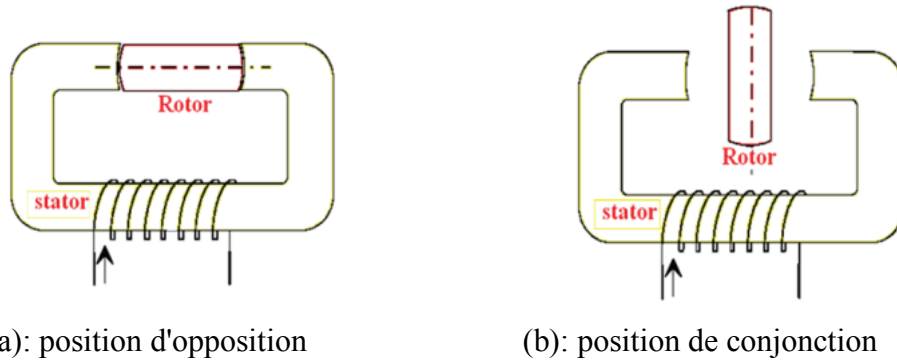


Figure II.7 Les différentes Positions du rotor relatives aux deux réluctances extrêmes

L'insertion d'un courant dans l'armature fixe, lorsque le rotor se trouve dans une position intermédiaire entre l'opposition et la conjonction, entraîne une modification de l'état du système qui tend alors à présenter une réluctance minimale, c'est-à-dire le passage du flux maximal entre les armatures.

Si le courant est éliminé, si l'énergie cinétique accumulée pendant la rotation est assez grande pour l'amener jusqu'à l'opposition, alors le cycle peut être répété et on obtient un mouvement de rotation continu.

II.4.2 Modélisation par éléments finis

II.4.2.1 Introduction

La modélisation de notre prototype de MRVDS 6/4 par la méthode des éléments finis (MEF) va nous permettre de déterminer ses caractéristiques magnétiques : flux magnétique et couple électromagnétique en utilisant comme paramètres la position angulaire du rotor θ et le courant de phase i .

En effet, la MEF s'adapte bien pour calculer le potentiel vecteur magnétique sur des structures avec une géométrie complexe et avec des caractéristiques des matériaux magnétiques non linéaires.

Moyennant les hypothèses simplificatrices couramment utilisées, notamment négliger les effets d'extrémité, nous travaillerons en géométrie 2D.

La machine examinée est une MRV 6/4 à double saillance. Pour les simulations, nous avons choisi d'utiliser le logiciel FEMM. Après nous être familiarisés avec ce logiciel qui utilise le langage LUA, nous l'avons utilisé pour modéliser notre prototype de machine et analyser les diverses caractéristiques telles que le flux et le couple en fonction des paramètres de position et de courant.

II.4.2.2 Choix d'un modèle d'étude

A partir des équations de Maxwell régissant les phénomènes électromagnétiques, dans le cadre de l'approximation des régimes quasi-stationnaires (faibles fréquences) :

$$\text{- de couplage :} \quad \nabla \times H = J \quad (\text{II.12})$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{II.13})$$

$$\text{- de conservation :} \quad \nabla \times B = 0 \quad (\text{II.14})$$

Où H représente le vecteur champ magnétique, B l'induction magnétique, E le champ électrique, J la densité de courant et ∇ (nabla) l'opérateur dérivation ($\partial/\partial x$; $\partial/\partial y$; $\partial/\partial z$).

Le problème à résoudre ici est, dans un premier temps, de type magnétostatique vectoriel où Le système à modéliser est excité par des courants $\mathbf{J}$ non nuls. En supposant le champ magnétique produit par des sources indépendantes du temps, le terme $\frac{\partial B}{\partial t}$ sera nul et les Champs électriques $\mathbf{E}$ et magnétiques $\mathbf{B}$ seront découplés.

En supposant l'aimantation rémanente B_r négligeable et les matériaux isotropes (conductivité σ et perméabilité μ sont des scalaires), nous pouvons leur associer les 2 propriétés :

- Caractéristique magnétique

$$B = \mu \cdot H \quad (\text{II.15})$$

- Loi d'Ohm locale

$$J = \sigma \cdot E \quad (\text{II.16})$$

De l'équation (II.3), nous déduisons l'existence d'un potentiel vecteur magnétique A tel que :

$$\nabla \times A = B \quad (\text{II.17})$$

Dont l'unicité est souvent garantie par *la jauge de Coulomb* :

$$\nabla \cdot A = 0 \quad (\text{II.18})$$

En combinant toutes ces relations, nous aboutissons à l'équation du potentiel vecteur magnétique $\mathbf{A}$ régissant le fonctionnement du système étudié :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot A \right) = J \quad (\text{II.19})$$

À laquelle nous ajouterons les propriétés des matériaux et *des conditions aux limites* :

- Type *Dirichlet homogène* ($A=0$) : sur les frontières extérieures et les axes de symétrie de Révolution ;
- Type *Neumann* ($\partial A / \partial t = 0$) sur les plans de symétrie géométrique et magnétique (lignes de flux orthogonales à ces plans).

En réalité, tout système électromagnétique est composé de trois dimensions (3D). Mais les dispositifs électrotechniques classiques privilégient généralement une direction particulière des champs ou des courants : une connaissance précise de la grandeur étudiée dans le plan privilégié associée à une approximation dans la direction orthogonale (négliger les effets d'extrémités) conduit à l'étude d'un *système bidimensionnel (2D)*. Dans le cadre de cette formulation *magnétostatique en cartésien-2D* et en supposant le système étudié excité à partir d'une densité de courant $\mathbf{J_z}$ dirigée selon l'axe $\mathbf{Oz}$ (il en sera de même pour le potentiel magnétique $\mathbf{Az}$ qui sera un scalaire), les équations de Maxwell conduisent finalement à :

$$\nabla^2 \cdot \mathbf{Az}(x, y) = -\mu \cdot \mathbf{J_z}(x, y) \quad (\text{II.20})$$

Pour ce qui est de la méthode de résolution, nous utiliserons une technique numérique type *éléments finis*, basée sur un procédé de discrétisation et d'approximation qui transforme les équations aux dérivées partielles écrites sous forme intégrale en un système d'équations algébriques. En effet, la méthode des éléments finis (*MEF*) s'adapte très bien aux problèmes à caractéristiques non linéaires et aux géométries complexes, avec une excellente précision de résolution mais avec des temps de calcul élevés, contrairement aux méthodes analytiques. [41]

II.4.2.3 Techniques de résolution

- **La méthode des éléments finis**

C'est une méthode utilisée depuis longtemps par les mécaniciens [42] avant d'être appliquée vers les années soixante-dix au domaine de l'électromagnétisme [43]

Et voici le principe :

- discrétiser : découper le domaine (D) en éléments (triangles ou quadrilatères, rectilignes ou curvilignes) reliés entre-eux par un nombre fini de points où les potentiels nodaux A_k sont les inconnues du problème ;

- approximer : par interpolation polynomiale de l'inconnue sur chaque élément (e)

$A^e \approx \sum N_k \cdot A_k$ où les $N_k(x_k, y_k)$ Représentent les fonctions de formes;

- écrire sous forme intégrale les E.D.P. selon une des 2 formulations suivantes :

- ❖ variationnelle qui consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système étudié.

- ❖ projective ou résidus pondérés (type Galerkin) qui consiste à minimiser le résidu induit par l'approximation de la fonction inconnue,

- assembler les intégrales élémentaires pour obtenir la fonctionnelle totale en f (nœuds)

$$\iint_S \rightarrow \sum \iint_e$$

- résoudre le système d'équations algébriques écrit sous forme matricielle, après prise en compte des conditions aux limites (et une bonne numérotation des nœuds).

II.4.2.4 Logiciel de résolution

Le logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics) comporte une suite de programmes permettant de résoudre des problèmes d'électromagnétisme à basse fréquence dans des domaines 2D ou axisymétriques. Ce logiciel, développé par David Meeker, est disponible gratuitement sur Internet.

FEMM se compose de trois programmes :

- **femm.exe** : est un post et pré-processeur contenant une interface graphique qui permet de fixer la géométrie du problème, les propriétés matérielles ainsi que les conditions aux limites. Après l'analyse, la solution est affichée sous forme de contour, densité de flux... Le logiciel permet également d'évaluer un certain nombre d'intégrales et de tracer diverses quantités d'intérêt le long de contours définis par l'utilisateur.
- **triangle.exe** : découpe les régions du problème en éléments triangles, ce qui constitue une étape importante de l'analyse par éléments finis.

- ***fkern.exe*** : est un solveur qui résout les équations aux dérivées partielles pour obtenir les valeurs du champ magnétique dans le domaine étudié. Le langage **LUA** est également intégré dans les pré et post-processeurs. Il suffit d'écrire un programme ou donner des instructions dans la console LUA pour commander les étapes de calculs.

Toute modification sur le domaine d'étude, analyses ou exploitations des résultats peut être effectuée de manière automatique par un programme en Lua sans l'intervention manuelle de l'utilisateur. Ainsi, la résolution par la méthode des éléments finis de l'équation (9) régissant le fonctionnement de notre système non linéaire se fera en utilisant un programme de calcul sous environnement FEMM (programmation par langage LUA). Les différentes étapes de mise en oeuvre de ce programme sont résumées dans l'organigramme suivant

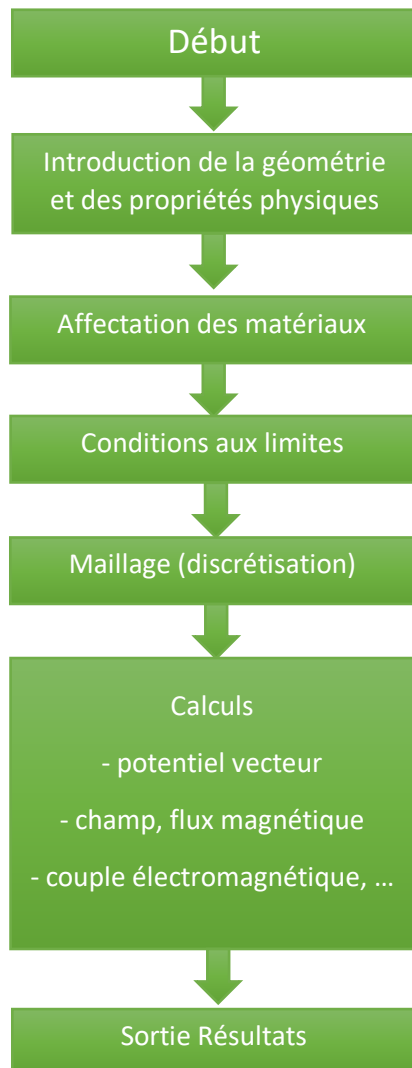


Figure II.8 : Organigramme résumant les différentes étapes de calcul dans FEMM

II.4.3. Mise en œuvre & Exploitation des résultats

II.4.3.1 Paramètres dimensionnels et physiques MRVDS 6/4

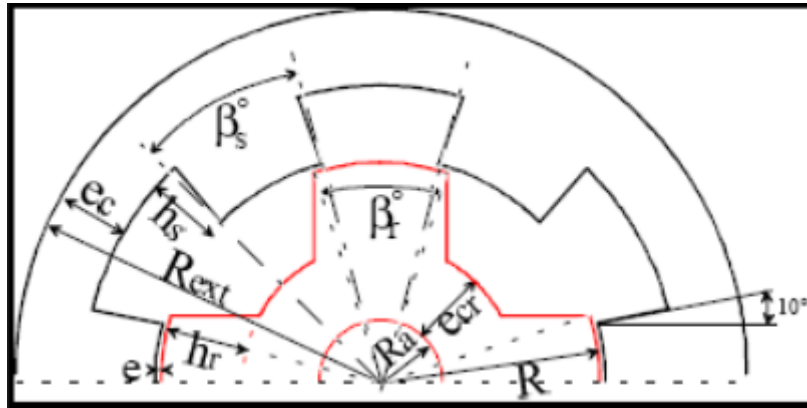


Figure II.9 : Définition des paramètres dimensionnels du prototype. [44]

Selon un cahier de charge imposé, on a choisi pour notre prototype les valeurs d'entrées suivantes :

- La vitesse: 1500tr/min.
- La puissance: 1500W.
- K_l : 0.5
- K_D : 0.5
- Sigma: 20400 Pa.
- Courant : $i_p=10A$

Tableau II.1 Principales dimensions

Intitulé	Notation	Dimensions
Nombre de dent statoriques	N_s	6 pôles
Nombre de dent rotoriques	N_r	4 pôles
Nombre de spire/phase	N	333 tours
Diamètre d'alésage	D	0.106 [m]
Diamètre extérieur	D_0	0.2121 [m]
Clearance	Cl	5.8721 [mm]
Épaisseur d'entrefer	E	$2.5e-4$ [m]
Hauteur de dent statorique	H_s	0.0393 [m]
Hauteur de dent rotorique	H_r	0.0191 [m]
Largeur de dent rotorique	W_r	0.0273 [m]
Largeur de dent statorique	W_s	0.0274 [m]
Épaisseur culasse rotorique	Y_r	0.0137 [m]
Longueur axiale de la machine	L	0.0530 [m]
Diamètre de l'arbre rotorique	D	0.0400 [m]
Epaisseur culasse statorique	Y_s	0.0137 [m]

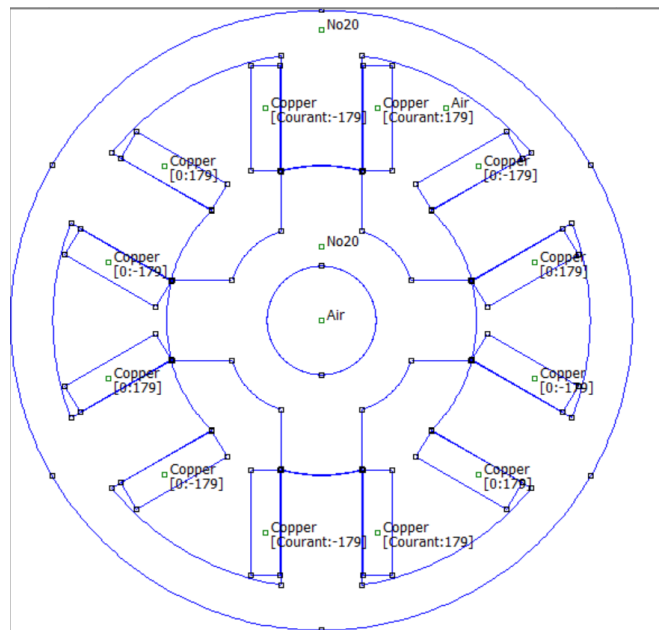


Fig. II.10 Dessin de la géométrie de la machine sous FEMM

- **Propriétés physiques**

L'analyse éléments finis est effectuée en non linéaire. Les parties ferromagnétiques sont représentées par la caractéristique $B(H)$ des tôles NO20 utilisées (Fig. II.11)

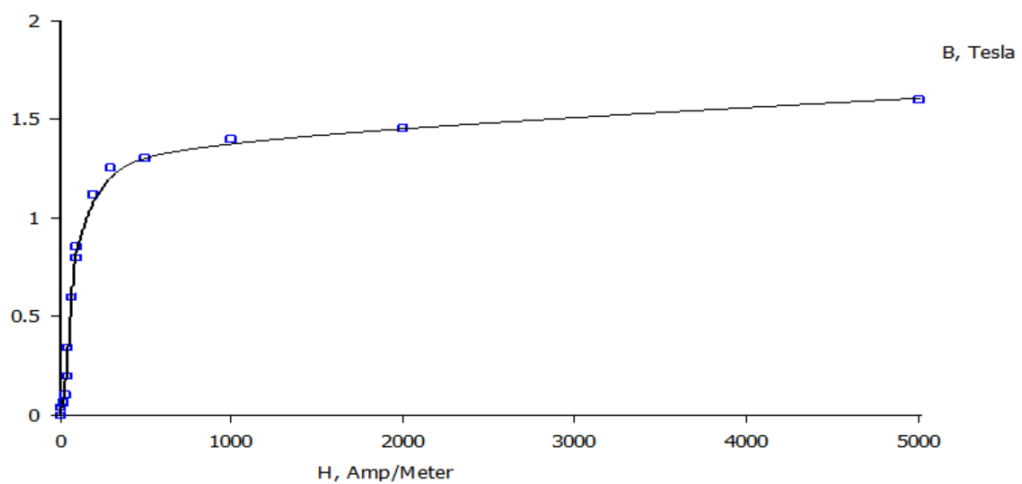


Fig. II.11 Caractéristique magnétique $B(H)$ du matériau NO20

- **L'alimentation** : elle est considérée comme constante, de 0 A jusqu'à 10 A avec un pas de 2 A pour chaque simulation.
- **Le maillage** : c'est « par défaut » du logiciel.
- **Les conditions au limites** : ce sont les conditions de Dirichlet (la limite extérieure de la machine)

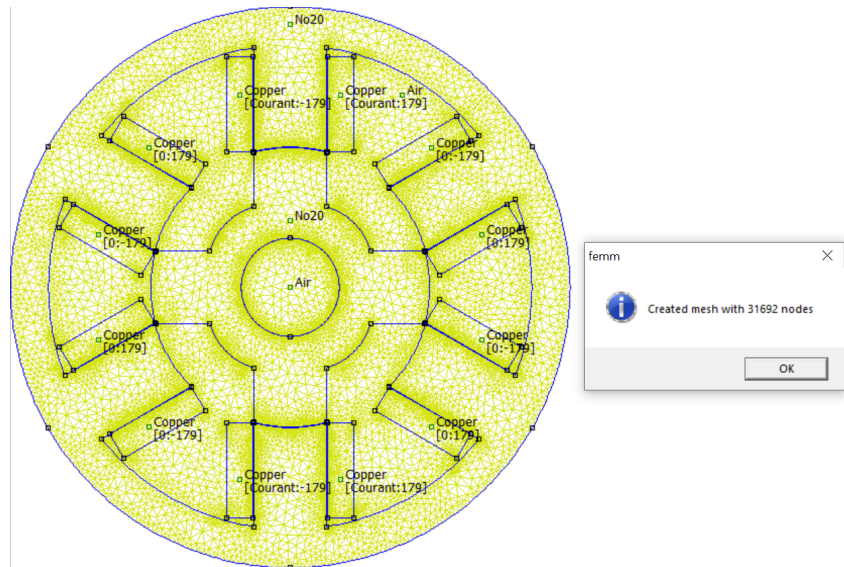
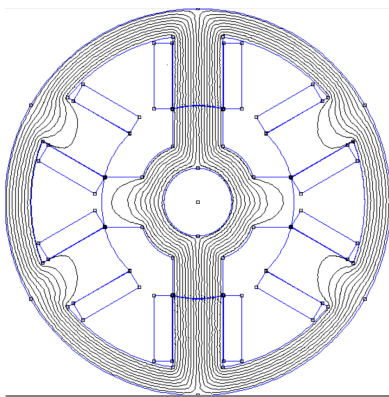


Fig.II.12 Maillage de la MRVDS selon FEMM

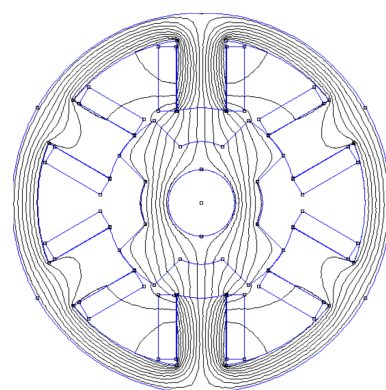
II.4.3.2. Exploitation des résultats

II.4.3.2.1 Résultats graphiques

- pour une excitation de 10A pour les deux positions conjonction et opposition :



- Position de conjonction



- Position d'opposition

Fig.II.13 Distribution des lignes de champ pour les deux positions extrêmes.

- L'induction magnétique B ?

- Position de conjonction :

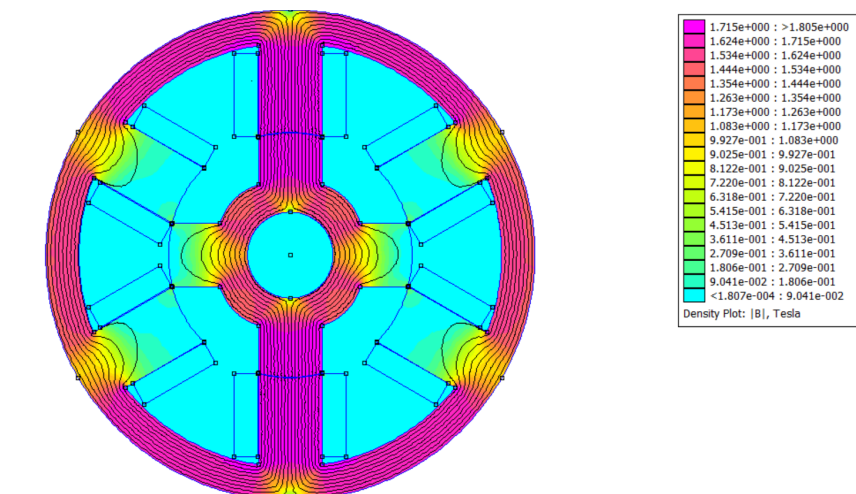


Fig.II.14 Densité du champ magnétique en conjonction.

- Position d'opposition:

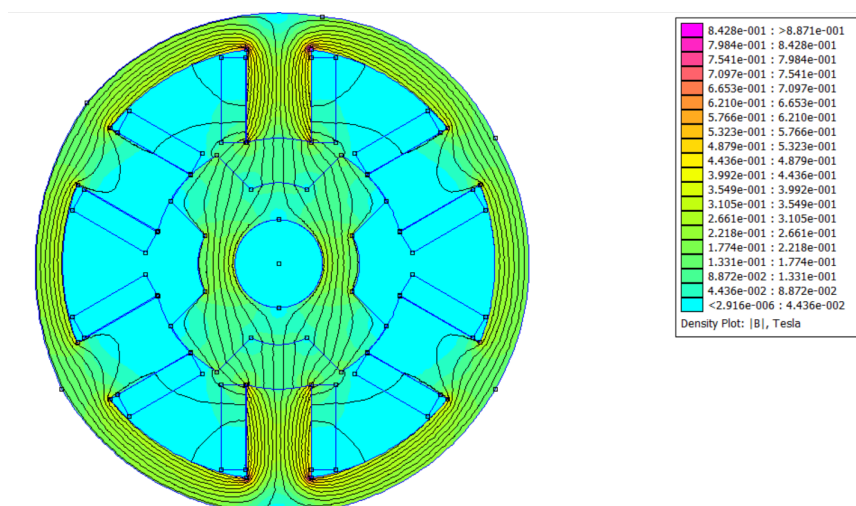


Fig.II.15 Densité du champ magnétique en opposition.

- Tableaux des résultats (couple & flux) :

Excitation teta	0	2	4	6	8	10
0	0	0.00441805	0.0055329	0.006123	0.00658643	0.00691
5	0	1.31464	2.35799	2.92537	3.42384	3.90909
10	0	1.56759	3.78914	4.85411	5.70806	6.52781
15	0	1.71584	5.04413	7.44586	8.91838	10.2141
20	0	1.78527	5.61299	9.96277	13.56	15.9794
25	0	1.84233	6.09534	11.523	17.7583	24.4708
26.5	0	1.8968	6.39758	12.3386	19.3467	27.1696
26.9	0	1.88966	6.4247	12.4708	19.6706	27.7649
27.3	0	1.91573	6.55853	12.8154	20.317	28.8236
27.8	0	1.92322	6.6607	13.1389	21.0019	30.0026
28.5	0	1.92494	6.80377	13.6375	22.0713	31.8751
29.1	0	1.93973	7.00093	14.2735	23.4023	34.1459
29.5	0	1.94051	7.12945	14.7637	24.465	36.0126
29.9	0	1.80787	6.81879	14.4141	24.2501	36.0934
30	0	1.69877	6.45791	13.7339	23.2031	34.6352
35	0	0.0979752	0.393567	0.888638	1.58324	2.47677
40	0	0.0301174	0.120803	0.272602	0.485659	0.759967
45	0	0.0000546	0.00021	0.00049	0.00087	0.00137

Tab II.2 : couple calculé par simulation sous FEMM

Excitation teta	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.800045	0.750159	0.647631	0.51975	0.377869	0.229149	0.0722846	0.040962	0.0359716	0.0347488
4	0.912696	0.89528	0.853507	0.754893	0.588474	0.388947	0.143594	0.0820813	0.0720372	0.0695786
6	0.975785	0.961845	0.931142	0.876932	0.751261	0.525144	0.21312	0.123314	0.108195	0.104495
8	1.03151	1.0186	0.990097	0.944038	0.86112	0.647665	0.281059	0.164582	0.14439	0.139447
10	1.08512	1.07249	1.04417	0.999584	0.927804	0.758411	0.347589	0.205853	0.1806	0.174415

Tab II.3 : Flux calculé par simulation sous FEMM

II.4.3.2.2 Analyse des caractéristiques

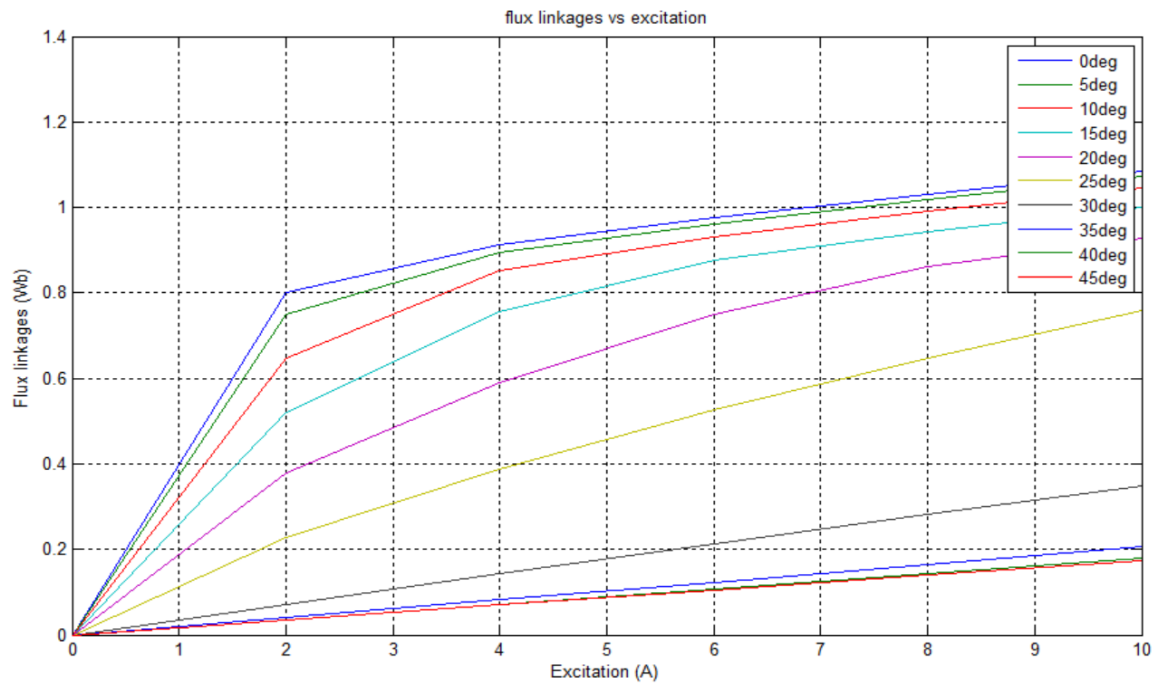


Fig.II.16 Caractéristiques flux $\Phi(i)$ paramétrées avec la position.

La figure II.16 montre comment le flux magnétique change avec l'excitation (I) pour différentes positions du rotor (tête), avec un pas de 5° . On voit que la zone linéaire est entre 0 et 2A, à 2A il y a un point de saturation, et après 2A on est dans la zone saturée.

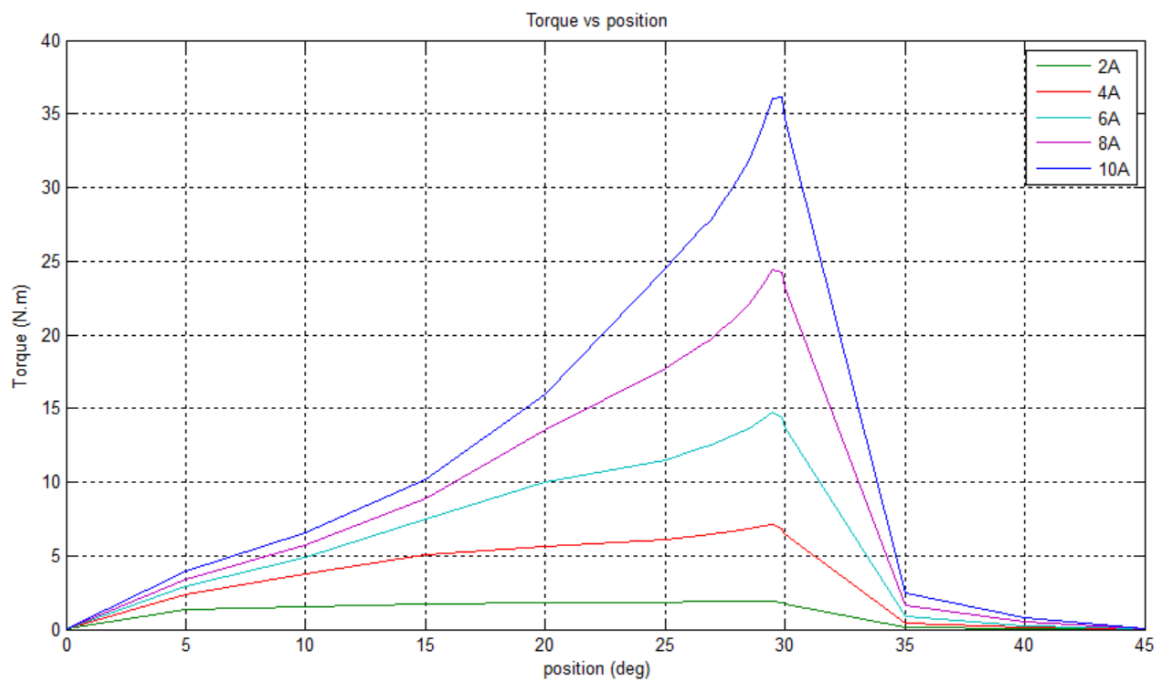


Fig.II.17 Caractéristiques couple $C(\theta)$ paramétrées selon l'excitation.

La figure II.17 montre le couple électromagnétique en fonction de la position du rotor, de 0° à 45° . On remarque que le couple maximum pour toutes les courbes est atteint près de 30° , quand les dents commencent à être face à face.

Remarques concernant le tracé du couple :

- le pas de rotation est de 5° pour avoir des courbes plus lisses
- le tracé du couple est modifié selon les étapes de processus de maillage : si le maillage appliqué est plus fin, le couple sera moins pointu. [45]

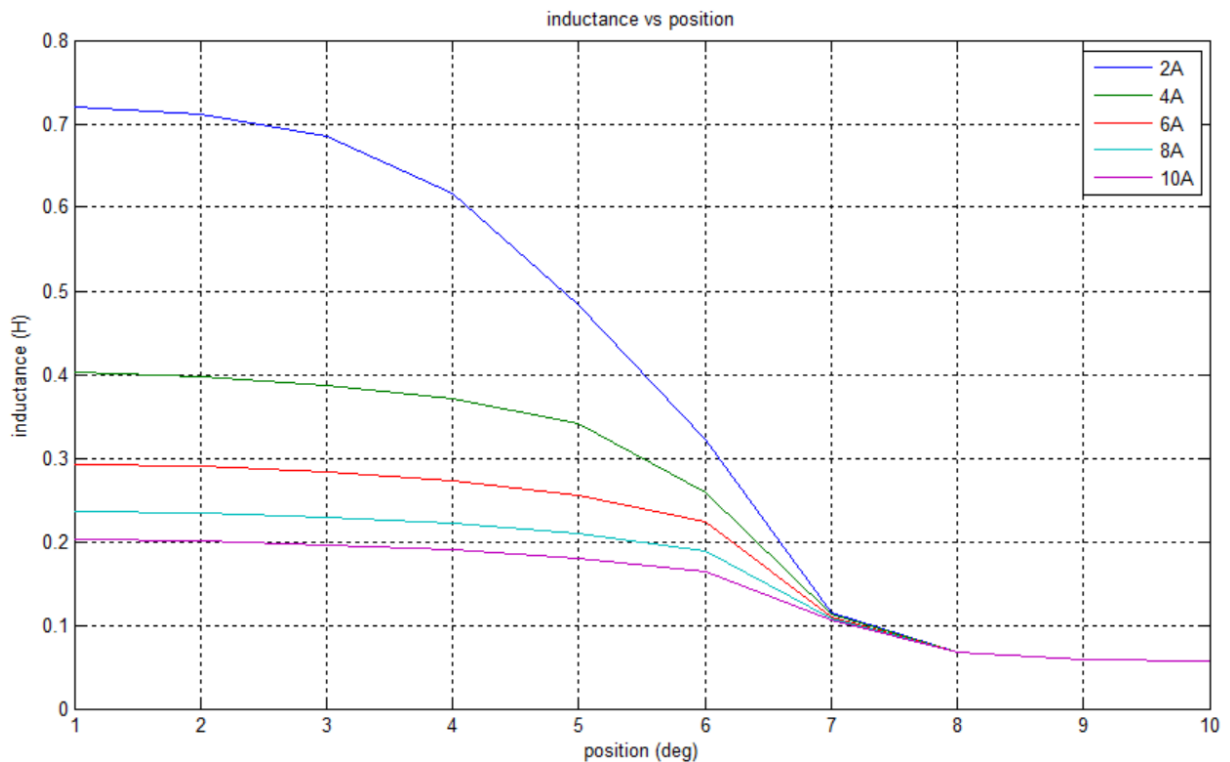


Fig.II.18 Caractéristiques inductance $L(\Theta)$ paramétrées selon l'excitation.

La figure II.18 montre l'inductance d'une phase par rapport à la position du rotor pour différentes excitations. L'inductance est minimale quand le rotor et le stator sont dans la position non alignée alors qu'elle atteint des valeurs maximales en position alignée.

De ce tracé, on déduit les valeurs d'inductances : $L_{\max}=0.73\text{H}$ et $L_{\min}=0.08\text{H}$.

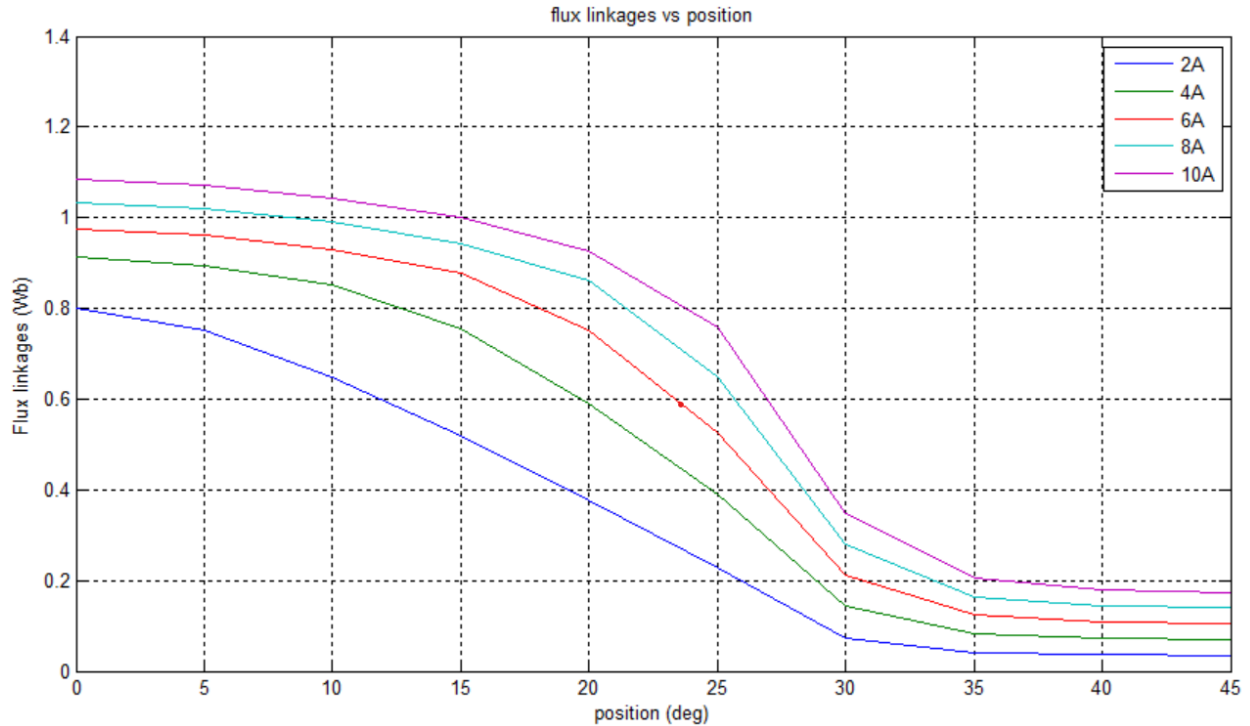


Fig.II.19 Caractéristiques flux Φ (Θ) paramétrées selon l'excitation.

La figure II .19 ci-dessus représente le flux magnétique en fonction de la position (Θ) pour différentes valeurs d'excitation (I) avec un pas de 2A.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle de la turbine et du multiplicateur de vitesse à adapter au générateur retenu. Puis nous avons déterminé les paramètres géométriques du prototype de MRVDS 6/4 nécessaires à sa modélisation par la méthode des éléments finis sous environnement FEMM et les différentes caractéristiques électromagnétiques.

Nous allons aborder dans le troisième chapitre la simulation dynamique de la machine sous environnement MATLAB/Simulink.

Chapitre III :

***Simulation &
Optimisation Du
Système GRV-
Convertisseur -
Turbine Eolienne***

III .1 Simulations de la GRV sous MATLAB/Simulink

III.1.1 Modèle non linéaire de la GRV

Dans cette étude sur la génératrice à réluctance variable (GRV), trois modèles d'inductance sont considérés : linéaire, quasi-linéaire et non-linéaire [42]. Pour analyser les caractéristiques réelles de la GRV, un modèle non-linéaire basé sur des équations d'interpolation est établi en utilisant le modèle non-linéaire d'inductance.

Le système étudié se compose de :

- ❖ machine à réluctance variable
- ❖ convertisseur de puissance
- ❖ contrôleur
- ❖ capteur de position

Dans ce mémoire, la machine étudiée est une génératrice triphasée à 6 pôles saillants au stator et 4 pôles saillants au rotor (plus connue sous le sigle de GRV 6/4 à double saillance). La topologie de son convertisseur de puissance est un demi-pont triphasé asymétrique. Le diagramme simplifié de la structure de la GRV est illustré dans la figure (III.1) [46].

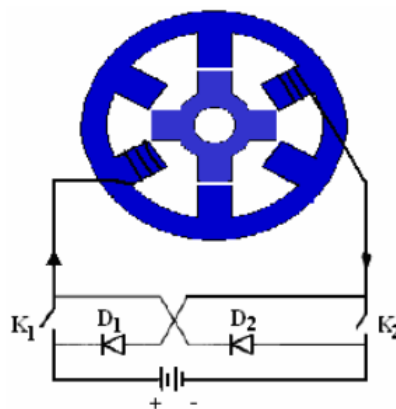


Figure III.1 : Structure simplifiée d'une GRV 6/4. [46]

- **Les différentes phases de la GRV**

La GRV comprend deux phases de fonctionnement dans une période électrique :

- **phase (1) : d'excitation ou de magnétisation.**

- **phase (2) : de génération électrique.**

La figure (III.1) montre qu'il y a deux commutateurs K1 et K2, et deux diodes D1 et D2 dans chaque phase.

- phase (1) : quand [K1, K2] fermés le bobinage du stator est excité par un circuit externe ; l'énergie électromécanique fournie par le circuit externe est convertie en énergie magnétique.

- phase (2) : quand [K1, K2] ouverts et [D1, D2] fermés, les énergies magnétique et mécanique sont converties en énergie électrique qui alimente de nouveau la source ou la charge.

- **Equations électromagnétiques**

La tension instantanée appliquée aux bornes de l'enroulement d'une phase de la GRV obéit à l'équation électrique :

$$\pm V_k = R \cdot i_k + \frac{d\psi(\theta, i_k)}{dt}$$

V_k : Tension appliquée sur chaque phase.

i_k : Courant dans la phase k (k = A, B, C).

R : Résistance de l'enroulement d'une phase.

$\psi(\theta, i_k)$: Flux statorique totalisé.

Le signe de V_k est déterminé par le mode de fonctionnement de la GRV : quand le système est excité (phase de magnétisation), nous avons $+V_k$; quand le système génère le courant (phase de génération), nous avons $-V_k$.

- **Calcul de l'inductance**

en effectuant un développement limité au premier ordre, nous aurons l'expression de l'inductance par phase statorique :

$$L_k(\theta, i_k) = L_0(i) + L_1(i) \cdot \cos(N_r \cdot \theta + \pi)$$

Ou

$$L_0(i) = \frac{L_{max}(i) + L_{min}(i)}{2}$$

$$L_1(i) = \frac{L_{max}(i) - L_{min}(i)}{2}$$

L_{min} : Valeur minimale de l'inductance

L_{max} : Valeur maximal de l'inductance

$$L_{max}(i) = \sum_{n=0}^3 a_n i^n = 0.136 - 0.0045 \cdot i + 0.005 \cdot i^2 - 0.0022 \cdot i^3 + 0.00035 i^4$$

- **Production du couple**

l'expression du couple :

$$Te = \frac{i^2}{2} \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} = \frac{i^2}{2} \cdot [-L_1 * N_r * \sin(N_r \cdot \theta + \pi)]$$

i : courant de la phase

N_r : nombre des dents rotoriques

θ : angle mécanique

III.1.2 Convertisseur de la GRV

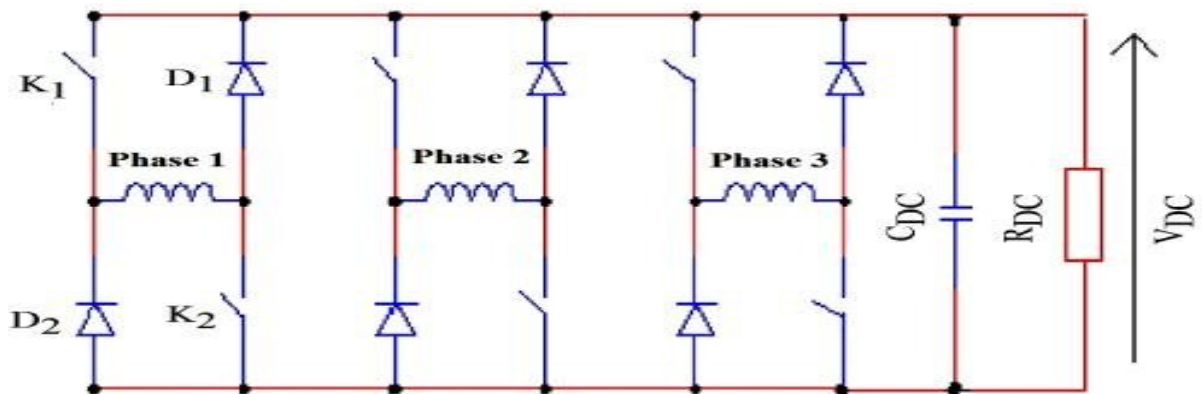


Figure III.2 : Convertisseur triphasé en demi-pont asymétrique. [46]

III.1.3 Schéma bloc de la simulation sous MATLAB/Simulink

- Paramètres utilisés pour la simulation de la GRV

La machine à réluctance variable simulée avec le modèle mathématique non linéaire établi ci-dessus est une génératrice triphasée dont la simulation numérique a été réalisée avec SIMULINK sous environnement MATLAB. Les angles optimaux des interrupteurs sont limités comme suit :

$$40^\circ \leq \theta_{on} < \theta_{off} \leq 90^\circ$$

Les paramètres de la simulation sont précisés dans le Tableau III.1.

Tab.III.1 Paramètres de la simulation de la GRV

Paramètre	Valeur Numérique
Ns	6
Nr	4
θ_{on}	40
θ_{off}	60
R	0.25 Ω
L_{min}	0.01 H
$V_{excitation}$	250 V
Kp, Ki	10, 5
R_{DC}	1140 Ω
Angle de référence	0°

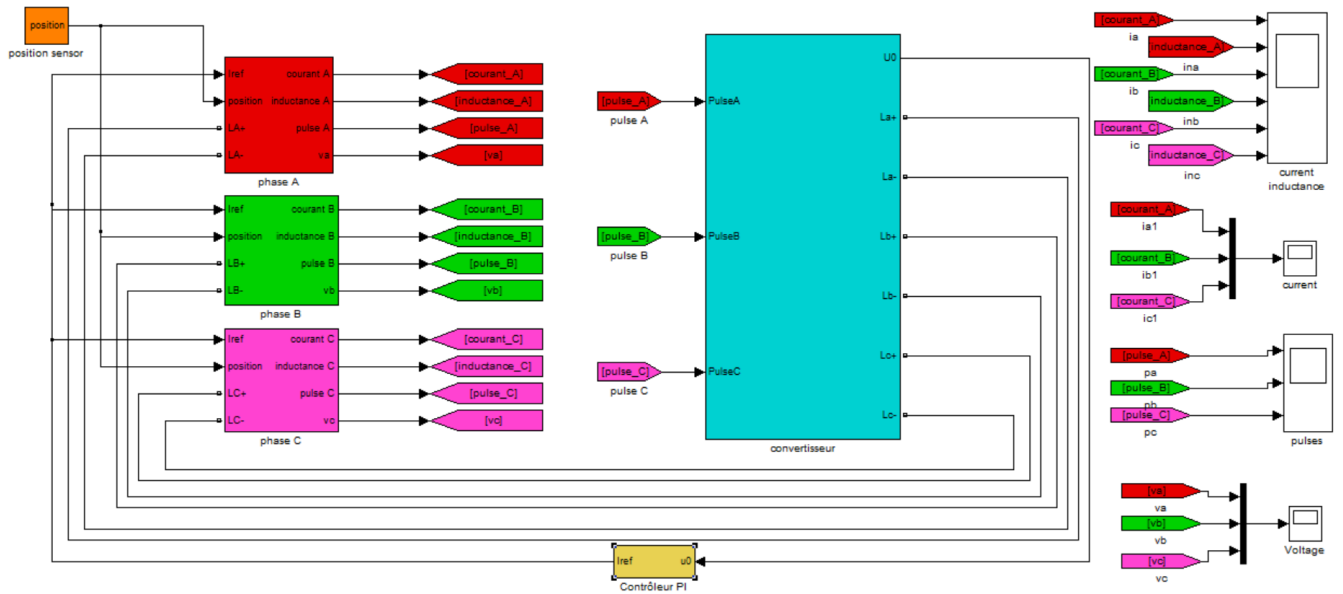


Figure III.3 : Structure interne du bloc GRV.

La figure montre que le modèle complet de simulation comprend cinq blocs principaux :

- la GRV
- le convertisseur de puissance
- le bus continu
- le contrôleur
- le capteur de position.

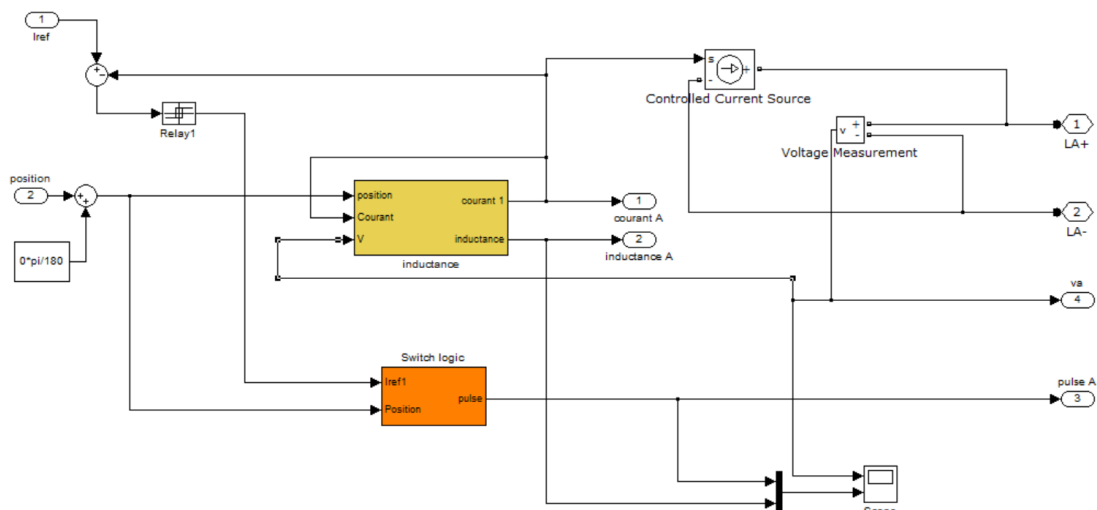


Figure III.4 : Intérieur du bloc Phase A.

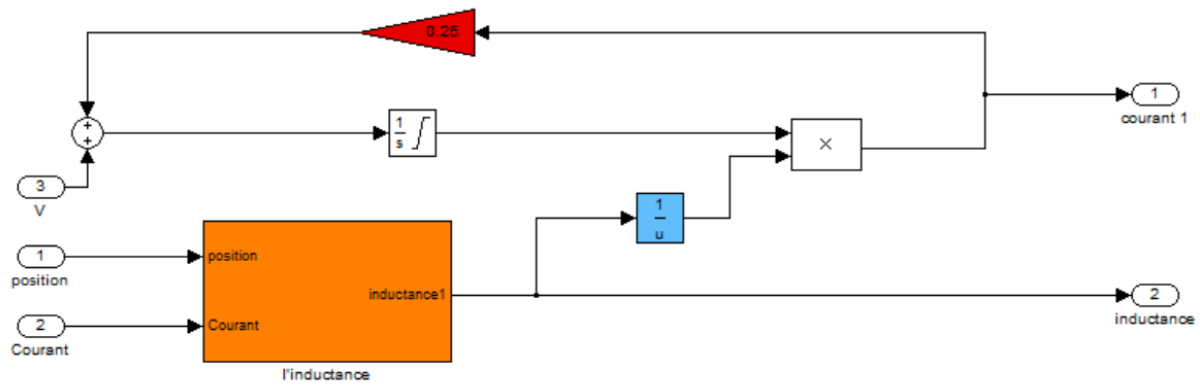


Figure III.5 : Calcul du courant de la phase (A).

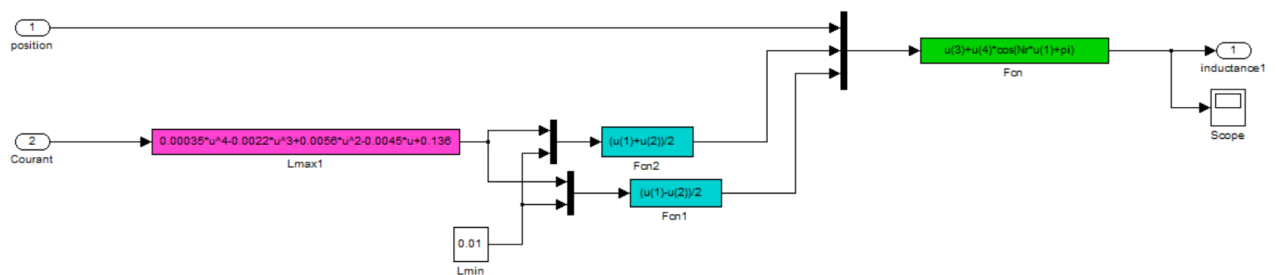


Figure III.6 : Calcul d'inductance de la phase (A).

Comme il a été mentionné précédemment, la structure du convertisseur de puissance est un demi-pont triphasé asymétrique (Fig.III.2).

Puisque les trois phases du convertisseur sont symétriques, on se contente de représenter (Fig.III.7) uniquement la phase A.

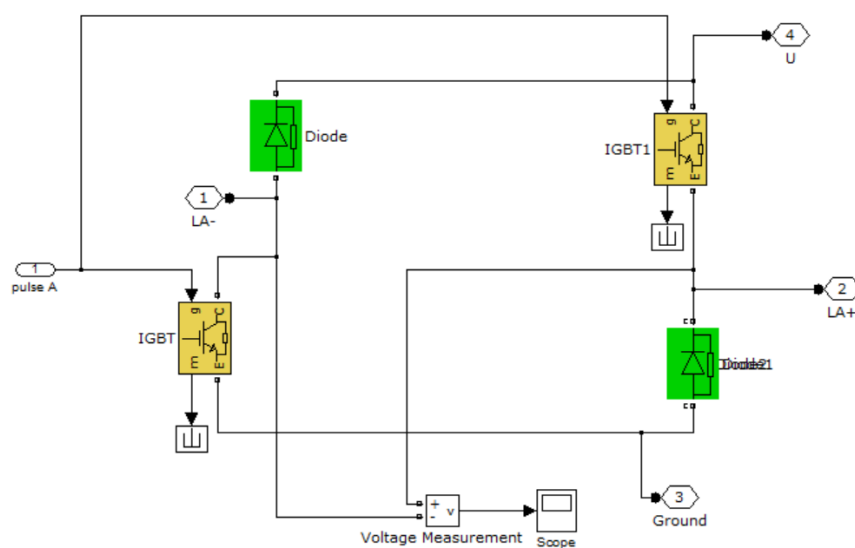


Figure III.7 : Circuit de puissance du convertisseur.

La figure (III.8) montre le bloc du bus continu. Il est constitué d'une source continue avec laquelle on place en série une diode. Le rôle de cette diode est de prévenir le courant généré par la GRV (pendant la phase de génération) de retourner vers la source continue.

Le transistor IGBT placé en série est utilisé pour simuler une présence (essai en charge) et une absence de charge (essai à vide).

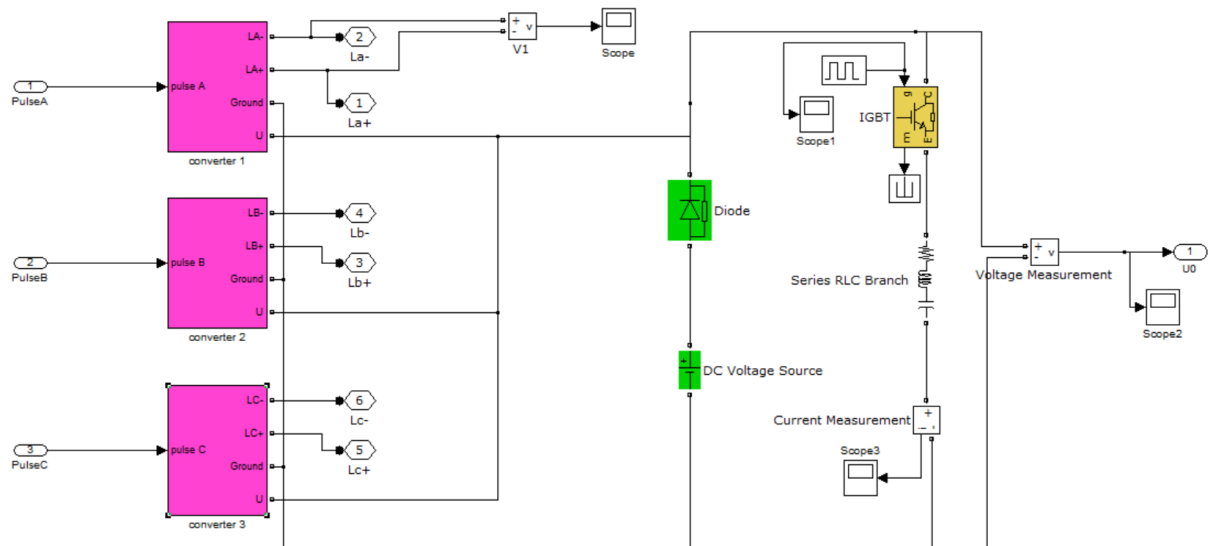


Figure III.8 : Convertisseur, bus continu et charge

- **Circuit de commande**

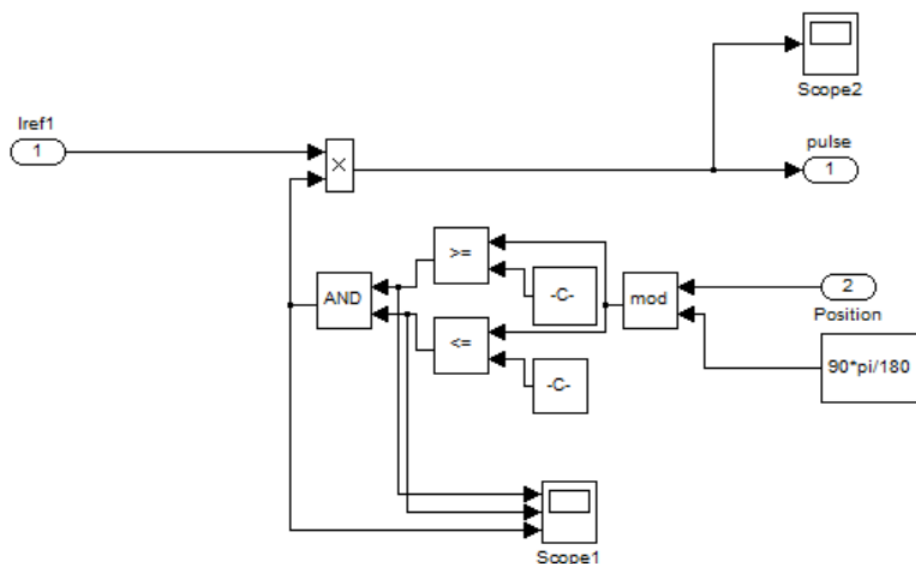


Figure III.9 : Circuit de commande du convertisseur.

- **Le Contrôleur**

Selon la tension de sortie du système et la tension de référence choisie, le contrôleur génère le courant de référence de la boucle du courant pour chaque phase afin de mettre en application la commande des deux boucles fermées. [46]

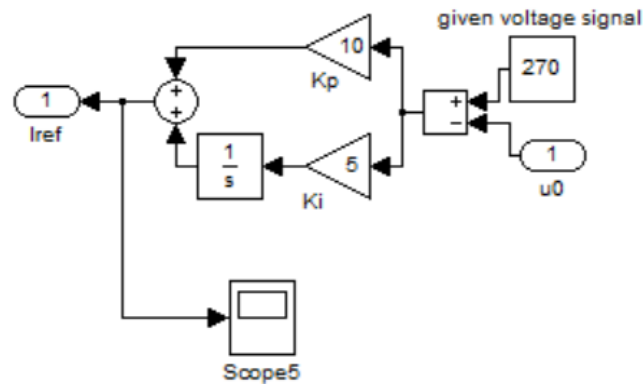


Figure III.10 : Le Contrôleur

- **Capteur de position**

Le capteur de position est sensé capter la position du rotor de la GRV, son schéma-bloc est représenté (Fig.III.11). La vitesse est mesurée puis intégrée ; il en résulte un angle qui sera additionné à un certain angle de référence. Ainsi, on obtient la position θ du rotor. [46]

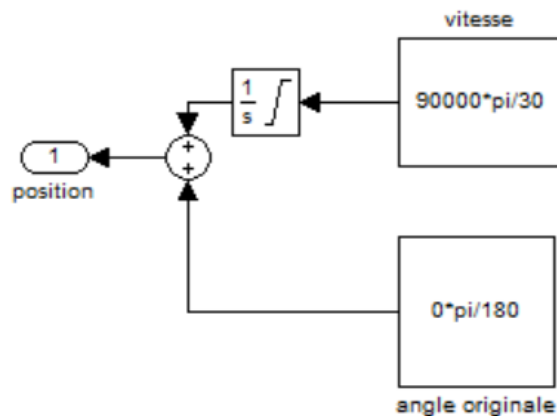


Figure III.11: Capteur de position.

III.1.4 Résultats de simulation de la GRV

Les figures suivantes illustrent les principaux résultats de simulation.

Résultats des simulations de la GRV avec ($\theta_{on}=40^\circ$ et $\theta_{off}=60^\circ$):

La Fig.III.12 montre la tension du côté AC du convertisseur de puissance (phase A). C'est une tension alternative variant entre -VDC (-250V) et +VDC (+250V). Le niveau +250 V est obtenu lors de la conduction des IGBT K1 et K2 (phase de magnétisation), tandis que le niveau - 250 V est obtenu lors de la conduction des diodes D1 et D2 (phase de génération).

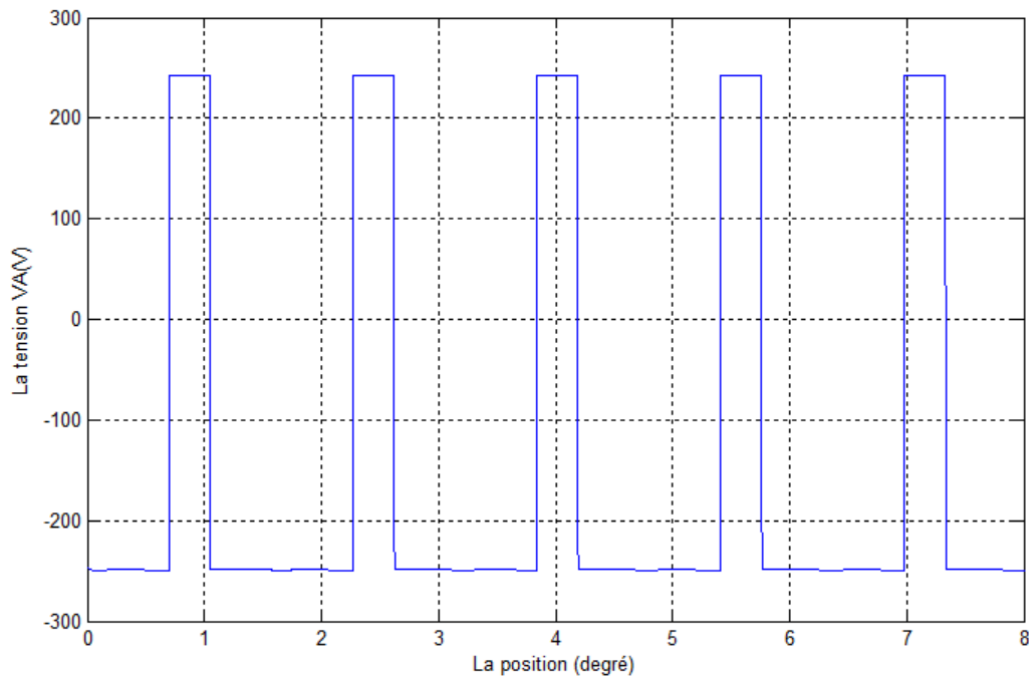


Fig.III.12 La tension de la phase A.

Dans la Fig.III.13, on montre les tensions alternatives dans les trois phases. La tension de la phase B est décalée de celle de la phase A d'un angle θ_s et quant à celle de la phase C, elle est décalée de $2\theta_s$.

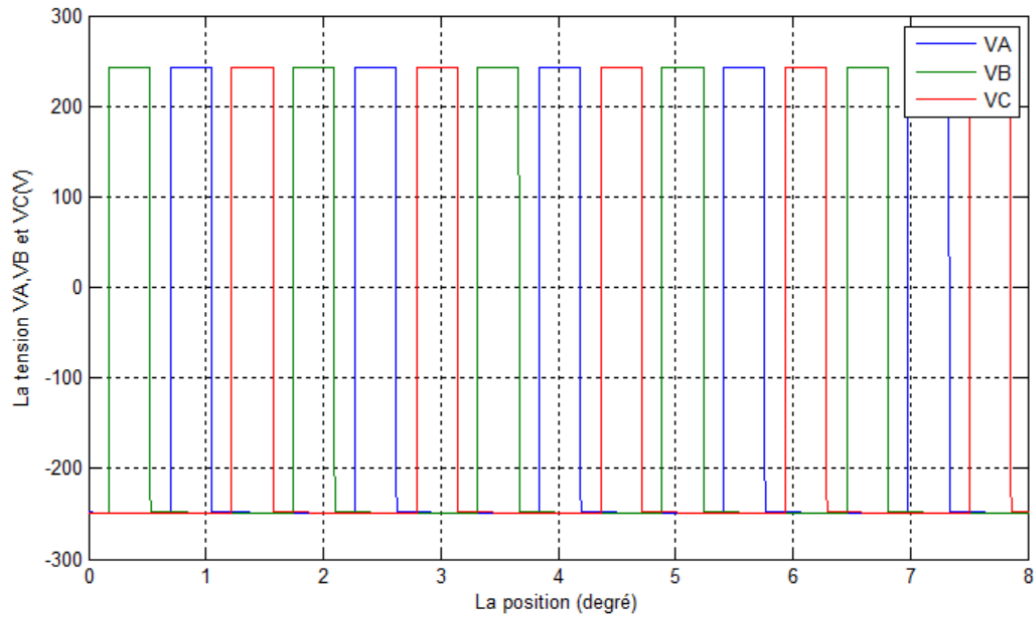


Figure III.13 Les tensions des trois phases.

La Fig.III.14 représente l'inductance en fonction de la position du rotor. On observe des valeurs strictement positives tantôt croissantes, tantôt décroissantes. Cela est justifié par la double saillance de la machine (saillance au stator et au rotor). Pour la machine considérée, et pour des positions variant de 0° à 100° , la valeur maximale de l'inductance est de 0.136 H.

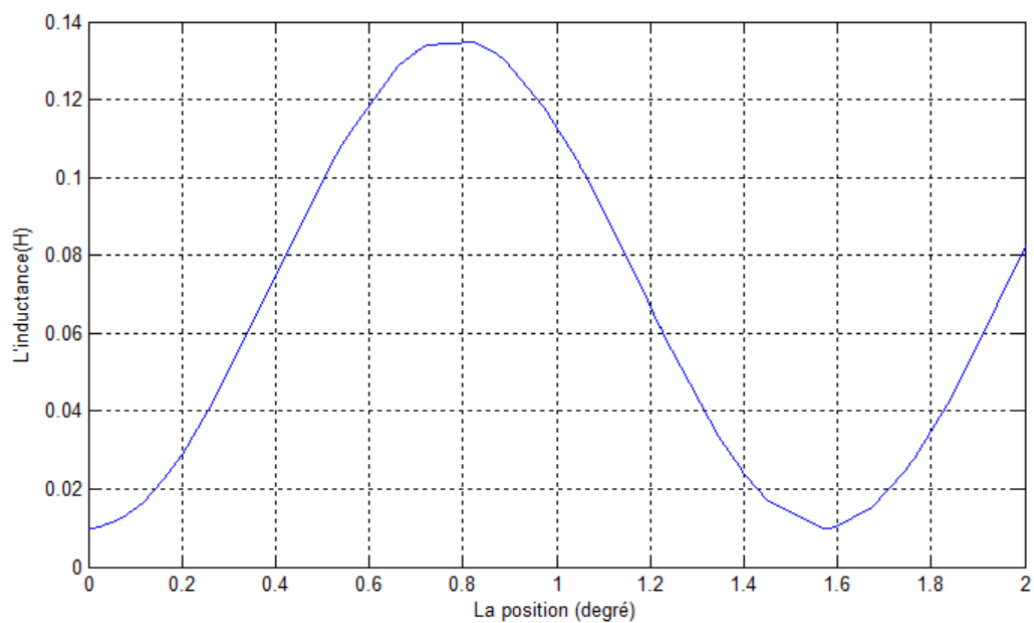


Figure III.14 L'inductance de la phase A.

Dans la Fig.III.15, on montre les inductances dans les trois phases. Rappelons que l'inductance de la phase B est décalée de celle de la phase A d'un angle $\theta_s = 30^\circ$, et quant à celle de la phase C elle est décalée de $2\theta_s = 60^\circ$.

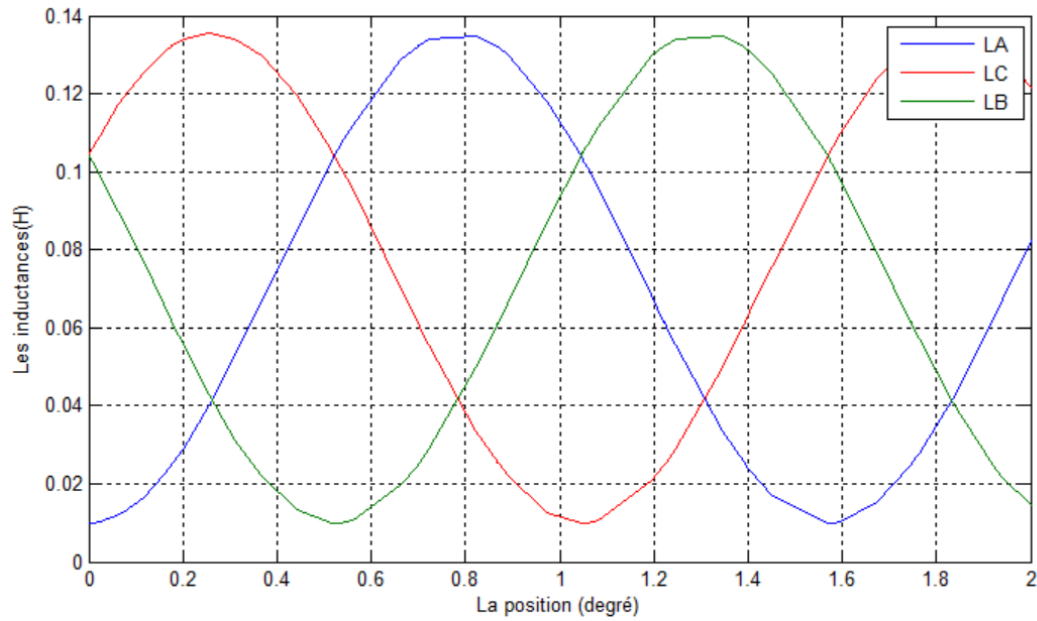


Figure III.15 Les inductances des trois phases.

Dans la Fig.III.16, les courants des trois phases sont simultanément tracés. Un décalage de θ_s est enregistré entre I_A et I_B , et un décalage de $2\theta_s$ est relevé entre I_A et I_C . On constate que lorsque le courant s'annule dans une phase, il est non nul dans les deux autres phases ; donc, la continuité du service est bien assurée.

Dans la Fig.III.17, on remarque que quand la vitesse diminue, le courant augmente : c'est un avantage de la GRV pour les basses vitesses de vent dans les applications éoliennes.

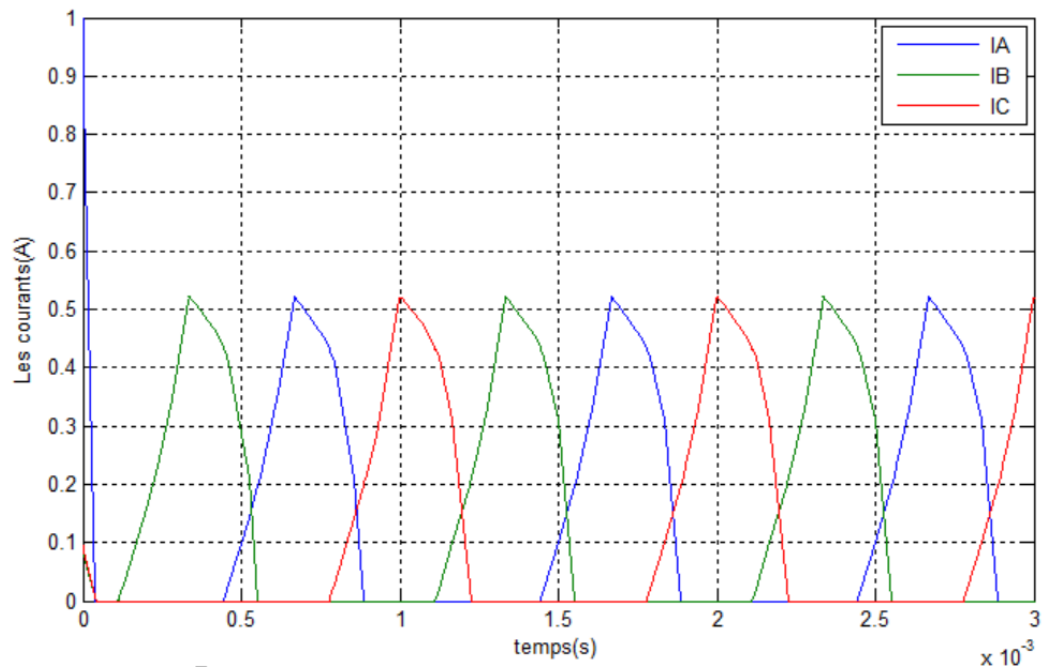


Figure III.16 Les Courants des trois phases.

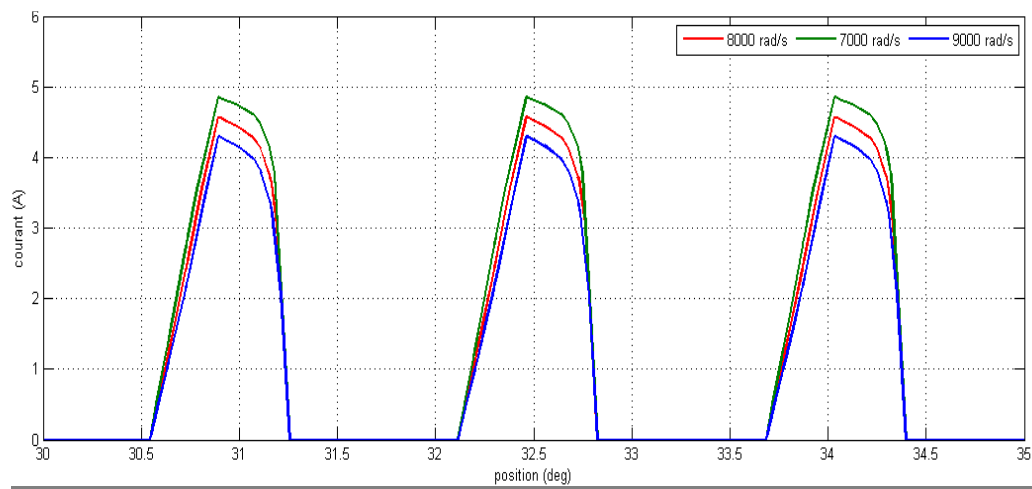


Figure III.17 : L'allure du courant de la phase A pour différentes vitesses d'excitation.

La Fig.III.18 montre le courant IA pour $\theta_{on}=40^\circ$ et différents θ_{off} .

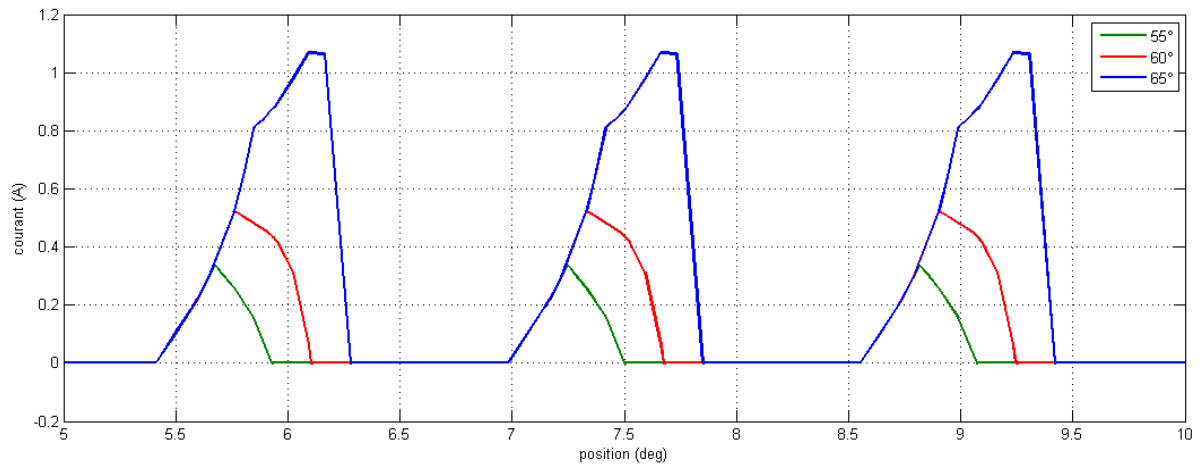


Figure III.18 : courant généré par la phase 1 pour différentes valeurs de θ_{off} à 9000rad/s

La Fig.III.19 illustre les impulsions des IGBT K1 et K2 de la phase A du convertisseur.

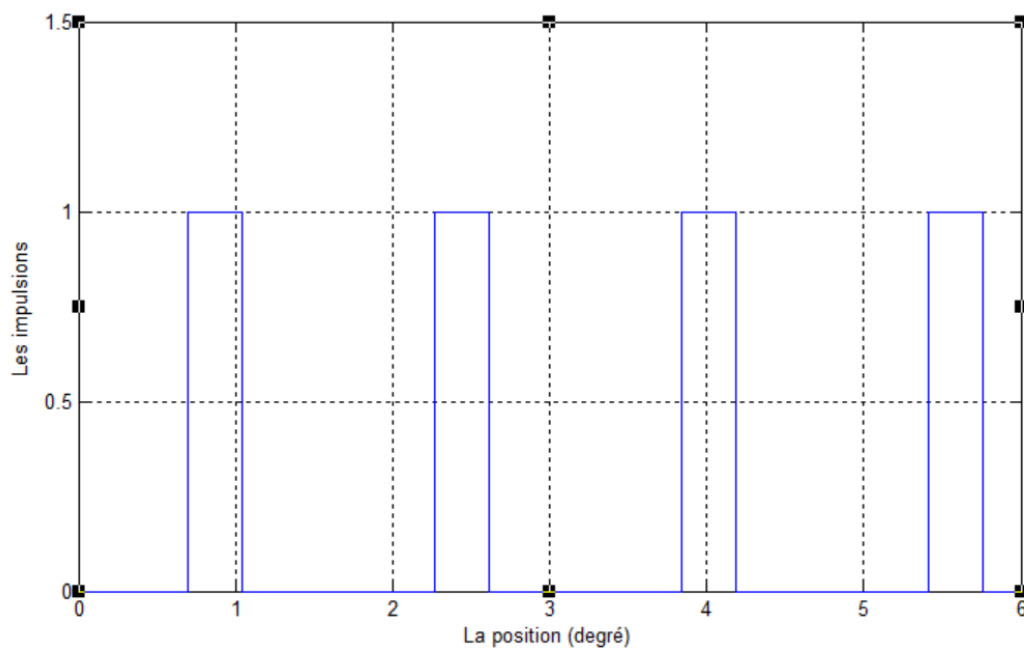


Figure III.19 Les impulsions de la phase A.

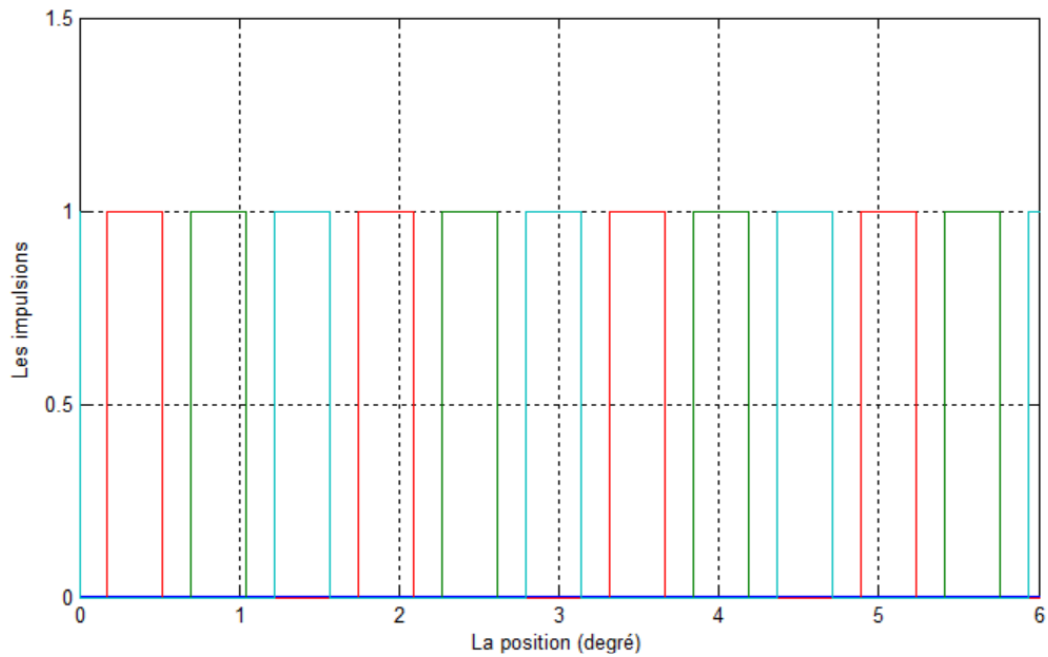


Figure III.20 Les impulsions triphasées.

Dans la Fig.III.20 précédente, on montre les impulsions des IGBT des trois phases du convertisseur. Là aussi, on remarque un décalage de θ_s entre les impulsions des phases A et B, et $2\theta_s$ entre les phases B et C (comme pour les cas des tensions, des courants et des inductances). Ce qui prouve la convergence du modèle adopté.

La Fig.III.21 représente les courbes de l'inductance et de l'impulsion de la phase A ; l'impulsion est amorcée lors de la décroissance de l'inductance.

La Fig. III.22 où on voit clairement que la machine est excitée (magnétisée) lors de la décroissance de l'inductance.

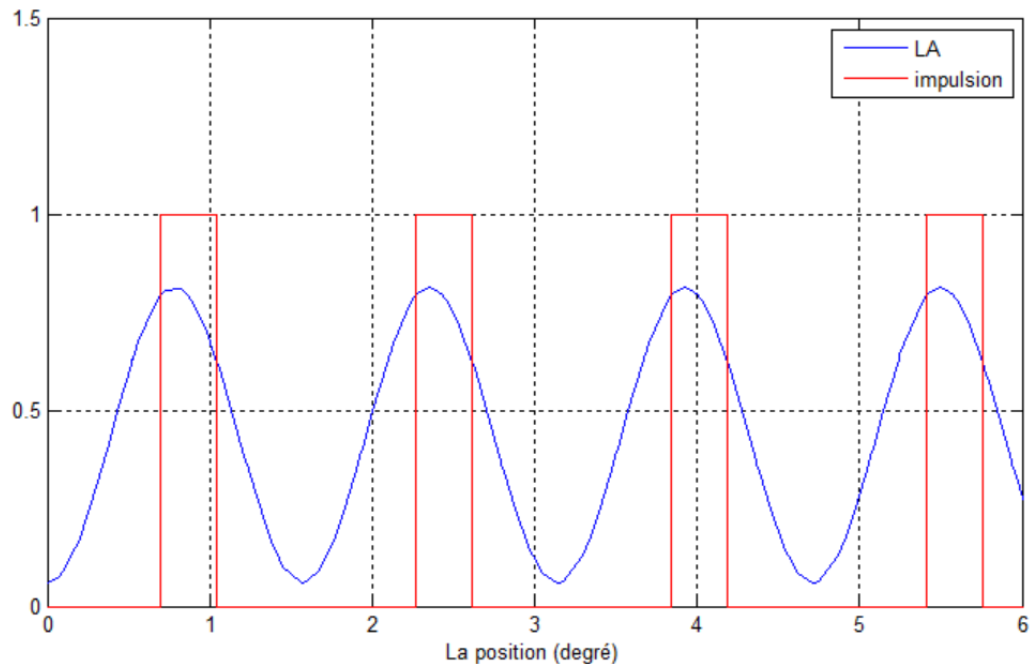


Figure III.21 : La position des impulsions par rapport à l'inductance.

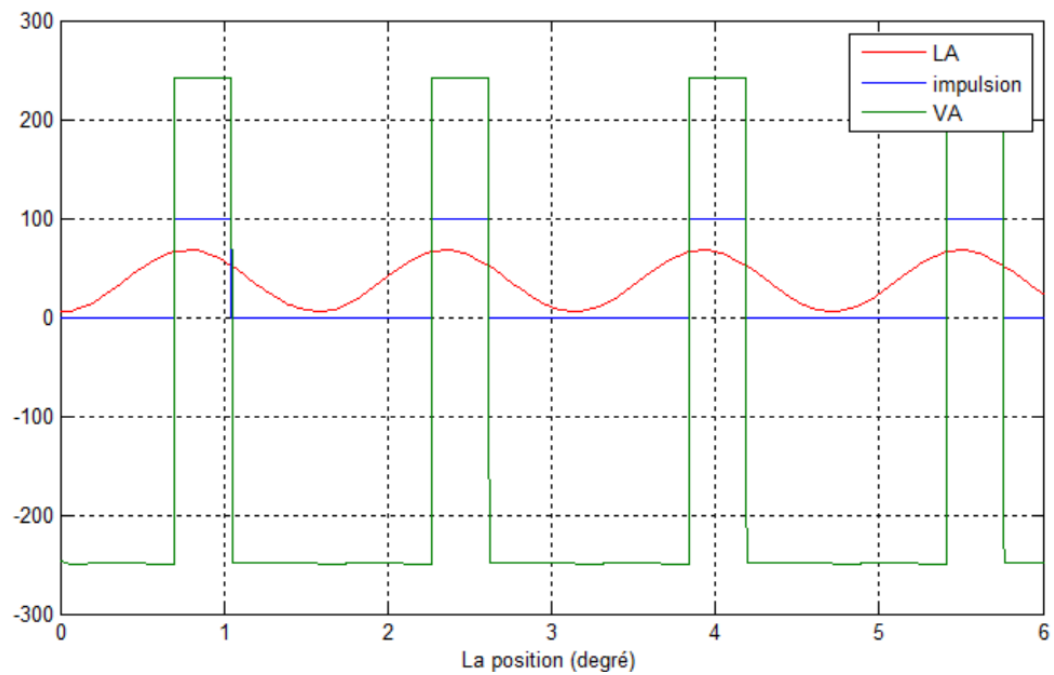


Figure III.22 : L'influence des impulsions sur la tension et l'inductance de la machine.

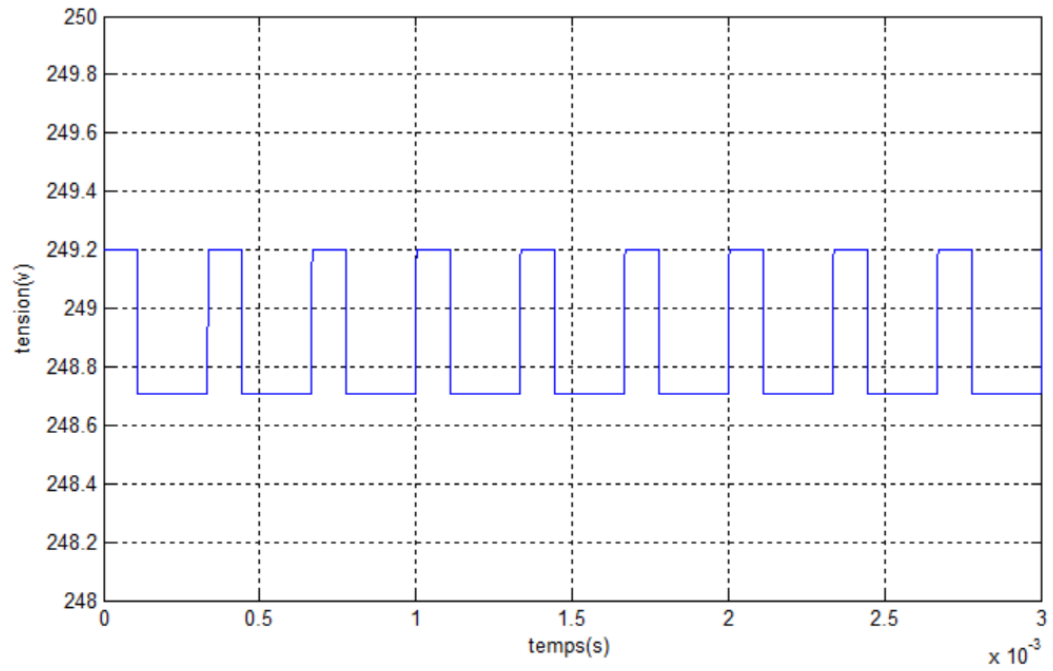


Figure III.23 Tension du bus continu.

La Fig.III.24 illustre la variation du flux par rapport au courant qui délimite la surface du cycle de l'énergie magnétique pouvant être transformée.

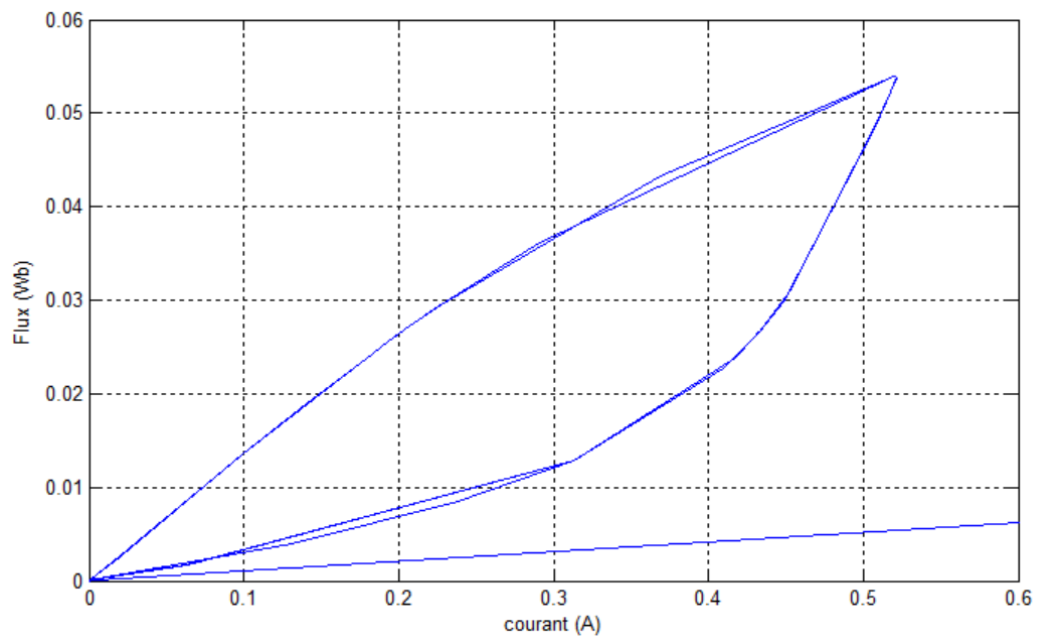


Figure III.24 Le flux en fonction du courant (phase A).

Dans la Fig.III.25 on montre l'allure du flux statorique de la machine en fonction de la position. Le flux croît jusqu'à un maximum de 0.054Wb, puis décroît et devient nul, et après un certain temps il reprend la croissance.

La Fig.III.26 les flux des trois phases sont simultanément tracés. Un décalage de θ_s est enregistré entre PsiA et PsiB, et un décalage de $2\theta_s$ est relevé entre PsiA et PsiC. On constate que lorsque le flux s'annule dans une phase, il est non nul dans les deux autres phases.

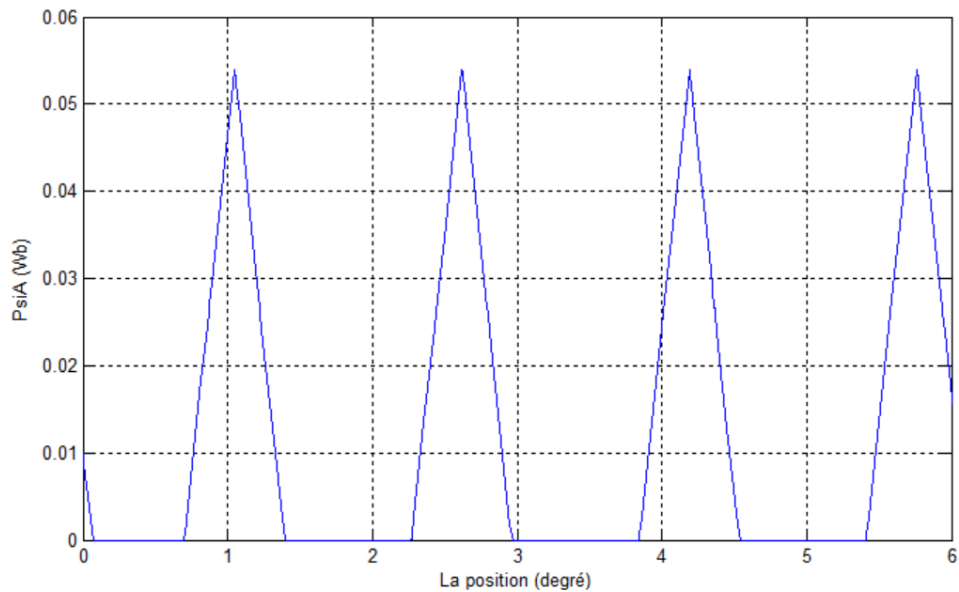


Figure III.25 Le flux de la phase A.

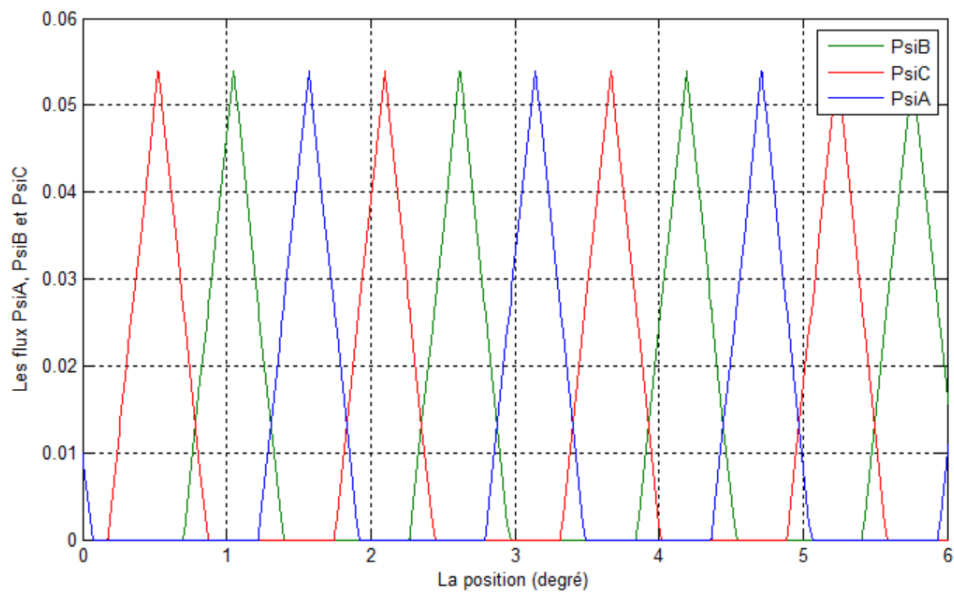


Figure III.26 : Les flux des trois phases.

Dans la Fig.III.27 on illustre l'allure du couple électromagnétique de la machine.

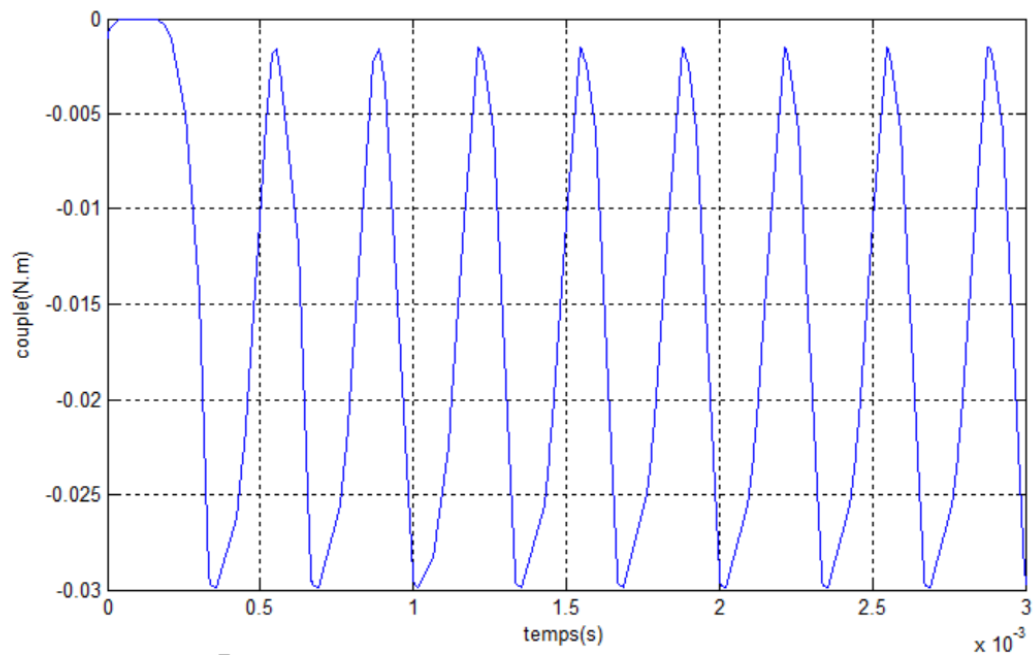


Figure III.27 : Le couple électromagnétique de la GRV.

III.2 Simulations de l'éolienne sous Matlab/Simulink

III.2.1 Schéma bloc de la turbine sous Matlab

- *Turbine à vitesse fixe*

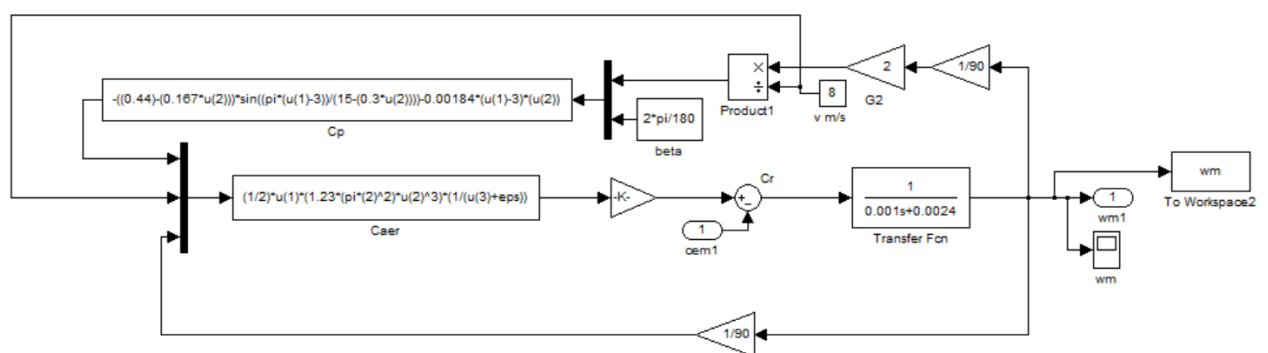


Figure III.28 Schéma bloc de la turbine à vitesse fixe (V=8m/s)

- *Turbine à vitesse variable*

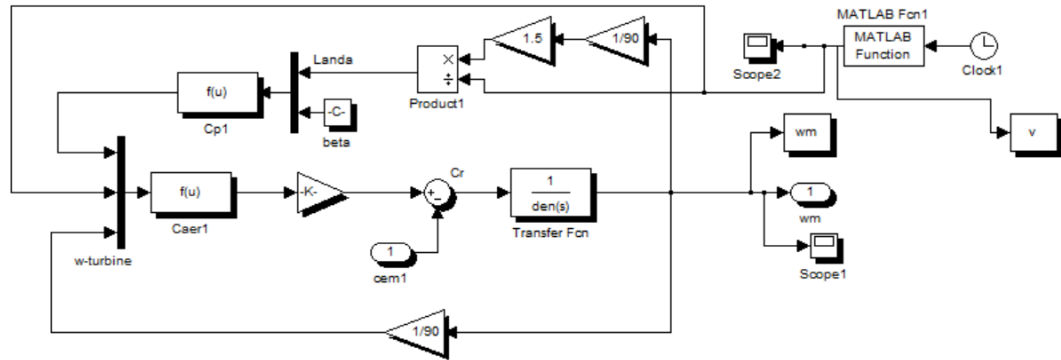


Figure III.29 Schéma bloc de la turbine à vitesse variable

Les paramètres de simulation de cette association sont inscrits dans le Tableau III.2.

Tab.III.2 Paramètres de simulation de l'association GRV-turbine

Paramètre	Valeur Numérique
J	0.001 kg.m2
F	0.0024 N.m.s
β	2°
R	2m
Vitesse du vent	8 m/s
G	90
ρ	1.23 kg/m3

III.2.2 Résultats de simulation

- *Turbine à vitesse fixe*

Pour une valeur fixée de la vitesse du vent, soit $V = 8$ m/s, la vitesse de rotation de la turbine en rad/s est représentée dans la Fig.III.30. Après une phase transitoire de 0.6 s, la vitesse se maintient à un niveau constant soit 1480 rad/s

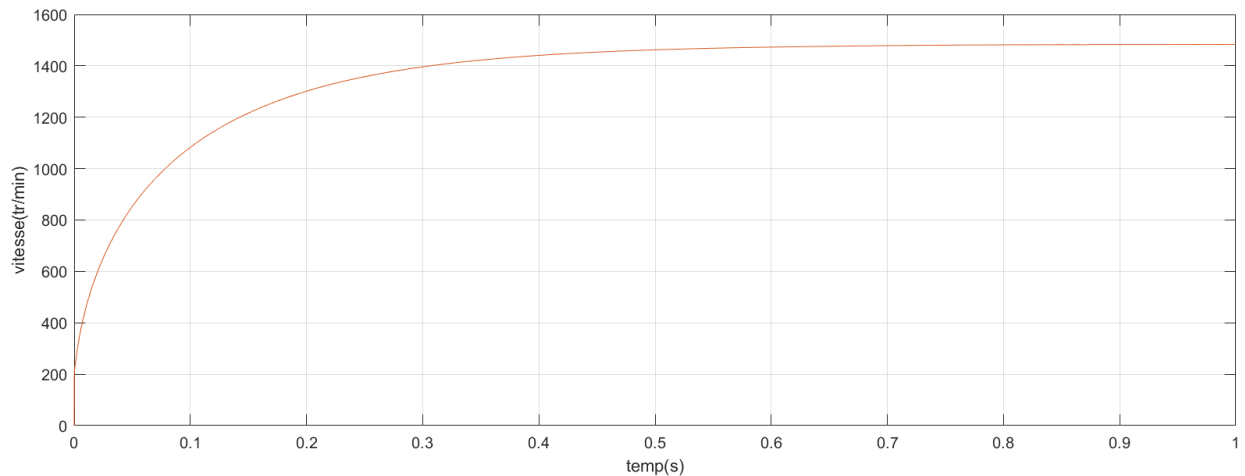


Figure III.30 Vitesse de la turbine fixe.

- ***Turbine à vitesse variable***

Dans ce cas, l'expression de la vitesse du vent en fonction du temps

$$V(t) = 10 + 0.2.\sin(14,7.t) + 2.\sin(26,65.t) + \sin(129,3.t) + 0.2.\sin(366,45.t)$$

Alors, la nouvelle allure de la vitesse de la turbine est indiquée Fig.III.31. Après un régime transitoire de 0.6 s, la courbe devient fluctuante autour de 1840 rad/s ; donc, la vitesse a augmenté.

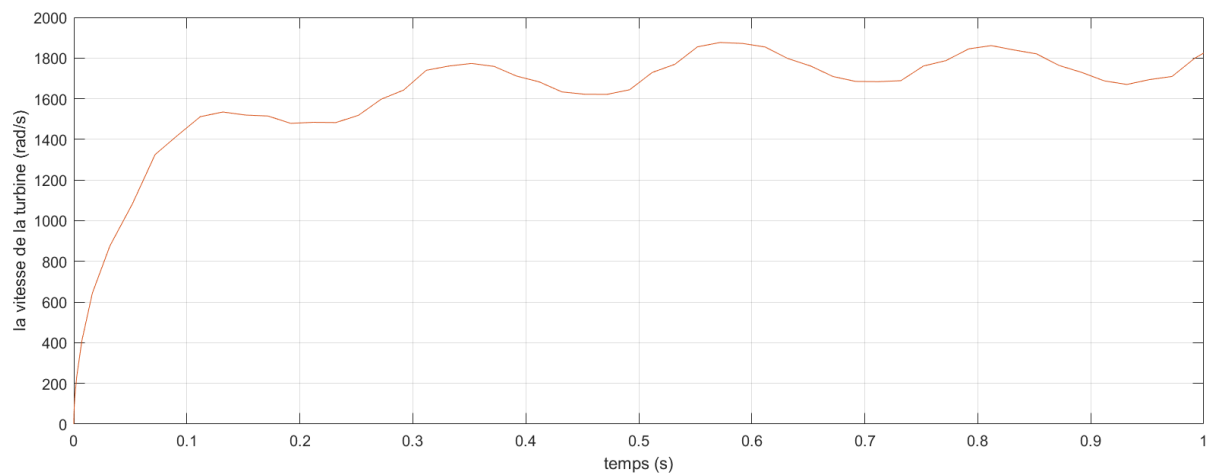


Figure III.31 La vitesse de la turbine variable.

III.2.3 Simulations de la GRV en association avec la turbine

Le multiplicateur de vitesse (Gearbox) permet d'adapter la vitesse de la turbine (Ω_1) avec celle du générateur (Ω_2). Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain de valeur (K), l'élasticité et le frottement étant négligés.[34]

- **Modèle de simulation**

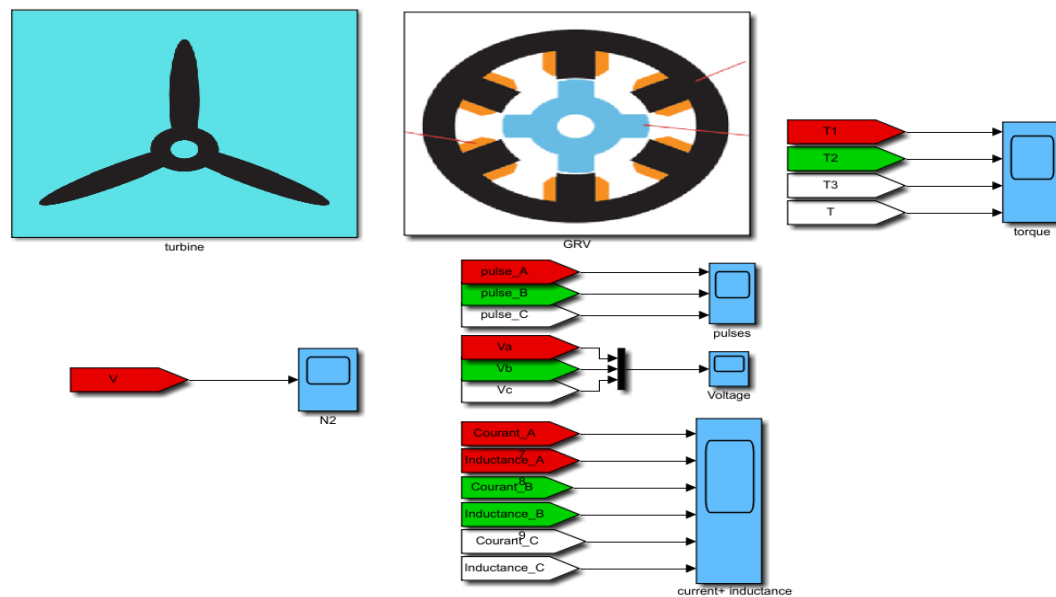


Figure III.32 Simulation d'une GRV6/4 en association avec une turbine tripale.

- **Résultats des simulations**

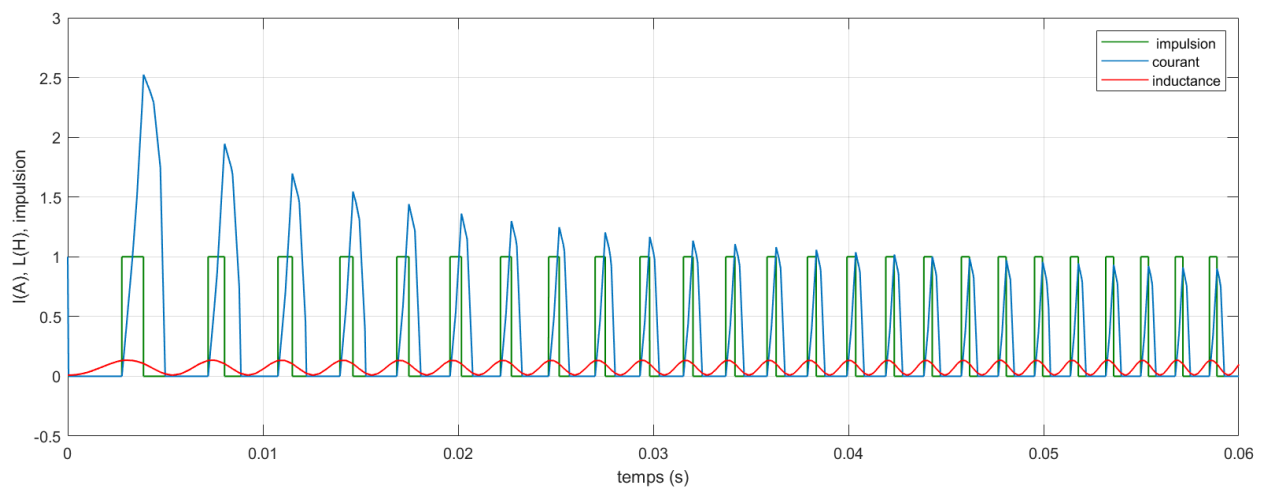


Figure III.33 Profil du courant, impulsion et inductance de la première phase

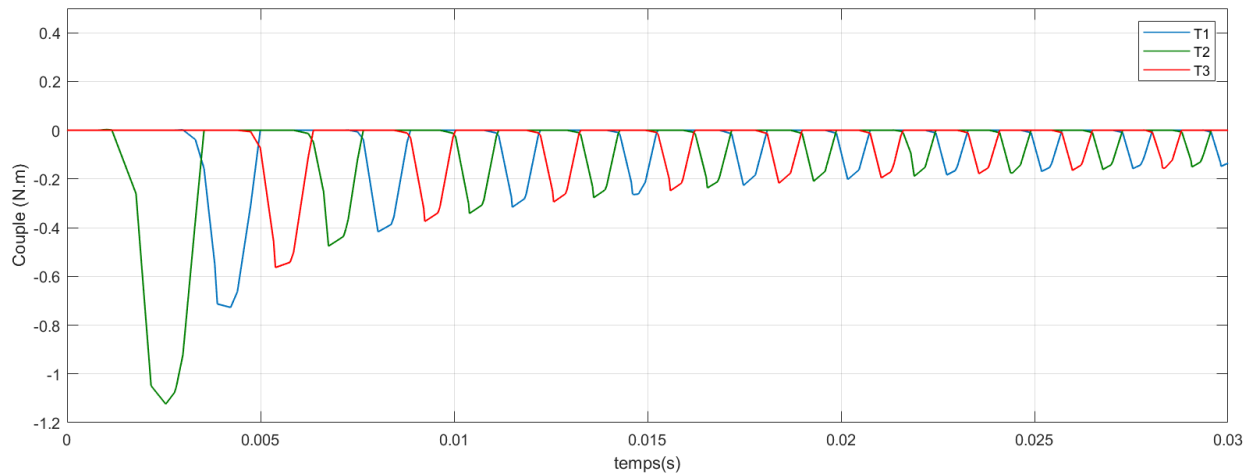


Figure III.34 Couple des trois phases de la machine.

III.3 Méthode d'optimisation appliquées à l'éolienne :

Parmi les méthodes les plus utilisées on site :

1. Méthode perturbe & observe

Dans cette étude, l'algorithme MPPT utilisé est autonome par rapport à l'éolienne suggérée. On a tenté de mettre en œuvre la méthode la plus répandue dans ce domaine, connue sous le nom de technique Perturbe and Observe (P & O), qui repose sur la fluctuation de la tension de sortie du générateur par rapport à la vitesse du rotor [47].

Le cycle de fonctionnement du convertisseur associé est modifié par l'algorithme P & O, ce qui entraîne une variation de la tension générée (de sortie du générateur éolien) et permet d'observer la puissance résultante.

Lorsque le rapport cyclique augmente, cela entraîne une augmentation de la puissance, ce qui signifie que la direction du signal de perturbation est identique à celle du cycle précédent. En revanche, lorsque le cycle de perturbation entraîne une baisse de la puissance, le signal de perturbation est dans le sens inverse du cycle précédent.

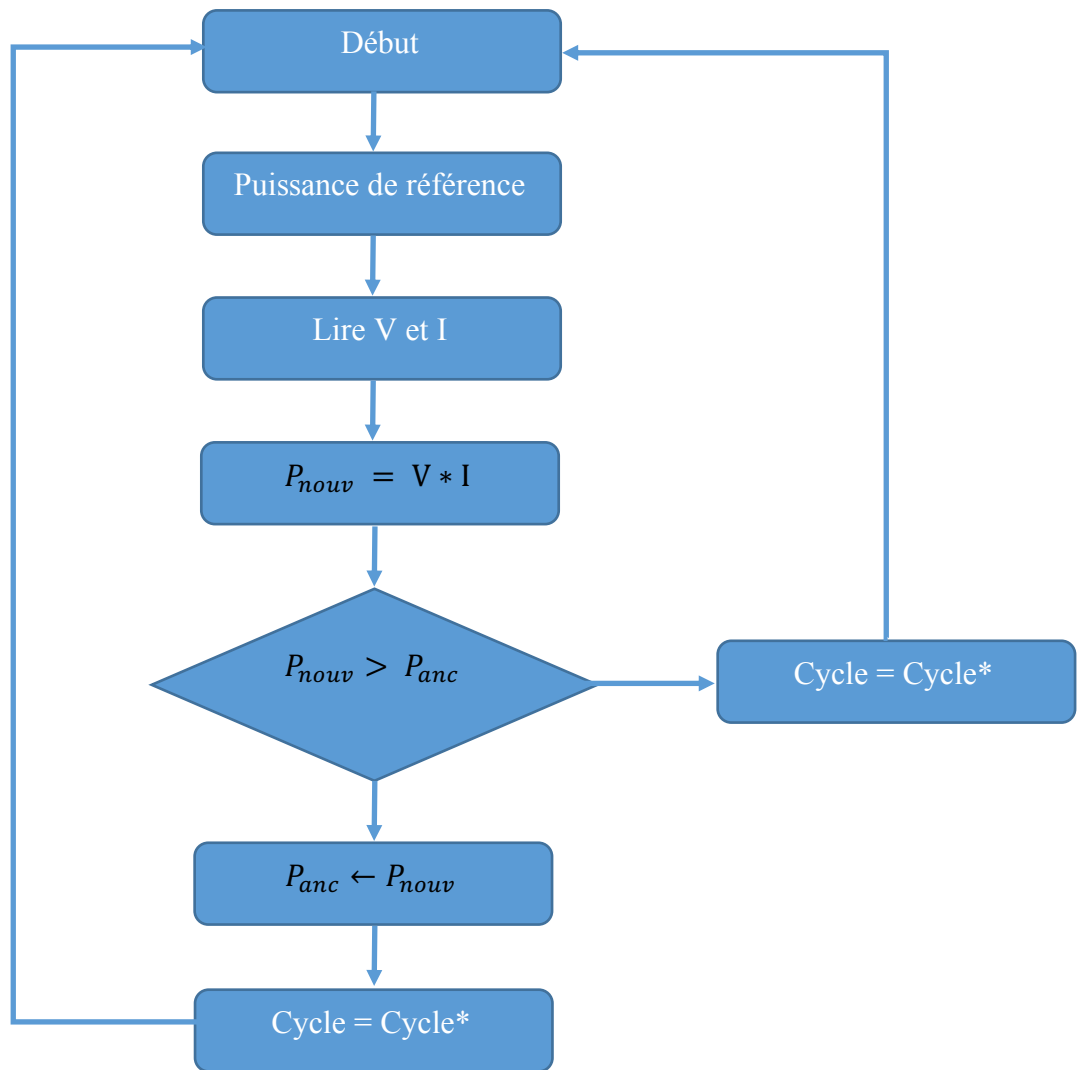


Figure III.35 L'algorithme P & O

1. Méthode profil de puissance

Cette méthode repose sur la connaissance préalable de la courbe de puissance de l'éolienne, qui décrit la relation entre la vitesse du vent et la puissance de sortie pour différentes vitesses de rotation. La courbe de puissance est généralement fournie par le fabricant de l'éolienne ou déterminée expérimentalement.

Étapes de la Méthode

1. Caractérisation Initiale :

- Une courbe de puissance est établie en fonction de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de l'éolienne.
- Cette courbe est stockée dans le contrôleur de l'éolienne.

2. Mesure en Temps Réel :

- La vitesse du vent et la vitesse de rotation de l'éolienne sont mesurées en temps réel.

3. Consultation de la Courbe de Puissance :

- Le contrôleur consulte la courbe de puissance pour déterminer la puissance maximale possible à la vitesse de vent mesurée.

4. Ajustement de la Vitesse de Rotation :

- La vitesse de rotation de l'éolienne est ajustée pour correspondre à la valeur qui maximise la puissance selon la courbe de puissance.

5. Boucle de Rétroaction :

- Le processus est répété en continu, ajustant la vitesse de rotation en réponse aux variations de la vitesse du vent pour maintenir l'opération au point de puissance maximale.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit et discuté la simulation de la machine à réluctance variable en mode générateur associée à une turbine éolienne. Plusieurs simulations ont été faites pour étudier le comportement de la GRV. Nous avons examiné comment la variation de la vitesse affecte le courant statorique : une diminution de la vitesse augmente le courant.

Enfin, nous avons découvert un avantage important de la GRV : elle permet de produire de l'énergie électrique à partir du vent sans nécessiter des vitesses de vent élevées, contrairement à d'autres systèmes.

Conclusion Générale

La Machine à Réductance Variable (MRV) est appréciée pour sa simplicité, sa robustesse et son faible coût, tout en offrant de bonnes performances. Avec la montée des énergies renouvelables, la MRV pourrait remplacer les machines traditionnelles grâce à son efficacité à basse vitesse de vent en éolien, ce qui justifie notre intérêt pour ce sujet. L'objectif principal de ce mémoire est de modéliser et simuler une Génératrice à Réductance Variable (GRV) 6/4 à double saillance avec son convertisseur, en utilisant MATLAB/SIMULINK. Ensuite, nous prévoyons d'adapter ce système générateur à une turbine éolienne. Ces développements sont présentés dans le troisième et dernier chapitre.

Ainsi, dans le premier chapitre, on a présenté l'état de l'art et les différents types d'éoliennes existant. On a également présenté les composants de la chaîne de conversion éolienne et principe de fonctionnement. Enfin, on a présenté les différents types de machine électrique employé dans l'éolienne.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté l'étude de la machine à Réductance Variable et déterminé les paramètres géométriques du prototype de MRV par la méthode des éléments finis sous environnement FEMM et les différentes caractéristiques électromagnétiques.

Dans le troisième chapitre, Nous avons présenté les résultats de la simulation obtenue sous Matlab/Simulink.

- Simulations de la GRV
- Simulations de la turbine
- Simulations de la GRV en association avec la turbine

Ainsi que la citation de quelques méthodes d'optimisation appliquée a une chaîne éolienne pour l'obtention du maximum de la puissance générée.

Comme perspectives, on peut attaquer :

- Simulation des méthodes MPPT
- Le filtrage
- Intégration au réseau

Bibliographie

- [1] Archer, C. L., & Jacobson, M. Z. (2005). "Evaluation of global wind power". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- [2] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L, "Wind energy explained: Theory, design and application". John Wiley & Sons, (2009).
- [3] Kaldellis, J. K. (2013). "Renewable energy systems: A smart energy systems approach to the choice and modeling of 100% renewable solutions". Academic Press.
- [4] Lu, X., & McElroy, M. B, "Global potential for wind-generated electricity". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, (2009).
- [5] Boyle, G. "Renewable energy: Power for a sustainable future". Oxford University Press (2012).
- [6] Jacobson, M. Z., & Archer, C. L. "Saturation wind power potential and its implications for wind energy". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* (2012).
- [7] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). "Solar engineering of thermal processes". John Wiley & Sons.
- [8] REN21. (2020). "Renewables 2020 Global Status Report". Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
- [9] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001). "Wind Energy Handbook". John Wiley & Sons.
- [10] Elliott, D. L. (1987). "Wind energy potential in the United States". Solar Energy Research Institute.
- [11] Sorensen, B. (2011). "Renewable energy: Physics, engineering, environmental impacts, economics & planning". Academic Press.
- [12] Jacobson, M. Z., & Archer, C. L. (2012). "Saturation wind power potential and its implications for wind energy". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*.
- [13] Sørensen, J. N. (2011). "Fundamentals of Wind Energy". CRC Press.

- [14] Hansen, M. O. L., & Sørensen, J. D. (2007). "Aerodynamics of Wind Turbines". Routledge.
- [15] Schlipf, D., & Kühn, M. (2016). "Lidar Measurements for Wind Energy Applications: Present and Future". Journal of Physics: Conference Series.
- [16] Milligan, M. (2011). "Wind energy and its integration into the power system". John Wiley & Sons.
- [17] Motta, M., Weisser, D., & Heath, M. (2012). "Modelling and Control of Wind Turbines: A Survey". IEEE Transactions on Control Systems Technology.
- [18] Peter Jamieson, "Innovation in Wind Turbine Design" (2011).
- [19] Olimpo Anaya-Lara et al., "Wind Energy Generation: Modelling and Control" (2009).
- [20] Global Wind Energy Council, "Global Wind Report Annual Market Update" (2020).
- [21] Archer & Jacobson, "Spatial and Temporal Distributions of U.S. Winds and Wind Power at 80 m Derived From Measurements" (2007)
- [22] Smith, J. "Wind Power Integration and Power System Impact" (2019)
- [23] Jacobson, M. Z. "Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security" (2009).
- [24] Wiser, R. et al. "The environmental and socioeconomic benefits of wind power" (2007).
- [25] Holttinen, H. et al. "Integration of wind power into power systems" (2006).
- [26] Lund, H. "Large-scale integration of optimal combinations of PV, wind and wave power into the electricity supply" (2006).
- [27] K. FERKOUS " etude d'une chaine de conversion d'énergie eolienne" (2009)
- [28] T. Douadi « Etude et commande d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone », thèse de magistère de l'université de EL Hadj Lakhdar –Batna, option maitrise d'énergie
- [29] I.Meghlaoui, « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal », Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2009.
- [30] Frédéric POITIERS, Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003

- [31] Redjem Radia « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », thèse de magister, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, (2009).
- [32] M.AZIZ, A.MCHELFEKH, "Modélisation et Simulation d'une Chaîne de Conversion Eolienne", thèse de Master, Université ZIANE ACHOUR DE DJELFA, 2019.
- [33] R. BAÏLE « Analyse et modélisation multi fractales de vitesses de vent application à la prévision de la ressource éolienne », 2010.
- [34] T.Benamimour, "Dimensionnement, Modélisation et Optimisation de Machines à Réductance Variable : Applications en Moteur/Générateur.", thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri de Constantine, 2018.
- [35] C. Sage, "La variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne, "REE, No.7, pp.42-48, Juillet1998.
- [36] D. Aouzellag, K. Ghedamsi, E.M. Berkouk, "Network power flux control of a wind generator," Renewable Energy, Vol. 34, pp. 615-622, 2009.
- [37] S. El Aimani, Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension," Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, Université, 2004
- [38] F.Boumaraf, "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", thèse de doctorat, université de Batna, 24/06/2014.
- [39] A.Parviainen, A.Piispanen,"Axial Flux Induction Electrical Machine", World Wilde Patent, 2008.
- [40] V.Courtecuisse "Supervision d'une centrale multi source à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique.", Thèse Doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers. Spécialité : Génie Electrique. 20 Novembre 2008.
- [41] L.Hammoum, "CONTRIBUTION A L'ÉVALUATION DES PERTES FER DANS UN MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE", thèse de master, Université Mouloud MAMMERIE de Tizi-Ouzou,(2017).
- [42] O. C. Zienkiewicz , « The Finite Elements Method », Mc Graw-Hill, 3è Ed., 1977.
- [43] M.V.K. Chari and P.P. Silvester , « Finite elements for electrical and magnetic fields problems » , Chichester : John Wiley , 1981.

- [44] S.MOUELLEF, "Contribution A L'étude D'une Machine A Reluctance Variable : Conception, Modélisation & Simulation D'une MRVDS 6-4.", thèse de magister, Université MENTOURI de CONSTANTINE, 2008.
- [45] M. Geoffroy, B. Multon, E. Hoang, R. Neji, « Couplage De Méthode Pour Le Calcul Rapide Des Caractéristiques Electromagnétiques Des MRVDS », Colloque « Méthodes informatiques de la conception industrielle », ESIM, Marseille, 18 Juin 1993.
- [46] F.MESSAI, "Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réductance Variable.", thèse de magister, Université des Frères Mentouri de Constantine, 2009.
- [47] A. Soctedjo , A. Lomi , W.P.Mulayanto , " Modeling of Wind Energy System With MPPT Control", ICEEI,17-19 July 2011,Bandung,Indonesia .

ملخص

يتناول العمل المقدم في هذه الأطروحة نمذجة ومحاكاة سلسلة تحويل طاقة الرياح. التوربينات الريحية هي جهاز يحول بعض الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة ميكانيكية متوفرة على عمود نقل الحركة ثم إلى طاقة كهربائية من خلال مولد. توربينات الرياح هي أنظمة كهروميكانيكية معقدة تعمل غالبًا في ظل ظروف بيئية وتشغيلية سريعة التغير. الهدف من هذا العمل هو تصميم ومحاكاة توربينات الرياح تحت ماتلاب.

كلمات البحث: توربينات الرياح ، النمذجة ، مولد .

Abstract

The work presented in this thesis deals with modeling and simulation of a wind energy conversion chain. The wind turbine is a device that transforms some of the kinetic energy of the wind into mechanical energy available on a transmission shaft and then into electrical energy through a generator. Wind turbines are complex electromechanical systems that often operate under rapidly changing environmental and operating conditions. The objective of this work is to model and simulate a wind turbine under Matlab.

Keywords: Wind Turbine, modeling, generator.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire traite une modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne. La turbine éolienne est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Les turbines éoliennes sont des systèmes électromécaniques complexes qui fonctionnent souvent sous l'évolution rapide de l'environnement et des conditions d'exploitation variables. L'objectif de ce travail est de modéliser et simuler une turbine éolienne sous Matlab.

Mots clés : Turbine éolienne, modélisation, générateur.