

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la technologie

Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Commande Électriques

Thème

**COMMANDE DE LA GÉNÉRATRICE À
RÉLUCTANCE VARIABLE POUR L'UTILISATION
DANS LA PRODUCTION DE L'ÉNERGIE
ÉOLIENNE**

Dirigé par:

Mr. SERHOUD Hicham

Réalisé par:

HAMIDA Issam

ZEKKOUR MOHAMMED Salem

2014/2015

Remerciement

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le Tout
Puissant, Pour toute la puissance qu'il nous a donné
pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous exprimons notre plus vif remerciement à
notre encadreur M. SERHOUD HICHAM
qui nous a aimablement orienté et assidûment dirigé
notre travail.*

Nos familles respectueuses à leur soutien.

*Et enfin nous remercions l'ensemble, des
enseignants et collègues de notre promotion, qui nous
ont aidés à réaliser ce modeste travail.*

Dédicace

Mes chers parents ; Qui ont œuvré pour ma réussite, de par leurs soutien, tous les sacrifices consentis et leurs précieux conseils, pour toute leurs assistance et leurs présence dans ma vie, recevez à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutient permanent.

Mes frères et mes sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

Je vous remercie d'avoir accepté mes dédicaces.

ملخص :

الهدف من هذا العمل هي دراسة إنتاج الطاقة بواسطة الرياح على أساس المولدة ذات المقاومة المغناطيسية المتغيرة التي تغذي الشبكة الكهربائية من خلال سلسلة كاملة من المحولات الثابتة.

قمنا بنمذجة توربينات الرياح مع ذكر مكوناتها ومبادئ عملها. ثم قدمنا النتائج التي تحدد أداء المولدة ذات المقاومة المغناطيسية.

قدمنا النتائج التي تحدد أداء المولدة ذات المقاومة المغناطيسية المتغيرة مع نظام الاثارة الذاتية مع حمولات مختلفة.

ثم قمنا بتوصيل المولدة ذات المقاومة المغناطيسية المتغيرة بالتوربين. لإتمام الحلقة، قمنا بربط المولدة المتغيرة بشبكة كهربائية سلبية (حمولة ثلاثية الطور)

مبدأ MPPT تتبع النقطة القصوة لقوة لطاقة التربين يستند على تغيير سرعة التوربين بتعقب الرياح لزيادة إنتاج الكهرباء. نتائج المحاكات من خلال ماتلاب-سيميلينك أكدت في نهاية المذكرة على تناسب جيد لمخطط التحكم واختيار معايير الضبط وأيضاً ايجابية بنية سلسلة التحويل إلى الأهداف المعينة.

الكلمات المفتاحية

ماكنة ذات مقاومة مغناطيسية متغيرة

المرشح/المحولات الكهربائية

توربينات الرياح

اثارة ذاتية

Résumé

L'objet de ce travail concerne la production de l'énergie éolienne à base d'une Génératrice à reluctance variable (GRV) débitant dans le réseau de puissance à travers une chaîne complète de convertisseurs statiques.

Nous avons modélisé une turbine éolienne avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement. Ensuite, nous avons présenté les résultats qui déterminent la performance de la MRV.

Nous avons présenté les résultats qui déterminent la performance de la GRV avec un système auto excité pour différente charge.

Nous avons obtenu une association de la GRV avec la turbine. Afin de compléter la boucle Nous avons relié la GRV avec un réseau passif (charge triphasée).

Le principe MPPT repose sur la variation de vitesse de la turbine suivant celle du vent afin de maximiser la production de l'électricité. Les simulations sur Matlab-Simulink, présentées en fin mémoire, confirment une bonne adéquation du schéma de commande, du choix des paramètres de réglage ainsi que l'architecture de la chaîne de conversion aux objectifs assignés.

Mots clés

- Génératrice à Reluctance Variable (GRV)
- Convertisseur statique
- Turbine éolienne
- Auto-excité

Sommaire

Remerciements	I
Dédicace	II
Résumé.....	II
Sommaire.....	V
Liste des figures.....	VIII
Notations et symboles.....	XI
Introduction générale.....	1
Chapitre I: Conversion de l'énergie éolienne	
I.1 Introduction	3
I.2 Direction et vitesse du vent.....	3
I.3 Définition de l'énergie éolienne.....	4
I.4 Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	5
I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	6
I.5.1 Avantage.....	6
I.5.2 Inconvénients.....	7
I.6 Types des turbines éoliennes	8
I.6.1 Eolienne à axe vertical	8
I.6.1.1 Avantages.....	9
I.6.1.2 Inconvénient.....	9
I.6.2 Eoliennes à axe horizontal	9
I.6.2.1 Avantage.....	10
I.6.2.2 Inconvénient	10
I.7 Régulation de la Puissance Mécanique d'une Eolienne.....	10
I.8 Evaluation de l'Energie Eolienne en Algérie.....	11
I.9 Constitution d'une éolienne moderne	12
I.10 Modélisation de la Turbine Eolienne.....	15
I.10.1 La puissance d'une éolienne.....	15
I.10.2 La puissance aérodynamique.....	16
I.10.3 Le coefficient de puissance.....	16
I.10.4 Modèle de multiplicateur	18
I.10.5 Équation dynamique de l'arbre.....	18
I.11 Schéma bloc du modèle de la turbine.....	19
I.12 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	19
I.13 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse.....	20
I.14 Conception du correcteur de vitesse.....	21
I.15 Régulation de la vitesse de variation de l'angle d'orientation.....	22
I.16 Conclusion.....	23

II : Étude et commande de la machine à réluctance variable

II.1	Introduction	24
II.2	Constitution du moteur à réluctance variable	24
II.3	Différentes types de MRV	24
II.3.a	La MRV pure	25
II.3.b	MRV vernier:.....	27
II.3.c	MRV hybrids.....	27
II.4	Conversion d'énergie.....	29
II.5	Principe de base.....	30
II.6	Les applications des MRV.....	32
II.7	Commande de la MRV	34
II.8	Hypothèses simplificatrices	34
II.9	Modélisation de la MRV	35
II.9.a	Les équations électromagnétiques.....	35
II.9.b	Production du couple.....	35
II.9.c	Modèle Linéaire de la MRV.....	36
II.10	Commande en tension.....	39
II.10.1	Bloc de simulation.....	41
II.10.2	Résultat de simulation.....	41
II.11	Commande par hystérésis.....	44
II.11.1	schéma synoptique.....	44
II.11.2	stratégie de la commande par hystérésis	45
II.12	commande de la vitesse par régulateur à action proportionnelle et intégrale PI.....	48
II.12.1	Résultats de simulation.....	50
II.13	Conclusion.....	53

III: Commande d'une GRV auto excitée

III.1	Introduction.....	54
III.2	Eléments du système.....	55
III.3	Modèle de la GRV.....	55
III.4	Alimentation de la GRV.....	55
III.5	Principe de fonctionnement.....	56
III.6	Système auto-excité de la GRV.....	57
III.7	Simulation de la GRV.....	58
III.7.1	Description du modèle élaboré.....	58
III.7.2	Résultats de simulation de la GRV.....	59
III.7.3	Fonctionnement sur charge résistive constante.....	60
III.7.4	Fonctionnement sur bus continu fixée.....	64
III.8	Conclusion.....	67

Chapitre IV : Association de la GRV à une turbine éolienne à vitesse variable

IV.1	Introduction.....	68
IV.2	Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome	68
IV.3	Machines à reluctance variable applications en conversion d'énergie éolienne.....	68
IV.4	Description générale de l'ensemble GRV-turbine éolienne.....	69
IV.4.1	simulation l'ensemble GRV-turbine éolienne.....	70
IV.4.2	Résultats de simulation.....	70
IV.5	GRV connecté à une charge triphasée.....	74

IV.5.1 Modélisation et commande de l'onduleur de tension.....	75
IV.5.1.1 Modélisation de l'onduleur.....	75
IV.5.1.2 Commande de l'onduleur.....	77
IV.5.1.3 Modélisation de filtre LC.....	78
IV.6. Simulation de l'ensemble GRV – Onduleur – Filtre – Charge triphasé.....	81
IV.6.1 Validation du Modèle.....	81
IV.7 Conclusion.....	87
Conclusion générale	88
Perspectives	90
Bibliographie.....	91
Annexe	

Liste de figure

Chapitre I: Conversion de l'énergie éolienne	
Figure (I.1) : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	5
Figure (I.2) technologie éolienne à axe vertical.....	8
Figure (I.3) technologie éolienne à axe horizontale.....	9
Figure (I.4) Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.....	11
Figure (I.5) Atlas de la vitesse moyenne du vent (en m/s) de l'Algérie estimée à 10 m du sol.....	12
Figure (I.6) différentes parties de l'éolienne NORDEX- N60 -1.3MW.....	13
Figure (I.7) Schéma d'une éolienne Enercon à entraînement direct.....	14
Figure (I.8) Schéma d'une turbine éolienne	15
Figure (I.9) Évolution du coefficient de puissance de l'éolienne.....	17
Figure (I.10) Puissance disponible d'une éolienne donnée.....	17
Figure (I.11) Schéma bloc du modèle de la turbine.....	19
Figure (I.12) Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.....	20
Figure (I.13) Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse	22
Figure (I.14) modèle du système de régulation de l'angle de calage	23
Chapitre II : Étude et commande de la machine à réluctance variable	
Figure (II.1) machine à réluctance variable Pures 6/4.....	25
Figure (II.2.a) MRV à 2 dents par phase.....	26
Figure (II.2.b) MRV à plus de 2 dents par phase.....	26
Figure (II.3) MRV à pôles statoriques dentés	27
Figure (II.4) Utilisation d'aimant dans les machines à double saillance.....	28
Figure (II.5) MRV à plots à aimant.....	28
Figure (II.6) MRV à hybride à effet vernier.....	28
Figure (II.7) Energie (W_{em}) et coénergie (W'_{em}).....	29
Figure (II.8) Structure MRV de base et positions extrêmes du rotor.....	30
Figure (II.9) Variation de l'inductance en fonction de la position du rotor.....	31
Figure (II.10.a) Structure électromagnétique d'une MRVDS 6/4 triphasée.....	31
Figure (II.10.b) Positions d'opposition et de conjonction d'une MRVDS 6/4...	32
Figure (II.11) : MRV utilisée dans le train à grande vitesse pour la climatisation de l'air cycle.....	33
Figure (II.12) : MRV fonctionnement dans les environnements extrêmes.....	34
Figure (II.13) Inductance en fonction de la position.....	37
Figure (II.14) L'angle δ correspond au déplacement d'une phase par rapport à une autre.....	37
Figure(II.15) Diagramme de simulation de MRV.....	38
Figure (II.16) Diagramme de simulation de MRV par phase (modèle linéaire)	39
Figure (II.17) Convertisseur H–pont.....	40
Figure (II.18) Diagramme de simulation de MRV par phase (modèle linéaire)	41
Figure (II.19. a) vitesse. b) tension. c) courant. d) FEM e) couple. f) Inductance. g) flux. (De la phase).....	43
Figure II.20. a) Courant. b) FEM.....	44
Figure (II.21) Schéma synoptique du circuit de commande proposé.....	45

Figure II.22 a) vitesse. b) tension. c) Courant. d) Couple par phase. e) inductance. f) flux. g) couplé électromagnétique totale.....	48
Figure (II.23) Boucle de régulation de vitesse.....	49
Figure (II.24) commande de la vitesse de la MRV.....	50
Figure (II.25) Régulation de vitesse de la MRV par régulateur PI (Démarrage à vide avec application de la charge)	53
Chapitre III: Commande d'une GRV auto excitée	
Figure (III.1) Convertisseur triphasé en demi-pont asymétrique.....	55
Figure (III.2) Phases de magnétisation de la GRV.....	56
Figure(III.3) principes de régulation de la tension du bus continu de GRV ...	58
Figure(III.4) La position de la tension par rapport à l'inductance.....	59
Figure(III.5) Schémas blocs globale de simulation.....	59
Figure(III.6) La tension du bus continu.....	60
Figure(III.7) La tension de la phase A.....	60
Figure(III.8) L'inductance de la phase A.....	61
Figure(III.9) Le courant de la phase A	62
Figure(III.10) Le flux de la phase A.....	62
Figure(III.11) Le flux de la phase A.....	63
Figure(III.12) Le couple électromagnétique de la GRV.....	63
Figure(III.13) La vitesse de la GRV.....	63
Figure(III.14) La tension de la buse continue.....	64
Figure(III.15) La tension de la phase A.....	65
Figure(III.16) Le courant de la phase A.....	65
Figure(III.17) Le flux de la phase A.....	66
Figure(III.18) La vitesse de la GRV.....	66
Chapitre IV : Association de la GRV à une turbine éolienne à vitesse variable	
Figure(IV.1) Association d'une GRV et d'une turbine éolienne avec une charge résistive.....	69
Figure. IV.2 Modèle de simulation de l'association GRV-Turbine éolienne.....	70
Figure. IV.3 La vitesse de vent (m/s).....	70
Figure. IV.4 La vitesse de la GRV.....	71
Figure. IV.5 La tension du bus continu.....	71
Figure. IV.6 coefficient de puissance	72
Figure. IV.7 Vitesse spécifique de la turbine	72
Figure. IV.8 La tension de la phase A.....	73
Figure. IV.9 Le courant de la phase A.....	73
Figure.IV.10 Zoom d'une portion de la courbe de la Fig.IV.13.....	74
Figure.IV.11 Le couple électromagnétique.....	74
Figure.IV.12: Modèle d'un générateur éolienne connecté au réseau à travers un onduleur de tension.....	75
Figure IV.13 Représentation d'un onduleur de tension à deux niveaux.....	75
Figure IV.14 Représentation de l'onde modulante et l'onde porteuse.....	77
Figure IV.15 : Schéma du filtre LC triphasé.....	78
Figure (IV.16) : Schéma de l'impédance de la charge.....	80
Figure IV.17 Schéma block de simulation de l'ensemble.....	81
Figure. IV.18 La vitesse de vent.....	81
Figure. IV.19 La vitesse de la GRV.....	82
Figure. IV.20 La tension du bus continue.....	82
Figure. IV.21 Le coefficient de puissance.....	83

Figure. IV.22 Vitesse spécifique de la turbine	83
Figure. IV.23 La tension de la phase a de la GRV.....	83
Figure. IV.24 Le courant de la phase a de GRV.....	84
Figure. IV.25 Le couple électromagnétique totale.....	84
Figure. IV.26 Le flux de la phase A.....	84
Figure. IV.27 Les tensions en sorite de l'onduleur.....	85
Figure. IV.28 les tensions en sortie de filtre.....	86
Figure. IV.29 le courant de phase de la charge.....	86

Notations et symboles

C_p	Coefficient de performance
V_{vent}	Vitesse du vent en (m/s).
V_M	Vitesse maximale (m/s).
V_D	Vitesse de démarrage (m/s).
V_N	Vitesse nominale (m/s).
β	Angle d'orientation des pales
V_{aer}	Couple aérodynamique
V_g	Couple issu du multiplicateur
G	Gain du multiplicateur
J_t	Inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice
C_{mes}	Couple mécanique, ce dernier prend en compte le couple
ρ	Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1,25 Kg/m en atmosphère normale).
S	Surface circulaire balayée par la turbine
s, r	Indices stator et rotor, respectivement
N_r	Nombre des pôles rotoriques
N_s	Nombre des pôles statoriques
θ_o	Angle de commutation [°]
θ_{off}	Angle de commutation [°]
θ_e	Angle électrique [°]
θ_m	Angle mécanique [°]
R	Résistance [Ω]
i	Courant instantané [A]
V_s	Tension de la source [V]
I	courant par phase [A]
ψ	Flux [Wb]
ω	Vitesse angulaire [rd/s]
L	Inductance [H]
α_p	Période de la conduction (pas polaire)
μ	Perméabilité magnétique

f	Fréquence [Hz]
p	Puissance [w]
Ω	Pulsation de rotation de rotor [rd/s]
C_e	Couple électromagnétique [Nm]
C_r	Represent le couple de charge
B	Induction magnétique [T]
W	Énergie
\bar{W}	Co-énergie
δ	Angle de déplacement [°]
F	Coefficient de frottement visqueux [SI]où [Nm.s/rd]
J	Moment d'inertie de l'entraînement [Kg.m ²]
MRV	Machine à réluctance variable
PI	Proportionnel Intégral
GRV	Génératrice à réluctance variable
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
F _p	Fréquence de porteuse
F ₀	la Fréquence modulante
V _p	l'Amplitude de porteuse
V ₀	l'Amplitude de référence
L _f	Inductance de filtre
C _f	Condensateur de filtre

Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

La consommation mondiale d'énergie enregistre une croissance considérable. La consommation intensive des énergies fossiles a entraîné une raréfaction des ressources aujourd'hui exploitables, tandis que leur combustion pollue l'air et produit des gaz à effet de serre. L'épuisement de certaines ressources et le souci de préserver l'environnement redirigent le monde vers les énergies renouvelables et favorisent l'utilisation des machines électriques tournantes dans ce domaine.

Les machines électriques sont de divers types. Il est possible de citer les machines électriques classiques comme la machine à courant continu, la machine synchrones et asynchrones mais il y a aussi de nouveaux types des machines spéciales émergent dans l'industrie comme les machines à courant continu sans balais « Brushless DC motor en anglais » (BLDC) et les machines à réluctance variable.

Les machines à réluctance variable constituent une classe particulière des machines électromagnétiques dans lesquelles les forces sont obtenues grâce à la variation de perméance d'un circuit magnétique entouré par des bobinages. Cette variation est obtenue lors du déplacement relatif des deux parties constitutives : le stator et le rotor dans les machines tournantes. Ces variations de perméance sont les sources de variations d'énergie électromagnétique ou encore de variations de réluctance, ou d'inductance (vu du bobinage), d'où le nom de "machines à réluctance variable". Ainsi, le stator ferromagnétique supportera les bobinages, quant au rotor qui ne possède aucun conducteur ni aimant, il aura une denture destinée à faire varier l'inductance du circuit électromagnétique.

La machine à reluctance variable est devenue un candidat important pour différentes applications telles que les automobiles, la production de l'énergie électrique et le domaine de l'aérospatial [1, 2, 3]. Cet intérêt qui s'est éveillé pour la machine à reluctance variable est dû à la robustesse de son rotor, à la simplicité de sa conception et à sa capacité à fonctionner en mode dégradé avec un défaut dans une de ses phases [1]. Par contre, malgré ses inconvénients majeurs comme les ondulations de couple et le bruit acoustique qu'elles produisent. Plusieurs recherches se font actuellement pour réduire ces derniers.

En effet, ce mémoire traite et étudie la performance d'une machine à reluctance variable fonctionnant en génératrice (GRV) dédiée aux énergies renouvelables.

L'objectif de ce mémoire est d'effectuer une étude sur le comportement de la MRV/GRV et leur commande dans de larges plages de conditions de fonctionnement. Notre travail sera présenté en quatre parties comme suit :

- Dans le Chapitre I : nous donnerons un aperçu de l'évolution des systèmes de conversion électromécanique d'énergie associés aux éoliennes. Et nous allons nous intéresser essentiellement à la modélisation de la turbine éolienne avec sa constitution et son principe de fonctionnement.

- Dans le Chapitre II : nous allons donner des généralités sur la MRV en introduisant le principe de fonctionnement et les différents types rencontrés. Nous allons parler aussi sur son alimentation et ses stratégies de commande. Nous allons ainsi étudier la modélisation et simulation de la MRV par le logiciel MATLAB. Les résultats relatifs aux caractéristiques électromagnétiques (couple, flux et inductance) obtenus sont acceptables. Ces résultats qui concernent la simulation de la MRV avec son alimentation et sa commande.

- Dans le Chapitre III : nous allons présenter la machine à reluctance variable fonctionnant en génératrice (GRV) commandé par régulateur à hystérésis avec un système auto-excité, après le travail que nous allons faire, on va montrer les résultats qui déterminent la performance de cette machine avec différent couple d'entraînement et aussi l'importance de l'influence de la variation de la charge sur le courant produit par la machine, dans tous ça en utilisant MATLAB/SIMULINK.

- Dans le chapitre IV : nous allons associer la turbine éolienne avec la GRV. On va exposer les résultats de la simulation. Dans la dernière partie dans ce mémoire on associera l'ensemble turbine-GRV avec un réseau passif (charge triphasé).

En dernier lieu, une conclusion générale sera donnée pour résumer les principaux résultats obtenus et pour définir certaines perspectives quant à une éventuelle continuation de ce travail.

Chapitre 1

Conversion de l'énergie éolienne

Chapitre I: Conversion de l'énergie éolienne

I.1 Introduction :

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables a connu une forte croissance durant ces dernières années. Dans l'avenir, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins. La production décentralisée de l'électricité à partir des sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose à établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter dans les meilleures conditions [5].

I.2 Direction et vitesse du vent :

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents. La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous actions quelques unes au tableau [I-1] [6] .

Degrés Beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (km/h)	Description générale	Pression sur surface plane (daN/m ²)
0	0 à 0.4	1	Clame	
3	3.5 à 5.5	12 à 19	Petite brise	3.2(5m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22 (13 m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20 m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30 m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470 (60 m/s)

Tableau [I-1] Echelles Beaufort

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude.

Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s. [7]

I.3 Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur [8] qui est dans notre cas un générateur à réluctance variable (GRV), (Figure I.1) .

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [9] :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

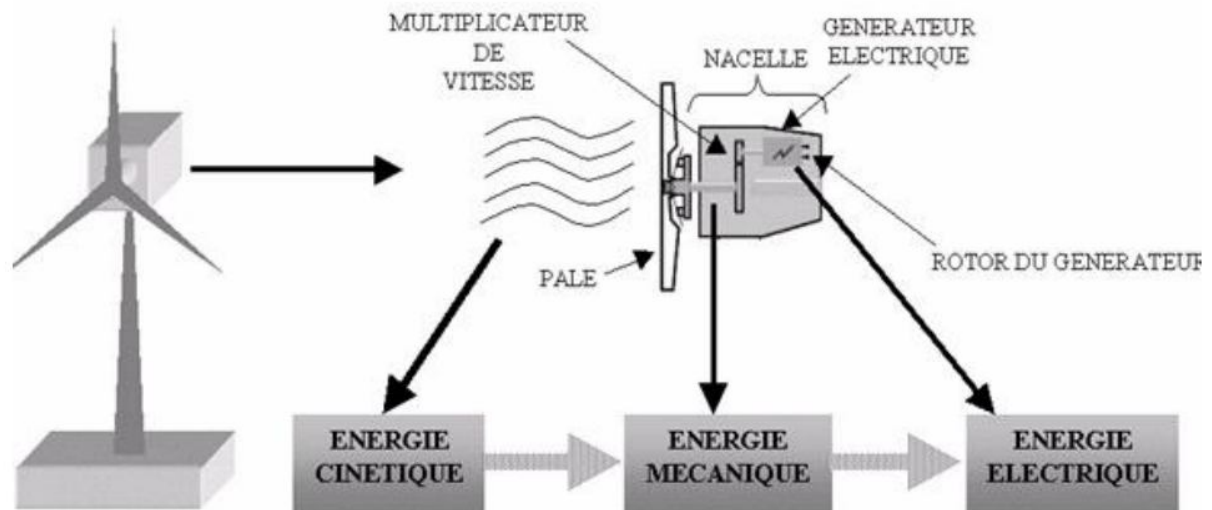


Figure (I.1) : Conversion de l'énergie cinétique du vent. [7].

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). de plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif ; elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes des plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement de turbulences [10].

L'éolienne se compose d'une nacelle, d'un mât, de pales et d'un multiplicateur de vitesse. La fabrication de ces différents éléments est d'une technologie avancée, ce qui les rend par conséquent onéreux.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produit étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également en mer où la présence du vent est plus régulière.

I.4 Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice.[11]

I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

I.5.1 Avantage:

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

- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie, contribuent notamment à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO₂ a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050 [12]. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années [12] . Toutes les conséquences de ce réchauffement n'est pas prévisible, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100 [12] .

« L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO₂ ».

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [12] .
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de Nox [12]. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides [12].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie [12].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [12].

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [12].
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégrable dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [12].
- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables [13].
- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours [13].

I.5.2 Inconvénients :

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif [12].
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée [12].
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs [12] [14]. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines [12].
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes [12].
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques: bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain

de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [12].

I.6 Types des turbines éoliennes :

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel l'hélice est montée, en deux types : les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal [15][16][17].

I.6.1 Eolienne à axe vertical :

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux [18].

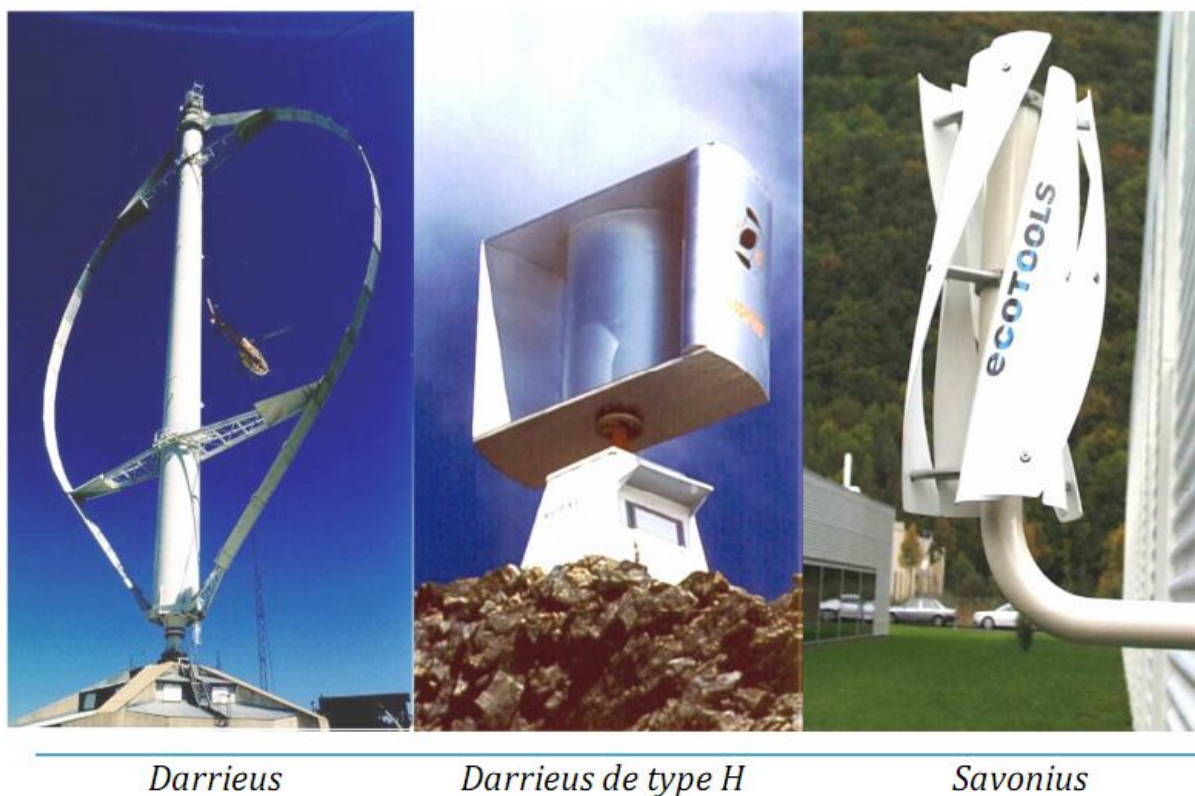


Figure (I.2) technologie éolienne à axe vertical.

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [16][19].

I.6.1.1 Avantages :

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

I.6.1.2 Inconvénient :

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

I.6.2 Eoliennes à axe horizontal :

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [20].

*Moulin américain**voilure bipale**voilure tripale***Figure (I.3)** technologie éolienne à axe horizontale.

I.6.2.1 Avantage :

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour.

Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

I.6.2.2 Inconvénient :

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées.

Elles sont de faible puissance destinée à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [18].

Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à pas variable (variable pitch) [18].

I.7 Régulation de la Puissance Mécanique d'une Eolienne [21] :

Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la puissance.

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale P_n . La puissance P_n est obtenue à partir d'une vitesse du vent v_n , dénommée vitesse nominale. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à v_n la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

A côté de la vitesse nominale V_n , on spécifie aussi :

- la vitesse de démarrage V_D , à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie,
- la vitesse maximale du vent V_M , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Les vitesses V_n , V_D et V_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent Figure (I.4) :

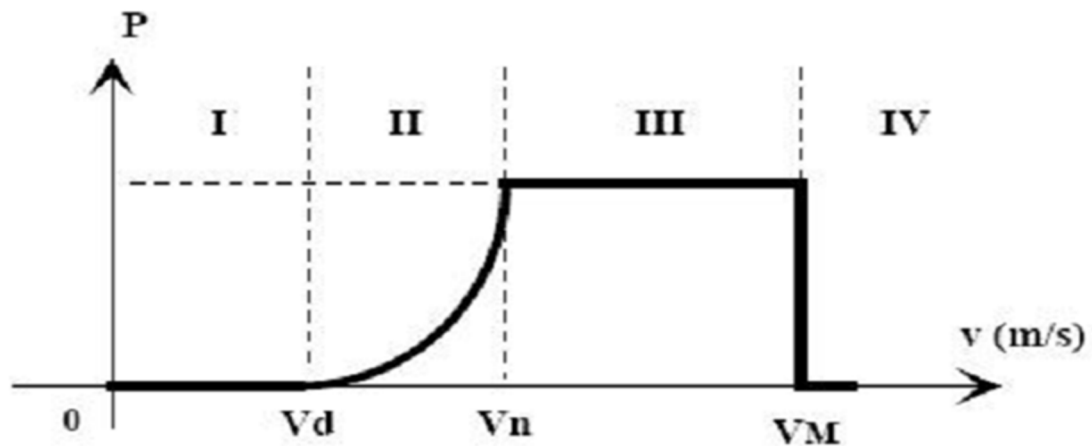


Figure (I.4) Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

- La zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas),
- La zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent v ,
- La zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n ,
- La zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

I.8 Evaluation de l'Énergie Éolienne en Algérie :

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en Figure (I.5). Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque qu'à l'exception de la région côtière (moins Béjaïa et Oran), du Tassili et de Beni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s, [20].

En fait, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s. Cependant, nous pouvons observer l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran [21].

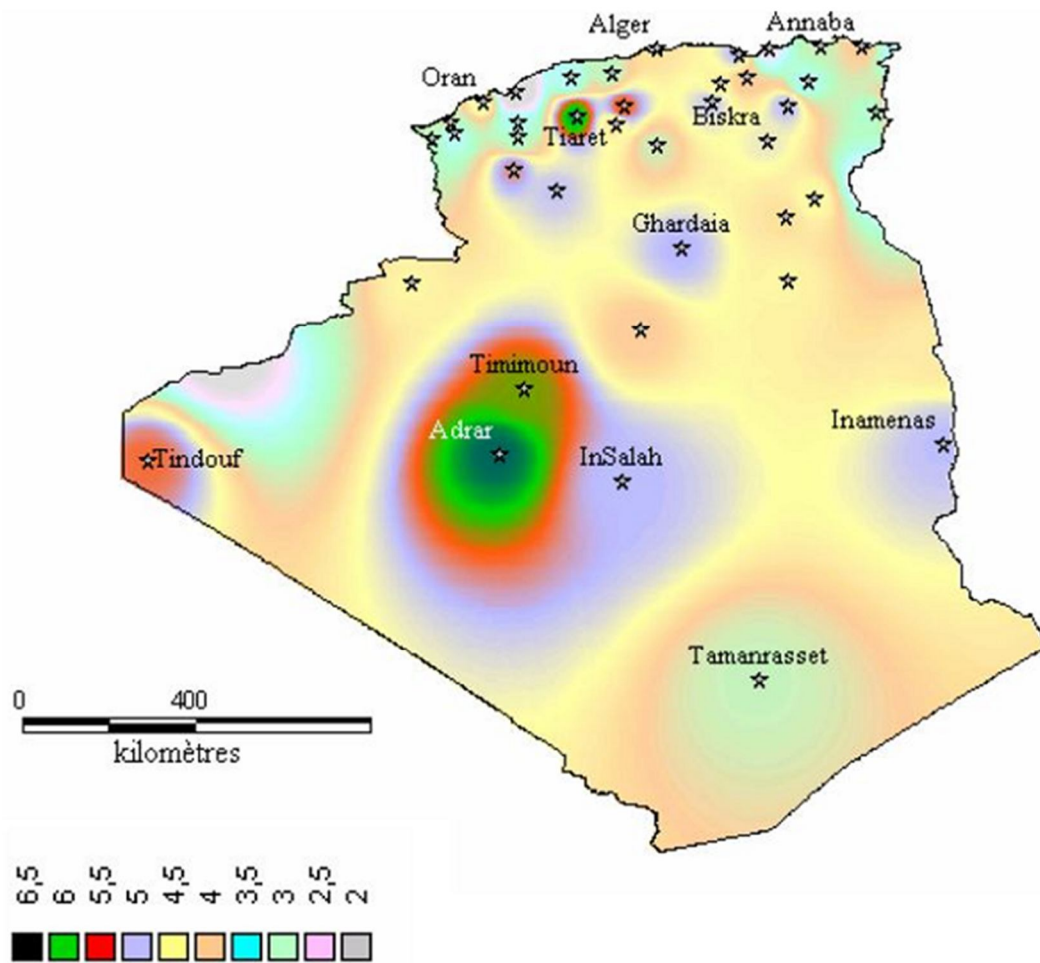


Figure (I.5) Atlas de la vitesse moyenne du vent (en m/s) de l'Algérie estimée à 10 m du sol [23]

I.9 Constitution d'une éolienne moderne :

La Figure (I.6) représente une chaîne électromécanique à multiplicateur de vitesse d'une éolienne moderne tripale à axe horizontal de type Nordex N60 (1.3MW) [24] .

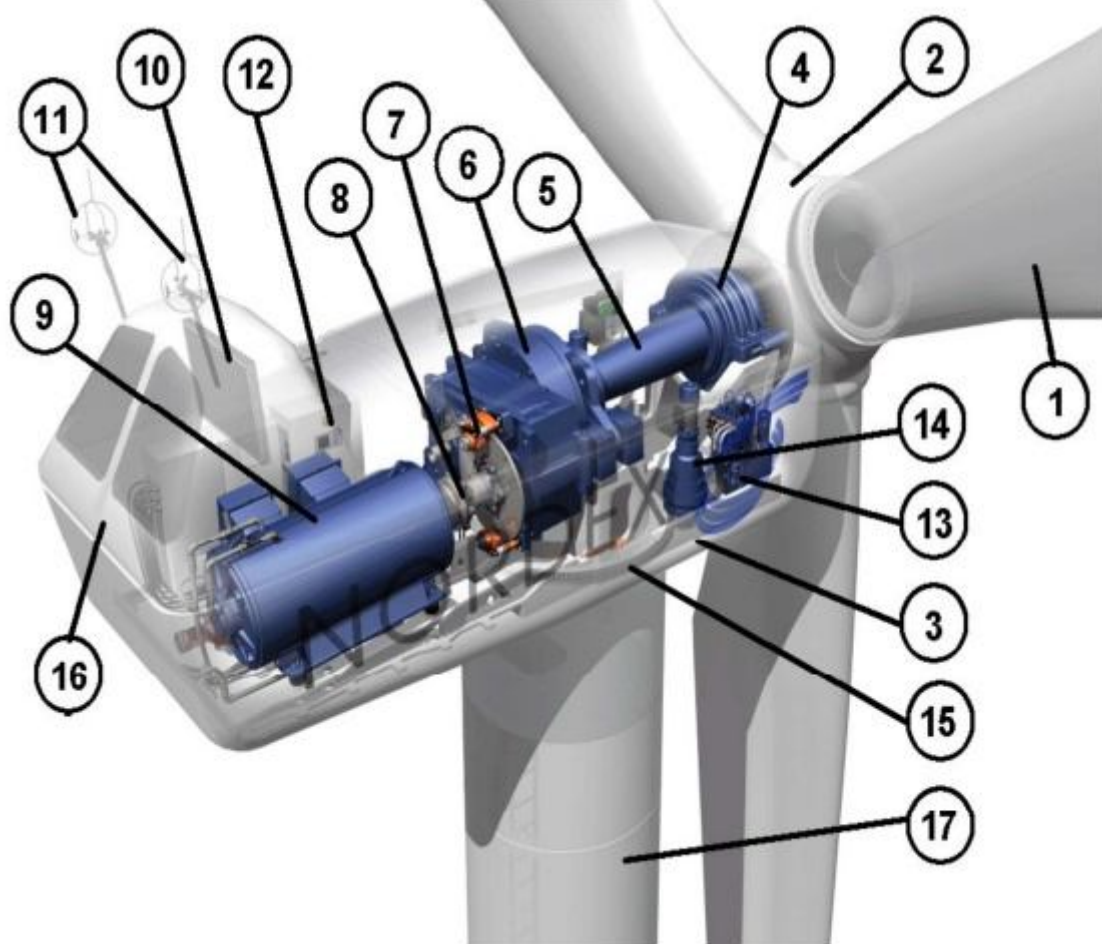


Figure (I.6) différentes parties de l'éolienne NORDEX- N60 -1.3MW

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

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

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

Mais les multiplicateurs mécaniques ont leurs inconvénients, ils nécessitent une maintenance accrue et nuisent à la fiabilité surtout dans les grandes puissances. C'est la raison pour laquelle la tendance est à l'entraînement direct. La génératrice est alors une machine synchrone (rotor bobiné ou aimants) à très grand nombre de pôles et donc à fort couple massique [25].

Le fabricant allemand Enercon propose ainsi toute une gamme de telles machines de 200 kW à 4,5 MW (phase de pré-industrialisation). La Figure (I.7) montre le schéma de la nacelle d'une telle machine. Le diamètre de la nacelle est plus élevé mais sa longueur est plus courte. Ces génératrices, dont la vitesse de rotation et le nombre de pôles rendent impossible une connexion directe au 50 Hz, sont nécessairement alimentées par un convertisseur statique qui offre la possibilité d'un fonctionnement à vitesse variable [25].

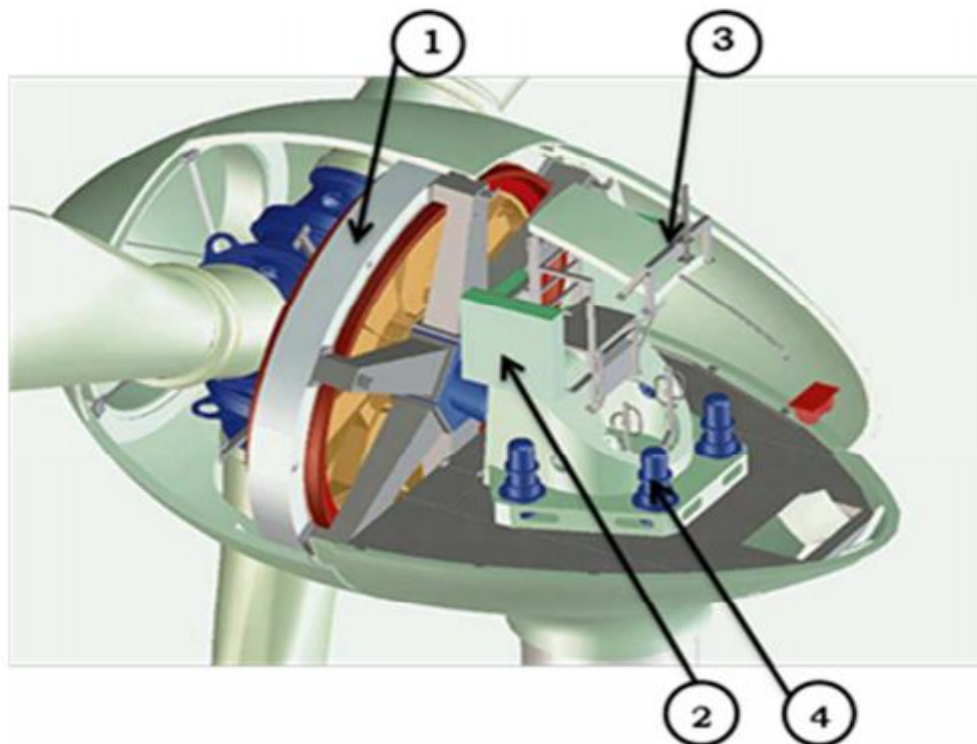


Figure (I.7) Schéma d'une éolienne Enercon à entraînement direct

- 1: Alternateur discoïde
- 2: Convertisseurs électronique
- 3: Système de refroidissement
- 4: Système d'orientation

I.10 Modélisation de la Turbine Eolienne :

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [26].

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant un générateur à travers un multiplicateur de vitesse de gain G , comme le montre la figure (I.8).

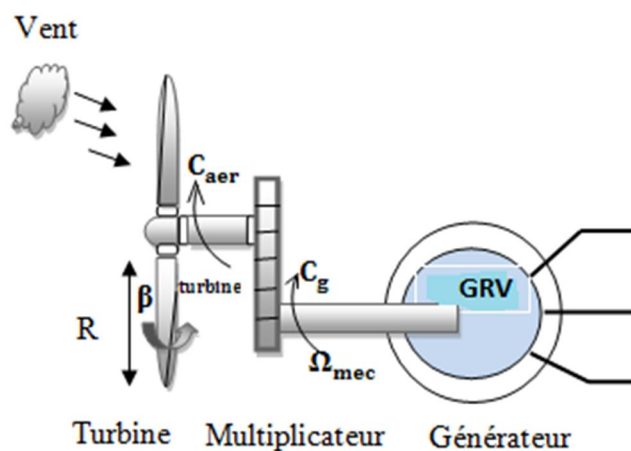


Figure (I.8) Schéma d'une turbine éolienne

I.10.1 La puissance d'une éolienne :

La puissance cinétique du vent à travers une turbine éolienne de rayon R , est donnée par la relation suivante:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \quad (I.1)$$

Avec :

ρ : Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1,25 Kg/m en atmosphère normale).

S : c'est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

R : correspond pratiquement à la longueur de la pale.

V_{vent} : est la vitesse du vent en (m/s).

Nous remarquons que la puissance est directement proportionnelle à la surface balayée par le rotor, mais aussi au cube de la vitesse du vent [27].

I.10.2 La puissance aérodynamique :

Toutefois, toute l'énergie ne peut être captée, car la vitesse du vent n'est pas nulle après la turbine. On introduit alors un coefficient C_p appelé coefficient de performance, qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales. Ce coefficient correspond au rendement du rotor de l'éolienne [32] [33], La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_{aéro} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (I.2)$$

C_p : est le coefficient de performance ou coefficient de puissance.

Avec :

β : est l'angle d'orientation des pales.

Le couple aérodynamique est donné par :

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (I.3)$$

I.10.3 Le coefficient de puissance :

Le C_p représente le rapport de la puissance récupérée sur la puissance récupérable. Ce coefficient présente un maximum de $16/27$ soit $0,59$ [28]. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ .

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure (I.9).

La figure (I.10) présente la puissance disponible d'une éolienne de quelque kilowatt.

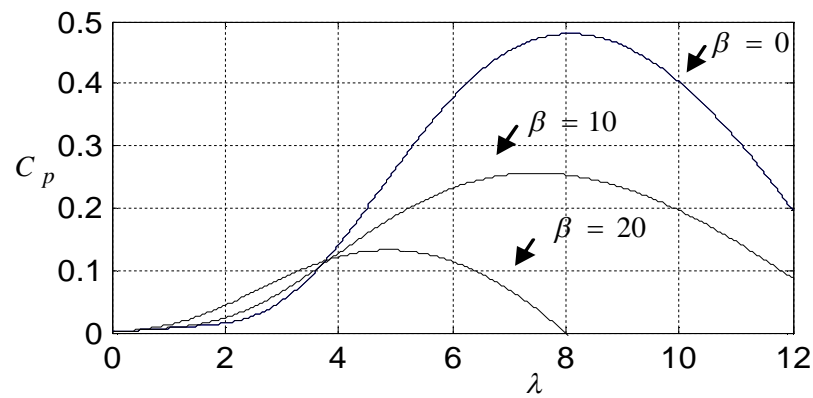


Figure (I.9) Évolution du coefficient de puissance de l'éolienne [1].

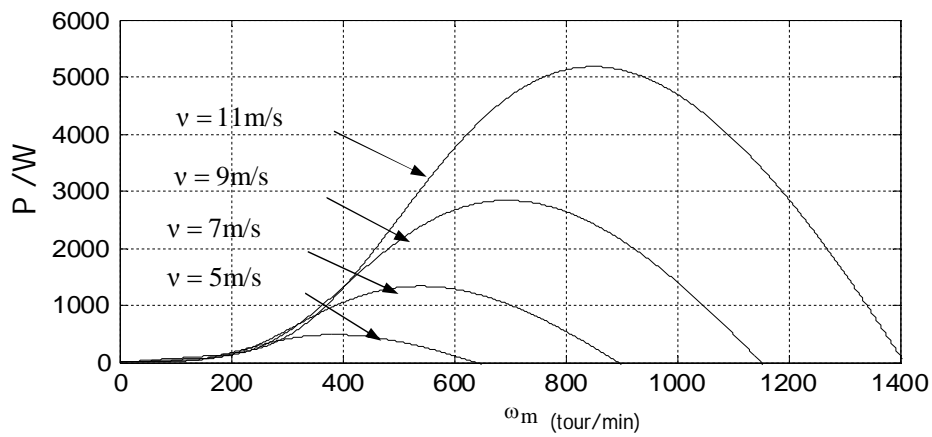


Figure (I.10) Puissance disponible d'une éolienne donnée[1].

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 10KW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4 \beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} - 0.0068 \cdot \lambda \tag{I.4}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^2 + 1}$$

I.10.4 Modèle de multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice, mathématiquement elle est modélisée par les équations suivantes [27] :

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (I.5)$$

Avec :

C_g : Couple issu du multiplicateur.

C_{aer} : Couple aérodynamique.

G : Gain du multiplicateur

Pour la vitesse, on aura : $\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G}$ (I.6)

I.10.5 Équation dynamique de l'arbre :

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit [29] :

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{mes} \quad (I.7)$$

Avec :

J_t : C'est l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice

C_{mec} : c'est le couple mécanique, ce dernier prend en compte le couple électromagnétique produit par la génératrice C_{mes} , le couple de frottement visqueux C_{vis} et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (I.8)$$

Le couple résistant qui résulte des frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{ves} = f\Omega_{mec} \quad (I.9)$$

I.11 Schéma bloc du modèle de la turbine :

La turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplicateur. Ce couple peut être calculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et en couple du multiplicateur.

La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation (Figure I.11).

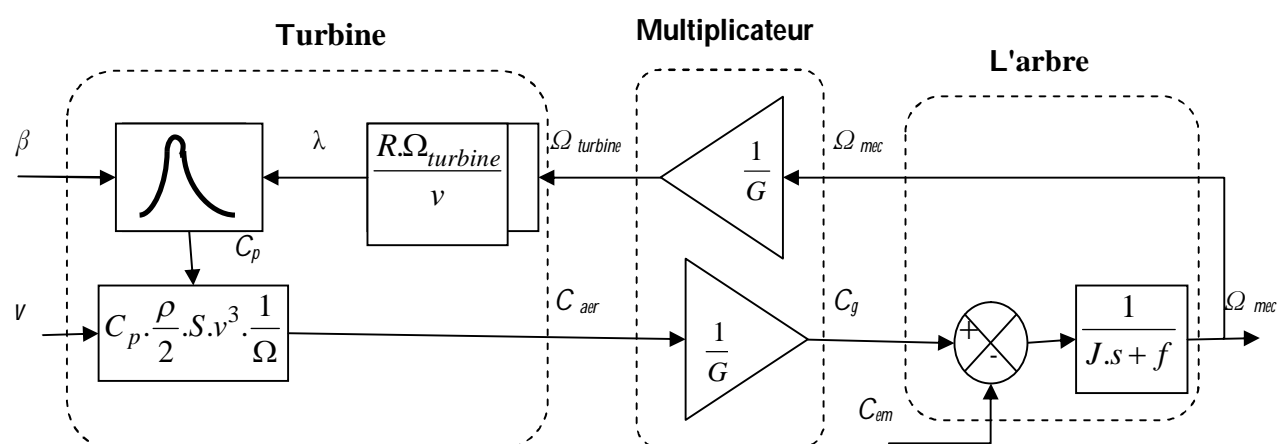


Figure (I.11) Schéma bloc du modèle de la turbine. [30]

I.12 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse:

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui errone la lecture de la vitesse du vent.
- Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 2 m pour une éolienne de 6 KW), une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse.

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation :

$$v_{ref} = \frac{\omega_t R}{\lambda_{opt}} \quad (I.10)$$

La référence de la puissance de la turbine correspond :

$$P_{ref} = \frac{\pi}{2} C_{p-max} R^2 \rho v_r^3 \quad (I.11)$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur λ_{cpmax} qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_p . Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{ref} = P_{ref} / \omega_t \quad (I.12)$$

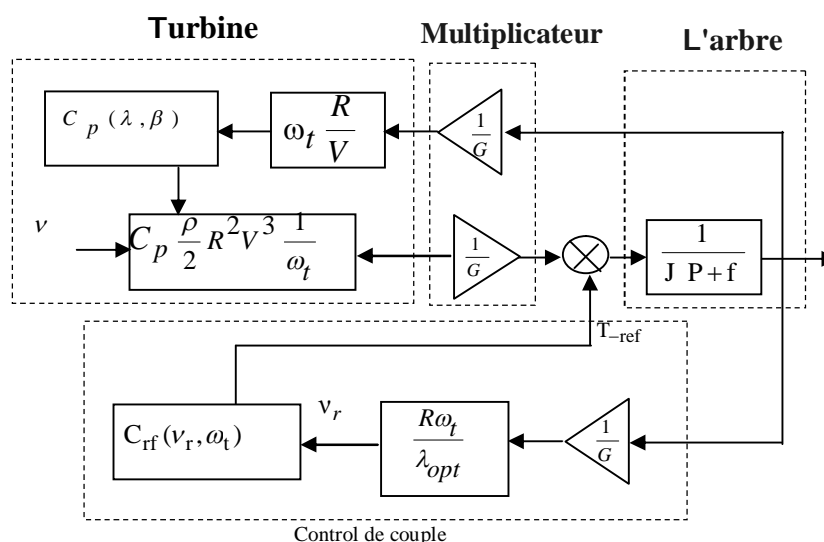


Figure (I.12) Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

I.13 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse :

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Ces fluctuations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.[1]

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (I.12)$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

Comme à été expliqué auparavant, la vitesse est influencée par l'application de trois couples : un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} :

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (C_g - f \cdot \Omega_{mec} - C_{em}) \quad (I.13)$$

La structure de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Le couple électromagnétique de référence C_{em-ref} permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} est obtenu par une relation inverse indirecte :

$$C_{em-ref} = PI \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (I.14)$$

Ou :

- PI est le régulateur de vitesse.
- Ω_{ref} est la vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ($\Omega_{turbine} - \Omega_{ref}$) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{turbine-ref} \quad (I.15)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse $\lambda_{C_{Pmax}}$ (à β constant et égal à 0°) permettant d'obtenir la valeur maximale du C_p

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{C_{Pmax}} \cdot V}{R} \quad (I.16)$$

I.14 Conception du correcteur de vitesse :

L'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches:

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur référence
- Il doit atténuer l'action du couple éolienne qui constitue une entrée perturbatrice

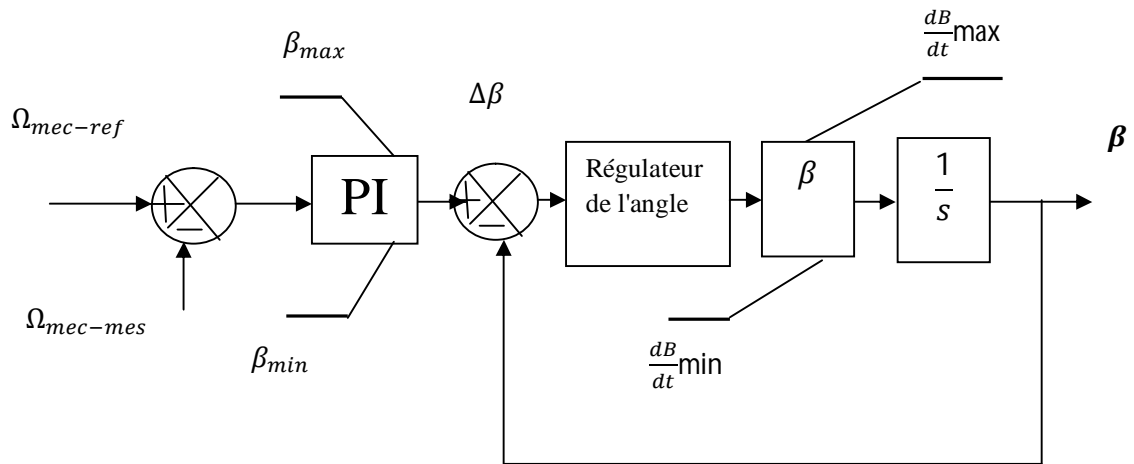


Figure (I.14) modèle du système de régulation de l'angle de calage

I.16 Conclusion :

Ce chapitre représente un état de l'art sur les systèmes de conversion éolien qu'on a essayé de les présenter d'une façon générale les différentes structures existantes: les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal, et leurs avantages et inconvénients les uns par rapport aux autres. Nous avons présenté aussi la modélisation de l'éolienne à axe horizontal. En fin de chapitre on a présenté les méthodes de régulation de la vitesse d'un éolien.

Chapitre 2

Étude et commande de la MRV

Chapitre II : Étude et commande de la machine à réluctance variable

II.1 Introduction :

Le principe des machines à réluctance variable (MRV) est basé sur celui de l'électroaimant. En fait, il s'agit de la plus ancienne méthode de conversion électromécanique. Toute machine à réluctance variable est constituée de deux parties en mouvement relatif dont l'une est électriquement active (stator) et l'autre passive (rotor). La première comprend un circuit magnétique denté muni de bobinages, la seconde est simplement un circuit ferromagnétique, lui aussi denté, mais sans aucun conducteur ni aimant [32] [33].

La machine à réluctance variable à double saillance (MRVDS) dont les phases sont alimentées en courants unidirectionnels par des convertisseurs à demi-ponts asymétriques, constitue certainement la solution la plus économique grâce aux matériaux utilisés (tôles fer-silicium et cuivre) et à sa simplicité de fabrication (empilage de tôles, bobines préfabriquées, rotor passif naturellement équilibré...). Ses performances peuvent être comparables à celles des machines à aimants permanents. Elle peut aussi fonctionner à puissance maximale constante.

Mais elle produit un couple très pulsatoire à haute vitesse et génère un bruit acoustique supérieur à tous ses concurrents [32][34].

II.2 Constitution du moteur à réluctance variable :

- **Rotor** : cylindre en fer doux dans lequel sont taillées des dents (pôles du rotor)
- **Stator** : empilage de tôles découpées, encochées.

Les enroulements en série sont diamétralement opposés afin que les attractions simultanées n'engendrent pas une usure prématurée des paliers du rotor.

N_s = nombre de dents du stator

N_r = nombre de dents du rotor

N_p = nombre de pas par tours

$$N_p = \frac{N_s \cdot N_r}{N_s - N_r} \quad (\text{II.1})$$

II.3 Différentes types de MRV :

Dans ce paragraphe, nous allons présenter une classification des structures des machines à réluctance variable selon la topologie. Ces topologies se divisent en trois groupes, MRV pures, MRV vernier et MRV hybrides.

Nous allons utiliser les symboles suivants pour faciliter la lecture des paragraphes :

q le nombre des phases

β_s	Arc polaire statorique
β_r	Arc polaire rotorique
N_s	Nombre de dents au niveau de l'armature statorique
N_r	Nombre de dents au niveau de l'armature rotorique
p	Nombre de paires de pôles de l'enroulement de l'induit
p'	Nombre de paires de pôles de l'enroulement de l'inducteur

II.3.a La MRV pure :

La machine à réluctance variable "pure" comporte des dents sur le stator et sur le rotor. Seules les bobines statoriques sont alimentées en courant. Le rotor ne contient ni aimants ni enroulements (Figure II.1).

La structure simple du MRV lui donne des grands avantages par rapport aux autres solutions aussi que des inconvénients importants comme les ondulations du couple dues à la double saillance et le caractère fortement non-linéaire des effets électromagnétiques pendant le fonctionnement. À cause de ces effets, la modélisation du moteur et la stratégie de son alimentation-commande sont assez compliquées.



Figure (II.1) machine à réluctance variable Pures 6/4. [35]

Le choix du nombre des dents et des phases doit se faire par rapport à l'application envisagée et aux performances souhaitées. Les critères qui peuvent influencer le choix pour une topologie particulière incluent :

La caractéristique de fonctionnement par le biais de la valeur du couple et sa qualité (ondulations et bruit), les demandes mécaniques lors du démarrage et les performances énergétiques lors du freinage récupératif.

Le type d'alimentation (triphase, monophasé, etc.) et l'onduleur utilisé les chemins de flux magnétique et les pertes de fer produits.

Le nombre des dents statoriques et rotoriques est normalement pair et la liaison entre les deux valeurs est donnée par [36] :

$$N_s = N_r \pm 2$$

Les moteurs avec un nombre plus grand des dents sont obtenus à partir des structures de base, on multipliant N_s et/ou N_r

Une autre particularité est qu'elle n'est pas à champ tournant mais à champ « pulsé ». Les moteurs à réluctance de ce type se satisfont de courants unidirectionnels de forme rectangulaire, ce qui fera la spécificité de leurs alimentations.

On peut citer divers types (Figure II.2) de structures à réluctance pure [37] [38] :

Structures à double denture « simple » (« grosses dents ») et à 2 dents par phase.

Structures à double denture « simple » (« grosses dents ») et à plus de 2 dents par phase.

Structures à pôles statoriques dentés (« petites dents ») où un bobinage excite plusieurs dents à la fois : on parle de « bobinage global ».

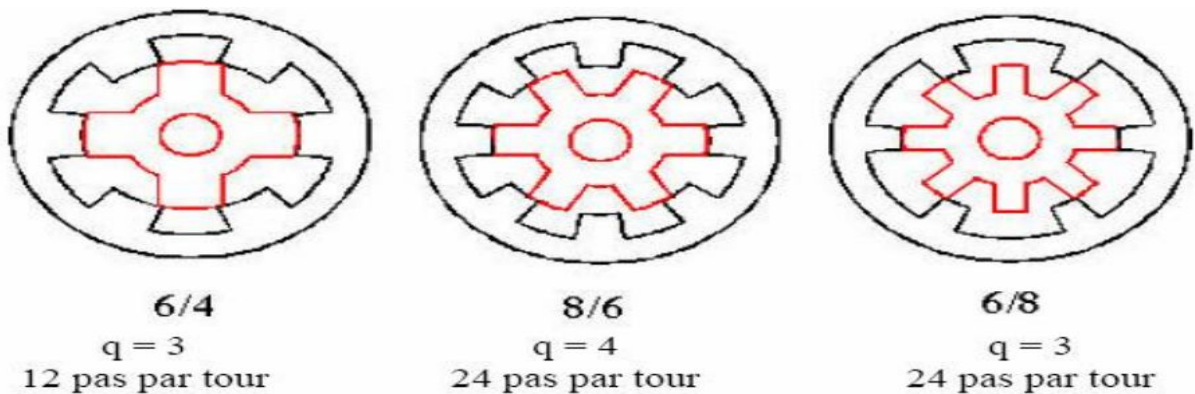


Figure (II.2.a) MRV à 2 dents par phase

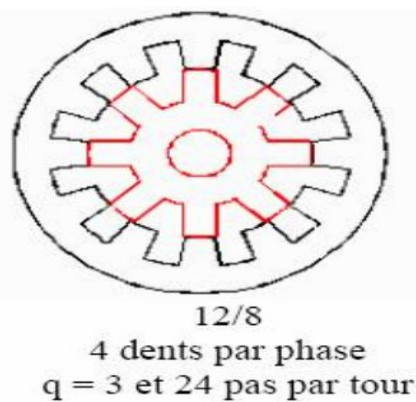


Figure (II.2.b) MRV à plus de 2 dents par phase

Elle se caractérise par un couple massique élevé et une grande simplicité de construction d'où un faible coût et une bonne robustesse [39] Ces atouts lui ont permis de multiples applications : dans l'industrie pour les systèmes de démarreur-alternateur dans les véhicules hybrides ou les avions mais aussi pour les systèmes de génération d'électricité dans l'éolien ou l'aérospatial [40] [41].

II.3.b MRV vernier :

Certaines machines Vernier ont des structures identiques aux MRV pures sauf qu'elles sont alimentées en courant alternatif sinusoïdal et non en créneaux. On distingue les machines dites « Vernier à grand nombre de dents », qui possèdent deux armatures saillantes: sur chaque armature, les dents sont identiques et équiréparties mais les nombres de dents statoriques et rotoriques sont légèrement différents (similaire à celui d'une machine synchrone à rotor lisse), ce qui permet d'obtenir une perméance sinusoïdale (Figure II.3)

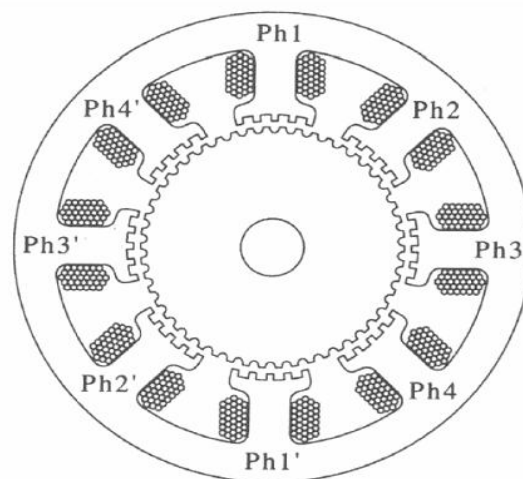


Figure (II.3) MRV à pôles statoriques dentés

On trouve aussi les machines « Vernier à grosses dents » dans lesquelles chaque pôle statorique constitue lui-même la dent. Les nombres de pôles sont alors relativement faibles et les performances couple-vitesse sont comparables à celles des machines asynchrone et synchrone à aimants avec des fréquences d'alimentation voisines [42] .

II.3.c MRV hybrides :

Par rapport aux précédentes structures, la particularité des MRV hybrides réside dans l'intégration d'aimants permanents afin d'améliorer leurs performances [43][44].

L'adjonction d'aimants dans les structures à double saillance permet de compenser un entrefer trop élevé mais on s'éloigne des structures à réluctance pure. Il est cependant intéressant de signaler deux machines à aimants à double saillance dérivées des MRV : l'une met en œuvre des aimants placés au rotor [45] , la machine se rapprochant des machines synchrones à aimants

enterrés (Interior Permanent Magnet); la seconde conserve le rotor passif de la MRV pure et utilise des aimants placés au stator [46]:

On obtient alors une machine à double saillance et aimants permanents statoriques (DSPMM) dite « MRV polarisée » Figure (II.4) [40][47][48] .

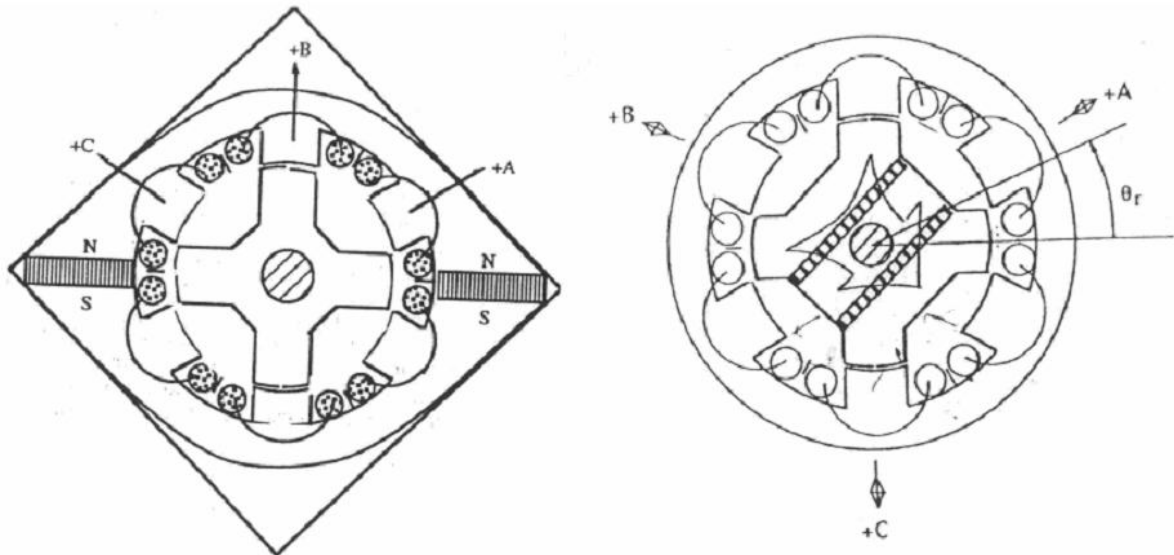


Figure (II.4) Utilisation d'aimant dans les machines à double saillance.

La MRV de la Figure (II.4) met en œuvre des aimants surfaciques et exploite l'effet vernier pour une alimentation sinusoïdale. Le grand nombre de dents de la machine à «plots aimantés». pour les forts couples la MRV à hybride à effet vernier de la figure (II.5) est un très intéressante structure [44][49] .

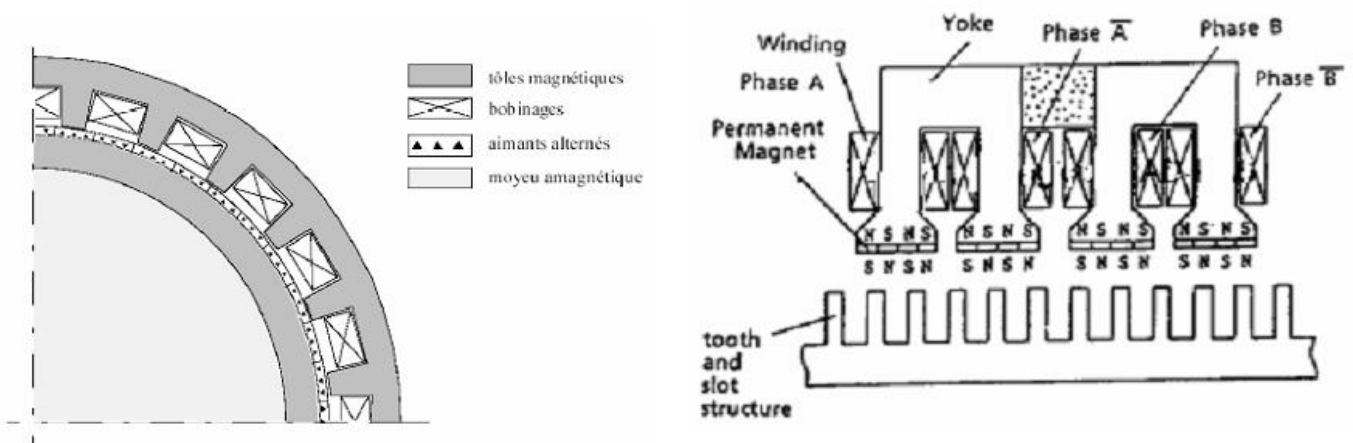


Figure (II.5). MRV à plots à aimant

Figure (II.6). MRV à hybride à effet vernier

II.4 Conversion d'énergie

Dans un système électromagnétique de conversion d'énergie, un changement incrémental de l'énergie appliquée va engendrer un changement de l'énergie dW_{mag} stockée dans le champ magnétique et de l'énergie mécanique dW_{mec} utilisée pour le mouvement. La relation entre les formes d'énergie est tenue de la façon suivante :

a- Notions d'énergie et de coénergie :

Le choix de l'énergie ($W_{em} = \int H \cdot dB = \int i \cdot d\Psi$) ou de la coénergie ($W'_{em} = \int B \cdot dH = \int \Psi \cdot di$). Dépend de la description initiale du système et du résultat désiré ; souvent, le courant (i) étant plus accessible que le flux (Ψ), on choisit alors la coénergie Figure (II.7).

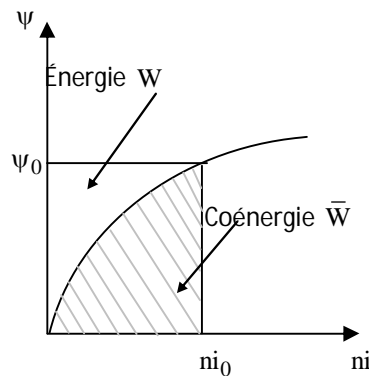


Figure (II.7) Energie (W_{em}) et coénergie (W'_{em}) [38].

b- énergie magnétique :

$$W_{em} = \int i \cdot d\Psi \quad (\text{II.2})$$

$$T_e = - \left(\frac{\partial W_e}{\partial \theta} \right)_{\Psi=cst} \quad (\text{II.3})$$

c- coénergie :

$$W'_{em} = \int \Psi \cdot di \quad (\text{II.4})$$

$$T_e = \left(\frac{\partial W_c}{\partial \theta} \right)_{i=cst} \quad (\text{II.5})$$

En régime linéaire, on montre que le couple s'exprime de la manière suivante :

$$T_e = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta_m} \quad (\text{II.6})$$

Qui indique que le couple ne dépend pas du sens du courant d'où possibilité d'une alimentation en courant unidirectionnel. Par contre, le couple dépend de la dérivée de l'inductance L par rapport à la position du rotor θ , d'où les deux types de fonctionnements moteur et génératrice .

II.5 Principe de base [32][29][38][39] :

Quel que soit le type de machine à réluctance variable étudié (cylindrique, linéaire, Vernier à grosses dents...), le principe de fonctionnement est toujours identique si les couplages magnétiques entre phases sont négligeables. Il peut être décrit à partir de la structure monophasée élémentaire représentée (Figure (II.8)). Il s'agit d'un circuit magnétique simple constitué de deux pièces ferromagnétiques, l'une fixe (stator) comportant un enroulement à N spires parcourues par un courant i et l'autre mobile (rotor) autour d'un axe fixe. Soit θ_m l'angle entre l'axe longitudinal de la pièce mobile et celui inter polaire de la pièce fixe.

Le flux magnétique créé par les ampères-tours (N_i) oscille entre 2 valeurs extrêmes correspondant aux 2 positions [30]:

- une position d'opposition Figure (II.8.a) dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance maximale, ou une inductance minimale ;
- une position de conjonction Figure (II.8.b) dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance minimale, ou une inductance maximale.

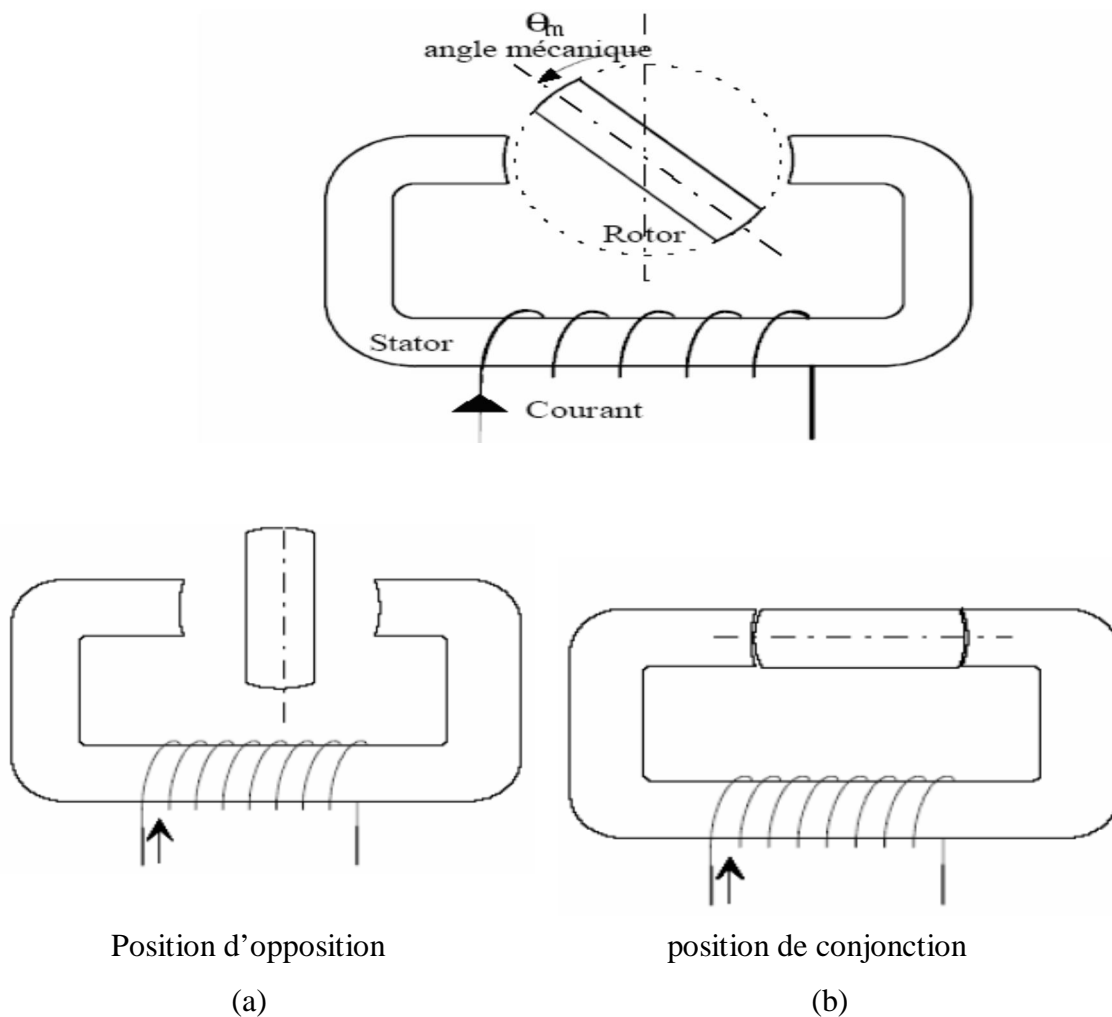


Figure (II.8) Structure MRV de base et positions extrêmes du rotor [39]

A partir de la position d'opposition ($\theta_m=0$), pour que la pièce ferromagnétique rotorique se mette à tourner, nous devrions alimenter l'électroaimant fixe jusqu'à la position de conjonction ($\theta_m = \pi/2$), selon la règle du « flux max. ou de la réluctance min. », et ainsi de suite ...

Sachant que l'expression du couple électromagnétique est: $T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta_m}$, l'alimentation de la machine avec un courant constant lors de la phase croissante ou décroissante d'inductance (figure (II.9)) donnera le régime de fonctionnement souhaité :

- **Moteur** ($T_e > 0$) sur la phase croissante de l'inductance ($\frac{\partial L(\theta_m)}{\partial \theta_m} > 0$)
- **Générateur** ($T_e < 0$) sur la phase décroissante de l'inductance ($\frac{\partial L(\theta_m)}{\partial \theta_m} < 0$)

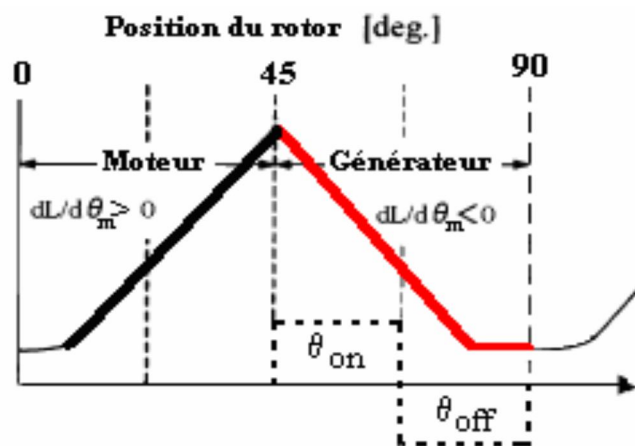


Figure (II.9) Variation de l'inductance en fonction de la position du rotor [39]

Typiquement, il y a un nombre inégal de pôles saillants au stator et au rotor. Il existe pour cela des règles régissant le nombre de dents statoriques N_s et rotoriques N_r ainsi que le nombre de phases k pour assurer un bon fonctionnement de la MRV. Dans notre application nous avons choisi une MRV triphasée à $N_s = 6$ dents stator et $N_r = 4$ rotor Figure (II.10.a)

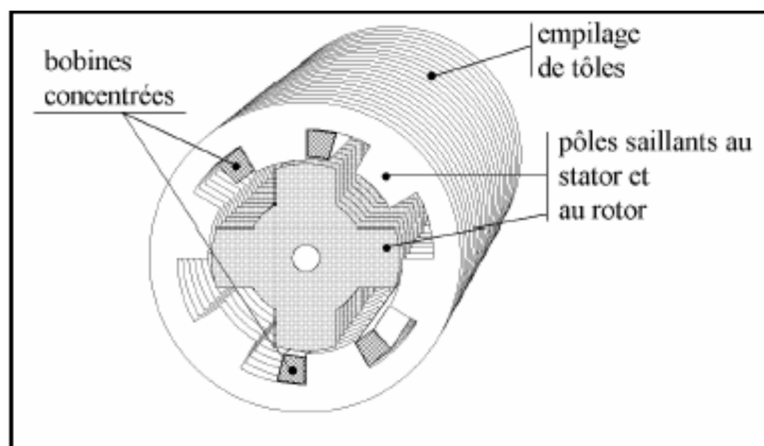


Figure (II.10.a) Structure électromagnétique d'une MRVDS 6/4 triphasée.

Si le rotor se trouve dans une position intermédiaire entre l'opposition et la conjonction, l'injection d'un courant dans l'enroulement d'excitation modifie l'état du système qui tend alors à présenter une réluctance minimale (flux maximal) ; on observe ainsi une rotation du rotor vers la position de conjonction. Lorsque le courant est supprimé, si l'énergie cinétique emmagasinée durant la rotation est suffisante pour l'amener jusqu'à l'opposition, alors on peut répéter le cycle et obtenir un mouvement continu de rotation Figure (II.10.a).

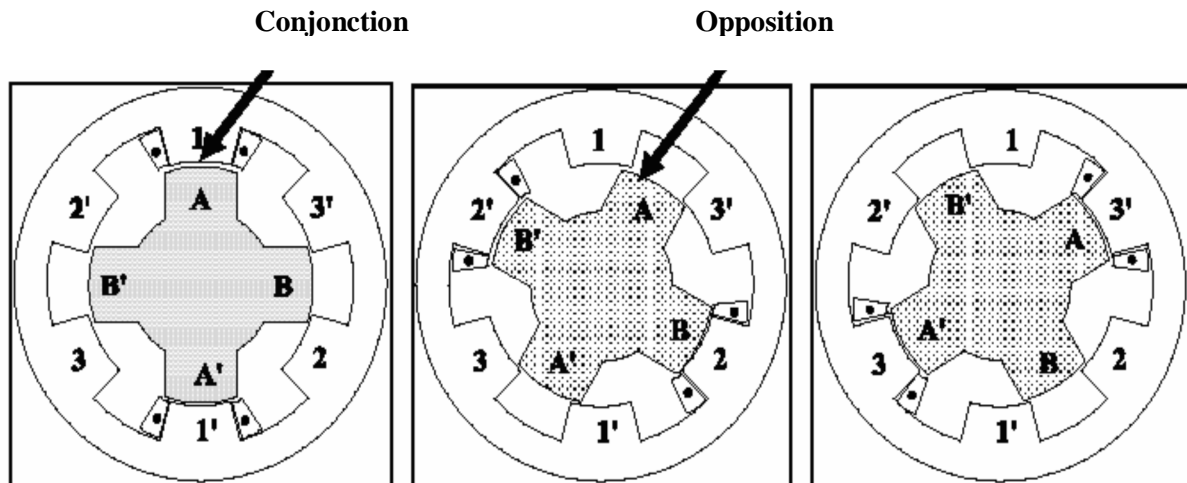


Figure (II.10.b) Positions d'opposition et de conjonction d'une MRVDS 6/4.

La période de variation de la réluctance vue d'une phase correspond au passage de la conjonction d'une dent à la conjonction de la dent suivante.

La relation entre angles électrique θ_e et mécanique θ_m est donnée par :

$$\theta_e = N_r \cdot \theta_m \quad (\text{II.7})$$

II.6 Les applications des MRV :

Après environ deux décennies de recherche sur la minimisation des vibrations et des bruits acoustiques, cet inconvénient majeur de la MRV " Pures" est limité à un niveau acceptable pour les applications industrielles [50] [51]

Avec leur simplicité, leur robustesse et leur tolérance aux défauts, les MRV ont été appliquées dans nombreuses applications industrielles. Nous allons dans la suite présenter quelques applications.

Haute vitesse. Le premier train à grande vitesse équipé de la MRV est un train allemand: ICE3 (figure II.11). La MRV est utilisée pour la climatisation de l'air cycle dans le train, dont la puissance et la vitesse nominales sont respectivement 40 kW et 3,0 104 tr/min. Une autre MRV à vitesse ultra élevée est conçue par Morel et dans laquelle une nouvelle structure de rotor est

proposée afin d'augmenter la rigidité mécanique du rotor et, une vitesse maximale de 2,0 105 tr/min est atteinte [50].

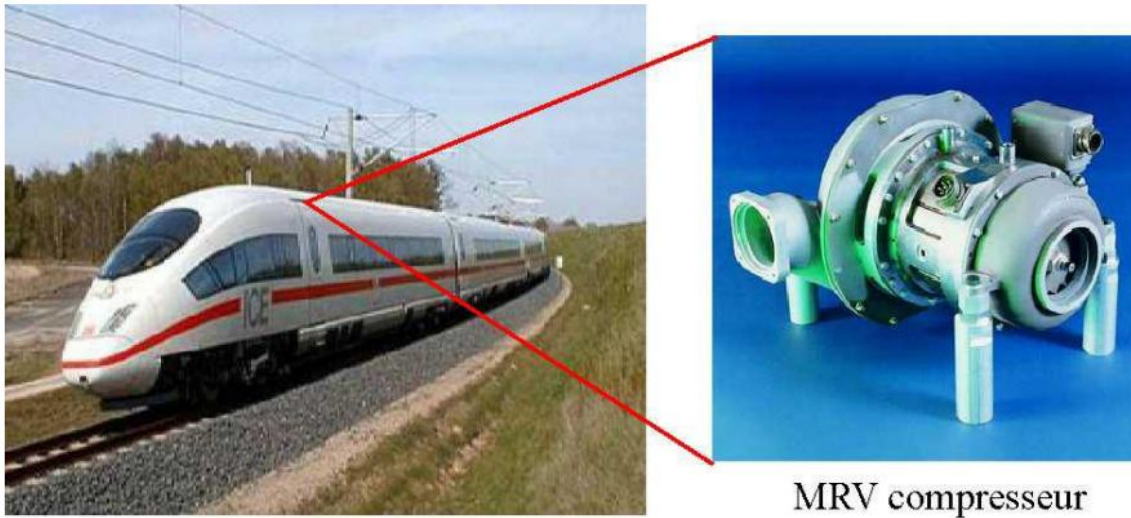
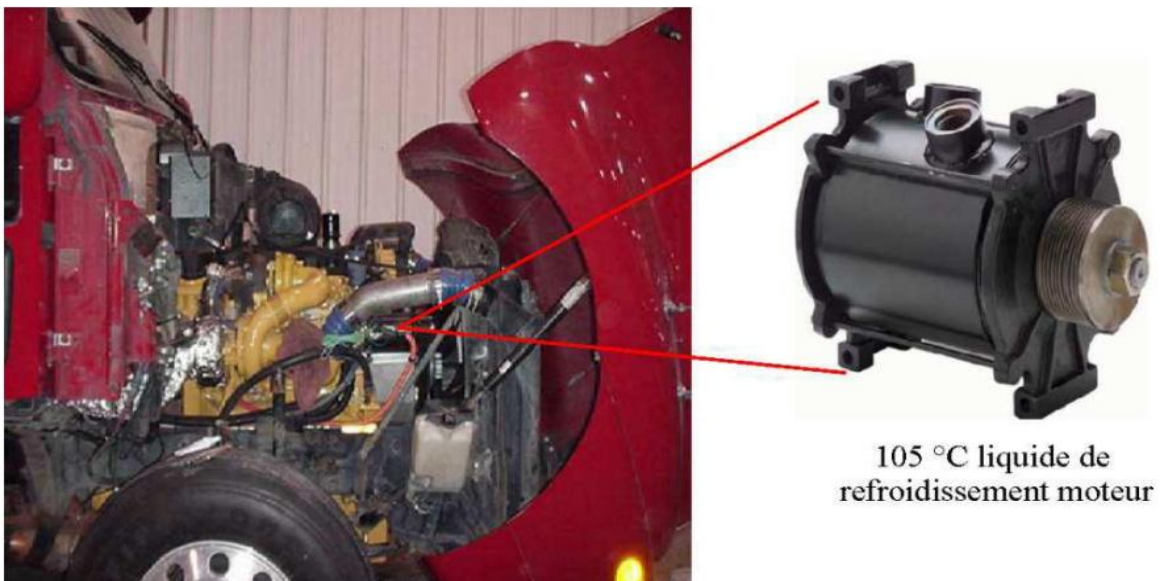


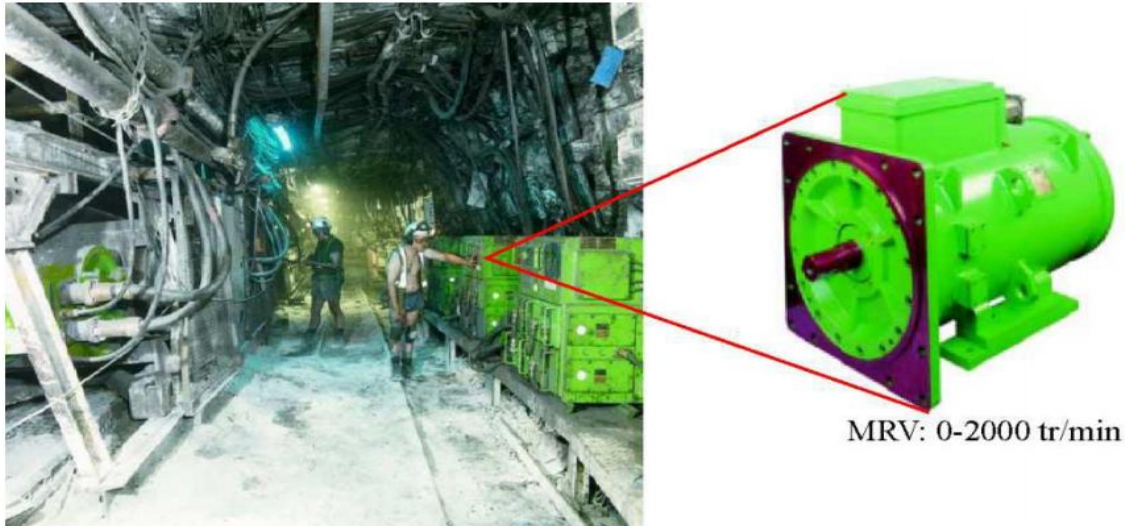
Figure (II.11) : MRV utilisée dans le train à grande vitesse pour la climatisation de l'air cycle [52].

Environnement extrême: haute température ambiante, humide, sale, etc. L'une des applications à haute température de la MRV est illustrée à la figure (II.12.a). C'est une machine ayant 12 dents statoriques et 8 dents rotoriques, dont le diamètre externe et la longueur active sont respectivement de 145 mm et de 125 mm et la puissance active est de 7,3 kW.

L'une des applications de la MRV dans les environnements humides et sales est illustrée à la figure (II.12.b). La MRV utilisée comme la transporteuse de charbon dans la mine de Selby au Royaume-Uni. La vitesse de la machine varie de 0 à 2000 tr/min et la puissance nominale est de 300 kW. [50]



(a) Environnement à haute température ambiante



(b) Environnement humide et sale

Figure (II.12) : MRV fonctionnement dans les environnements extrêmes. [50] [52]**II.7 Commande de la MRV :**

Pour un entraînement de type déterminé, toute amélioration du comportement implique une action sur l'un des éléments constitutifs suivants:

Le moteur,

L'alimentation,

La commande.

L'alimentation a pour but d'appliquer la tension successivement aux bornes des diverses phases du moteur. Elle doit assurer l'enclenchement d'un bobinage sur ordre de commande. Elle doit également assurer la coupure du courant. Dans ce chapitre, on simule la machine à réluctance variable pour étudier son comportement dynamique en régime linéaire par deux stratégies de commande. Le premier est une commande en tension et la deuxième est la commande par hystérésis. Cela nous permet de choisir l'angle d'excitation optimal pour réduire l'ondulation du couple de la MRV.

II.8 Hypothèses simplificatrices [32]

- Les paramètres de chaque phase sont symétriques.
- L'inductance mutuelle et l'inductance de fuite sont négligées.
- Ignorer les phénomènes d'hystérésis et de courants induits de Foucault.
- La résistance est indépendante de la température.
- Les interrupteurs sont parfaits.
- La tension d'excitation est parfaitement continue.
- On néglige les effets de saturation.

II.9 Modélisation de la MRV

II.9.a Les équations électromagnétiques [32] [38]

La tension instantanée appliquée sur l'enroulement d'une phase du moteur MRV à une relation avec le flux par la loi de Faraday:

$$V_s = Ri + \frac{d\psi}{dt} \quad (\text{II.8})$$

V_s : est la tension appliquée.

i : est le courant dans la phase.

R : est la résistance de l'enroulement de phase.

Ψ : est le flux.

À cause de la structure à double saillance du moteur MRV et l'effet de la saturation magnétique, le flux dans une phase MRV varie en fonction de la position du rotor θ et le courant de la phase. L'équation (II-8) peut être développée comme suit :

$$V = Ri + \frac{d\psi}{di} \frac{di}{dt} + \frac{d\psi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.9})$$

$\frac{\partial \Psi}{\partial i}$ est défini comme l'inductance instantanée $L(\theta, I)$ et le terme $\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t}$ est La force électromotrice

(FEM) instantané.

II.9.b Production du couple

La MRV peut être décrite par une fonction convexe quelle dépend seulement de la position du rotor θ et le courant dans le n^{eme} phase. Cette fonction est la co-énergie $\bar{W}(\psi, \theta)$. Dans une manière semblable, la fonction de l'énergie $W(\psi, \theta)$, où les variables sont les flux de n phase et la position de rotor, aussi permet de décrire la MRV. Tenant compte des vecteurs ψ et I , la fonction de co-énergie et énergie vérifie l'inégalité suivante [27] [30]:

$$\bar{W}(I, \theta) + W(\Psi, \theta) \geq \Psi^t I \quad (\text{II.10})$$

Grâce à son double saillance, la MRV peut avoir une variation de l'énergie magnétique et par conséquence la production du couple. La dérivée partielle de la fonction énergie par rapport à la position du rotor donne le couple de la machine :

$$C_e(\Psi_1, \dots, \Psi_n, \theta) = \frac{\partial W}{\partial \theta}(\Psi_1, \dots, \Psi_n, \theta) \quad (\text{II.11})$$

Appliquant cette relation à une MRV 6/4, on a :

$$C_e(\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \theta) = \frac{\partial W}{\partial \theta}(\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \theta) \quad (\text{II.12})$$

Quand on excite une phase, le couple apparaît afin que le rotor évolue dans la direction des augmentations de l'inductance. Par conséquent, le couple sera dans la direction de la position alignée la plus proche.

II.9.c Modèle Linéaire de la MRV

Les caractéristiques électromagnétiques utilisées pour la simulation de la MRV 6/4 ont été obtenues précédemment dans ce chapitre. La figure (II.13) montre le profil de l'inductance linéaire $L(\theta)$ avec chaque inductance de phase déplacée par un angle θ_s donné Par [53]:

$$\theta_s = 2\pi \left(\frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \right) \quad (\text{II.13})$$

N_r et N_s sont les nombres de pôles du rotor et du stator respectivement. Quand les arcs des pôles du rotor et du stator du moteur ne sont pas égaux, $\beta_r \neq \beta_s$, on a les relations d'angles suivantes :

$$\theta_x = \left(\frac{\pi}{N_r} \right) - \frac{(\beta_r + \beta_s)}{2} \quad (\text{II.14})$$

$$\theta_y = \left(\frac{\pi}{N_r} \right) - \frac{(\beta_r - \beta_s)}{2} \quad (\text{II.15})$$

$$\theta_z = \frac{(\beta_r - \beta_s)}{2} \quad (\text{II.16})$$

$$\theta_z = (\theta_y + \theta_z + \theta_s) \quad (\text{II.17})$$

Lesquels sont indiqués dans la figure (II.13). La figure (II.14) montre l'angle δ correspondant au déplacement d'une phase par rapport à une autre, elle est donnée par:

$$\delta = 2\pi \left(\frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \right) \quad (\text{II.18})$$

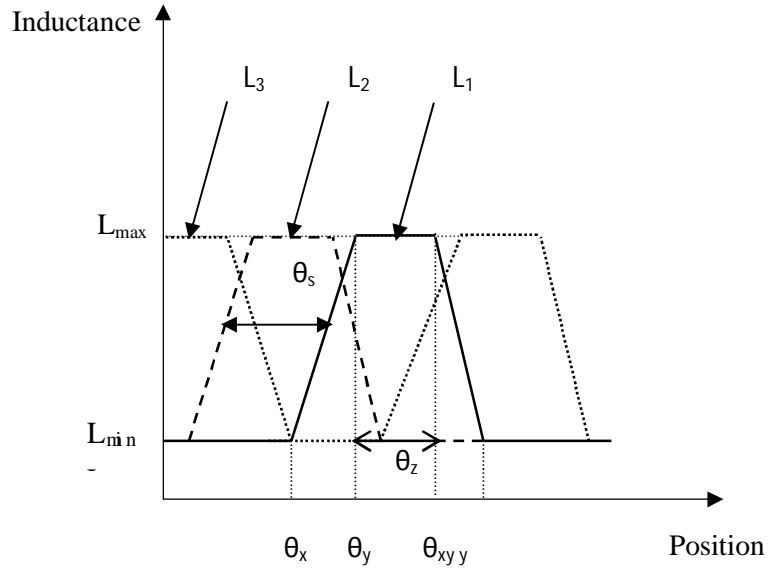


Figure II.13 Inductance en fonction de la position [30]

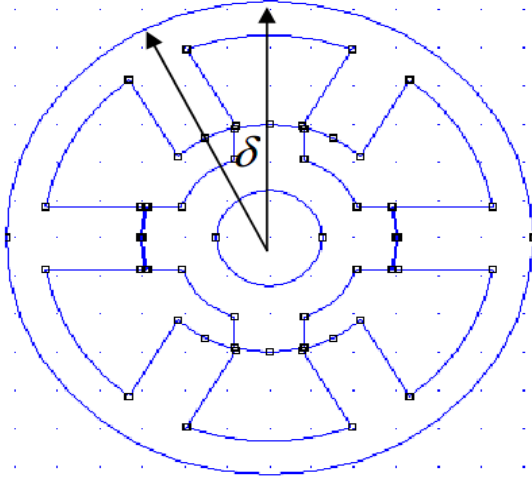


Figure II.14 L'angle δ correspond au déplacement d'une phase par rapport à une autre

L'équation électrique de chaque phase est donnée par:

$$V_i = Ri_i + \frac{d\psi_i(\theta, i_i)}{dt}, \quad i = \{1, 2, 3\} \quad (\text{II.19})$$

Le flux dans chaque phase est donné par l'équation linéaire:

$$\Psi_i(\theta, i_i) = L(\theta)i_i \quad (\text{II.20})$$

L'énergie totale associée avec les trois phases est donnée par :

$$W_{\text{total}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 L(\theta + (n-i-1)\theta_s) i_i^2 \quad (\text{II.21})$$

Et le couple total du moteur est donné par :

$$C_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \frac{L(\theta + (n-i-1)\theta_s)}{d\theta} i_i^2 \quad (\text{II.22})$$

Les équations mécaniques sont :

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_e - C_r - F\omega \quad (\text{II.23})$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (\text{II.24})$$

C_r : représente le couple de charge,

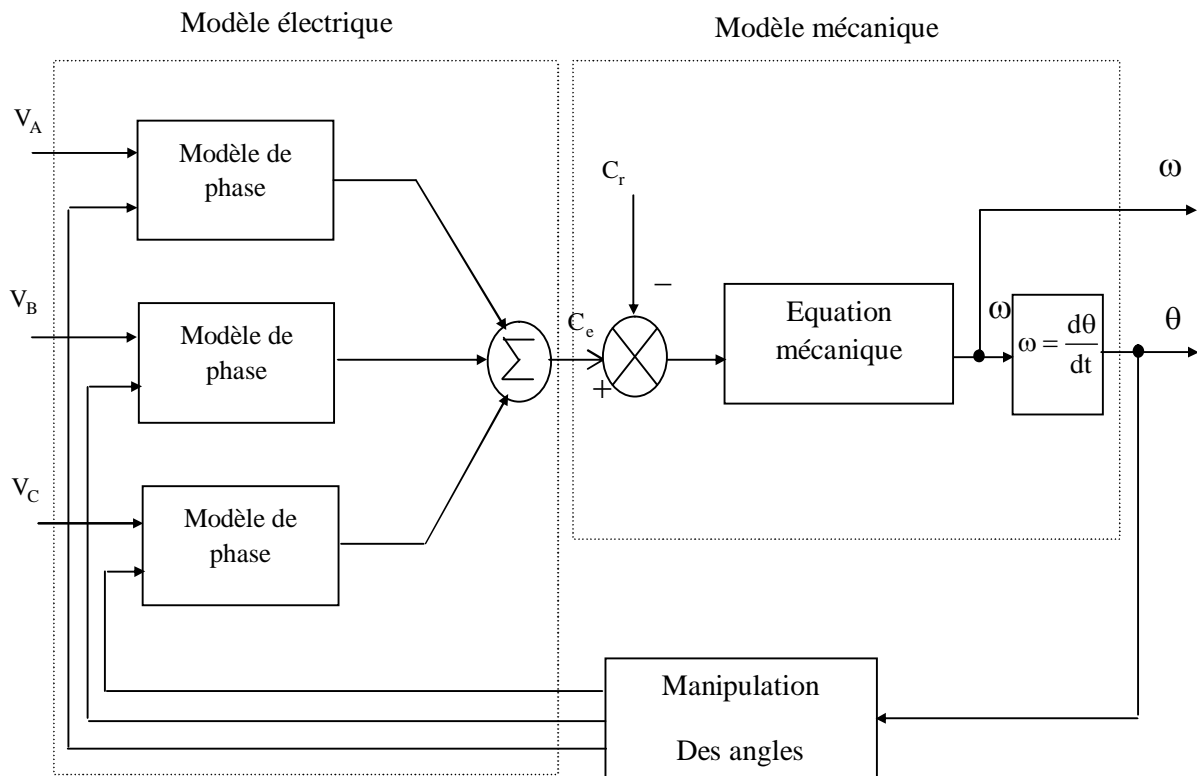
F : Le coefficient du frottement de la machine.

J : Moment d'inertie.

Nous montrons dans la figure (II.15) le diagramme de simulation utilisé pour le modèle linéaire de la MRV. La figure (II.16) montre le contenu du bloc de la phase 1. Il contient trois autres blocs, chacun est associé à une fonction MATLAB spécifique.

Ils sont :

- **Le convertisseur:** permet d'assurer les commutations du convertisseur de puissance aux angles θ_{on} , θ_{off} et θ_d .
- **L'inductance:** le calcul du courant sur l'inductance de chaque phase respectivement, d'après la position du rotor θ et le flux de la phase ψ . Le courant de la phase 1 est présenté comme la sortie.
- **Le couple:** le calcul de couple produit dans cette phase d'après la position du rotor θ et la valeur du courant I .



Figure(II.15) Diagramme de simulation de MRV [54].

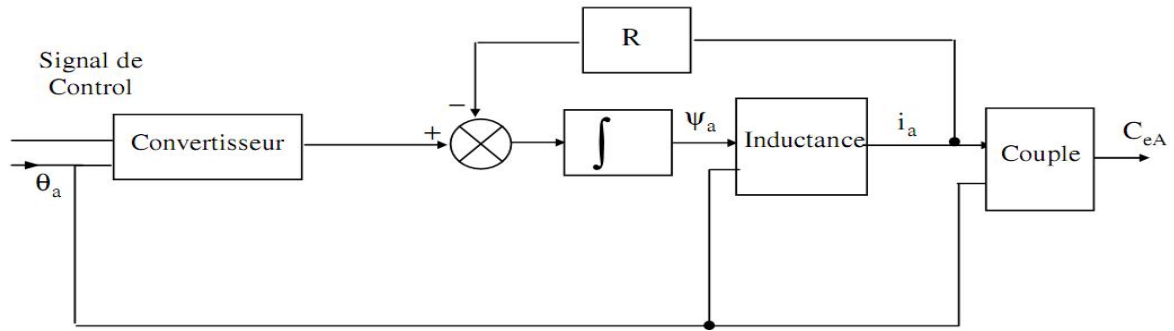


Figure (II.16) Diagramme de simulation de MRV par phase (modèle linéaire)

Pour commencer la simulation de la MRV utilisant son modèle linéaire, c'est nécessaire de prendre soin de choisir une position initiale du rotor qui ne doit pas être dans la zone où l'inductance L a une valeur constante, c'est là où aucun couple ne serait produit. Quand le couple de la charge est nul, la variable θ correspondant à la position du rotor n'évolue pas et la machine sera arrêtée tout le temps. Cependant, quand le couple de la charge n'est pas nul, là le rotor déplace pour établir une vitesse où $C_r = C_e$. Pour notre machine particulière, un angle initial θ supérieur à 15° a été choisi, comme nous pouvons vérifier dans son profil de l'inductance dans la figure (II.14), pour éviter le premier cas d'un couple de charge nul.

II.10 Commande en tension : [54] [55]

Supposant une forme d'inductance idéale, les courbes de simulation dans la figure (II.19) illustrent le fonctionnement de la MRV quand elle est commandée par tension. Le contrôle a lieu en appliquant une tension à une bobine de phase à un angle θ_{on} jusqu'à l'angle θ_{off} . Après cela, la tension appliquée est inversée jusqu'à un certain angle d'extinction θ_a qui permet le retour du flux magnétique vers zéro.

Pour appliquer la tension V à une phase, les deux IGBT Q1 et Q2 dans la figure (II.17) doivent être ON. Au contraire, pour appliquer la tension $-V$ et pour assurer la continuité de courant, les deux diodes D1 et D2 sont conductrices [54]

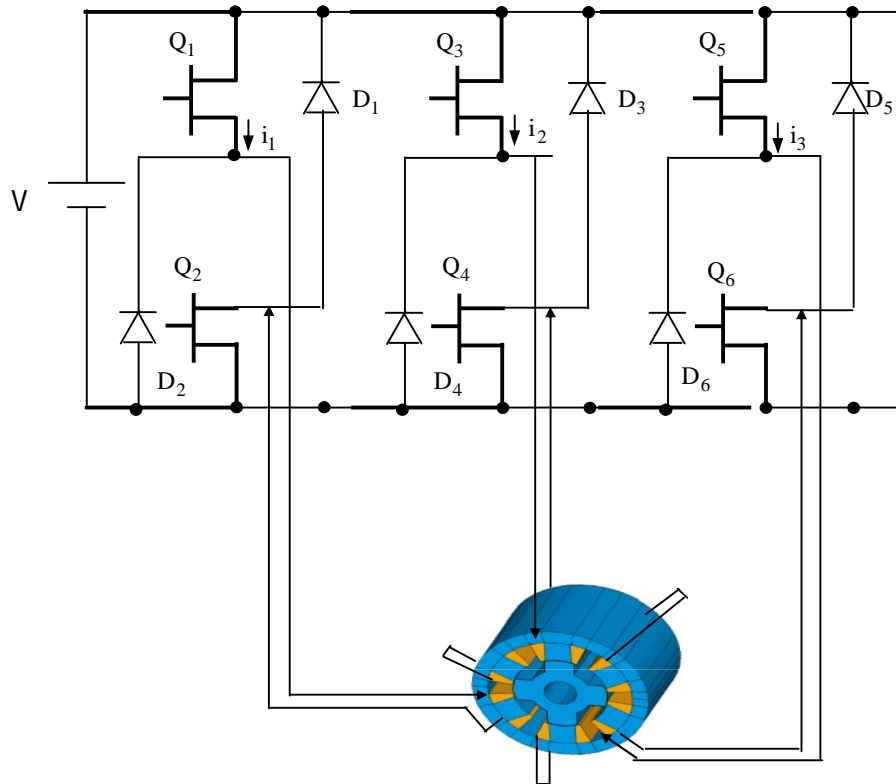


Figure II.17 Convertisseur H-pont [30][54]

La relation de la tension de la phase:

$$V = Ri + \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (\text{II-25})$$

Avec $\Psi = L(\theta)I$, on a

$$\text{Et} \quad \frac{d\Psi}{dt} = i \frac{dL}{d\theta} \omega + L(\theta) \frac{di}{dt} \quad (\text{II-26})$$

$$V = Ri + L(\theta) \frac{di}{dt} + i\omega \frac{dL}{d\theta} \quad (\text{II-27})$$

Dans l'équation (II-27), le terme $i\omega \frac{dL}{d\theta}$ est la tension induite « FEM » et qui sera grande pour les grandes vitesses. Pour augmenter la croissance du courant et éviter une grande FCEM, l'angle θ_{on} doit être choisi de la même manière que dans la Figure II.17 qui signifie qu'elle est la choisir quand l'inductance et la FEM sont minimums. En utilisant le modèle linéaire, la valeur minimale de la FEM sera nulle quand $\frac{dL}{d\theta} = 0$, comme montré dans la figure (II.19.d). Cependant, quand la position du rotor est dans la zone de l'augmentation de l'inductance, la tension FEM apparaît. Après, quand la FEM dépasse la tension V , le courant de la phase commence à diminuer jusqu'à ce que l'angle θ_{off} soit atteint comme montré dans la figure (II.19.c). Les effets de la commutation brusque présente dans cette commande introduit clairement des harmoniques dans le signal du couple par le

signal du courant de phase, cela augmente l'ondulation de la vitesse du moteur. Cette stratégie est appliquée seulement aux moteurs à grandes vitesses [54].

II.10.1 Bloc de simulation

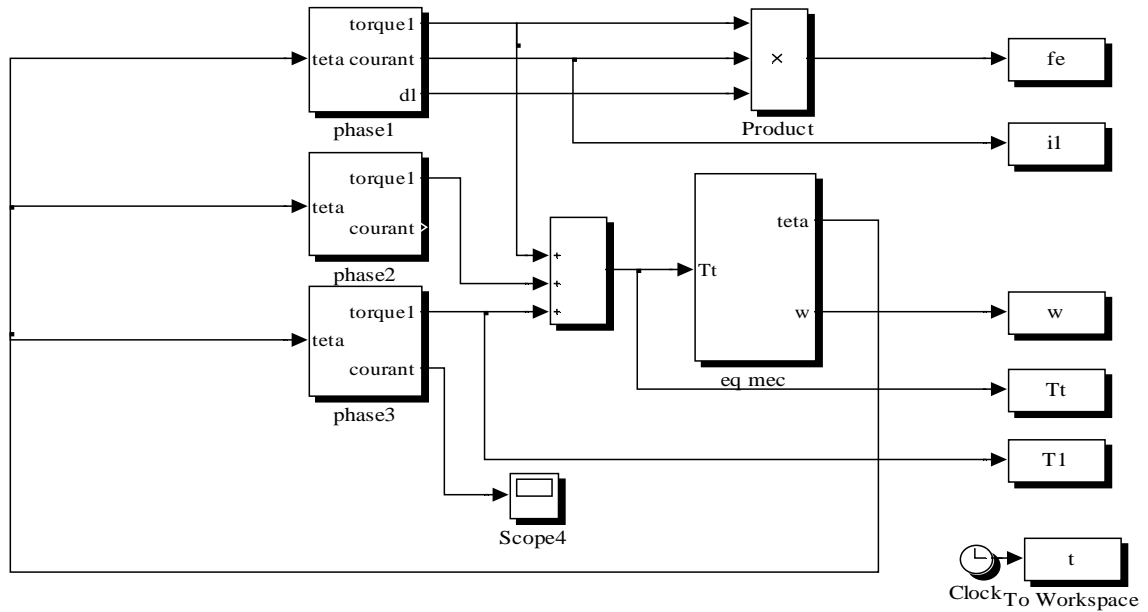
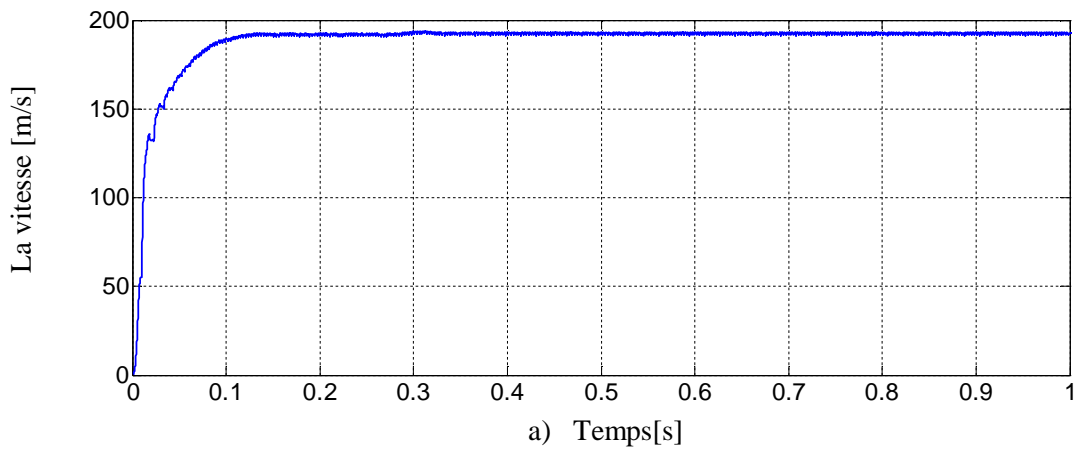


Figure II.18 Diagramme de simulation de MRV par phase (modèle linéaire).

II.10.2 Résultat de simulation :



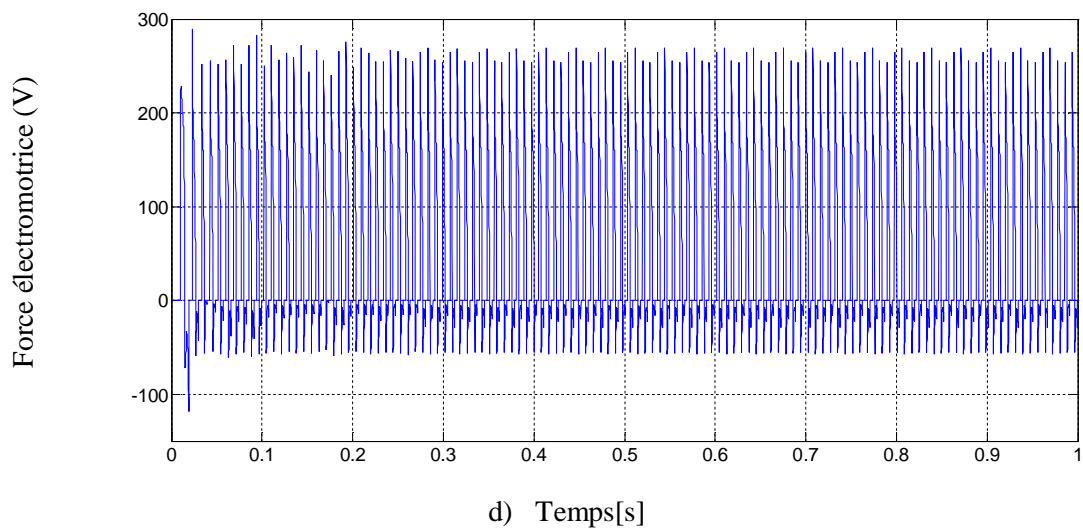
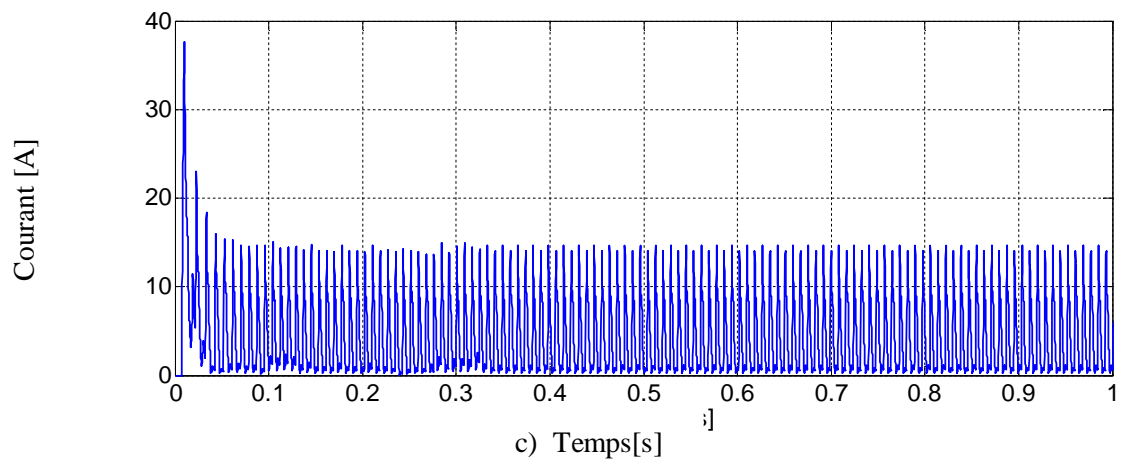
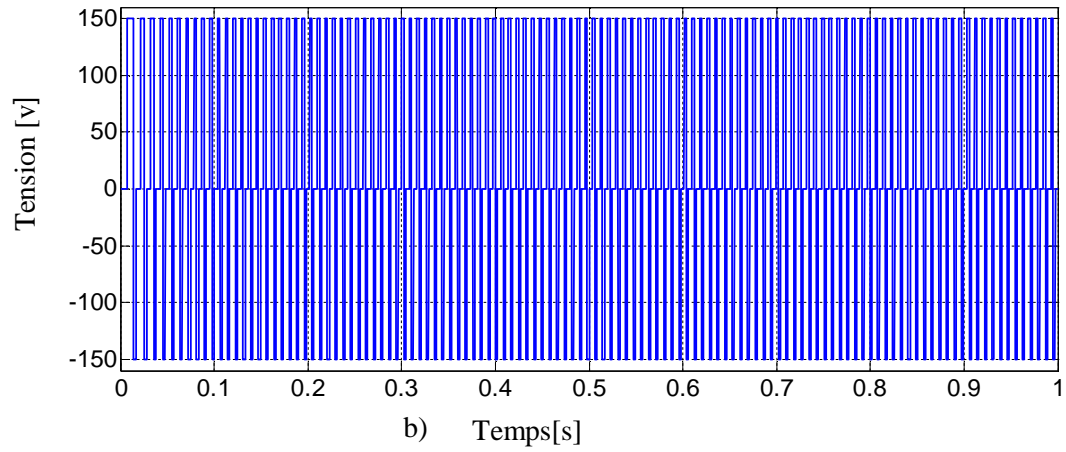




Figure II.19. a) vitesse. b) tension. c) courant. d) FEM e) couple. f) Inductance. g) flux.

(De la phase).

Pour illustrer l'importance de choisir un angle θ_{off} qui convient, nous avons mis plusieurs valeurs de θ_{off} comme illustré sur la figure (II.20). Dans la figure (II.20.a), nous pouvons voir que le courant de la phase n'arrive plus à la valeur zéro. Encore, on peut voir dans la zone (1) que le courant commence à diminuer rapidement parce que maintenant nous sommes dans la région décroissante de l'inductance. Dans la zone (2), la FEM devient encore considérable

(voir figure (II.20.b)) quand la tension de la phase passe de -50 v à 0 v et donc le courant de la phase commence à augmenter. Enfin, le courant de la phase commence à diminuer dans la zone (3), parce que la tension FEM est encore nulle quand l'inductance est constante.

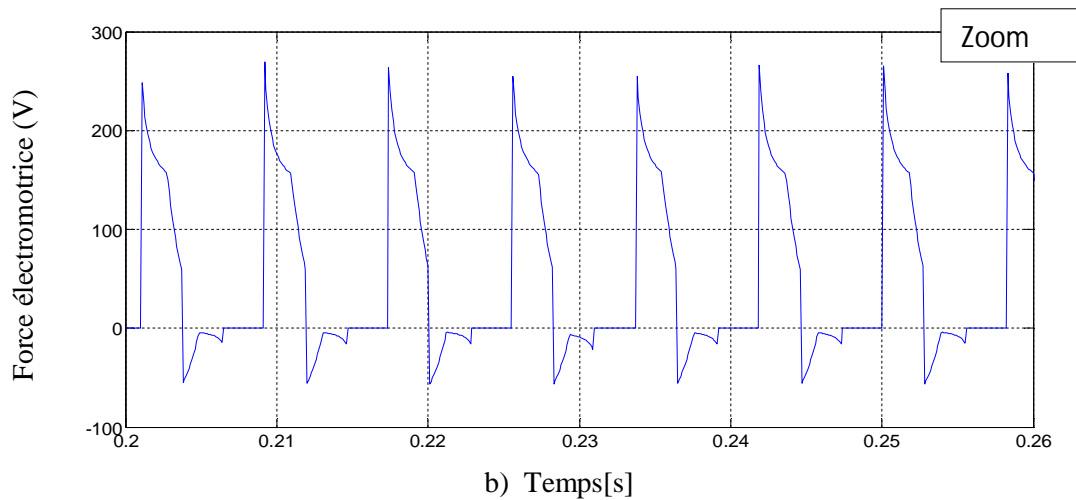
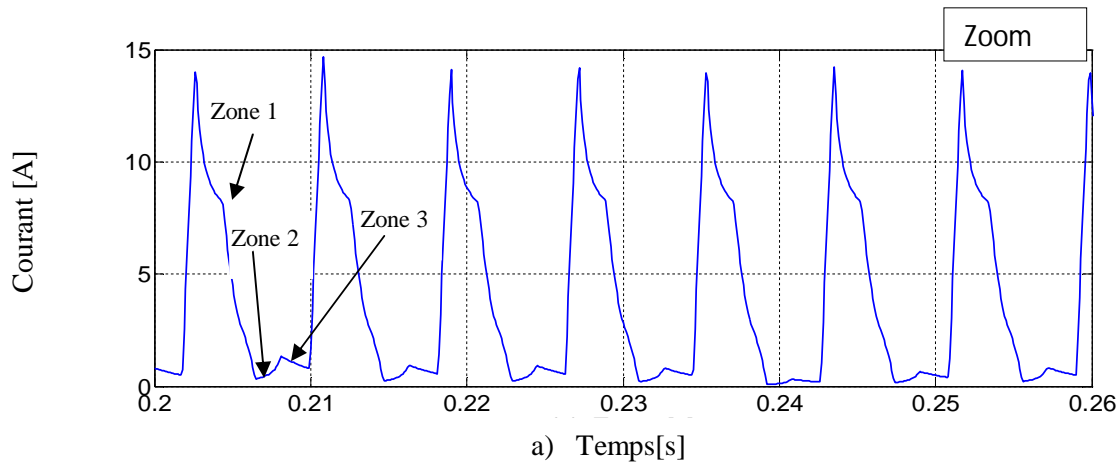


Figure II.20. a) Courant. b) FEM.

II.11 Commande par hystérésis

II.11.1 schéma synoptique

Le schéma synoptique du circuit de commande monophasé permettant d'atteindre l'objectif précédent est représenté (Fig. II.21). D'abord, le courant d'une phase statorique est capturé; ensuite, il est comparé à une consigne. Après, l'erreur Δi passe par un comparateur à hystérésis générant une sortie logique (0 ou 1). Puis, cette dernière intervient avec la position du rotor pour établir l'ordre de commutation (impulsion) [32][54].

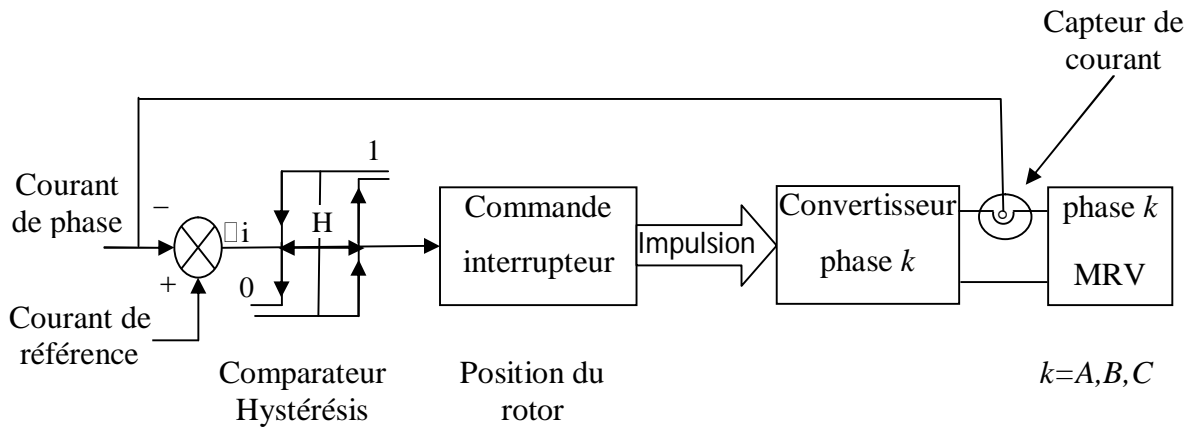


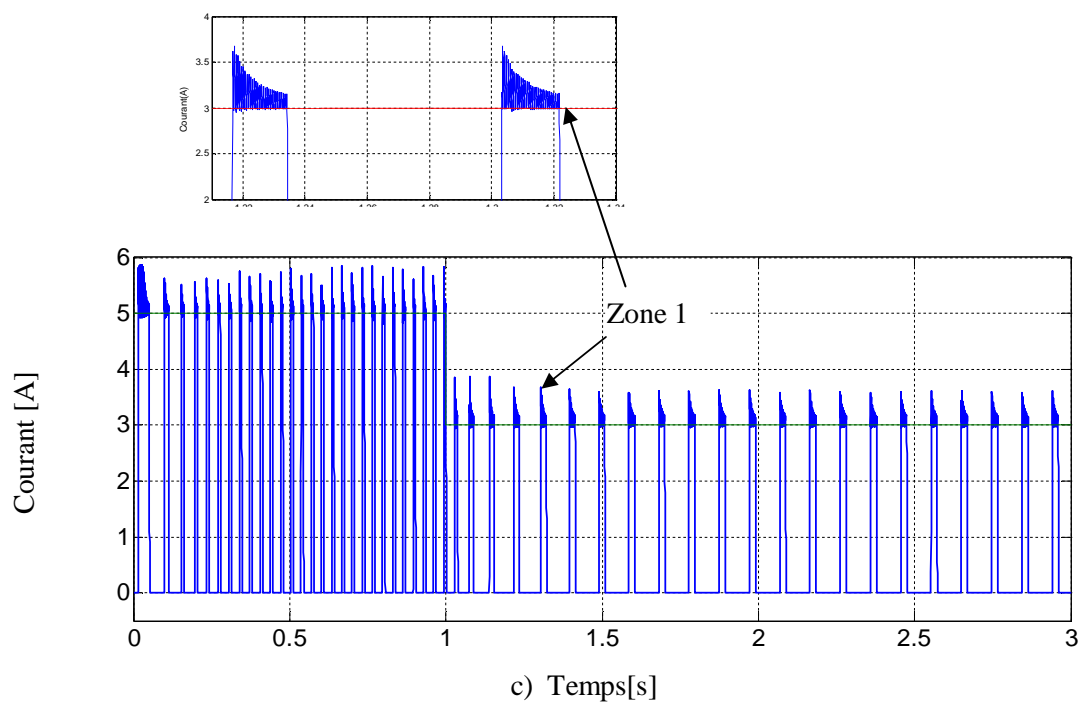
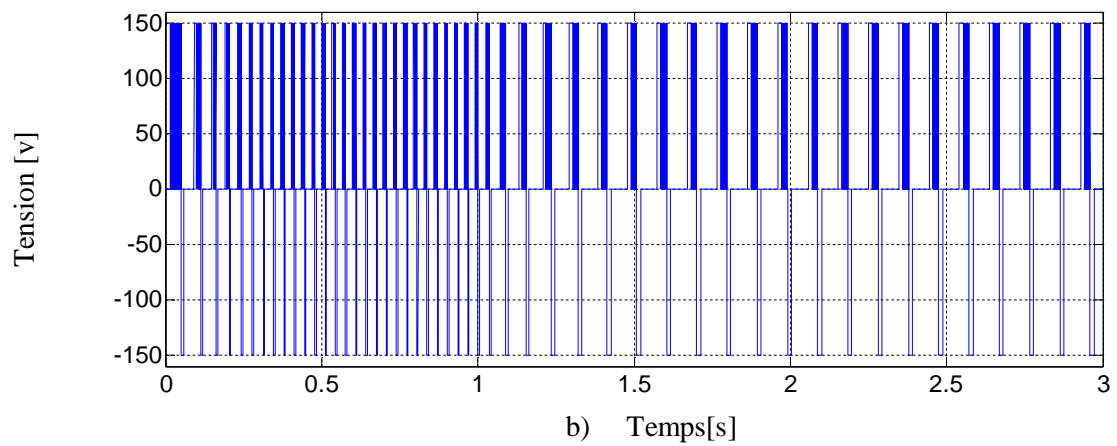
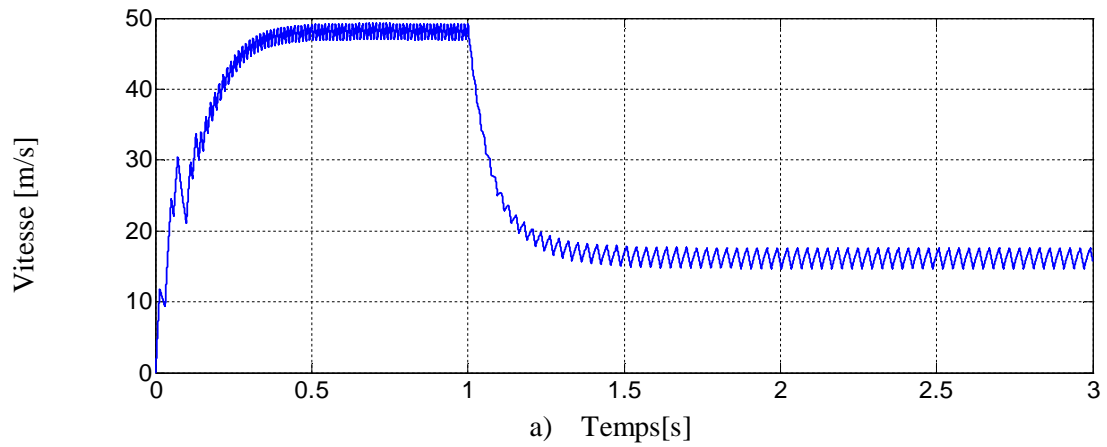
Figure II.21. Schéma synoptique du circuit de commande proposé [30]

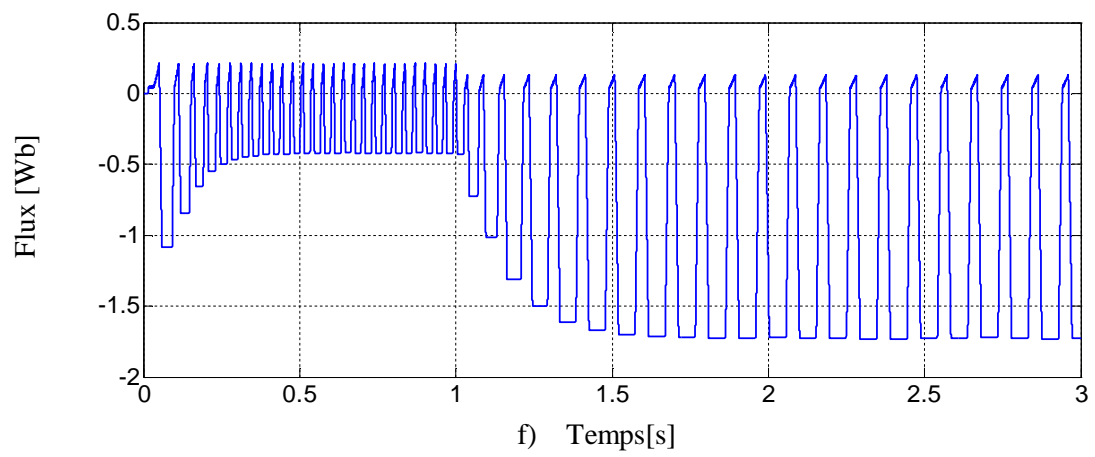
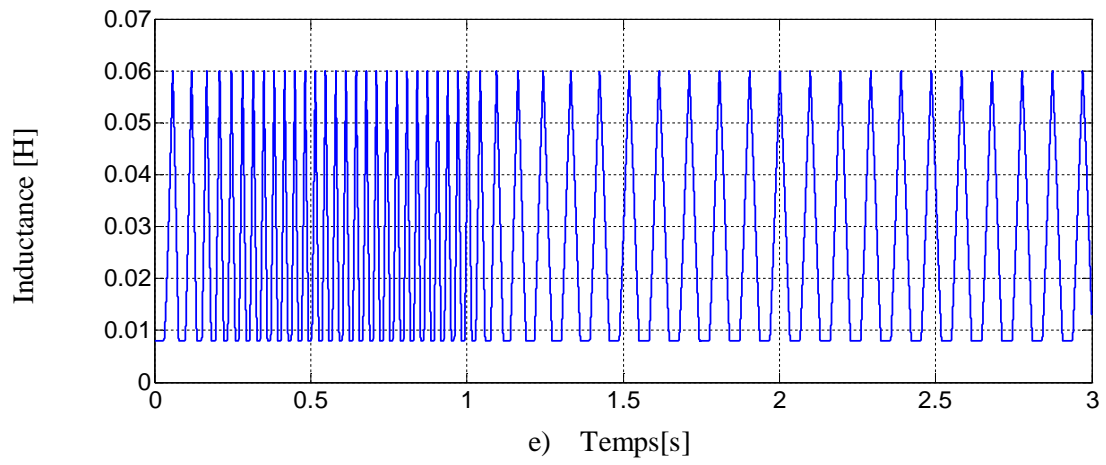
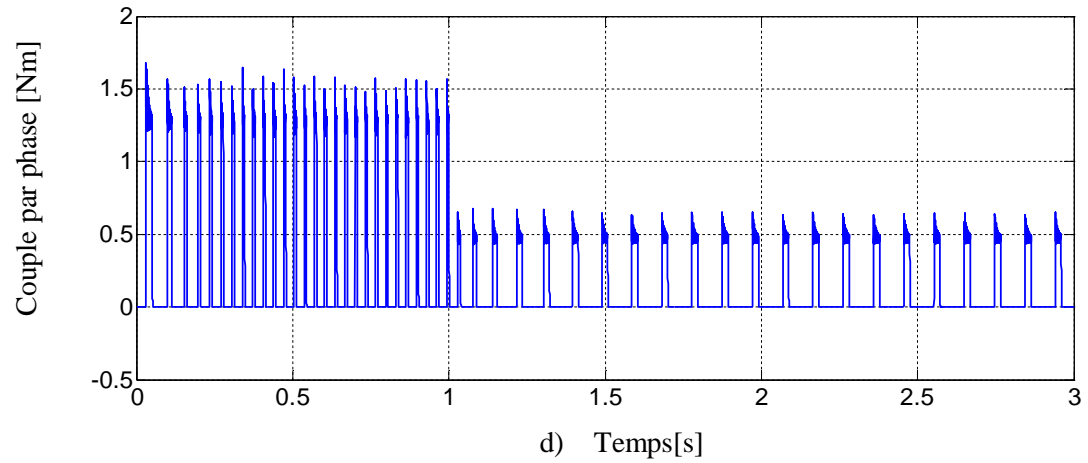
II.11.2 stratégie de la commande par hystérésis : [54]

Cette méthode de contrôle des courants, la plus utilisée dans l'industrie actuellement, consiste à commander les interrupteurs de l'onduleur de telle sorte que les courants des phases statoriques du moteur ne puissent évoluer en dehors d'une bande de largeur H encadrant leurs courbes de référence. Ce contrôle se fait donc par une comparaison permanente entre les courants réels et leurs consignes. La différence entre les deux valeurs permet à la logique de commande de l'onduleur d'imposer une commutation des interrupteurs à chaque fois que cette différence dépasse, en valeur absolue, $H/2$. Cette méthode ne nécessite donc pas la connaissance du modèle électrique de la machine.

Comme il est bien connu, cette technique de contrôle du courant la plus directe que l'on puisse imaginer, a les avantages d'une bonne stabilité, une réponse très rapide et une bonne précision.

Le comportement dynamique du MRV est illustré dans le cas de l'emploi de la commande du courant par hystérésis. Les résultats montrés dans la figure (II.22) ont été obtenus pour $\theta_{on} = 0^\circ$ et $\theta_{off} = 30^\circ$, et un courant de référence $I_{ref} = 5A$, avec le moteur qui fonctionne à vide. La figure (II.22.b) présente la forme de la tension par phase et la figure (II.22.f) présente la forme du flux par phase. La figure (II.22.c) montre l'influence de la commande du courant par hystérésis sur la forme du courant de la phase. On remarque dans cette figure de la zone 1 que la bande de l'hystérésis ne reste pas constante. Dans la zone 1, l'inductance de la phase reste constante et avec sa valeur minimale et pour 15 degrés. On peut observer aussi dans la figure (II.22.d) l'influence de cette commande sur le couple de la phase. L'ondulation du couple présente une haute amplitude pour les valeurs de θ_{on} et θ_{off} , comme montré dans la figure (II.22.g). Et a pour conséquence des oscillations de vitesse importantes, comme montré dans figure (II.22.a).





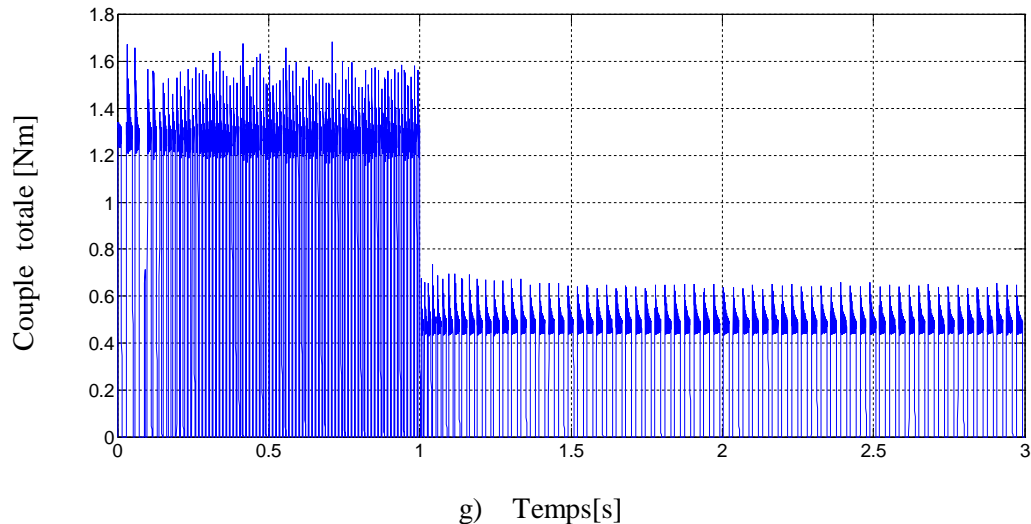


Figure II.22 a) vitesse. b) tension. c) Courant. d) Couple par phase. e) inductance. f) flux.
g) couple électromagnétique totale

Pour diminuer les oscillations de vitesse il est nécessaire de produire plus de couple.

Le contrôleur à hystérésis du courant est utilisé pour les basses et les moyennes vitesses parce qu'on a un assez de temps pour être capable de contrôler le courant de la phase. Ce qui permet aussi d'utiliser ce mode du contrôle aux basses et moyennes vitesses, c'est le fait que la FEM ne prend pas des grandes valeurs qui détériore la forme du courant.

II.12 commande de la vitesse par régulateur à action proportionnelle et intégrale PI

Les régulateurs PI sont utilisés dans l'industrie pour les entraînements. Dans beaucoup de processus industriels, le contrôle de la vitesse est indispensable particulièrement lors des phénomènes transitoires. Cela permet d'assurer une bonne qualité du produit. Beaucoup de non-linéarités interviennent dans les entraînements.

Le contrôleur de la vitesse convertit l'erreur de la vitesse à une valeur du couple électromagnétique de référence (ou à une valeur du courant de référence). Les limitations du courant entre des valeurs prédéterminées sont accomplies en limitant le produit du régulateur de vitesse. Les contrôleurs de la vitesse les plus utilisés pour les entraînements contiennent deux boucles du contrôle séparées figure (II.23). La boucle intérieure est responsable de la régulation du courant et incorpore un régulateur PWM à hystérésis. Ce régulateur est activé par l'erreur entre le courant de référence et le courant mesuré du moteur. La référence du courant ou du couple est produite par la boucle extérieure du contrôle, dans lequel l'erreur entre la référence de la vitesse et sa valeur réelle sollicite le régulateur PI de vitesse.

Pour simplifier les calculs, le système peut être découpé en deux modes: mode rapide (mode électrique) et mode lent (mode mécanique). Cette hypothèse est admissible quand la constante du temps mécanique est beaucoup plus grande que celle électrique. Dans ce cas, la boucle du contrôle du courant peut être considérée comme unitaire.

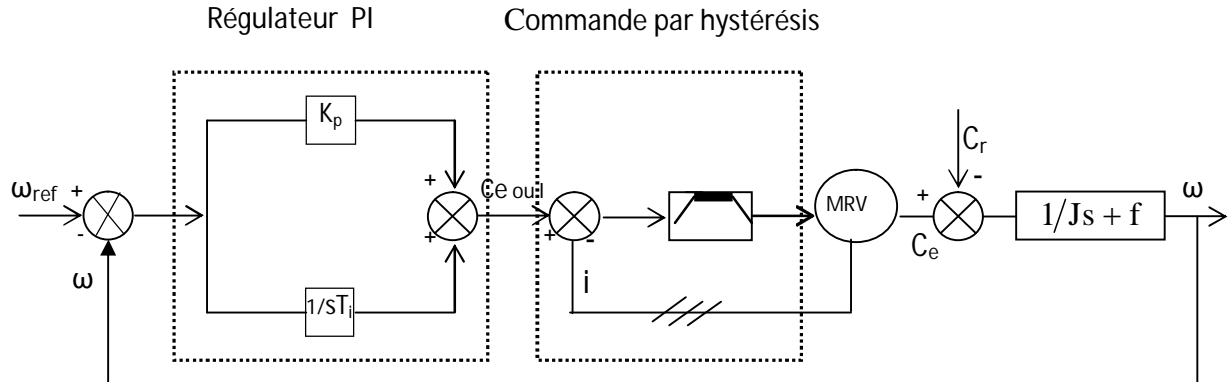


Figure II.23 Boucle de régulation de vitesse [29]

Le réglage du régulateur de l'entraînement électrique est un problème complexe dû au grand nombre de non-linéarités de la machine, du convertisseur électronique et du contrôleur. La non-linéarité inhérente de la MRV est difficile à éliminer pour un réglage adéquat des paramètres du contrôleur. Le convertisseur de puissance présente une caractéristique de transfert non linéaire à cause des temps morts imposés par la commutation. Un obstacle supplémentaire pour le réglage optimal des paramètres du PI de la vitesse est la difficulté de caractériser la charge. Le système peut être décrit comme un système standard de deuxième ordre avec un zéro :

$$\frac{\omega(s)}{\omega_{\text{ref}}} = \frac{\frac{K_{\omega}}{J}(s+a)}{s^2 + \left(\frac{f + K_{\omega}}{J}\right)s + \frac{K_{\omega}}{J}} = \frac{\omega_n^2}{a} \frac{(s+a)}{s^2 + 2\omega_n \zeta s + \omega_n^2} \quad (\text{II.28})$$

Par identification on a :

$$\begin{cases} \frac{F + K_{\omega}}{J} = 2\omega_n \zeta \\ \frac{K_{\omega}}{J} = \omega_n^2 \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Si on choisit un coefficient d'amortissement égal à l'unité, la dynamique de la réponse de vitesse est fixée par la pulsation propre ω_n [52].

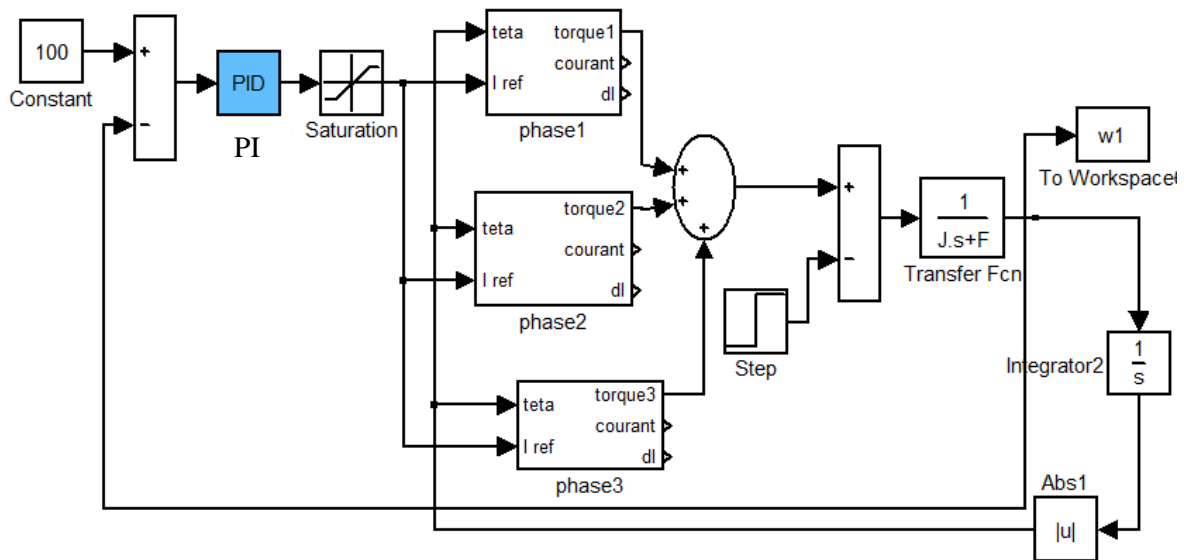


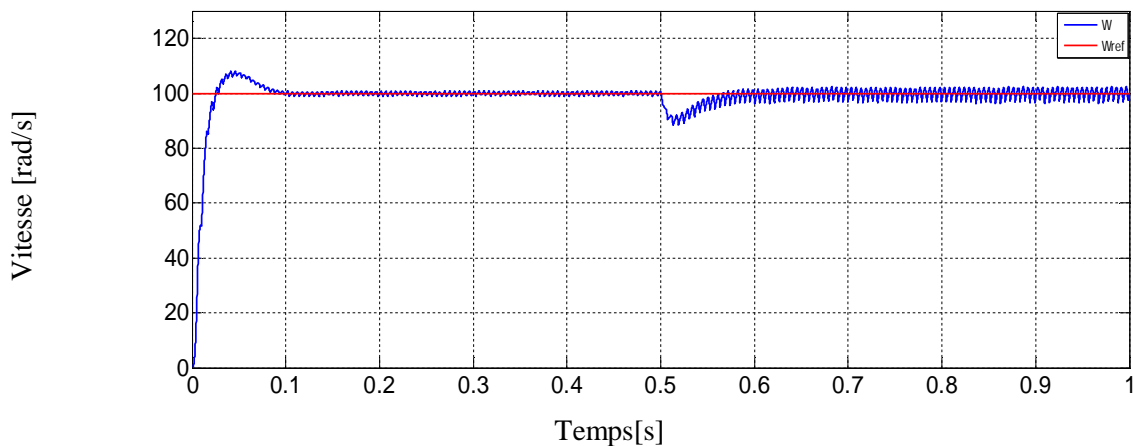
Figure II.24 commande de la vitesse de la MRV

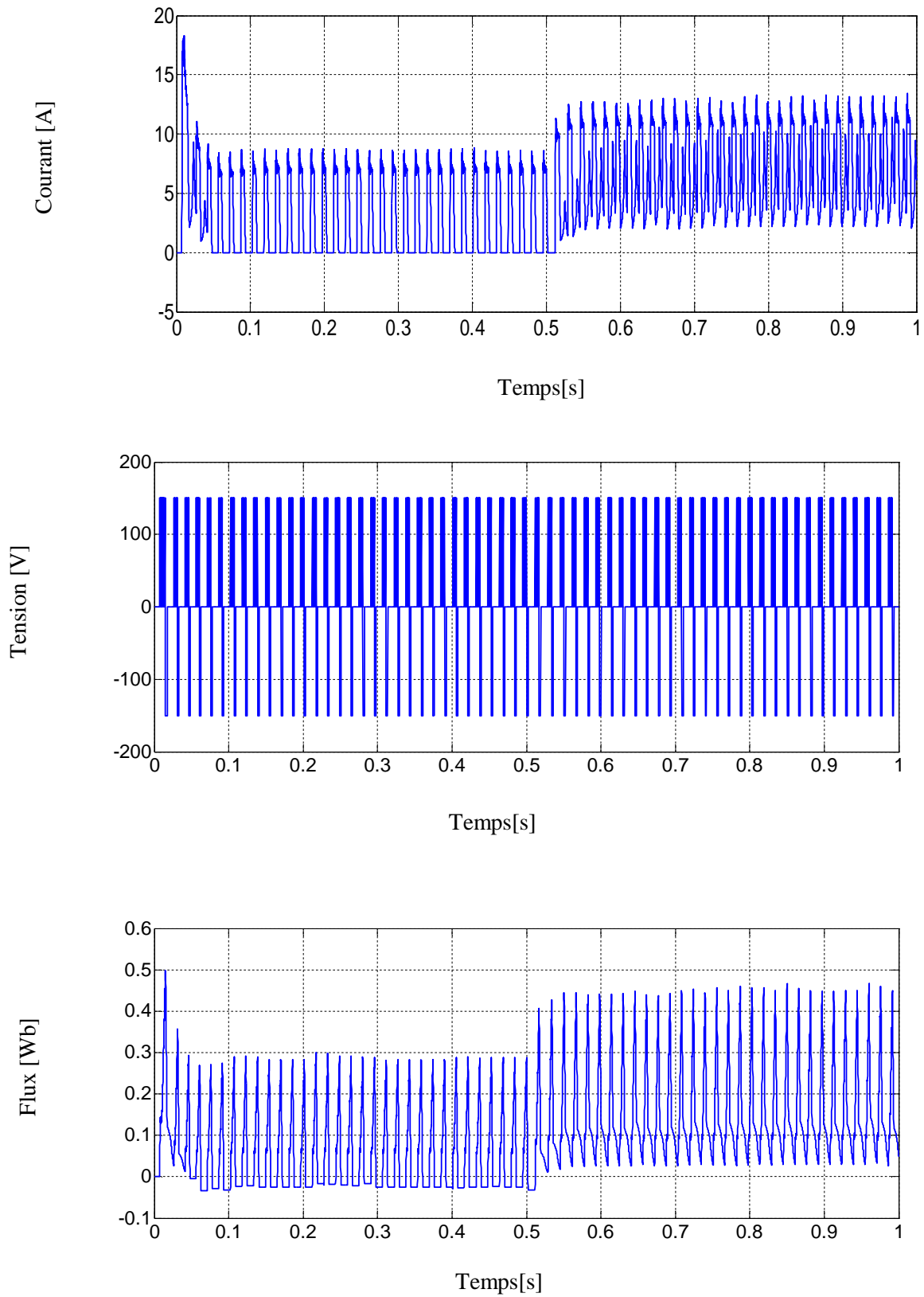
II.12.1 Résultats de simulation :

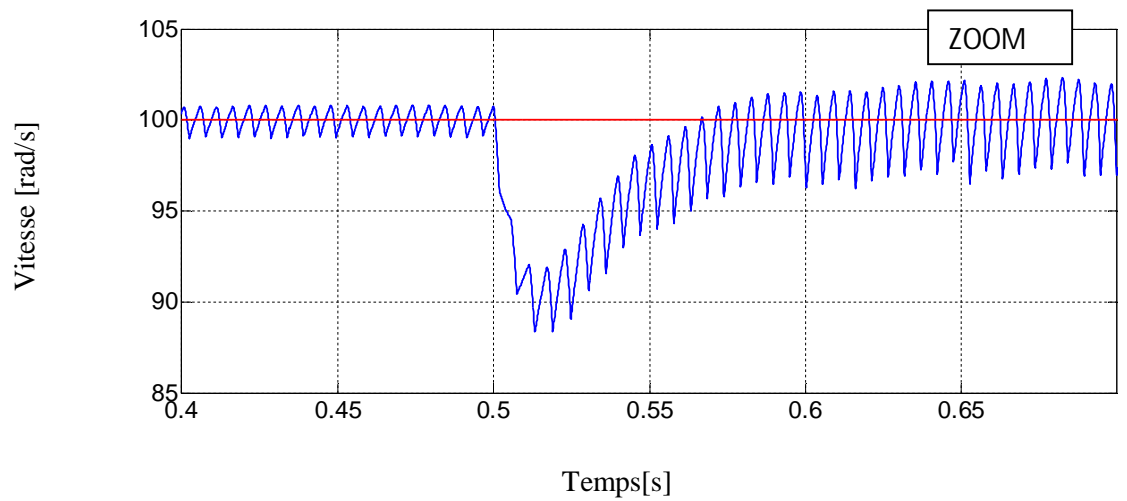
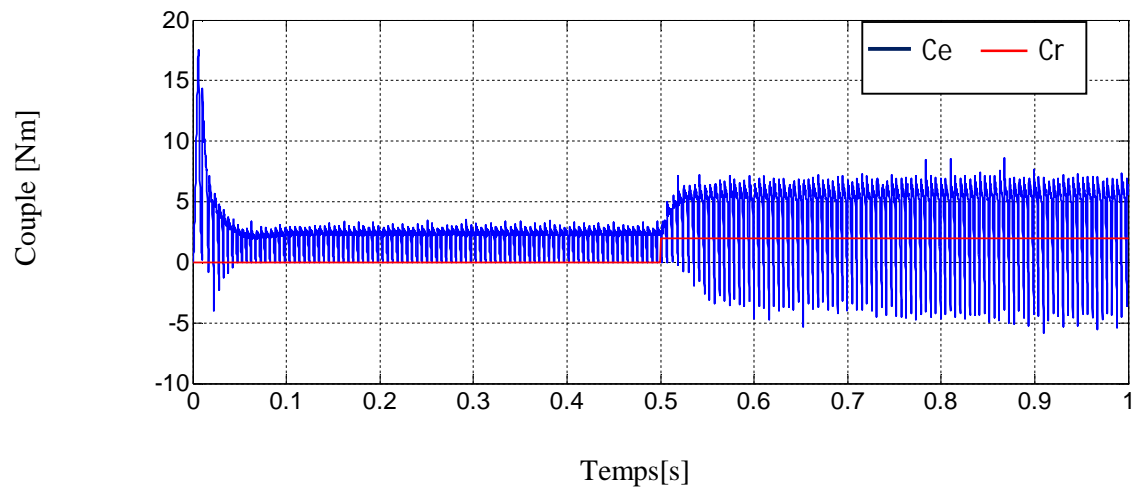
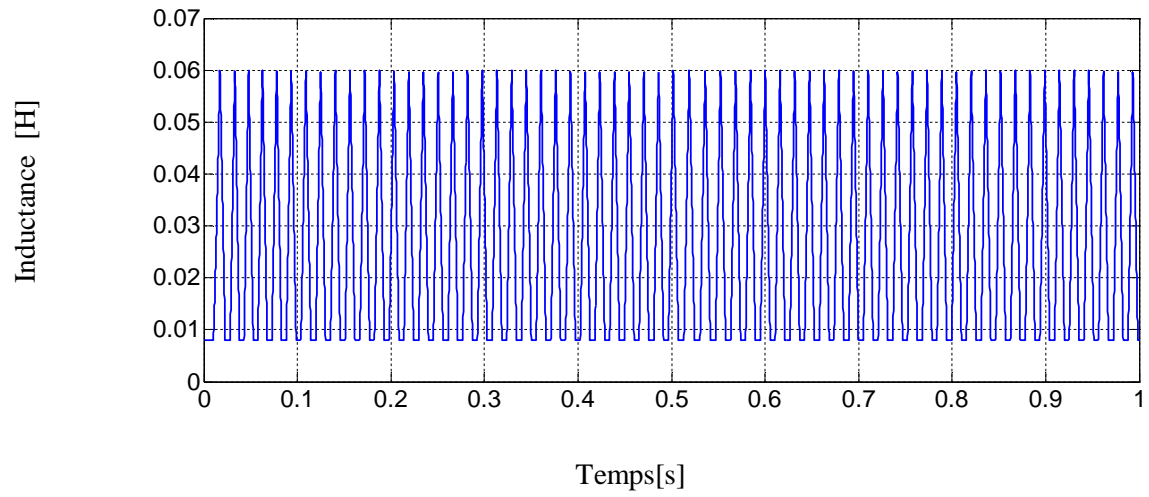
Les simulations reportées sur la figure (II.25) concernent l'application d'un échelon de vitesse de 100 rad/sec, puis nous avons introduit une charge de 2 N.m à l'instant $t = 0.5s$. Cet essai est fait avec un θ_{off} optimale vaut 35° .

Ces résultats montrent les performances de la régulation. On note une amélioration en régime dynamique. En effet, la vitesse est obtenue sans dépassement au bout d'un temps de 0.1s. Lors de l'application du couple de charge, on note un creux de vitesse. L'application de cette charge provoque une augmentation des ondulations présentées sur l'allure de la vitesse. Notons qu'on a utilisé un filtre pour la consigne de vitesse afin de modérer l'impact de sa variation brusque.

D'après la figure (II.25), nous pouvons observer que le courant, le flux et le couple augmentent à l'instant $t=0.5s$. Cette augmentation est due à l'application de la charge.







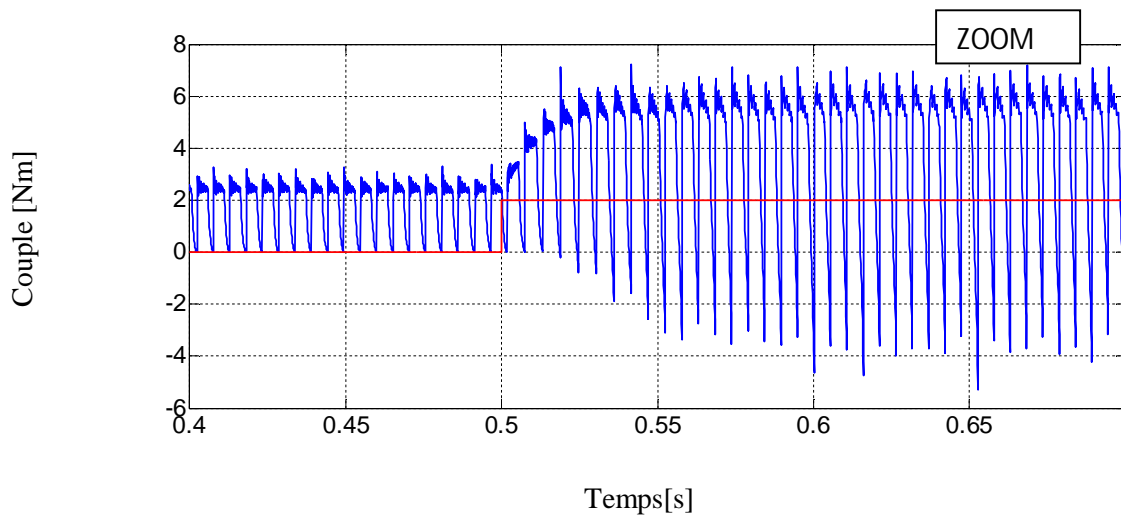


Figure II.25 Régulation de vitesse de la MRV par régulateur PI
(Démarrage à vide avec application de la charge)

La régulation de la vitesse est effectuée dans ce chapitre à travers l'utilisation du régulateur classique type PI. Les résultats obtenus sont acceptables. On a observé que l'application de la charge engendre des pulsations importantes sur l'allure du couple et de la vitesse de rotation. Il faut noter que notre difficulté réside principalement, dans le choix des paramètres du régulateur PI.

II.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait la description et la discussion détaillée de la simulation de la MRV. Nous avons vérifié que pour analyser avec précision les oscillations du couple, une étude de simulation utilisant son modèle linéaire n'est pas adéquate. Plusieurs simulations ont été réalisées afin d'étudier le comportement dynamique de la MRV.

Pour la validation du modèle, on a simulé les deux stratégies de commande, la commande en tension et celle à hystérésis. La commande en tension est plus adaptée aux grandes vitesses tandis que la commande à hystérésis est utilisée pour les moyennes et faibles vitesses.

La régulation de la vitesse est effectuée dans ce chapitre à travers l'utilisation du régulateur classique type PI. Les résultats obtenus sont acceptables. On a observé que l'application de la charge engendre des pulsations importantes sur l'allure du couple et de la vitesse de rotation. Il faut noter que notre difficulté réside principalement, dans le choix des paramètres du régulateur PI à cause de non linéarité du modèle.

Chapitre 3

Commande d'une GRV auto excitée

CHAPITRE III: Commande d'une GRV auto excitée

III.1 Introduction

En vue de répondre à des nouvelles exigences, nous constatons ces dernières années un engagement pour l'étude et la mise en application de convertisseurs électromécaniques d'énergie non-conventionnels dont la MRV fait partie pour ses multiples atouts (robustesse, simplicité de construction, faible coût, performances élevées).

La plupart des études sur ce type de machine ont surtout porté sur le mode de fonctionnement moteur alors que le mode générateur, assez marginal au début, commence à intéresser les chercheurs.

En effet, certains avantages offerts par la Génératrice à Réductance Variable en font une machine idéale pour certaines applications telles que le démarreur/générateur du moteur des avions, des automobiles ainsi que les générateurs associés aux turbines éoliennes. En plus, elle peut intervenir dans des conditions nécessitant un système de freinage régénérable telles que: les machines à laver, les volants d'inertie ou les voitures électriques hybrides.

Toutefois, la GRV est un système complexe, multi variable et très fortement couplée. Sa modélisation et son analyse ne sont donc pas aisées.

Ils existent plusieurs méthodes pour analyser le fonctionnement de la GRV, la référence introduit quelques modèles et fichiers.m sous environnement MATLAB pour construire le modèle mathématique et déterminer les courbes de magnétisation ; cette méthode est assez précise mais le temps de simulation est très élevé ; la référence présente une nouvelle méthode de modélisation qui combine les avantages des méthodes basées sur la simulation de circuit et la simulation d'équations différentielles. Dans ce modèle, le convertisseur de puissance, la source d'excitation, l'inductance du bobinage statorique, le générateur d'impulsions du convertisseur de puissance et le convertisseur d'angle ont été introduits par des fonctions MATLAB et les modèles de base de SIMULINK. Le modèle construit dans cette référence est très flexible, le temps de simulation très court et le travail présenté offre une nouvelle approche pour les caractéristiques de la GRV.

En nous inspirant de cette approche, nous avons établi dans ce chapitre le modèle théorique d'une GRV 6/4. L'étude a porté sur les caractéristiques électriques (courants, tensions), magnétiques (flux) et mécaniques (vitesse et couple) de la machine. Le modèle théorique sera

validé, par la suite, par une simulation sous MATLAB/SIMULINK. Comme application pratique de cette GRV 6/4, le fonctionnement de cette GRV sera autonome.

III.2 Eléments du système

Le système étudié se compose de la machine à réluctance variable, du convertisseur de puissance, d'un contrôleur et d'un capteur de position.

- La génératrice à réluctance variable
- Le capteur de position du rotor
- le convertisseur d'alimentation électrique
- le système contrôleur.
- Le système d'entraînement

III.3 Modèle de la GRV :

Pour la génératrice à réluctance variable, il y a trois types de modèles d'inductance : le modèle linéaire, le modèle quasi-linéaire et le modèle non-linéaire, Dans ce travail il nous suffit d'étudier les caractéristiques de la GRV selon le modèle linéaire d'inductance [32].

III.4 Alimentation de la GRV :

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).

L'alimentation de la génératrice à réluctance variable se fait par un convertisseur de puissance triphasé en demi-pont asymétrique [28][32][53].

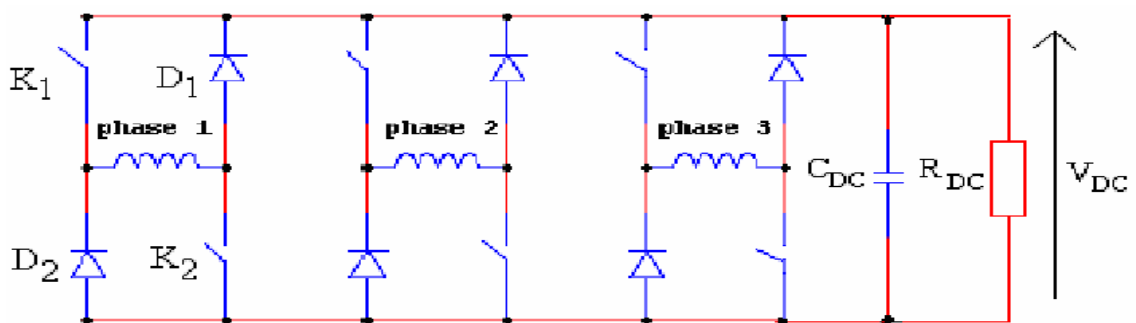


Figure III.1 Convertisseur triphasé en demi-pont asymétrique [32].

III.5 Principe de fonctionnement :

Sachant que l'expression du couple électromagnétique à courant constant est :

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta_m} \quad (\text{III.1})$$

Où L est l'inductance, i le courant et θ_m la position relative des dentures rotor-stator.

L'alimentation de la machine lors de la phase croissante ou décroissante d'inductance

Donnera le régime de fonctionnement souhaité (Fig.III.2):

- ✚ Moteur ($T_e > 0$) sur la phase croissante de l'inductance ($\frac{\partial L}{\partial \theta_m} > 0$)
- ✚ Générateur ($T_e < 0$) sur la phase décroissante de l'inductance ($\frac{\partial L}{\partial \theta_m} < 0$).

La FEM d'expression

$$E = \Omega \frac{\partial \Psi}{\partial \theta_m} = \Omega_i \frac{\partial L}{\partial \theta_m} \quad (\text{III.2})$$

E est négative en fonctionnement générateur ($\frac{\partial L}{\partial \theta_m} < 0$).

Quand les interrupteurs (K1, K2) sont fermés (magnétisation de la GRV), la tension appliquée à la phase 1 est $V = +V_{DC}$, V_{DC} est la tension du bus continu.

Lorsque ces interrupteurs sont ouverts et que les diodes (D1,D2) conduisent, la tension appliquée s'inverse et devient $V = -V_{DC}$ (génération de la GRV).

Le principe de fonctionnement en mode générateur étant assez simple, sa complexité réside au niveau de la commande du convertisseur associé. En effet, les séquences d'allumage (θ_{on}) et d'extinction (θ_{off}) des interrupteurs doivent être bien synchronisées avec les positions relatives des dents rotor-stator (nécessité d'un capteur de position), lors des phases d'excitation et de génération.

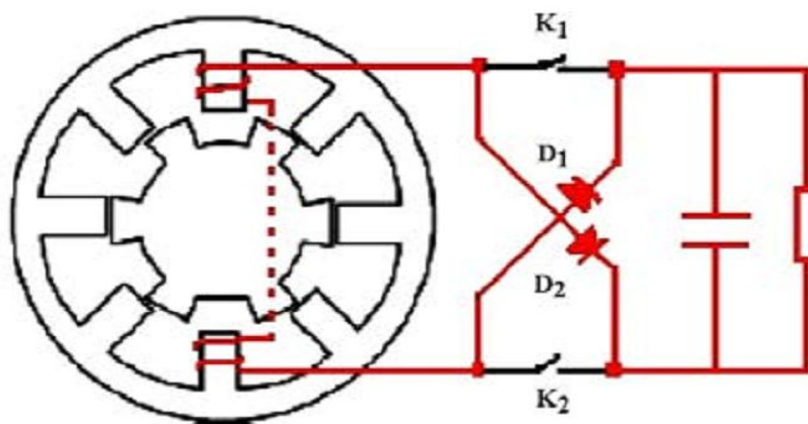


Figure III.2 Phases de magnétisation de la GRV [32][53].

Le rotor de la génératrice à réluctance variable est entraîné par un moteur principal. La position du rotor peut être obtenue par un capteur de position. Le contrôleur générera les signaux de commande selon l'information sur la position du rotor. Les signaux de commande des interrupteurs (type IGBT) du convertisseur de puissance assureront les phases de magnétisation et de génération de l'énergie électrique.

La commutation de l'enroulement du stator est réalisée à l'aide d'un contrôleur, où dans notre modélisation on va utiliser le système de contrôle (entraînement) qui est présenté dans la (figure III.3).

Dans notre machine GRV on va utiliser le système qui est présenté dans la figure III.3 , cette figure base sur un système auto-excité par un condensateur ou bien une batterie, selon les caractéristiques de système d'excitation on a une tension référence (V_{DC}^*) comme consigne, à partir de la comparaison entre V_{DC}^* et la tension mesurée V_C et avec un régulateur proportionnelle intégrale (PI), on trouve le courant de référence i_{ref} qui doit être obtenu par la GRV pour avoir un courant mesuré adopté avec le système d'excitation[30].

III.6 Système auto-excité de la GRV

Dans ce cas, une seule capacité est suffisante pour que la génératrice puisse fournir la puissance nécessaire à la charge, ce qui permet de réduire le coût total du système. Cependant, en cas de défaut dans la phase où le condensateur est connecté, ou encore dans le condensateur lui-même, la machine se démagnétise vu l'absence d'une autre source d'énergie réactive. Par ailleurs, cette configuration induit forcément des courants statoriques déséquilibrés.

Le contrôleur à hystérésis du courant est utilisé pour les basses et les moyennes Vitesses parce qu'on a assez de temps pour être capable de contrôler le courant de la phase, ce qui permet aussi d'utiliser ce mode du contrôle aux basses et moyennes vitesses

A vide, les tensions statoriques aux bornes des condensateurs constituent également des inconnues. Par conséquent, il faut tenir compte des équations du circuit électrique extérieur. Ces dernières peuvent s'écrire en fonction des capacités d'excitation sous la forme matricielle suivante :

$$\frac{d}{dt}V_C = \begin{bmatrix} \frac{1}{c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{c} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

Dans le cas de la présence d'une charge équilibrée, cette relation matricielle est modifiée pour tenir compte des courants dans la charge et devient alors :

$$\frac{d}{dt}V_c = \begin{bmatrix} \frac{1}{c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{c} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a - i_{ch a} \\ i_b - i_{ch b} \\ i_c - i_{ch c} \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

III.7 Simulation de la GRV :

Avant de commencer la simulation de la GRV en choisissant la position initiale du rotor, qui ne doit pas être dans la zone où l'inductance L a une valeur constante car le couple serait nul.

Quand le couple résistant de la charge est nul, la variable θ , correspondant à la position du rotor, n'évolue pas et la machine serait arrêtée tout le temps. Pour notre machine particulière, un angle initial θ été choisi, pour éviter ce cas de couple de charge nul.

III.7.1 Description du modèle élaboré :

La figure (III.3) représente le modèle complet de simulation d'une GRV 6/4.

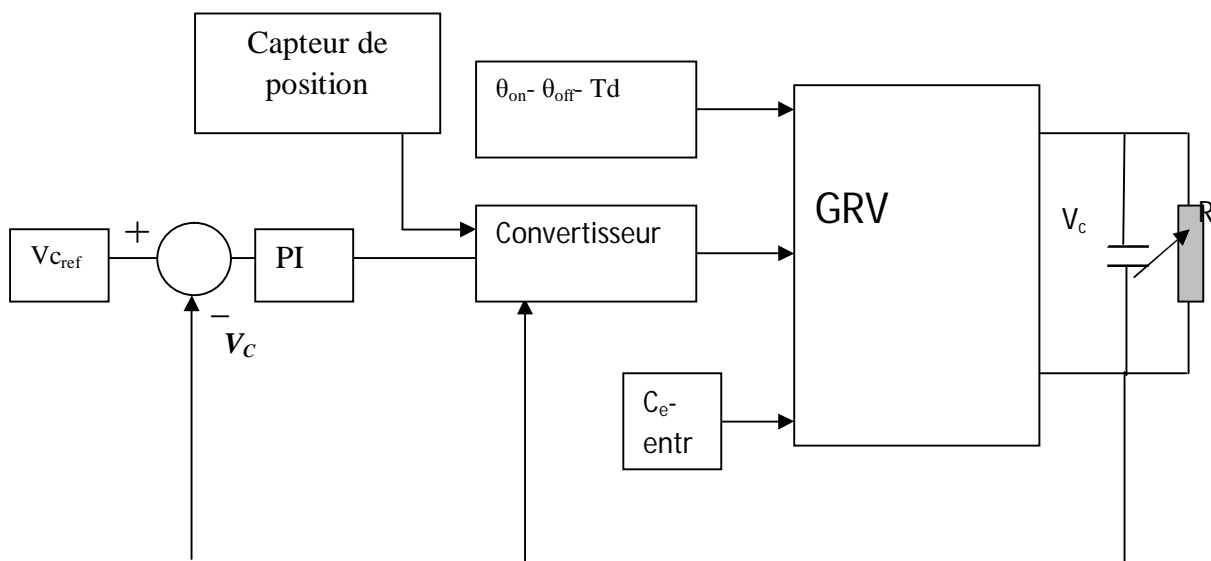


Figure.III.3 principes de régulation de la tension du bus continu de GRV

Comme mentionné dans la figure ci-dessus, le modèle complet de simulation pour la GRV avec un système auto-excité pour savoir leur comportement.

La Figure (III.4) représente l'inductance en position de 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 90° , la valeur maximale de l'inductance est de 0.06 H.

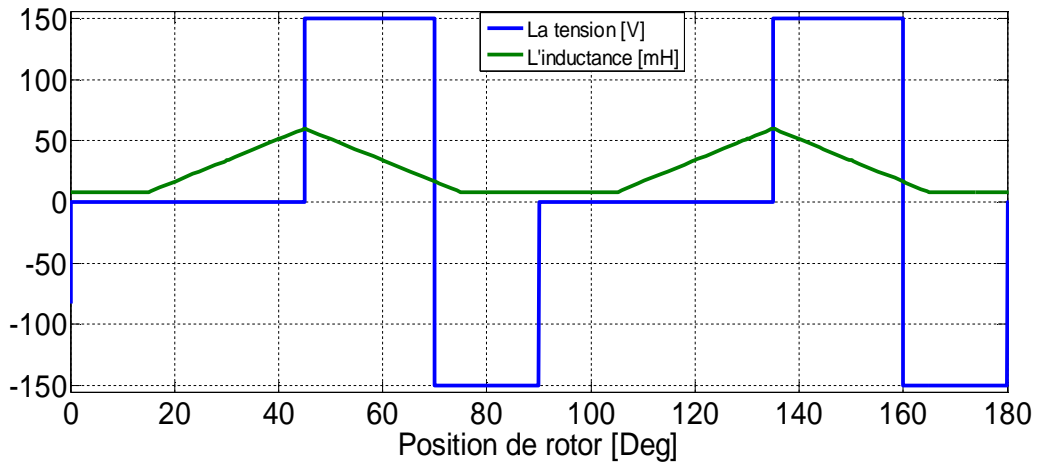


Figure.III.4 La position de la tension par rapport à l'inductance.

III.7.2 Résultats de simulation de la GRV :

Dans cette section, nous vérifierons le fonctionnement du modèle en le simulant pour deux Conditions de fonctionnement.

La figure (III.5) montre le modèle du système complet réalisé dans Simulink/Matlab.

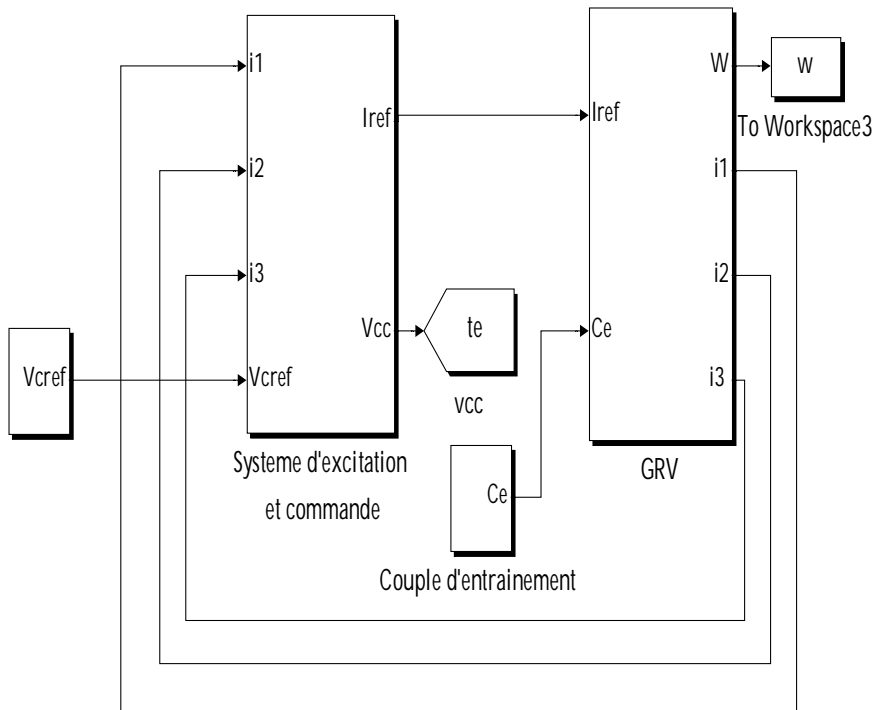


Figure.III.5 Schémas blocs globale de simulation

III.7.3 Fonctionnement sur charge résistive constante :

Grâce au programme de simulation élaboré, nous avons pu tracer l'évolution des différentes grandeurs électriques et mécaniques avec variation de la tension de référence et sous une charge résistive de 20Ω .

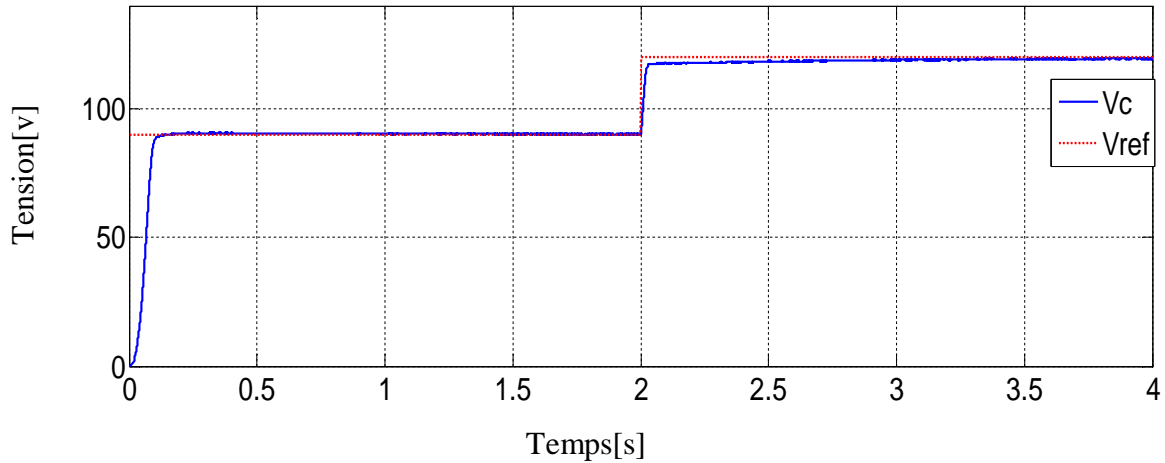


Figure.III.6 La tension du bus continu.

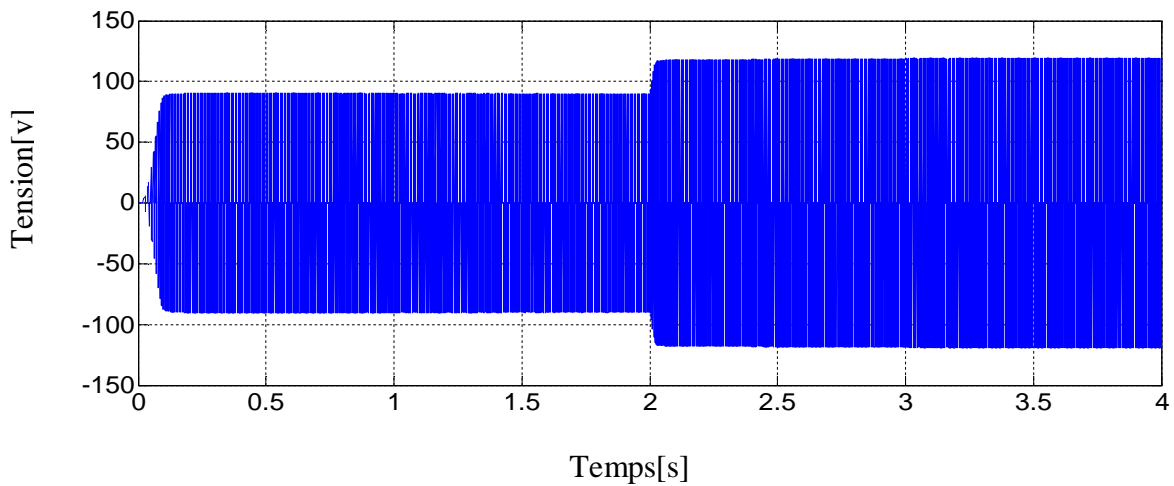


Figure.III.7 La tension de la phase A.

La Figure (III.6) montre la tension à la borne de la capacité qui est réglée selon la tension référence, La Figure (III.7) montre la tension du côté AC du convertisseur de puissance (phase A) C'est un créneau de tension variant entre $-V_{DC}$ et $+V_{DC}$ selon la valeur de système auto-excité. Le niveau est obtenu lors de la conduction des IGBT K1 et K2 (phase de magnétisation), tandis que le niveau $-V_{DC}$ est obtenu lors de la conduction des diodes D1 et D2 (phase de génération).

La Figure (III.8) représente les courbes de l'inductance de la phase A.

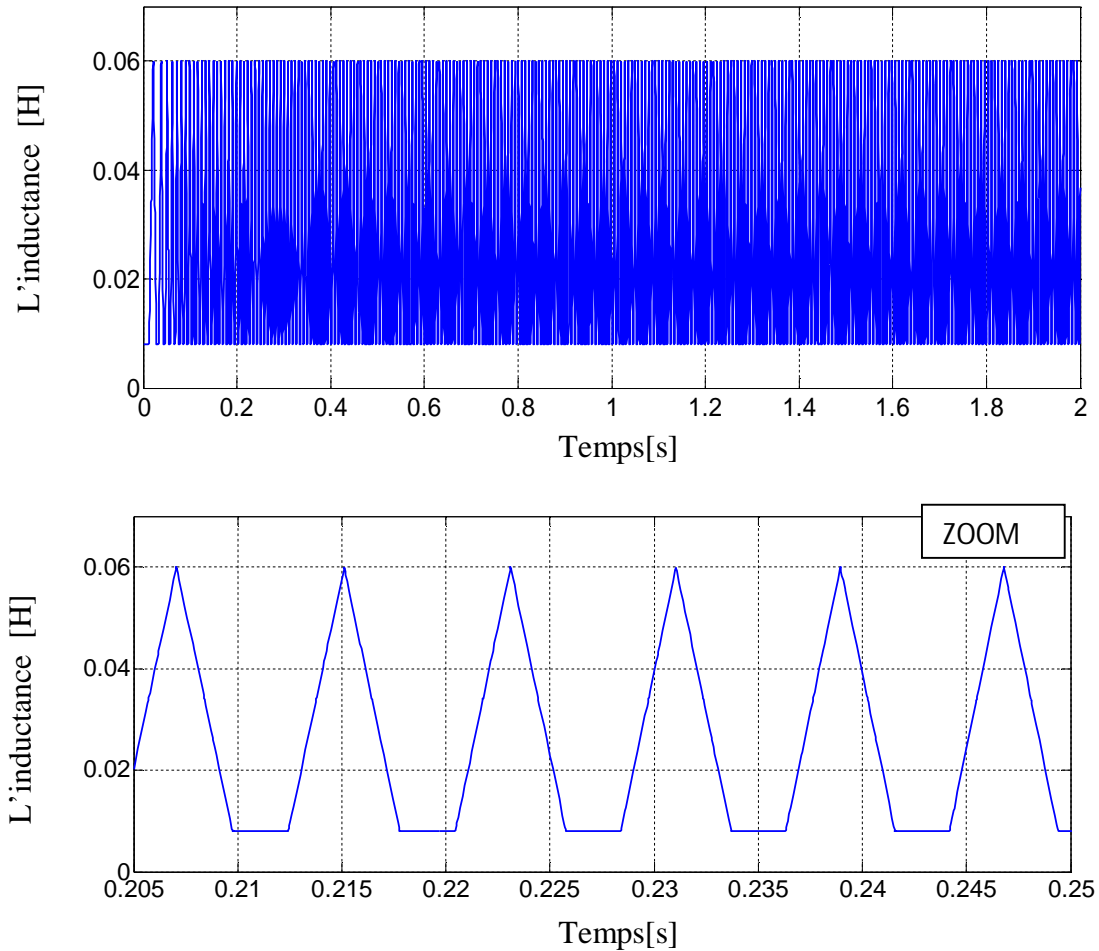


Figure.III.8 L'inductance de la phase A.

Dans la Figure (III.9) on illustre l'allure du courant statorique de la machine (phase A). Le courant croît jusqu'à 8A. A l'instant $t=2s$, le courant devient 10 A parce que la tension a augmenté. L'allure est semblable à celle qu'on a l'habitude de rencontrer dans la littérature.

Nous savons que le décalage entre IA et IB est θ_s , donc décalé par $t= \theta_s/\Omega$, et un décalage de $2\theta_s$ est relevé entre IA et IC. 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.

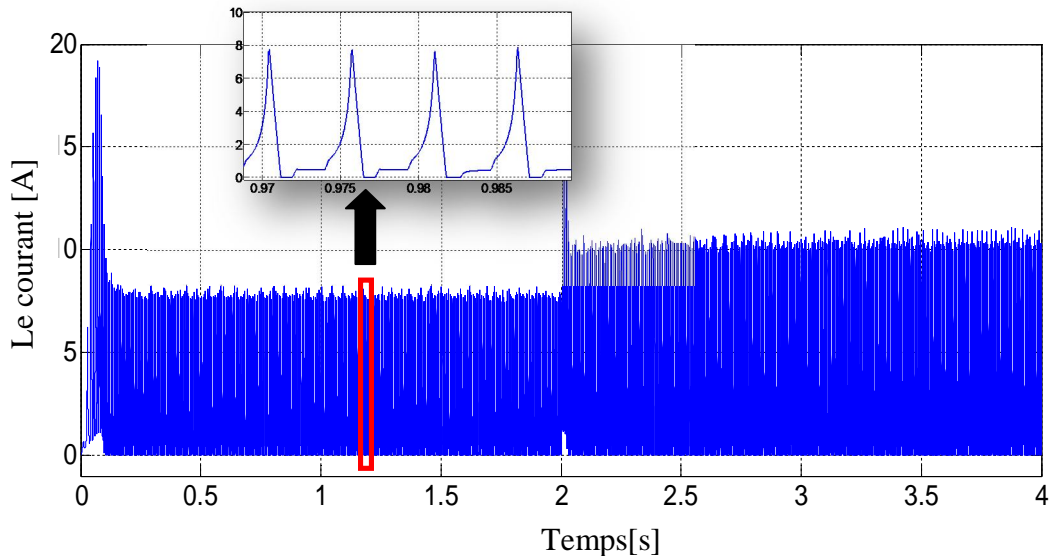
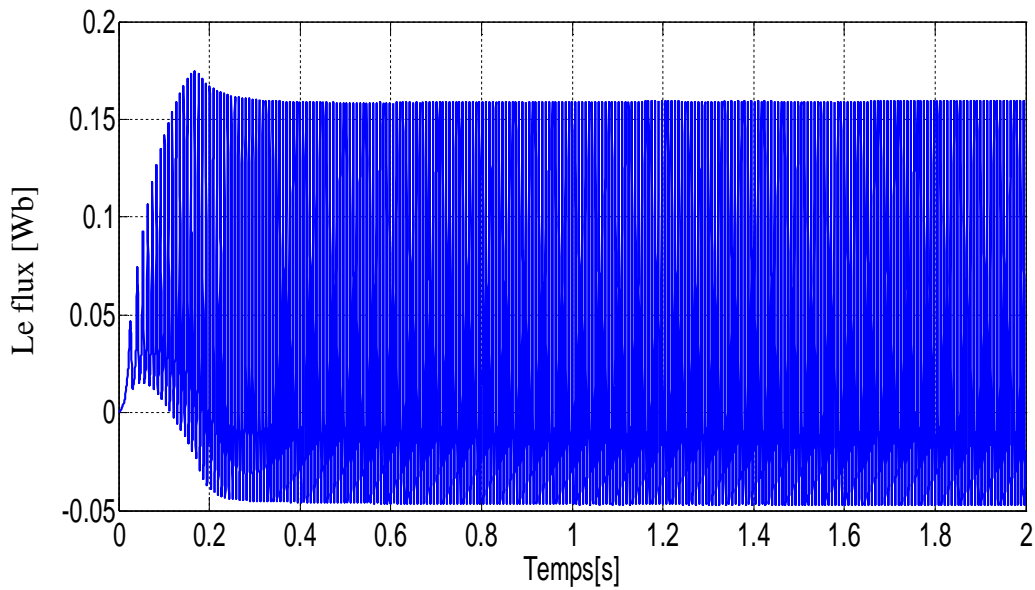


Figure.III.9 Le courant de la phase A.

Dans la Figure (III.10) on montre l'allure du flux statorique de la machine en fonction de temps. Le flux croît jusqu'à un maximum de 0.16Wb, puis décroît et devient nul, et après un certain temps il reprend la croissance (comme pour le cas du courant).



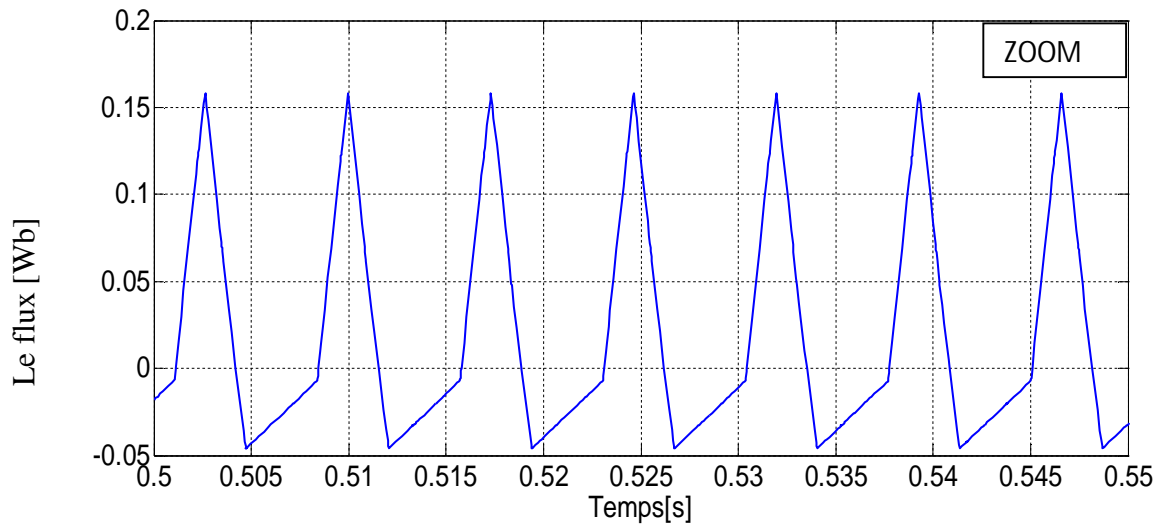


Figure.III.10 Le flux de la phase A.

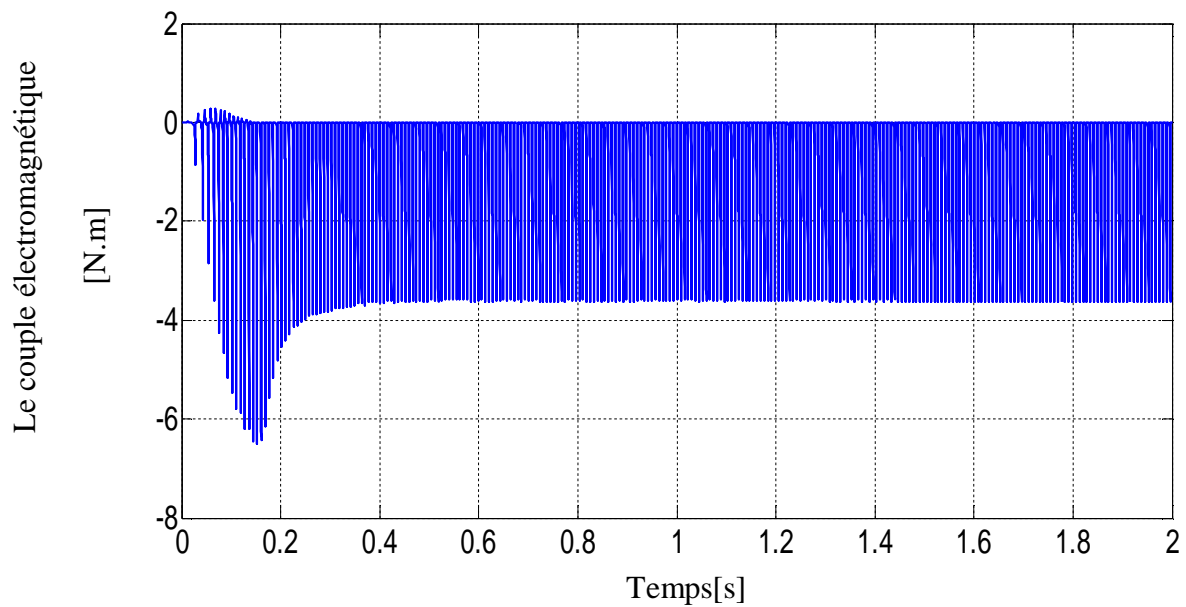


Figure.III.11 Le couple électromagnétique de la GRV.

Dans la Figure (III.11) on illustre l'allure du couple électromagnétique de la machine. C'est une courbe qui oscille autour d'une valeur moyenne négative.

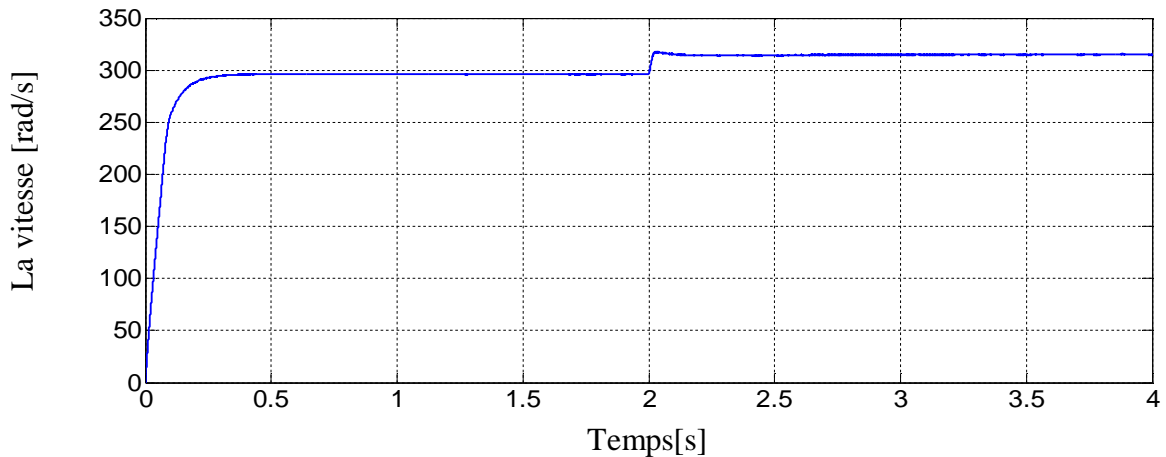


Figure.III.12 La vitesse de la GRV.

La vitesse est montrée dans la Figure (III.12), alors on a ici la vitesse est augmentée dans l'instant de $t=2s$ ceci évidemment parce que le courant électrique déjà augmenté.

III.7.4 Fonctionnement sur bus continu fixée

En vue de vérifier le bon fonctionnement de ce régulateur, l'essai suivant est réalisé:

- La valeur de référence de la tension du bus continu est fixée à 100 V
- la couple d'entraînement variable

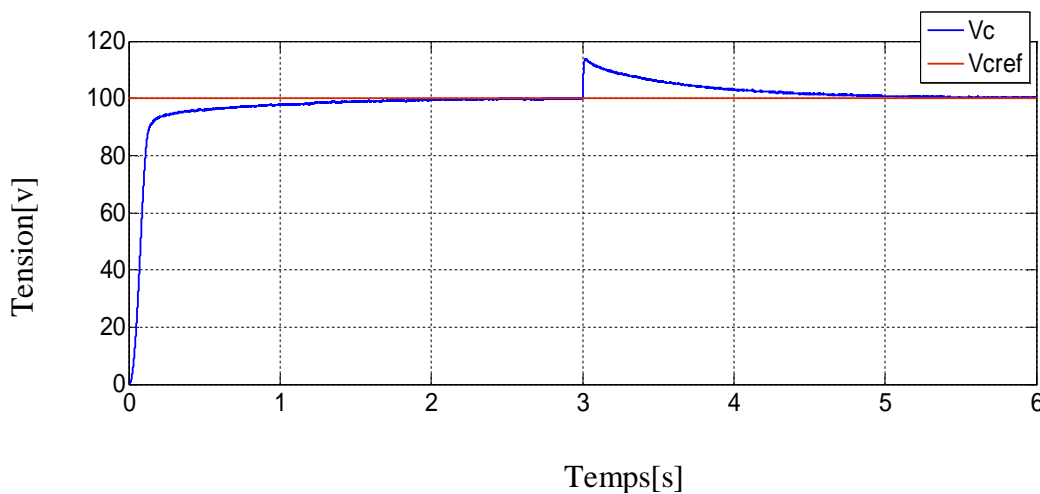


Figure.III.13 La tension de la buse continue.

La Figure (III.13) montre la tension à la borne de la capacité qui est restée constante comme la tension référence, La Figure (III.14) montre la tension du côté AC du convertisseur de puissance (phase A). C'est un créneau de tension variant entre $-V_{DC}$ et $+V_{DC}$, grâce au régulateur PI, la valeur de la tension revient toujours à la valeur référence lors de la variation de couple d'entraînement.

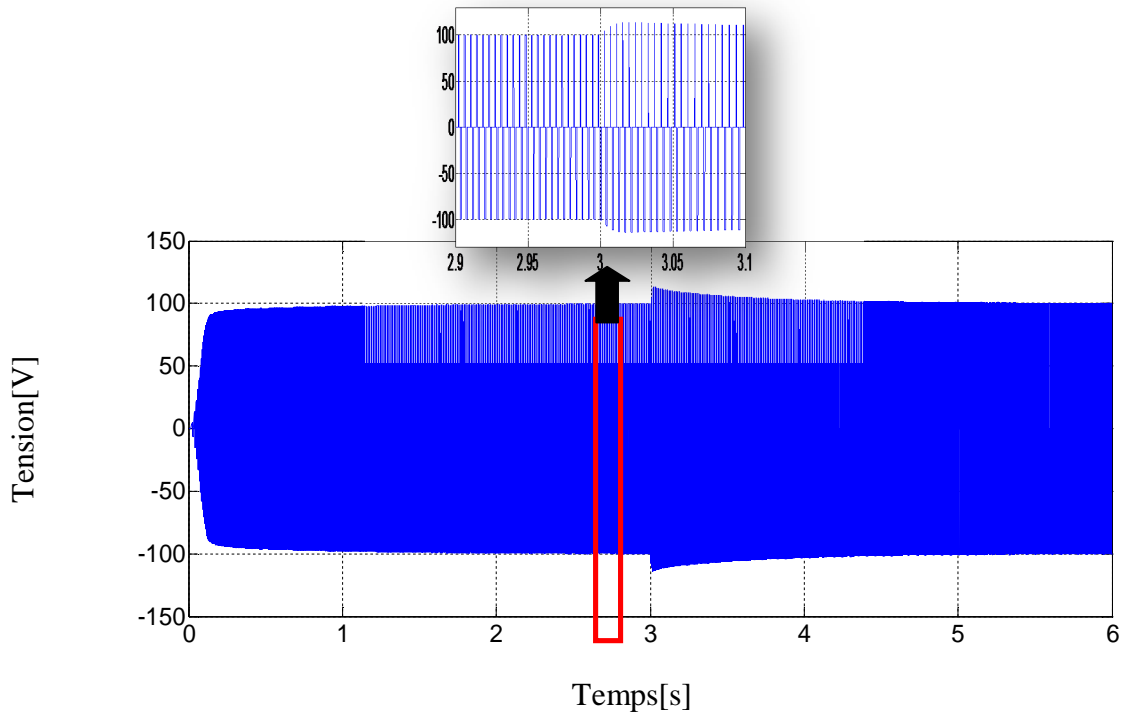


Figure.III.14 La tension de la phase A.

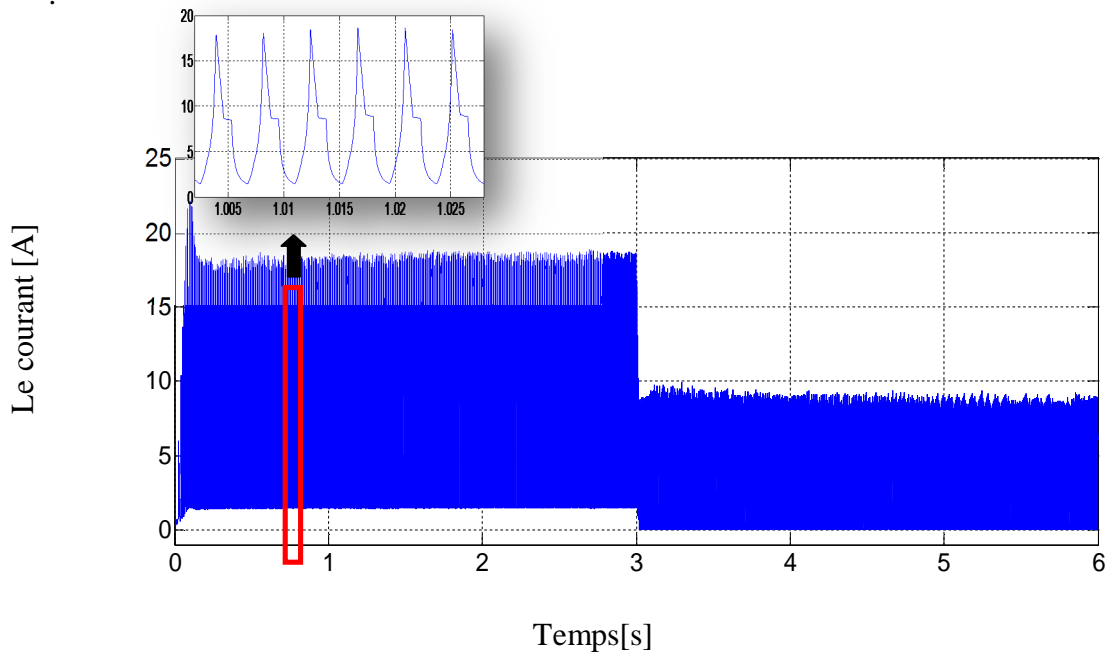


Figure.III.15 Le courant de la phase A.

La Figure (III.15) présente l'allure du courant statorique de la machine (phase A) où on a remarqué que le courant diminue de 17 A jusqu'à 9A après l'instantané $t=2$ s parce que le couple d'entraînement est augmenté c'est-à-dire l'augmentation de puissance absorbée.

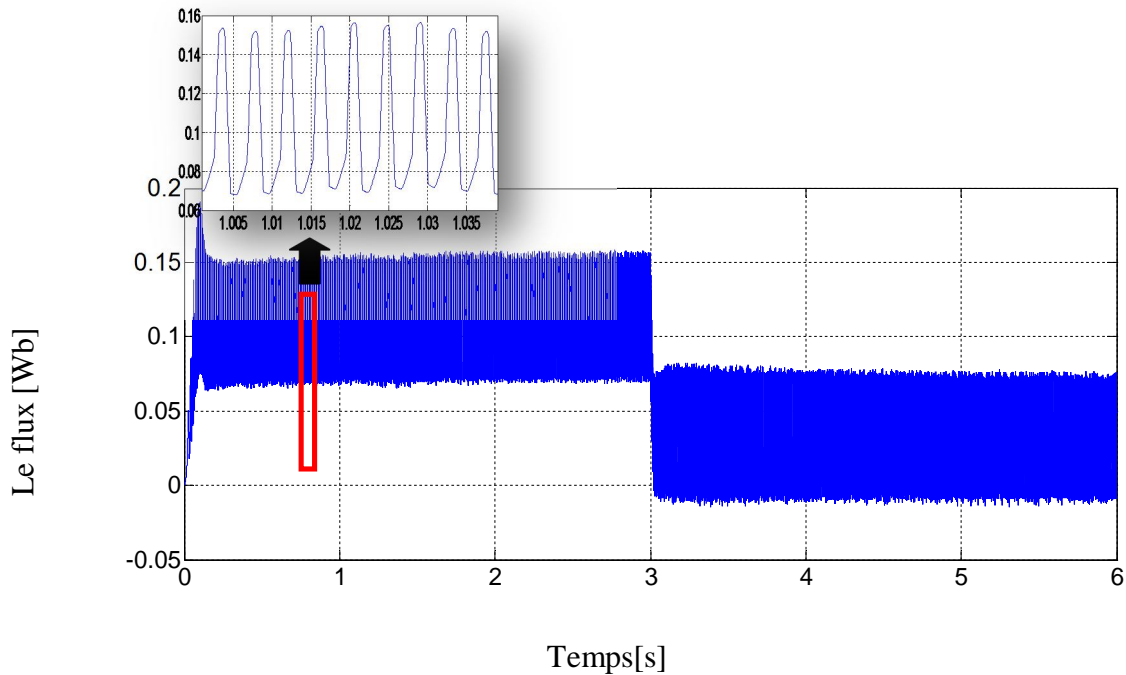


Figure.III.16 Le flux de la phase A.

La Figure (III.16) montre l'allure du flux statorique de la machine en fonction de temps. Au début, le flux était avec une grande valeur (0.15Wb) par contre après la diminution du couple d'entraînement cette valeur est décroissante jusqu'à 0.07Wb, aussi nous savons que le flux est proportionnel avec le courant électrique donc évidemment la même influence avec la variation de courant.

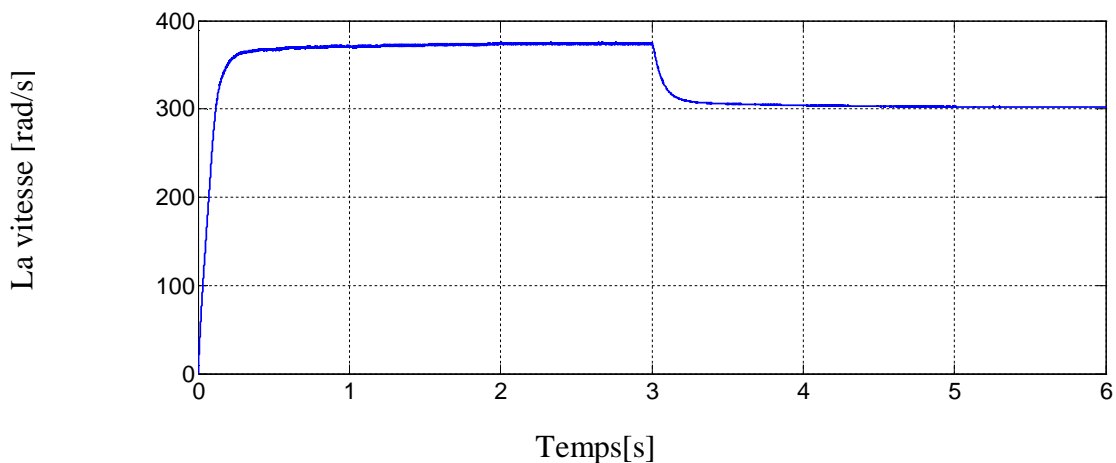


Figure.III.17 La vitesse de la GRV.

Il est naturel que la vitesse diminue comme présenté dans la Figure (III.17), cela est dû à une baisse du couple d'entraînement, ceci est démontré avec l'équation mécanique du système. Les résultats de simulation de ces deux points de fonctionnement confirment le bon fonctionnement du modèle du système GRV.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait la description et la discussion détaillée de la modélisation et la simulation de la machine à réluctance variable en mode générateur.

Plusieurs simulations ont été réalisées afin d'étudier le comportement dynamique de la GRV. Nous avons aussi étudié l'influence de la variation de vitesse et la tension du bus continu sur le courant à paramètre bien défini, par ce dernier la diminution de la vitesse engendre un accroissement au niveau du courant. Nous avons en outre montré que ce courant est aussi influencé par la durée de conduction des interrupteurs, pour une durée de conduction suffisante le courant prend des valeurs importantes.

Chapitre 4

*Association de la
GRV à une
turbine
éolienne à vitesse
variable*

Chapitre IV : Association de la GRV à une turbine éolienne à vitesse variable

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons développer l'association de la turbine avec la GRV qu'on a étudié dans la partie précédente, c'est à dire avec le système d'excitation, pour savoir l'importance de la variation de courant électrique avec la variation de vent. C'est-à-dire les influences de la vitesse mécanique de la turbine. Puis nous allons lier la GRV à un réseau passif.

IV.2 Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome :

Dans la plupart des régions isolées et ventées, l'énergie éolienne constitue la principale source potentielle d'énergie électrique. La baisse continue des prix des aérogénérateurs et les développements technologiques de l'électronique de puissance, conjugués aux incitations gouvernementales, conduisent à une utilisation d'éoliennes autonomes de plus en plus courante dans ces régions isolées. La variabilité et les fluctuations des ressources (vent) ainsi que les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières, qui ne sont pas forcément corrélées avec les ressources, constituent encore des limitations à une exploitation plus large. La conception des petits systèmes éoliens est considérablement différente de celles des éoliennes connectées aux grands réseaux. En effet, le but de l'utilisation de ces petits systèmes n'est pas toujours la recherche de la conversion maximale de puissance éolienne mais la production de la quantité d'énergie électrique adéquate alliée à un prix d'installation et de maintenance le plus faible.

De ce fait, la plupart des systèmes éoliens isolés privilégient l'utilisation de générateurs asynchrones à cage de par leur faible coût, leur robustesse et leur standardisation.

Ces derniers sont souvent associés à une batterie de condensateurs qui fournit la puissance réactive nécessaire à leur magnétisation.

IV.3 Machines à reluctance variable applications en conversion d'énergie éolienne :

Quelques travaux ont également concerné l'utilisation de la machine à réluctance variable pour des applications en conversion d'énergie éolienne. Cette structure a un stator dont la structure avec des bobinages simples. Son rotor est saillant et peut être muni d'une cage d'écureuil qui permet d'assurer le démarrage direct sur le réseau et d'améliorer la stabilité de fonctionnement au synchronisme. Comme la machine asynchrone, cette structure absorbe de la

puissance réactive pour sa magnétisation et dans sa version classique, son facteur de puissance est relativement faible qui limite son domaine d'application à quelques dizaines de kilowatts. Néanmoins, la cage d'amortisseurs n'étant pas obligatoire, son coût de fabrication peut être très attractif dans une utilisation en éolienne autonome.

Le fonctionnement de GRV est très proche de celui d'une machine asynchrone à cage. Par conséquent, elle peut être utilisée en autonome débitant sur un banc de capacités en parallèle à la charge ou encore sur un redresseur à MLI.

IV.4. Description générale de l'ensemble GRV-turbine éolienne :

Les réserves de combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel s'épuisent avec le temps et polluent l'environnement. Il faudrait donc penser au développement et à l'utilisation d'autres énergies propres et renouvelables (green power). Parmi ces sources alternatives, l'énergie éolienne fait l'objet d'une application de notre système de conversion électromécanique dans cette partie (cf. Chapitre I).

La MRV est naturellement adaptée à la basse vitesse car la vitesse de rotation est directement liée au nombre de dents du rotor, La structure de la MRV dite «pure» est très simple et composée d'un rotor passif et d'enroulements concentriques au stator. Pour un grand nombre de dents, les dents du stator sont regroupées en plots afin de faciliter le bobinage de la machine, on obtient alors une machine à plots dentés. C'est le principal avantage de cette structure pour assurer le fonctionnement basse vitesse (grand nombre de dents) tout en conservant un bobinage réalisable en utilisant une MRV à plots dentés. La structure robuste de la GRV permet de l'utiliser dans une éolienne.

Le schéma de l'association de la GRV à une turbine éolienne est illustré dans la Figure (IV.1).

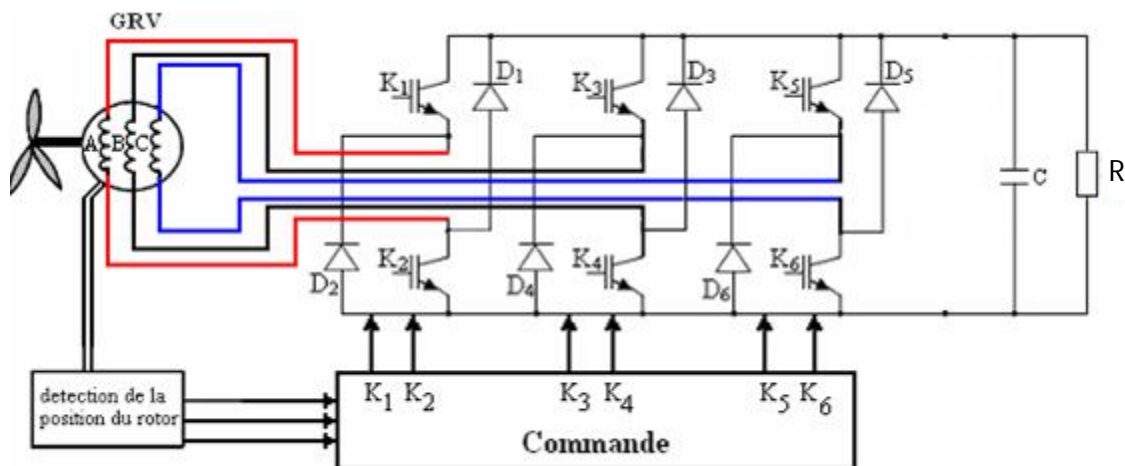


Figure. IV.1 Association d'une GRV et d'une turbine éolienne avec une charge résistive.

IV.4.1 simulation l'ensemble GRV-turbine éolienne :

L'étude que nous menons dans la dernière étape consiste à intégrer le modèle de la GRV dans un dispositif éolien. D'où la tension débitée par le générateur éolien est proportionnelle à la vitesse du vent.

La Figure (IV.2) représente le modèle global de simulation du bloc GRV-Turbine.

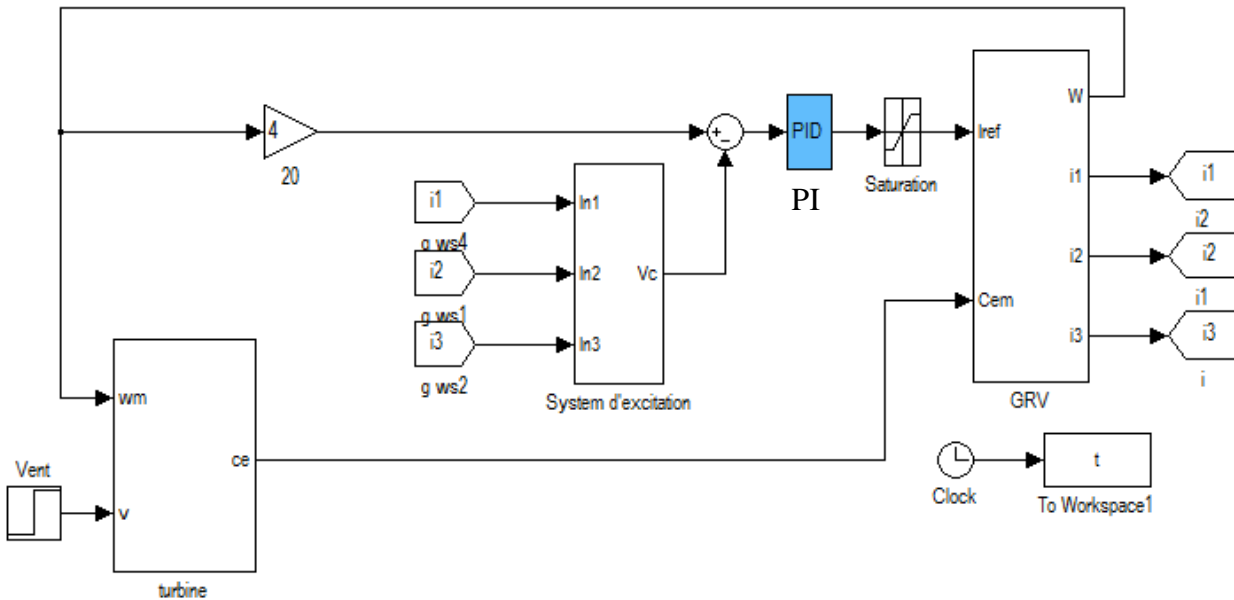


Figure. IV.2 Modèle de simulation de l'association GRV-Turbine éolienne.

IV.4.2 Résultats de simulation :

Pour la simulation de l'association GRV-turbine éolienne, on a considéré la vitesse de la turbine est variée selon deux niveaux.

Dans ce cas, on a proposé la vitesse du vent en fonction du temps comme la figure (IV.3) qui a présenté ci-dessous.

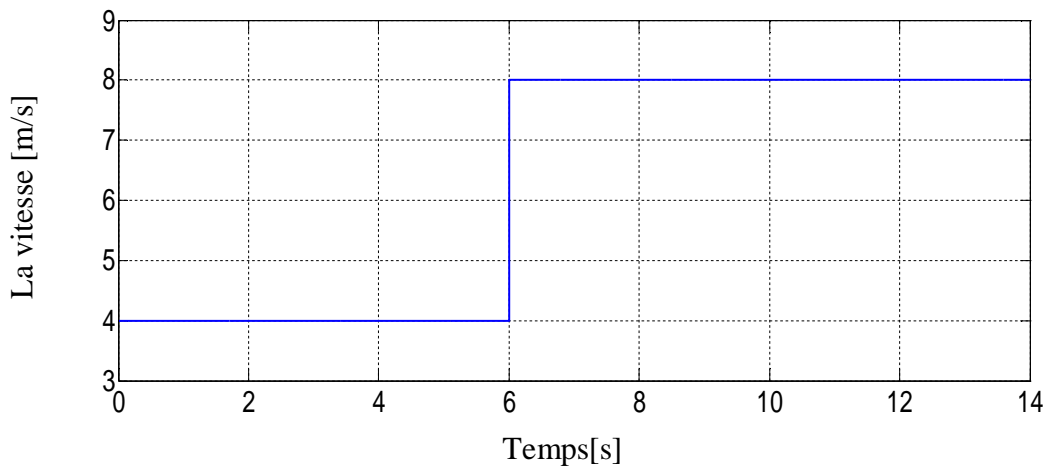


Figure. IV.3 La vitesse de vent (m/s)

Alors, la nouvelle allure de la vitesse mécanique de la turbine est indiquée dans la figure (IV.4). Après l'instant $t=4s$, la courbe devient autour de 30 rad/s cependant la vitesse égale 62 rad/s après l'instant $t=7s$, donc, l'augmentation de vitesse est évidente parce que la vitesse de vent a augmenté où la puissance générée par la turbine a aussi augmenté.

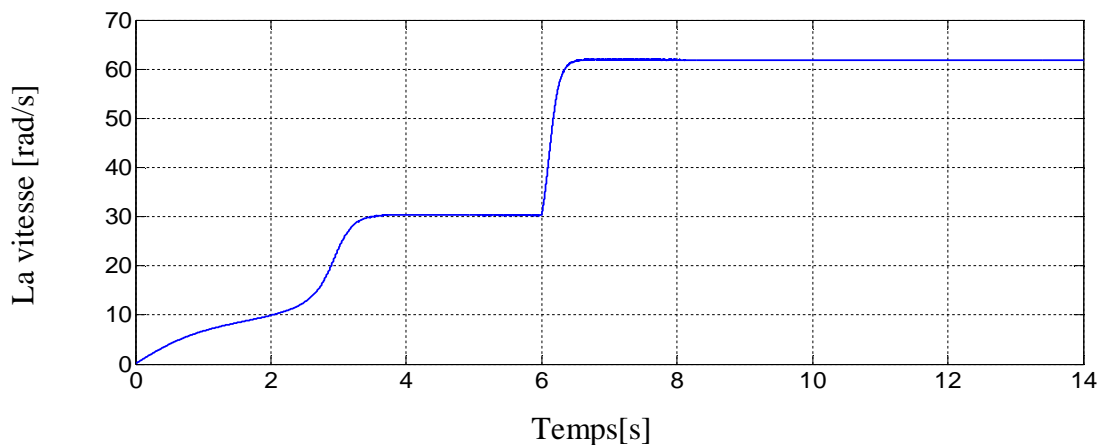


Figure. IV.4 La vitesse de la GRV.

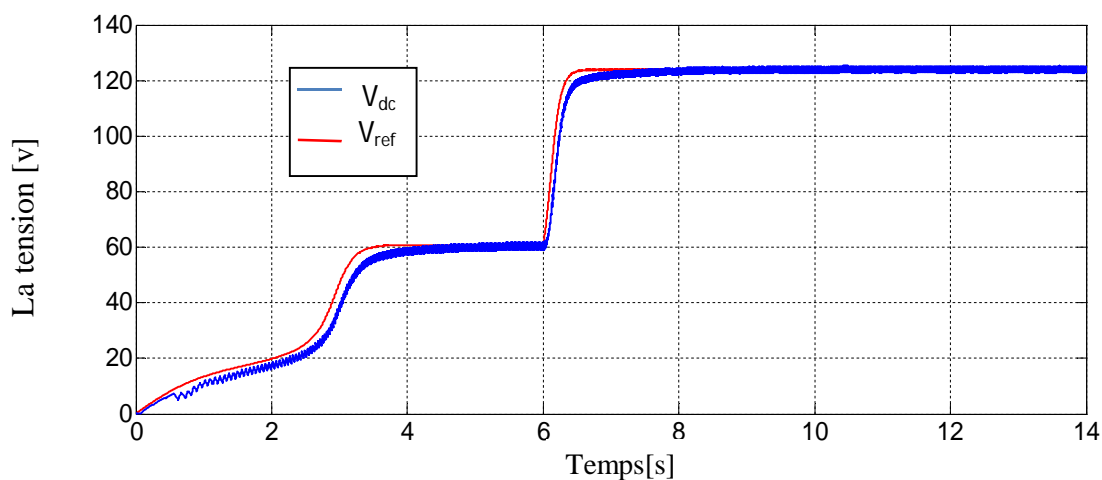
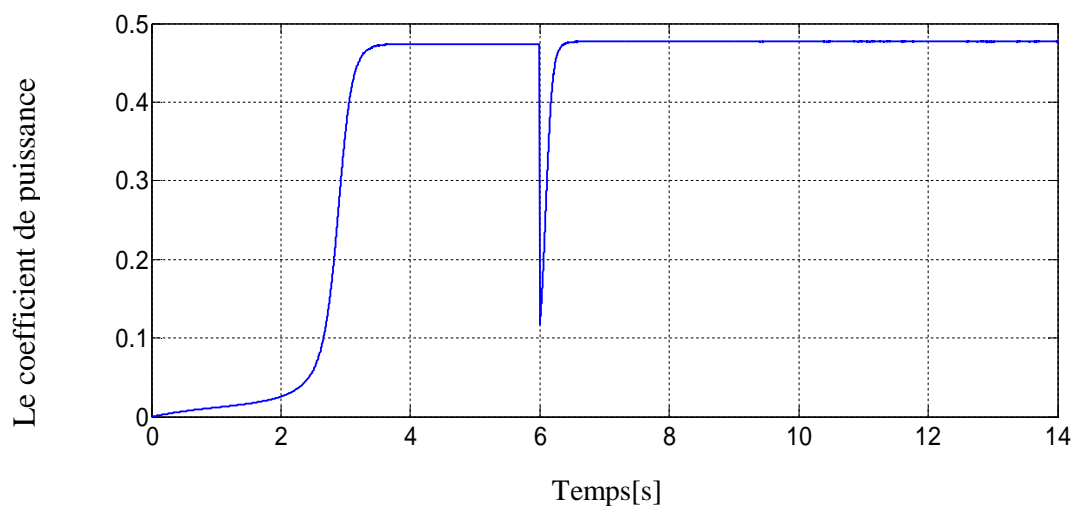
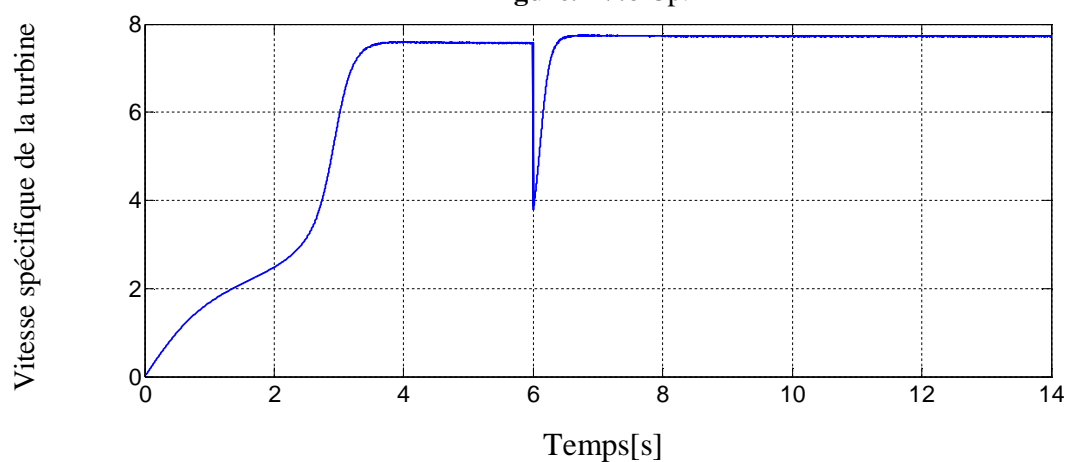


Figure. IV.5 La tension du bus continu

Dans la figure suivante Figure (IV.5) la tension de l'alimentation à partir du système d'excitation, on a ici le réglage de la tension est varié selon la variation de la vitesse ceci pour assurer le courant de référence adapté avec la puissance générée par la turbine.

**Figure. IV.6** Cp.**Figure. IV.7** Lambda.

À partir des résultats illustrés sur les figures Figure (IV.6) et Figure (IV.7) on constate que la courbe de la grandeur mécanique (c_p, λ) de la turbine est bien suivie la maximal de la puissance électrique produite par la GRV et les variations de la vitesse de la génératrice sont adaptées à la variation de la vitesse du vent.

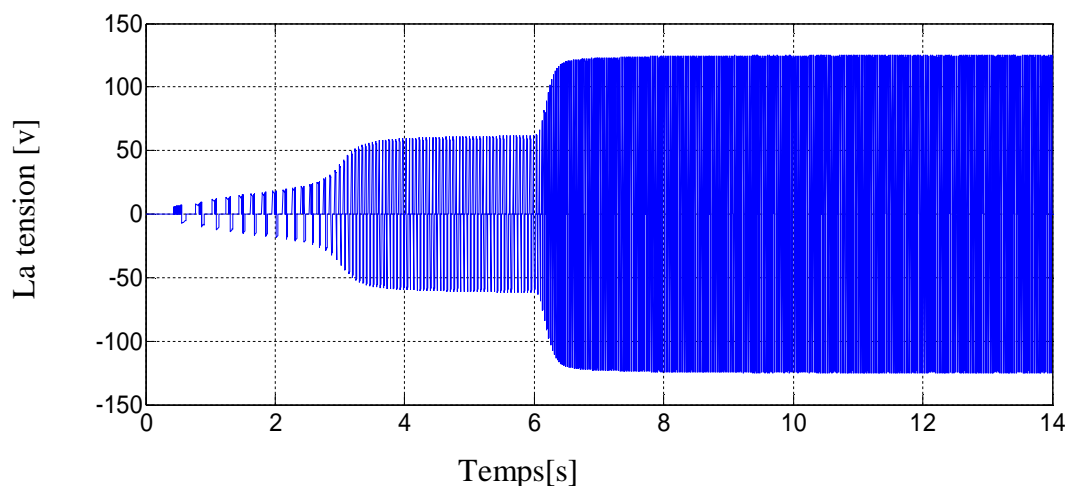


Figure. IV.8 La tension de la phase A.

A partir de la figure (IV.9) on a s'attend à une augmentation au niveau du courant statorique, ce dernier a cause du courant de référence à base de la valeur de tension (auto-excité), où il augmente avec l'augmentation de la vitesse, c'est-à-dire l'augmentation de puissance, les courants enregistrés avec les deux variations sont (7.5A et 17A).

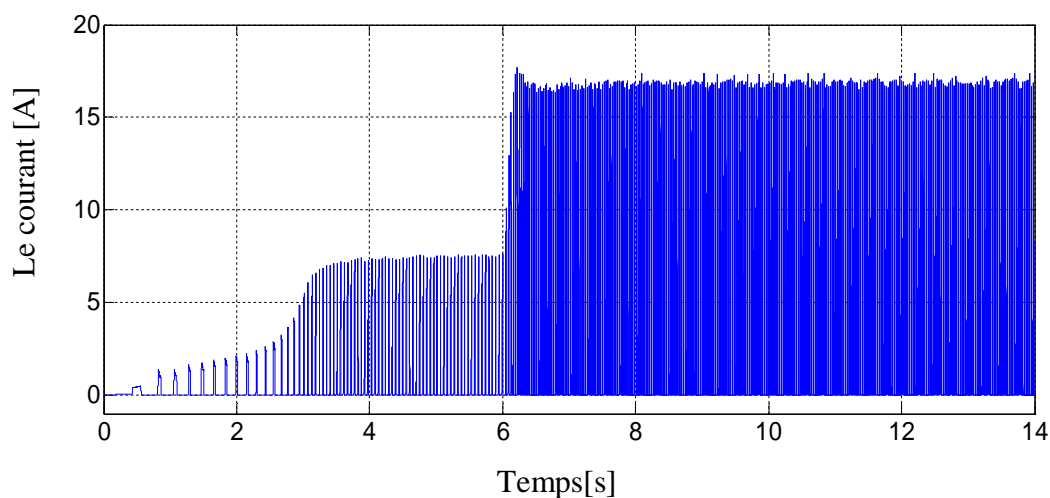


Figure. IV.9 Le courant de la phase A.

On précise ici que la Figure (IV.10) est un agrandissement (zoom) d'une portion de la courbe de la Figure (IV.9) dans l'intervalle de temps 5 s jusqu'à 7 s pour bien voir les allures et les comportements du courant pendant la variation de vitesse.

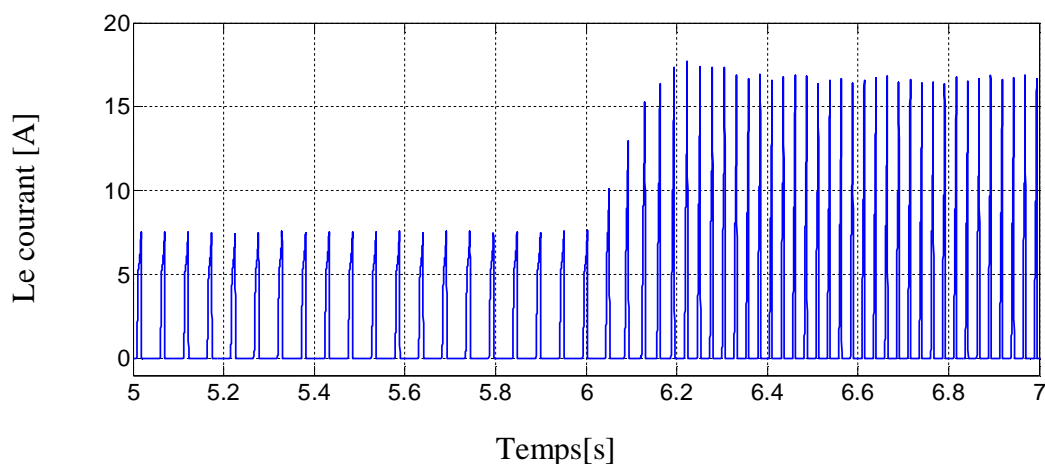


Figure.IV.10 Zoom d'une portion de la courbe de la Fig.IV.9.

Dans la figure (IV.11) on a présenté le couple électromagnétique de la machine à réluctance variable, on a remarqué que la valeur de couple est négative parce que le régime de fonctionnement de cette machine est sous la condition de régime génératrice .

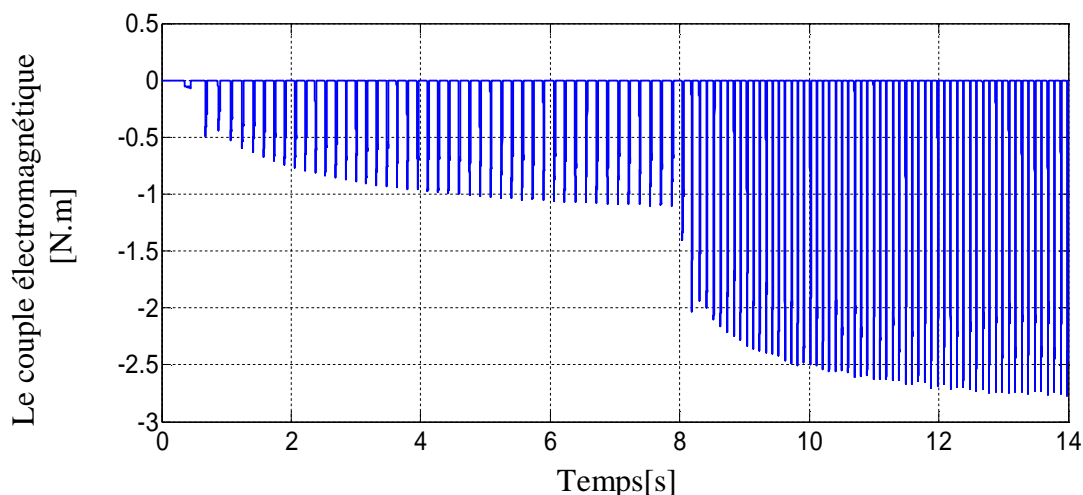


Figure.IV.11 Le couple électromagnétique.

En effet, pour chaque vitesse de vent correspond une référence vitesse de machine ce qui nous donne une tension acceptable.

IV.5 GRV connecté à une charge triphasée :

Le modèle général d'un générateur basé sur un onduleur de tension considéré dans cette étude est représenté dans la figure (IV.12). Il contient trois éléments principaux: la source DC, l'onduleur triphasé et le filtre de connexion au réseau. La source DC intègre la source primaire (générateur éolien). L'onduleur qui assure la conversion DC/AC est un onduleur de tension triphasé commandé en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

Le filtre de connexion au réseau est un filtre LC qui sert à minimiser les harmoniques de commutation. Deux types de réseaux électriques peuvent être considérés:

- un réseau comportant au moins une source parfaite de tension triphasé, que l'on appellera réseau actif.
- un réseau composé uniquement de charges isolées raccordées entre-elles électriquement sans source d'énergie, que l'on appellera réseau passif et qui constituera l'objet de notre application. [58]

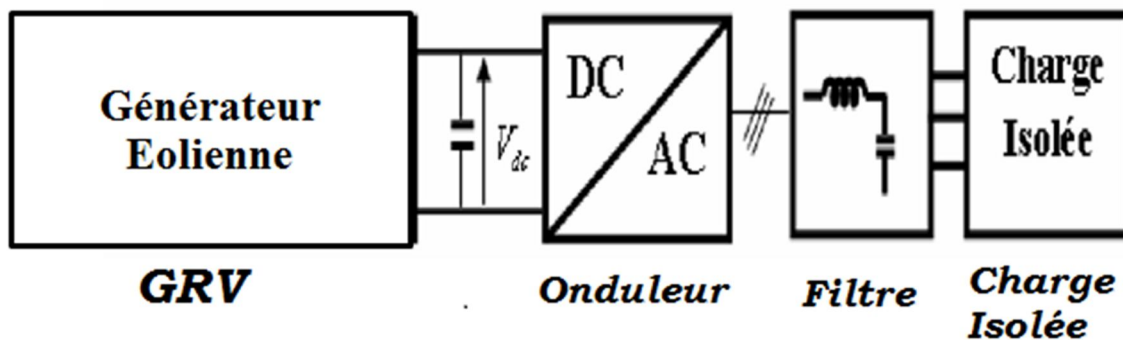


Figure.IV.12: Modèle d'un générateur éolienne connecté au réseau à travers un onduleur de tension.

IV.5.1 Modélisation et commande de l'onduleur de tension :

L'onduleur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie électrique d'une source de tension continue en une énergie électrique de type alternative, l'utilisation des onduleurs est très vaste dans l'industrie, tels que les variateurs de vitesse pour les moteurs triphasés, les alimentations de secours.....etc.

IV.5.1.1 Modélisation de l'onduleur :

Le schéma structurel de l'onduleur est représenté sur la figure suivante:

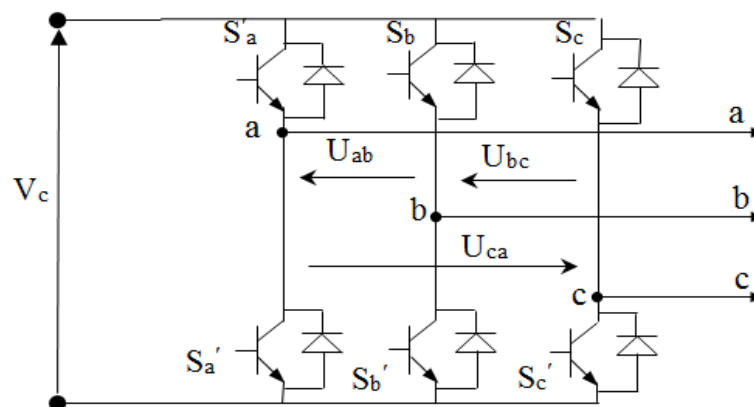


Figure IV.13 Représentation d'un onduleur de tension à deux niveaux

L'état des interrupteurs, supposés parfaites preuves être défini par trois grandeurs booléennes de commande $S_i (i=a,b,c)$

- ✓ Si le transistor supérieur est en conduction, les variables $S_i=1$
- ✓ Si le transistor inférieur est en conduction, les variables $S_i=0$

Dans ces conditions on peut écrire les tensions de phase $U_{ina,b,c}$ en fonction des signaux de commande S_i :

$$U_{ina,b,c} = S_i \cdot U_c - \frac{U_c}{2} \quad (\text{IV.1})$$

Les tensions composées des trois phases sont obtenues à partir des relations suivantes en tenant compte du point fictif à la figure (IV.13)

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

Soit "n" le point neutre du coté charge, alors on a :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{IV.3})$$

La charge est considérée équilibrer, il l'en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{IV.4})$$

La substitution de (IV.3) dans (IV.2) nous donnés:

$$V_{no} = \frac{1}{3} (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{IV.5})$$

En remplaçant (IV.4) dans (IV.2) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3} V_{ao} - \frac{1}{3} V_{bo} - \frac{1}{3} V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3} V_{ao} + \frac{2}{3} V_{bo} - \frac{1}{3} V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3} V_{ao} - \frac{1}{3} V_{bo} + \frac{2}{3} V_{co} \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

L'utilisation de l'expression (IV.1) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_{ac} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.7})$$

IV.5.1.2 Commande de l'onduleur :

L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions le plus sinusoïdal possible, à cet effet, différentes stratégies de modulation ont été proposées. Parmi celle-ci, la modulation de largeur d'impulsions (MLI) a été choisie pour notre système.

La technique MLI sinusoïdale est une technique très utilisée en industrie et elle est largement passée en revues dans la littérature. Le principe de cette technique consiste à comparer un signal de référence (modulante) à une porteuse. Le signal de référence représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence. Quant à la porteuse, elle définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur, c'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence. [4]

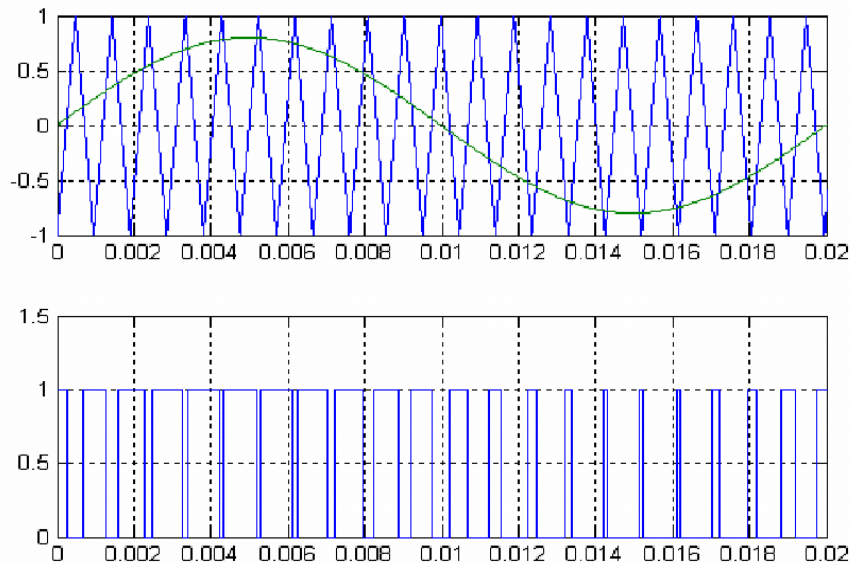


Figure IV.14 Représentation de l'onde modulante et l'onde porteuse

On définit:

- ✓ L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence de la porteuse sur la fréquence du modulante.

$$m = \frac{f_p}{f_0}$$

- ✓ L'indice d'amplitude r égal au rapport de l'amplitude de la porteuse sur l'amplitude de référence.

$$r = \frac{V_p}{V_0}$$

La valeur maximale de la tension de phase à la sortie de l'onduleur vaut exactement:

$$V_{max} = r \cdot \frac{V_{dc}}{2}$$

IV.5.1.3 Modélisation de filtre LC :

Le filtre LC représenté à la figure (IV.15) est régi par les équations de tension et de courant explicitées ci-dessous [57].

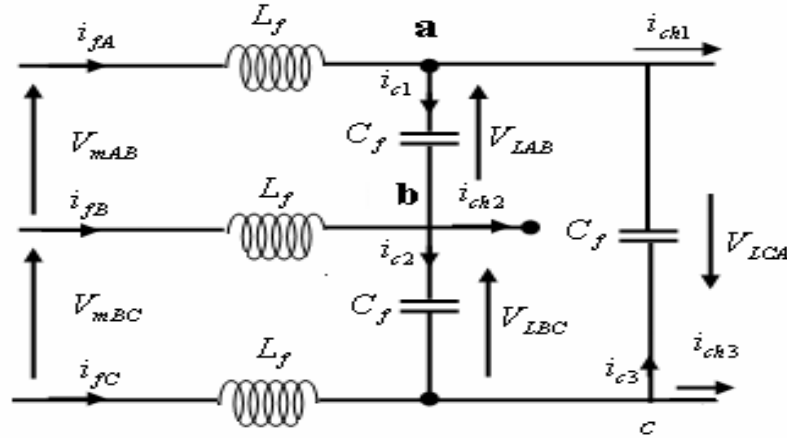


Figure IV.15 : Schéma du filtre LC triphasé

A partir de la figure (IV.15), on applique la première loi de Kirchoff's (loi des nœuds) aux points a, b, c ; on obtient les équations suivantes:

Nœud a :

$$i_{fA} + i_{c3} = i_{c1} + i_{ch1} \Rightarrow i_{fA} + C_f \frac{dV_{LCA}}{dt} = C_f \frac{dV_{LAB}}{dt} + i_{ch1} \quad (IV.8)$$

Nœud b :

$$i_{fB} + i_{c1} = i_{c2} + i_{ch2} \Rightarrow i_{fB} + C_f \frac{dV_{LAB}}{dt} = C_f \frac{dV_{LBC}}{dt} + i_{ch2} \quad (IV.9)$$

Nœud c :

$$i_{fC} + i_{c2} = i_{c3} + i_{ch3} \Rightarrow i_{fC} + C_f \frac{dV_{LBC}}{dt} = C_f \frac{dV_{LCA}}{dt} + i_{ch3} \quad (IV.10)$$

Avec :

$$\begin{aligned} i_{c1} &= C_f \frac{dV_{LAB}}{dt} \\ i_{c2} &= C_f \frac{dV_{LBC}}{dt} \\ i_{c3} &= C_f \frac{dV_{LCA}}{dt} \end{aligned} \quad (IV.11)$$

La soustraction (IV.8) de (IV.9) on obtient :

$$\begin{aligned} i_{fA} - i_{fB} + C_f \left(\frac{dV_{LCA}}{dt} - \frac{dV_{LAB}}{dt} \right) &= C_f \left(\frac{dV_{LAB}}{dt} - \frac{dV_{LBC}}{dt} \right) + i_{ch1} - i_{ch2} \\ \Rightarrow C_f \left(\frac{dV_{LCA}}{dt} + \frac{dV_{LBC}}{dt} - 2 \frac{dV_{LAB}}{dt} \right) &= i_{fA} + i_{fB} + i_{ch1} - i_{ch2} \end{aligned} \quad (IV.12)$$

La soustraction (IV.9) de (IV.10) on obtient :

$$\begin{aligned}
i_{fB} - i_{fC} + C_f \left(\frac{dV_{LAB}}{dt} - \frac{dV_{LBC}}{dt} \right) &= C_f \left(\frac{dV_{LBC}}{dt} - \frac{dV_{LCA}}{dt} \right) + i_{ch2} - i_{ch3} \\
\Rightarrow C_f \left(\frac{dV_{LAB}}{dt} + \frac{dV_{LCA}}{dt} - 2 \frac{dV_{LBC}}{dt} \right) &= i_{fB} + i_{fC} + i_{ch2} - i_{ch3}
\end{aligned} \tag{IV.13}$$

La soustraction (IV.10) de (IV.8) on obtient :

$$\begin{aligned}
i_{fC} - i_{fA} + C_f \left(\frac{dV_{LBC}}{dt} - \frac{dV_{LCA}}{dt} \right) &= C_f \left(\frac{dV_{LCA}}{dt} - \frac{dV_{LAB}}{dt} \right) + i_{ch3} - i_{ch1} \\
\Rightarrow C_f \left(\frac{dV_{LAB}}{dt} + \frac{dV_{LBC}}{dt} - 2 \frac{dV_{LCA}}{dt} \right) &= i_{fC} + i_{fA} + i_{ch3} - i_{ch1}
\end{aligned} \tag{IV.14}$$

$$\text{Avec : } V_{LAB} + V_{LBC} + V_{LCA} = 0 \tag{IV.15}$$

A partir de les équations (IV.12 à IV.15) on obtient :

$$\frac{dV_{LAB}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{fAB} - \frac{1}{3C_f} i_{LAB} \tag{IV.16}$$

$$\frac{dV_{LBC}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{fBC} - \frac{1}{3C_f} i_{LBC} \tag{IV.17}$$

$$\frac{dV_{LCA}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{fCA} - \frac{1}{3C_f} i_{LCA} \tag{IV.18}$$

Avec :

$$i_{fAB} = i_{fA} - i_{fB}$$

$$i_{fBC} = i_{fB} - i_{fC}$$

$$i_{fCA} = i_{fC} - i_{fA}$$

$$i_{LAB} = i_{ch1} - i_{ch2}$$

$$i_{LBC} = i_{ch2} - i_{ch3}$$

$$i_{LCA} = i_{ch3} - i_{ch1}$$

En appliquant la deuxième loi de Kirchoff's (loi des mailles) nous obtenons :

$$\frac{di_{fAB}}{dt} = - \frac{1}{L_f} V_{LAB} + \frac{1}{L_f} V_{mAB} \tag{IV.19}$$

$$\frac{di_{fBC}}{dt} = - \frac{1}{L_f} V_{LBC} + \frac{1}{L_f} V_{mBC} \tag{IV.20}$$

$$\frac{di_{fCA}}{dt} = - \frac{1}{L_f} V_{LCA} + \frac{1}{L_f} V_{mCA} \tag{IV.21}$$

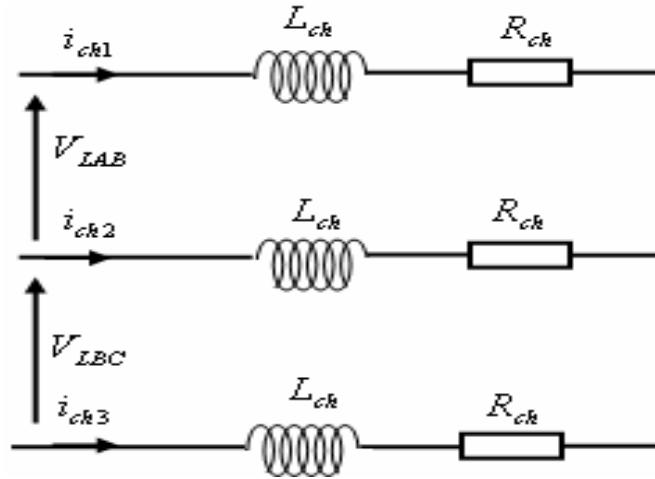


Figure (IV.16) : Schéma de l'impédance de la charge [58]

En appliquant la deuxième loi de Kirchoff's (loi des mailles) de la figure (IV.16), nous obtenons:

$$V_{LAB} = L_{ch} \frac{di_{ch1}}{dt} + R_{ch} i_{ch1} - L_{ch} \frac{di_{ch2}}{dt} + R_{ch} i_{ch2} \quad (IV.22)$$

$$V_{LBC} = L_{ch} \frac{di_{ch2}}{dt} + R_{ch} i_{ch2} - L_{ch} \frac{di_{ch3}}{dt} + R_{ch} i_{ch3} \quad (IV.23)$$

$$V_{LCA} = L_{ch} \frac{di_{ch3}}{dt} + R_{ch} i_{ch3} - L_{ch} \frac{di_{ch1}}{dt} + R_{ch} i_{ch1} \quad (IV.24)$$

Les équations (IV.22 à IV.24) peuvent être réécrites ainsi:

$$\frac{di_{LAB}}{dt} = -\frac{R_{ch}}{L_{ch}} i_{LAB} + \frac{1}{L} V_{LAB} \quad (IV.25)$$

$$\frac{di_{LBC}}{dt} = -\frac{R_{ch}}{L_{ch}} i_{LBC} + \frac{1}{L} V_{LBC} \quad (IV.26)$$

$$\frac{di_{LCA}}{dt} = -\frac{R_{ch}}{L_{ch}} i_{LCA} + \frac{1}{L} V_{LCA} \quad (IV.27)$$

En les exprimant sous forme matricielle, on a :

$$\frac{dV_L}{dt} = \frac{1}{3 C_f} I_f - \frac{1}{3 C_f} I_L \quad (IV.28)$$

$$\frac{dI_f}{dt} = \frac{1}{L_f} V_L - \frac{1}{L_f} V_f \quad (IV.29)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{1}{L} V_L - \frac{R}{L} I_L \quad (IV.30)$$

Avec

$$V_L = [V_{LAB} \ V_{LBC} \ V_{LCA}]^T, \quad I_f = [i_{fAB} \ i_{fBC} \ i_{fCA}]^T, \quad [V_{fAB} \ V_{fBC} \ V_{fCA}]^T.$$

IV.6. Simulation de l'ensemble GRV – Onduleur – Filtre – Charge triphasé :

Le fonctionnement du dispositif complet a été simulé sous environnement MATLAB/Simulink. En utilisant les paramètres électriques de la machine (voir annexe)

Le but de cette simulation est d'avoir le fonctionnement de l'ensemble GRV, onduleur, filtre, charge. Le système est alimenté par une génératrice à réluctance variable, le schéma block de simulation illustré sur la figure suivante :

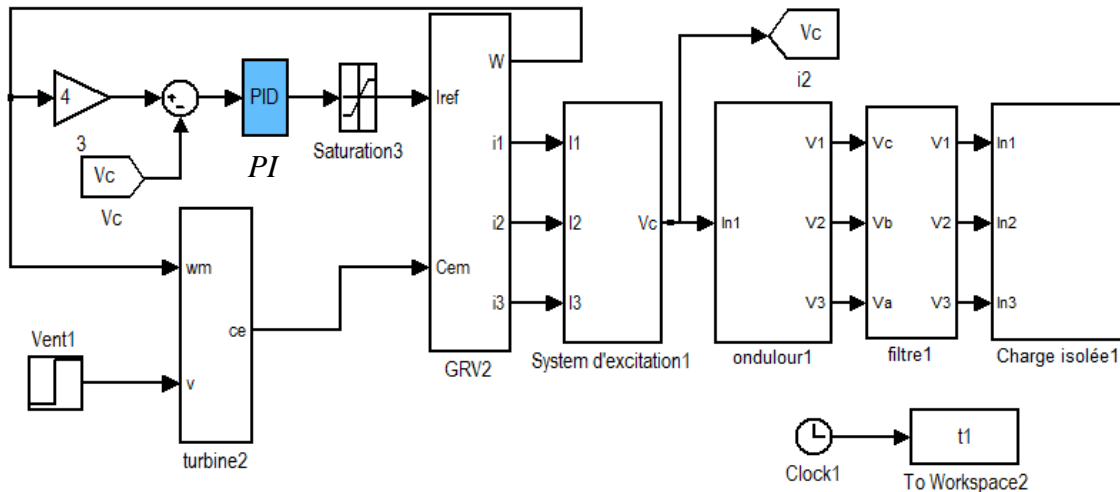


Figure IV.17 Schéma block de simulation de l'ensemble

IV.6.1 Validation du Modèle

Lors de l'application de la charge inductive triphasée, l'effet de cette perturbation est plus important sur la régulation de la tension, mais la commande compense tous les erreurs statique et dynamique.

Les résultats de simulation sont obtenus pour des vitesses de vent de 4m/s et 7m/s à $t=6s$

On a considéré la vitesse de la turbine est varié selon deux niveaux.

Dans ce cas, on a proposé la vitesse du vent en fonction du temps comme la figure (IV.18) qui a présenté ci-dessous.

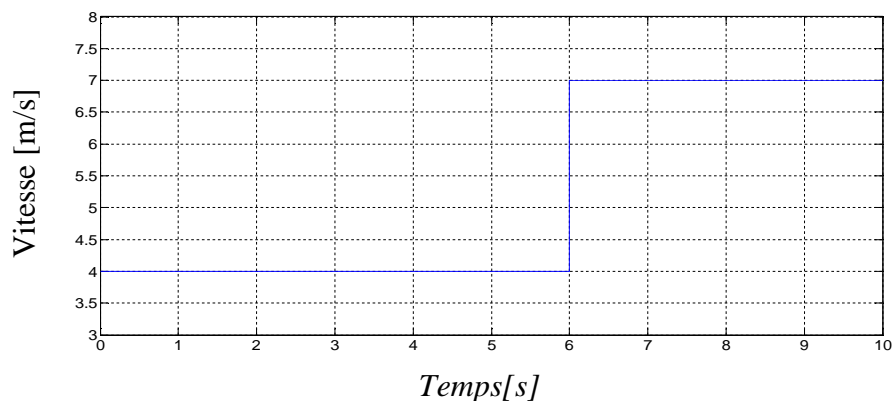


Figure. IV.18 La vitesse de vent

Alors, la nouvelle allure de la vitesse mécanique de la turbine est indiquée dans la figure IV.19. À l'instant $t=8$ s, la courbe devient autour de 56 rad/s. donc, l'augmentation de vitesse est évidente parce que la vitesse de vent a augmenté où la puissance générée par la turbine a aussi augmenté.

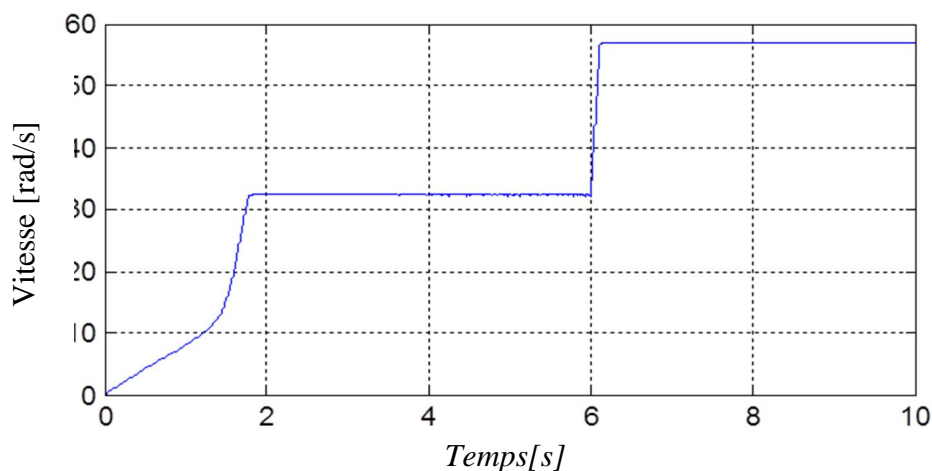


Figure. IV.19 La vitesse de la GRV

Dans la figure suivante Figure (IV.20) la tension de l'alimentation à partir du système d'excitation, on a ici le réglage de la tension est varié selon la variation de la vitesse ceci pour assure le courant de référence adapté avec la puissance généré par la turbine.

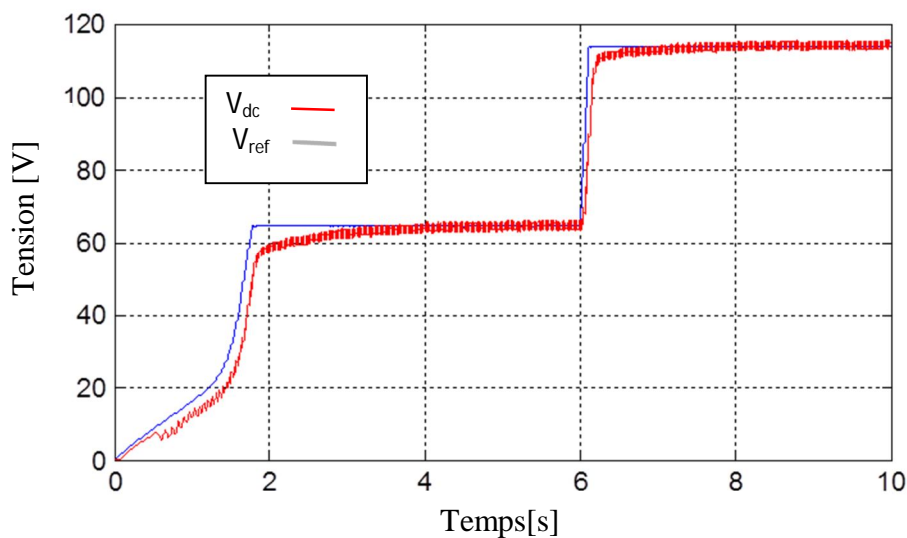


Figure. IV.20 La tension du bus continue

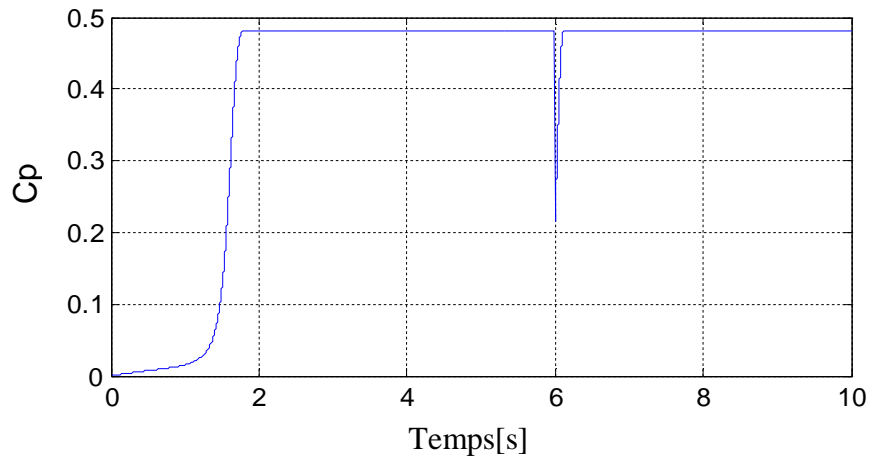


Figure. IV.21 Le coefficient de puissance

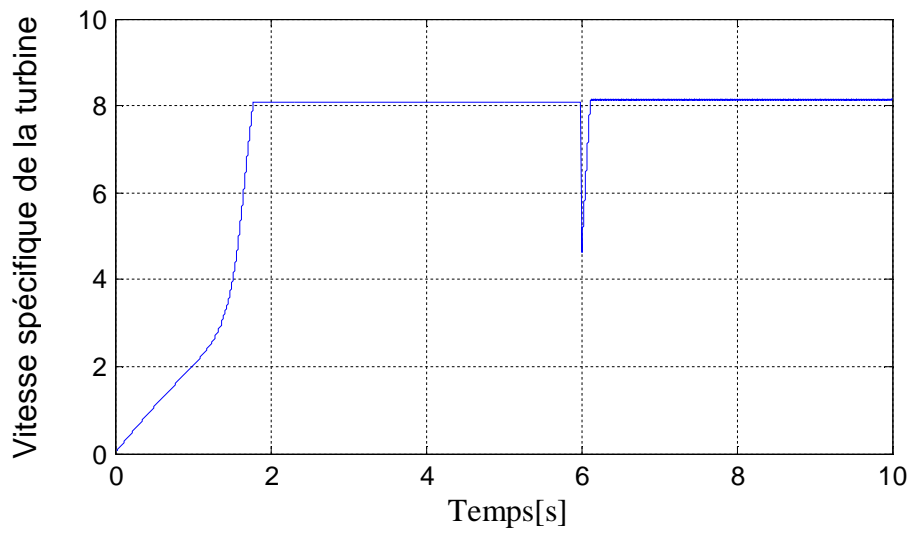


Figure. IV.22 Lambda.

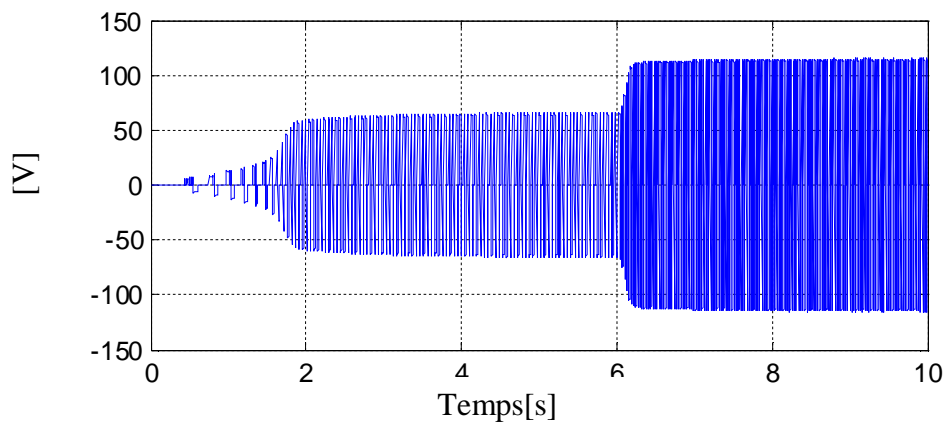


Figure. IV.23 La tension de la phase a de la GRV

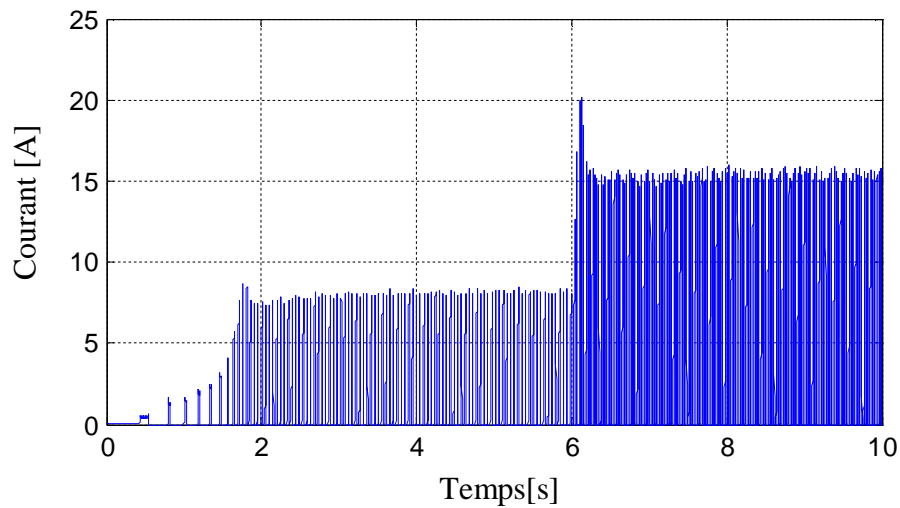


Figure. IV.24 Le courant de la phase a de GRV.

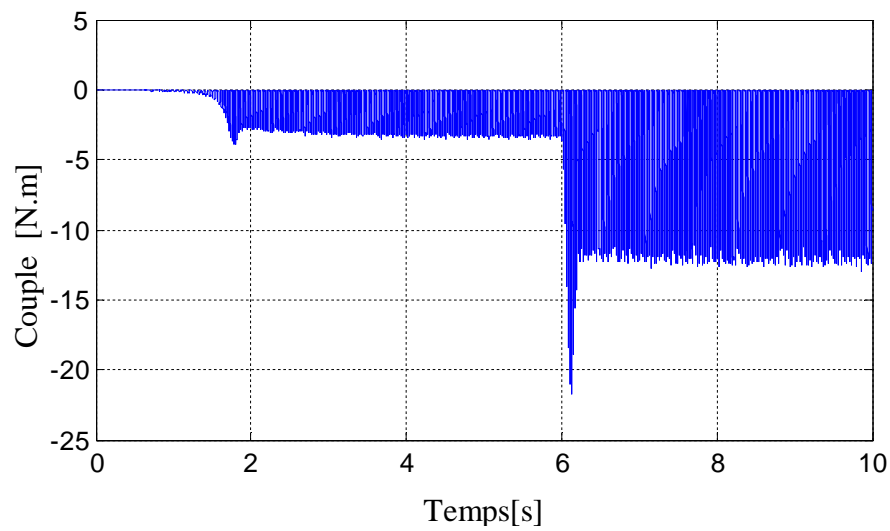


Figure. IV.25 Le couple électromagnétique totale

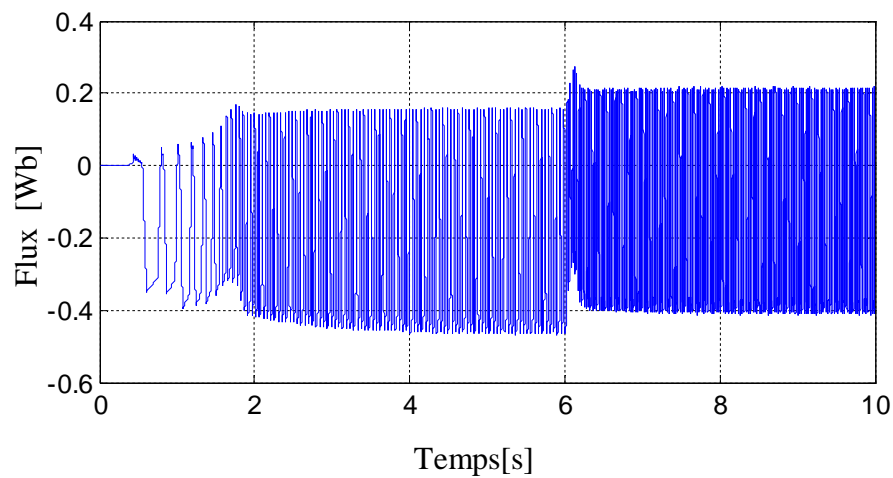


Figure. IV.26 Le flux de la phase A.

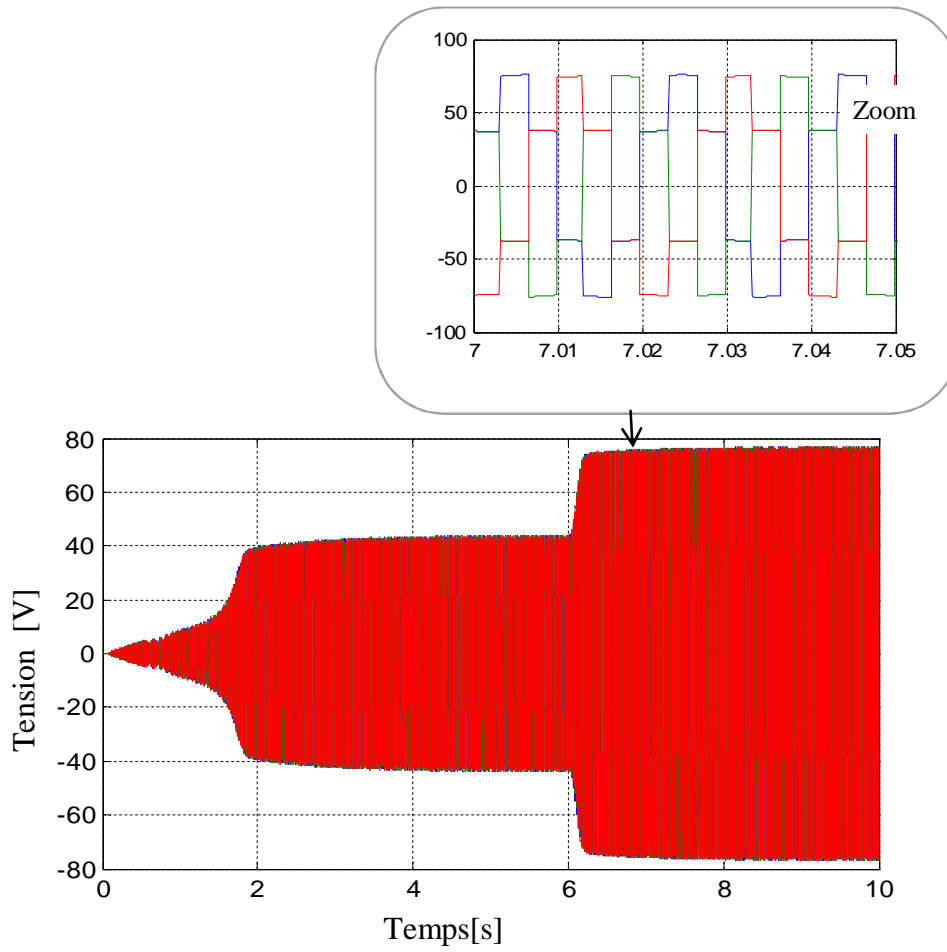


Figure. IV.27 Les tensions en sortie de l'onduleur

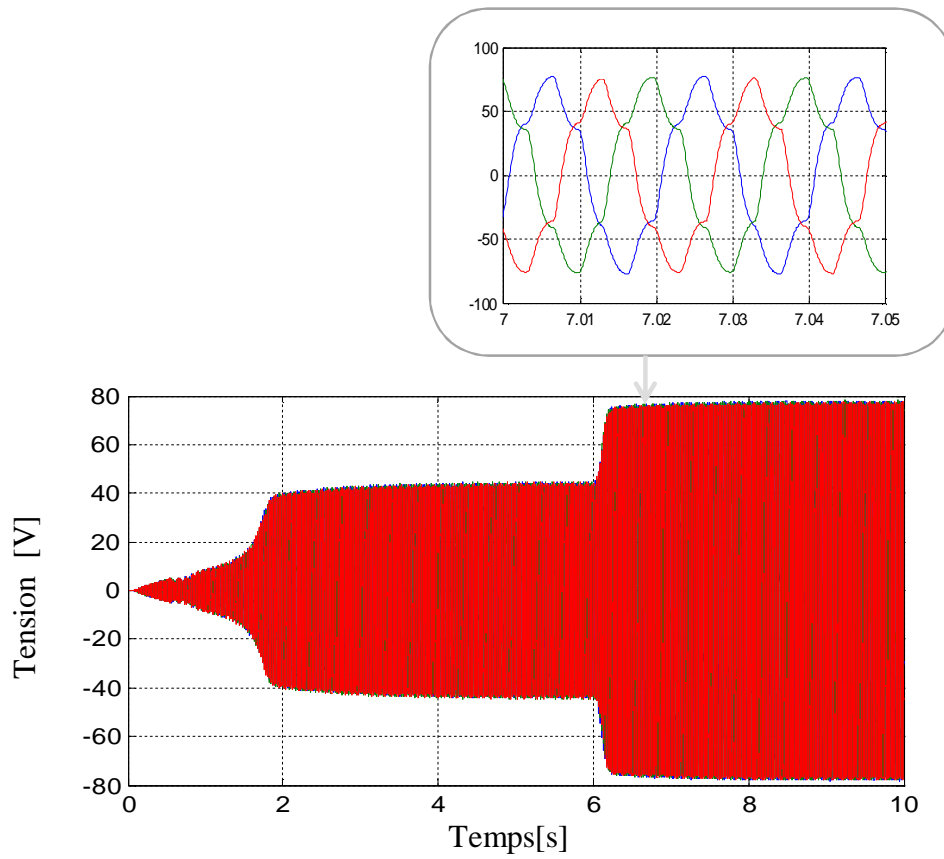


Figure. IV.28 les tensions en sortie de filtre.

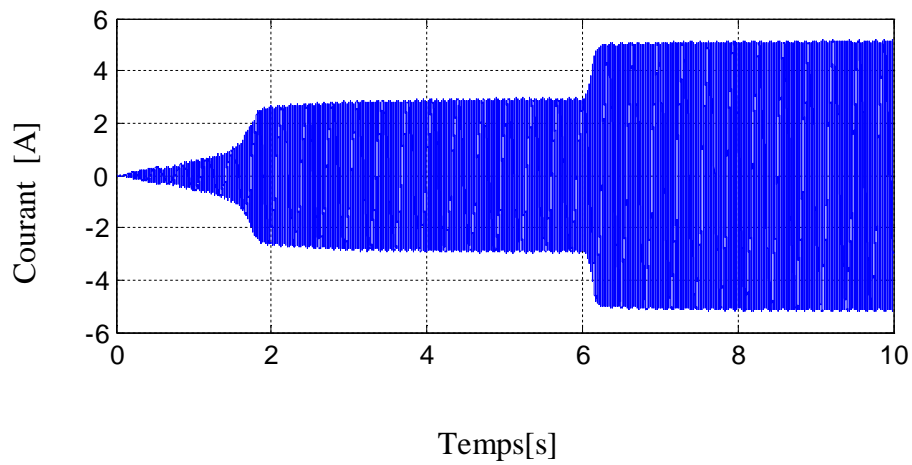


Figure. IV.29 le courant de phase de la charge.

➤ **Interprétation des résultats**

On peut observer l'influence de la vitesse du vent, et par suite l'énergie cinétique du vent sur les amplitudes de courants. Avec l'augmentation de la vitesse du vent,

La vitesse spécifique et le coefficient de puissance ne changent pas beaucoup de valeurs en régime permanent, ils restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales 8.1 et 0.49 successivement, avec la puissance éolienne capturée suit sa référence optimale.

-La figure IV-20 représente la tension du bus continu suit sa référence qui est proportionnel à la vitesse de rotation de la machine.

-La figure IV -23 représente la tension d'autoamorçage de phase de la GRV avec une fréquence et une amplitude proportionnée avec la vitesse de la génératrice.

A partir de la figure IV.24 on s'attend à une augmentation au niveau du courant statorique de la GRV, ce dernier à cause du courant de référence à base de la valeur de tension (auto-excité), où il est augmenté avec l'augmentation de la vitesse c'est-à-dire l'augmentation de puissance, les courants enregistrés avec deux variations sont (7A et 15A)

Les figures (IV.27 - IV.28) montrent respectivement les tensions en sortie de l'onduleur et les tensions en sortie de filtre avec un signal de sortie approche a la forme sinusoïdal.

Le courant et la tension de la charge suivent la même allure, ils sont uniquement un peu décalés à cause du déphasage entre les deux.

IV.7 Conclusion

La simulation numérique nous a permis de juger de la qualité de la commande de la génératrice à réluctance variable pour la production de l'énergie éolienne.

Cependant avec l'avantage très important de ce type de machine, Ce-ci nous permet d'obtenir des performances dynamiques très élevées, et ne nécessite pas des vitesses élevées du vent contrairement à d'autres systèmes qui exigent une vitesse élevée. Ainsi le système de maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse du vent est effectué avec succès.

En fin Les résultats des différentes simulations indiquent l'efficacité de l'approche proposée et mise en œuvre. Sauf que les méthodes de réduction de l'ondulation de couple qui n'a pas abordé dans ce travail, car c'est un autre objet de recherche.

Conclusion

Générale

CONCLUSION GENERALE

Notre travail a étudié la stratégie de contrôle du système de production d'énergie éolienne basé sur une génératrice à reluctance variable. Cette stratégie a permis de contrôler la tension de bus contenu par la technique de la MPPT avec une bonne concordance entre la mesure et la consigne. L'objectif est d'effectuer la modélisation et la simulation du système de production d'énergie éolienne en tenant compte des problématiques des variations de la vitesse du vent et d'entretien de la génératrice. Les stratégies de commande des convertisseurs statiques également une implémenté correcteurs, cependant le contrôle de la vitesse de la génératrice assuré par la commande de la turbine. Pour montrer les performances des méthodes utilisées, des résultats des simulations du système global sont présentés et analysés.

On a étudié la performance de la machine à reluctance variable fonctionnant moteur /génératrice par la modélisation dans différents régime de fonctionnement.

Les machines à réluctance variable sont probablement les machines électriques les plus simples et les plus économiques à fabriquer pour des performances assez élevées, on trouve aujourd'hui plusieurs applications dans l'industrie, C'est pourquoi nous sommes intéressés à étudier la génératrice dans ce type de machine là où nous avons modélisé le prototype 6/4 MRV pour savoir la majorité des comportements et de leurs effets sur son fonctionnement, Notre étude inclut plusieurs directions comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons entamé notre travail par une introduction à la filière éolienne, on a rappelé les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et les différents types d'éoliennes, principe de fonctionnement de l'éolienne, leurs constitutions, leurs avantages et inconvénients...

Dans le second chapitre, nous avons abordé les différents types des MRV, le principe de fonctionnement et conversion d'énergie de système électromagnétique pour comprendre le mécanisme et la condition de fonctionnement de la GRV ainsi que les paramètres d'influence. Nous avons présenté les résultats relatifs aux caractéristiques électromagnétiques à partir de la

modélisation et simulation de la MRV avec son alimentation et la commande par le logiciel MATLAB, ce dernier traduit les comportements de la machine en mode moteur.

Dans le troisième chapitre, on a exposé les résultats de la GRV avec un système auto-excité qui détermine la performance de cette machine avec différents points de fonctionnement, où nous avons noté que la tension de système auto-excité avec le couple d'entraînement ont donné un rôle primordial sur le courant produit par la machine, ce dernier est très important pour avoir un courant satisfaisant pour le système.

Après la modélisation de la chaîne de turbine nous avons associé la GRV à la turbine, puis la GRV avec un réseau passif. On a exposé les résultats de simulation de l'association commandée avec un régulateur hystérésis à travail le système auto-excité, Enfin Cette association a permis de conclure que le modèle a convergé et les résultats de simulation étaient satisfaisants.

PERSPECTIVES

Comme perspectives de ce travail, on propose:

- étudier l'influence des principaux paramètres géométriques du circuit magnétique sur les caractéristiques électromagnétiques de la machine à réluctance variable, par la méthode des éléments finis (MEF). Cette approche permet en effet une étude fine des phénomènes électromagnétiques, surtout si on travaille en régime saturé.
- l'optimisation du dimensionnement de la MRV optimisée par un algorithme génétique (AG) couplé à la méthode des éléments finis.

- Utilisation des régulateurs entrant dans le cadre de l'intelligence artificielle tel que, réseaux de neurone et algorithmes génétiques au lieu du régulateur classique PI pour la régulation de la vitesse et la tension de bus contenu.
- Le fonctionnement sans capteur de vitesse de la GRV.
- étudier le fonctionnement global de l'ensemble du système éolien avec un filtre actif.

- étudier la commande de la GRV de grande puissance connectée au réseau.

- optimiser le choix des angles de commutations des interrupteurs du convertisseur (t_{on} - t_{off}) en utilisant la fonction objective dès surfaces flux en fonction des courants de phase.

Bibliographie

- [1] R. Krishnan, « Switched Reluctance Motor Drives: Modelling, Simulation, Analysis, Design & Applications », pp. 351-384, CRC Press, 2001.
- [2] T. Wildi, "Électrotechnique", Les presses de l'université Laval, 2008.
- [3] David A. Torrey, "Switched Reluctance Generators and Their Control", IEEE Transactions Industrial Electronics, vol.49, no.1, Feb. 2002.
- [4] Med Assaad HAMIDA, " etude et simulation d'un système éolien basé sur des machines synchrones et asynchrone " Université ELHADJ LAKHDAR BATNA, 2009
- [5] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de CACHAN, Décembre 2002. "
- [6] desire le gouriere, "energie eolienne, theorie, conception et calcul pratique des installations", edition eyrolles, 1982" .
- [7] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes, soutenue le 19/12/2003.
- [8] A. Medjber, A. Mouldia, A. Mellit, M.A. Guessoum, "Commande vectorielle indirecte d'un générateur asynchrone double alimenté appliqué dans un système de conversion éolien," Acta Electrotehnica, Vol. 53, No. 4, pp. 316-322, 2012.
- [9] (B. Multon, "Energie électrique: les enjeux," Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008.)
- [10] J. Martin, « Energies éoliennes », techniques de l'ingénieur, traite de génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [11] Naouel HAMDI " Modélisation et commande des génératrices éoliennes " mémoire de magister de l'Université MENTOURI de CONSTANTINE Soutenu le :24 /01/2008 .
- [12] HARITZA CAMBLONG «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.

- [13] ARTHOUROS ZERVOS, SVEN TESKE «perspectives mondiales de l'énergie éolienne 2006 » septembre 2006.
- [14] TOUAL BELKACEM « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire de magister Université de Batna, 2010.
- [15] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, "Aérogénérateurs électriques," Techniques de l'Ingénieur, D3960, 2004),.
- [16] (B. Paluch, "Introduction à l'énergie éolienne," Revue REE, No. 5, pp. 35-50, Mai 2005.),
- [17] (B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, B. François, S. Plumel, J. Deuse, "Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie," Revue J3Ea, Vol. 5, Hors Série 1, EDP Science, 2006.
- [18] METATLA SAMIR «Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique d'Alger, 2009.
- [19] ARMAND BOYETTE «contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne» thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, 2006.)
- [20] NICOLAS LAVERDURE «Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires» Thèse de Doctorat d'institut national polytechnique de Grenoble, 2005.)
- [21] I. Meny, "Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance," Laboratoire d'Electrotechnique de Montpellier (LEM).
- [22] N. Kasbadji Merzouk et H. Daaou., "Cartes saisonnières du vent en Algérie," Journée d'Etudes : Météorologie et Climatologie entre Sciences et Prise de Décision, ONM/Alger, 2001.
- [23] N. Kasbadji Merzouk, "Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie," Thèse de Doctorat de l'Université de Tlemcen, 2006.

- [24] B. MULTON, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, X. ROBOAM, S. ASTIER, B. DAKYO, C. NICHITA «état de l'art dans les aérogénérateurs électriques» paru mai en 2002.
- [25] B. MULTON, G. ROBIN, O. GERGAUD, H. BEN AHMED «Le Génie Electrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne » JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- [26] F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed et H. Benalla, “Modélisation, simulation et contrôle d’une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation,” Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14, No. 1, pp. 109-120, 2011.
- [27] L.khettache, "Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation", mémoire de magister, Université de BATNA, 2007.
- [28] I.hamzaoui, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur", mémoire de magistère, ENP, Janvier 2008.
- [29] J. Vaidya, “Advanced Electric Generator & Control For High Speed Micro/Mini Turbine Based Power Systems”, Electrodynamics Associates, Inc. 409 East bridge Drive, Oviedo, FL 32765 And Earl Gregory, Power Generation, Propulsion Directorate AFRL/PRPG, Wright-Patterson AFB, OH 45433.
- [30] E. Hoang, “Etude, modélisation et mesure des pertes magnétiques dans les moteurs à réluctance variable à double saillance”, Thèse ENS Cachan, 1995.
- [31] (LI Guang-Jin, "Contribution à la Conception des Machines Electriques à Rotor Passif pour des Applications Critiques : Modélisations Electromagnétiques et Thermiques sur Cycle de Fonctionnement, Etude du Fonctionnement en Mode Dégradé ", Thèse de Doctorat, École normale supérieure de Cachan, CACHAN CEDEX (France), 05 Jul 2011.)
- [32] (FEYROUZ MESSAI, "Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réluctance Variable", Université Mentouri De Constantine 2009.)
- [33] (B. Multon, “Conception Et Alimentation Electronique Des Machines A Reluctance Variable A Double Saillance”, Habilitation à Diriger des Recherches, 1994) .
- [34] (G. Segulier, F. Notellet, “Electrotechnique Industrielle”, 2ème édition pages 371-384) .

- [35] G. MEROUGE, "Les règles générales de dimensionnement des machines électriques tournantes. ", Journées Electrotechniques du club EFA. Belfort, 1993.
- [36] Dan Ilea , " Conception optimale des moteurs à réluctance variable à commutation électronique pour la traction des véhicules électriques légers", Thèse de Doctorat, Université Lille Nord-de-France, Oct 2011.
- [37] (B. Multon , ENS de Cachan Antenne de Bretagne notes de cours Agrégation génie Electrique " Moteurs pas à pas ", 2004.)
- [38] (A. Guettaf, "Contribution A La Conception De La Machine A Reluctance Variable, En Vue De Sa Commande", Université de Biskra, 2005)
- [39] (L. Moreau, "Modélisation, Conception et Commande de GRV ", Thèse Doctorat, Univ. Nantes, 9 Dec 2005).
- [40], (S. TAIBI," Contribution à l'étude, la conception, le dimensionnement et l'optimisation des machines à réluctance variable de type vernier ", Thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies de Lille. 2002)
- [41] (I. HOUARA, " Contribution à l'étude, la modélisation et l'optimisation de machines à réluctance variable d'une structure machine à réluctance variable excitée par des aimants permanents ", Thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies de Lille. 1998).
- [42] B. Multon, " Principe et éléments de dimensionnement des machines à réluctance variable à double saillance autopilotées ", Journées ELT club EEA, Belfort, 25-26 Mars 1993.
- [43] (A. TOUNZI, HDR, "Contribution à la conception et la modélisation des machines électriques ", Application aux MRV à deux circuits.)
- [44] (Sihem MOUELLEF, "Contribution A L'étude D'une Machine A Reluctance Variable: Conception, Modélisation& Simulation D'une MRVDS 6-4" Soutenu le : 03/06/ 2008.)
- [45] J. Chalmers, L. Msaba, " Design and field-weakening performance of a synchronous reluctance motor with axially laminated rotor ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, N°5, pp. 1035 - 1041, Sep-Oct 1998.

- [46] R.E. Betz, R. Lagerquist, M. Jovanovic, T.J.E. Miller, R.H. Middleton " Control of synchronous reluctance machines", IEEE Transactions on, Industry Applications, Vol.29, N°6, pp.1110 - 1122, Nov-Dec 1993.
- [47] (Y. Liao, T.A. Lipo, "A New Doubly-Salient Permanent Magnet Motor For Adjustable Speed Drives", SPEEDAM Conf. (Positano, Italy), May 19-21, 1992, pp. 415-420.)
- [48] (Y. Liao, F. Liang, T.A. Lipo, "A Novel Permanent Magnet Motor with Doubly Salient Structure", IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 31, NO.5, September/October 1995.)
- [49] (B. Multon, DEA. Conception actionnaire " Cas d'une machine à aimant permanents à f.m.m. trapézoïdales alimentée en courants rectangulaires ", Université Paris-Sud, ENS Cachan.)
- [50] (Marcel Jufer, " ÉLECTROMÉCANIQUE ", Publié Sous La Direction De Jacques Neiryck , De L'école Polytechnique Fédérale De Lausanne, VOLUME IX, 2004.)
- [51] (Khelef salah eddine, hada abd elmounim, "commande de la machine a réluctance variable" université d'el-oued master académique 2013).
- [52] (M. Turner, "Switched reluctance drives : Technology, applications, operation & performance", in 2009 Motor, Drive & Automation Systems Conférence, Orlando, Florida, 2009.)
- [53] (soud salah eddine,touil boukhari" technique de maximisation de la puissance d'un systeme de generation eolien base sur mada université d'el-oued master académique 2013.)
- [54] Serhoud Hicham, "Contribution à l'étude de la machine synchrone à réluctance variable", Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Université de Biskra 2009.
- [55] A. Takahashi, H. Goto, K. Nakamura, T. Watanabe, O. I. Fukushima "Characteristics Of 8/6 Switched Reluctance Generator Excited By Suppression Resistor Converter", IEEE Transactions On Magnetic, vol. 42, N°.10, pp. 963-0215, Oct 2006.
- [56] J. M. Kokernak, D. A. Torrey, and M. Kaplan, "A switched reluctance starter/alternator for hybrid electric vehicles", Proc. PCIM'99, pp. 74-80, 1999.

[57] J. Woo Jung," Project # Roject sine- Δ PWM INVERTER" PH.D Student, the OHIO state university.

[58] Soltane BELAKEHAL, "conception et commande des machine à aimants permanents dédiés aux énergies renouvelables" Université Mentouri De Constantine 2010

Annexe

Paramètres de la MRV :

Nombre de phases : $q=3$

Angle denture stator: $\beta_s=30^\circ$

Angle denture rotor: $\beta_r=30^\circ$

Angles de commutation : $\theta_{on} = 0^\circ$; $\theta_{off} = 43^\circ$

$P = 750W$

$U_{excitation} = 150 V$

Résistance/phase : $R = 3 \Omega$

$N_s = 6, N_r = 4, m = 3$

$L_{min} = 0.008 H, L_{max} = 0.06 H$

$J=0.013Kgm^2$

Paramètres de la turbine :

$\rho=1,25 Kg/m$

Nombre de pales=3

Rayon des pâles $R_t=2$

Gain du multiplicateur de vitesse $G_t=2$

Paramètres du filtre LC :

inductance : $L_f=0.9 mH$; capacité $C_f= 900 \mu F$

Paramètres de la charge :

inductance : $L=0.014H$; résistance: $r = 10 \Omega$.

Capacité du condensateur de lissage de la tension du bus continu : $C=0.002F$,