

**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

**ETUDE D'UNE GÉNÉRATRICE À RÉLUCTANCE
VARIABLE**

Diriger par:

Mr. SERHOUD Hicham

Réaliser par:

ABID Mohammed

BEN AMOR Fathi

2013/2014

Remerciement

Mes remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant qui m'a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.

*Nous tenons à adresser nos vifs remerciements pour sa collaboration son soutien moral, à notre encadreur **Mr. HICHAM Serhoud**, pour nous avoir suivies durant la préparation de ce travail et pour son aide si précieuse, ces nombreux conseils et suggestions.*

Les collègues de notre spécialité à leur soutien que dieu l'aide dans leur vie professionnelles,

Nos familles respectueuses à leur soutien matériel et moral, et l'atmosphère qui nous avons présenté,

Remerciement spécial aux responsables de l'universitaire D'El-Oued et à tous ceux-là nous présentons nous remerciements et nos respect

Dédicace

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et
de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au
bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de
dire

" Ya Kayoum "

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le
symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et
ma réussite, à ma mère ...

A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant
toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma
vie

à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les gardes et les protège.

A mes adorables sœurs.....

A mes frères

A mes amies.

A tous ceux qui me sont chères.

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime.

Je dédie ce travail.

ملخص

هدف هذا العمل هو دراسة حول المولد ذا الممانعة المتغيرة (GRV) وهذا لأجل شرح سلوكيات هذه الآلة. بعد مراجعة حول مختلف أنواع الماكينات الكهربائية ومعرفة مختلف أنواع وأشكال الماكينة ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة, نقدم نمذجة الماكينة ذات الممانعة المتغيرة ثم محاكاتها ومنه نعرف عمل هذه الماكينة عندما تكون في حالة مولد كهربائي. لقد استخدمنا طريقتين للتحكم وهما التحكم عن طريق التوتر والتحكم بطريقة التخلفية (هستريزيس) وهذا لأجل الحصول على تيار كهربائي منظم حسب حاجة النظام, ومن هنا قدمنا نتائج تحدد أداء المولد ذا الممانعة المتغيرة المرتبط مع نظام التحريض الذاتي بشحنات مختلفة. من أجل إكمال الحلقة, قمنا بنمذجة توربين الرياح مع تعريف دساتيرها ومبادئ التشغيل الخاصة بها, حيث حصلنا على الترابط بين المولد والتوربين. وفي الأخير وجدنا نتائج مرضية تترجم لنا المحاكاة الخاصة بالمولد مع نظام التحريض الذاتي المتحكم بهم بالطريقة التخلفية (هستريزيس) مرتبط مع التوربين.

Résumé

L'objet de ce travail concerne une étude sur la génératrice à reluctance variable (GRV) pour exprimer le comportement de cette machine. Après un rappel des différents types de machines électriques avec différents cas de figures et types de MRV, nous présentons la modélisation de la machine à reluctance variable (MRV), Nous avons utilisés deux stratégies de la commande soit en tension et aussi par hystérésis pour avoir un courant réglé selon le besoin de système, et puis la simulation ainsi nous le définissons la MRV fonctionnant en génératrice (GRV). Où nous avons présenté les résultats qui détermine la performance de la GRV avec un système auto excité pour différente charge. Afin de compléter la boucle, nous avons modélisé une turbine éolienne avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, et à partir de lui, nous avons acquis une association pour la GRV avec la turbine. Enfin nous avons trouvé des résultats robustes pour la simulation de l'association GRV-turbine commandée par un régulateur hystérésis avec un système auto excité.

Mots clefs

- Génératrice à Reluctance Variable (GRV)
- Régulateur à Hystérésis
- Turbine éolienne
- Auto-excité

Sommaire

Remerciements	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	III
Sommaire	IV
Listes de figure.....	VII
Notations et symboles.....	X
Introduction générale.....	1

Chapitre I: Généralités sur la MRV

I.1 Introduction	4
I.2 Différents topologies de MRV	4
I.2.1 MRV pures.....	4
I.2.2 MRV vernier.....	6
I.2.3 MRV hybrides.....	7
I.3 Conversion d'énergie.....	8
I.4 Principe de base.....	10
I.5 Application critique des MRV.....	14
I.6 Avantages et inconvénient des MRV.....	16
I.7 Principe de fonctionnement d'une GRV.....	17
I.7.1 Les différences phases de la GRV	17
I.7.2 Modes d'excitation de la GRV.....	18
I.8 Objectif	19
I.9 Conclusion	20

Chapitre II : Modélisation & Simulation Du Système MRV-Convertisseur

II.1 Introduction	21
II.2 Hypothèses simplificatrices.....	21
II.3 Modélisation de la MRV	21

II.3.1 Les équations électromagnétiques.....	22
II.3.2 Production du couple	22
II.3.3 Modèle Linéaire de la MRV.....	23
II.4 Commande en tension.....	27
II.5 Résultat de simulation.....	29
II.6 Commande par hystérésis.....	33
II.6.1 schéma synoptique.....	33
II.6.2 Stratégie de la commande par hystérésis.....	34
II.7 Commande de la vitesse par régulateur à action PI.....	38
II.8 Résultats de simulation.....	40
II.9 Conclusion.....	44

Chapitre III : Commande d'une GRV auto excitée.

III.1 Introduction :	45
III.2 Eléments du système	46
III.3 Modèle de la GRV	46
III.4 L'alimentation de la GRV	46
III.5 Principe de fonctionnement	47
III.6 Système auto-excite de la GRV	49
III.7 Simulation de la GRV	50
III.7.1 Description du modèle élaboré	50
III.7.2 Résultats de simulation de la GRV.....	51
III.7.3 Fonctionnement sur charge résistive	52
III.7.4 Fonctionnement sur bus continu fixée.....	56
III.8 Conclusion	59

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

IV.1 Introduction :	60
IV.2 Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome.....	60
IV.3 Machines à reluctance variable applications en conversion d'énergie éolienne.....	61
IV.4 Modélisation d'une turbine éolienne	61
IV.4.1 La puissance d'une éolienne	61
IV.4.2 La puissance aérodynamique	62

IV.4.3 Le coefficient de puissance.....	62
IV.4.4 Modèle de multiplicateur.....	63
IV.4.5 Équation dynamique de l'arbre.....	64
IV.5 Schéma bloc du modèle de la turbine.....	64
IV.6 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	65
IV.7 Association de la GRV a une turbine éolienne.....	66
IV.7.1 Description générale de l'ensemble GRV-turbine éolienne.....	66
IV.7.2 Modèle de simulation.....	67
IV.7.3 Résultats de simulation.....	68
IV.8.Conclusion	72
 Conclusion générale.....	73
Les perspectives	74
Bibliographie	75
Annexe A	

Listes de figures

Figure I.1 MRV pure à double saillance.....	05
Figure I.2 MRV excitée à effet vernier	07
Figure I.3 Utilisation d'aimants dans les machines à double saillance	07
Figure I.4 MRV hybride à effet vernier	08
Figure I.5 MRV à plots aimantés	08
Figure I.6 Energie (W_{em}) et coénergie (W'_{em})	09
Figure I.7 Structure MRV de base et positions extrêmes du rotor	11
Figure I.8 Variation de l'inductance en fonction de la position du rotor	13
Figure I.9.a Structure électromagnétique d'une MRVDS 6/4 triphasée.	12
Figure I.9.b Positions d'opposition et de conjonction d'une MRVDS 6/4.....	13
Figure I.10 MRV utilisée dans le train à grande vitesse pour la climatisation de l'air cycle.....	14
Figure I.11 MRV fonctionnent dans les environnements extrêmes.....	16
Figure I.12 Représentation d'une GRV.....	17
Figure. I.12.a Phase de magnétisation.....	18
Figure. I.12.b Phase de génération.....	18
Figure .I.13 Conduction des IGBT pendant la décroissance de l'inductance.....	20
Figure II.1 Inductance en fonction de la position	24
Figure II.2 L'angle δ correspond au déplacement d'une phase par rapport à une autre	24
Figure II.3 Diagramme de simulation de MRV	26
Figure II.4 Diagramme de simulation de MRV par phase (modèle linéaire)	27
Figure II.5 a) vitesse. b) tension. c) courant. d) couple. e)Inductance. f) flux. (De la phase).	29
Figure II.6 a) Courant. b) couple. c)inductance. d) flux.....	31

Figure II.7: Schéma synoptique du circuit de commande proposé	33
Figure II.8: a) vitesse. b) tension. c) Courant. d) Couple par phase. e) inductance. f) flux	34
Figure II.9 a) Courant b) Couple par phase c) Inductance. d) Flux	36
Figure II.10 a) Courant b) Couple par phase c) Inductance. d) Flux.....	38
Figure II.11 Boucle de régulation de vitesse.....	39
Figure II.12 Régulation de vitesse de la MRV par régulateur PI.....	43
Figure III.1 Convertisseur triphasé en demi-pont asymétrique	46
Figure III.2 Phases de magnétisation de la GRV.....	48
Figure III.3 Système de contrôle pour la GRV.....	48
Figure III.4 Modèle de la MRV sous MATLAB avec régulation de la tension.. .	50
Figure III.5 La position de la tension par rapport à l'inductance.	51
Figure III.6 La tension de la buse.....	51
Figure.III.7 La tension de la phase A.....	52
Figure.III.8 L'inductance de la phase A.....	52
Figure.III.9 Le courant de la phase A.....	53
Figure.III.10 Le flux de la phase A.....	54
Figure.III.11 Le couple électromagnétique de la GRV.....	55
Figure.III.12 La tension de la buse.....	55
Figure.III.13 La tension de la phase A.....	56
Figure.III.14 La tension de la buse continue.....	56
Figure.III.15 La tension de la phase A.....	57
Figure.III.16 Le courant de la phase A.....	57
Figure.III.17 Le flux de la phase A.....	58
Figure.III.18 La vitesse de la GRV.....	58
.Figure IV.1 Schéma d'une turbine éolienne	61

Figure IV.2 Évolution du coefficient de puissance de l'éolienne.....	63
Figure IV.3 Puissance disponible d'une éolienne donnée.....	63
Figure IV.4 Schéma bloc du modèle de la turbine.....	65
Figure IV.5 Association d'une GRV et d'une turbine éolienne.....	66
Figure IV.6 Modèle de simulation de l'association GRV-Turbine éolienne.....	67
Figure. IV.7 Modèle de simulation de l'association GRV-Turbine éolienne.....	67
Figure IV.8 La vitesse de vent (m/s).....	68
Figure IV.9 La vitesse de la GRV.....	68
Figure IV.10 La tension du bus continue.....	69
Figure IV.11 C_p	69
Figure IV.12 λ_{opt}	70
Figure. IV.13 La tension de la phase A.	70
Figure.VI.14 Le courant de la phase A	71
Figure.IV.15 Zoom d'une portion de la courbe de la Fig.IV.12.....	71
Figure.IV.16 Le couple électromagnétique.....	72

Notations et symboles

s, r	Indices stator et rotor, respectivement
N_r	Nombre des pôles rotoriques
N_s	Nombre des pôles statoriques
θ_o	Angle de commutation [$^\circ$]
θ_{off}	Angle de commutation [$^\circ$]
θ_e	Angle électrique [$^\circ$]
θ_m	Angle mécanique [$^\circ$]
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 [$^\circ$]
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
C _p	Coefficient de performance
V _{vent}	Vitesse du vent en (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

INTRODUCTION GENERALE

La consommation mondiale d'énergie enregistre une croissance explosive. 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 et leur constante évolution. Il est possible de citer les machines électriques classiques comme la machine courant continu, la machine synchrones et asynchrones mais il y a aussi de nouveaux types des machines spécial émergent dans l'industrie comme les machines a courant continu sans balais en anglais Brushless DC electric motor (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, 4]. 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 dernier.

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 avons donné des généralités sur la MRV en introduisant le principe de fonctionnement et les différents types rencontrés. Nous avons parlé aussi sur son alimentation et ses stratégies de commande.

- Dans le Chapitre II : traite 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 la 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 différents couples d'entraînement et aussi l'importance de l'influence de la variation de la charge sur le courant produit par la machine, dans tout ça en utilisant MATLAB/SIMULINK.

- Dans le Chapitre IV : nous allons nous intéresser essentiellement à la modélisation de la turbine éolienne avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, pour faire l'association avec la GRV, on va exposer les résultats de simulation de l'association GRV-turbine commandée par un régulateur à hystérésis avec un système auto-excité. Ces résultats présentent les performances de cette commande par tel que l'importance de régler le courant produit par la machine pour différents des vitesses de vent.

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 I : Généralités sur Les Machines à Réluctance Variable

I.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 [5, 6].

La machine à réluctance variable à double saillance (MRVDS) dont les phases sont alimentées en courants unidirectionnels par des convertisseurs à demi-points 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 pulsateur à haute vitesse et génère un bruit acoustique supérieur à tous ses concurrents [5, 7].

Dans le présent chapitre, nous présenterons les différents types de machines à réluctance variable selon leurs constructions puis nous procéderons à une étude théorique de leur fonctionnement en association avec leur alimentation.

I.2. Différents topologies de MRV

I.2.1. MRV pures

La MRV dite "pure" a une structure saillante au rotor et au stator avec un stator "actif" où sont situés les bobinages et un rotor "passif" (sans bobinage ni aimants) qui la distingue

des machines synchrones et asynchrones. 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 [13].

On peut citer divers types (Fig. I.1) de structures à réluctance pure [19]:

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

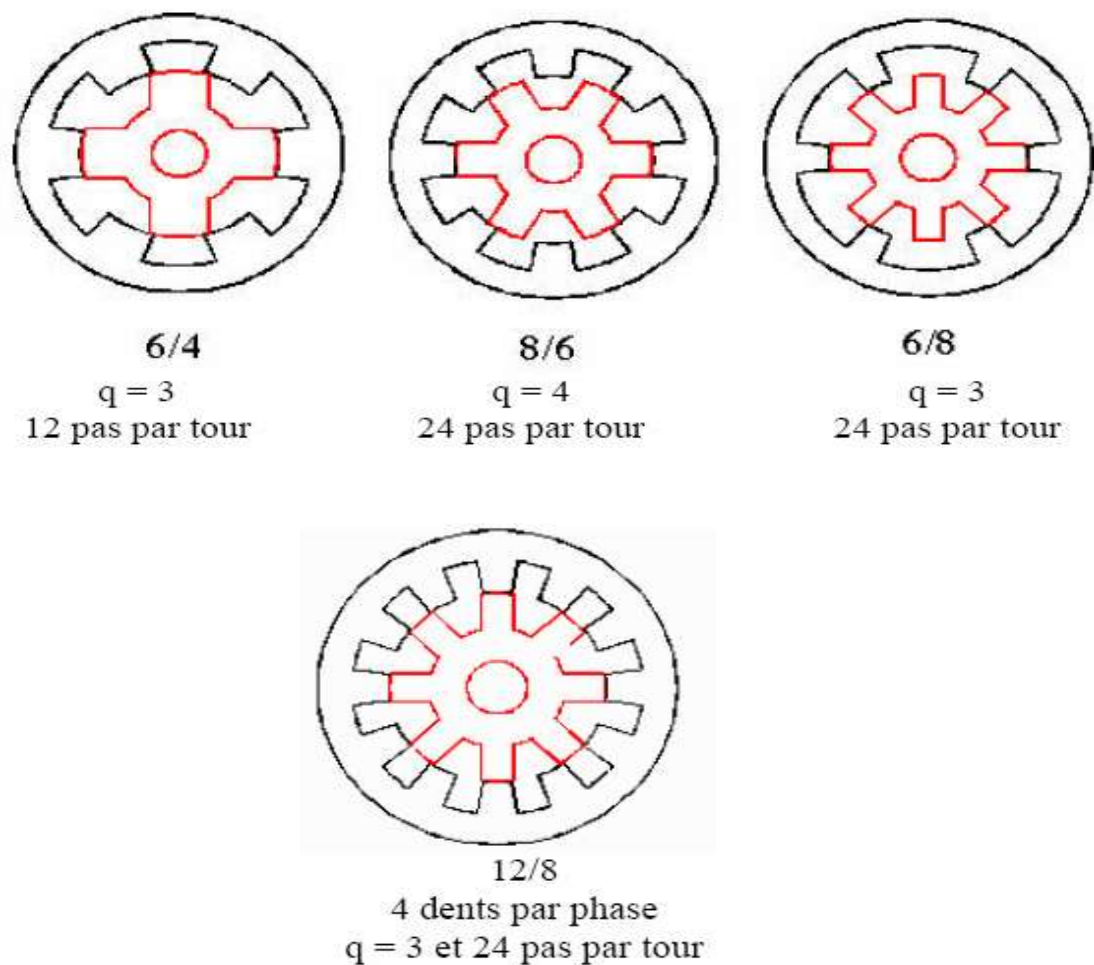


Figure. I.1 MRV pure à double saillance.

Elle se caractérise par un couple massique élevé et une grande simplicité de construction d'où un faible coût et une bonne robustesse [14]. 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 [8, 9].

I.2.2. MRV vernier

Alors que la MRV « pure » est alimentée par des courants de forme rectangulaire la MRV vernier est alimentée par des courants sinusoïdaux. En effet, le pas dentaire au rotor et au stator est légèrement différent, ce qui permet d'obtenir une perméance sinusoïdale. Le fonctionnement de cette machine (excitée au rotor et au stator) est similaire à celui d'une machine synchrone à rotor lisse. L'avantage de cette structure est que l'on peut lui associer un convertisseur classique [12].

La structure de la figure (I.1) est excitée au rotor. Le même principe peut être appliqué avec une excitation au stator. Elle dispose de N_s dents au stator et N_r dents au rotor et p et p' sont les polarités des circuits induit et inducteur. Le respect de la condition « $\pm N_s \pm N_r = \pm p \pm p'$ » permet de générer un couple à la vitesse de synchronisme donné par :

$$\Omega = \frac{\omega \pm \omega'}{N_r \pm p} \quad (I-1)$$

Avec ω et ω' les pulsations de l'induit et l'inducteur et à une constante égale à 0 ou 1 selon que le circuit d'excitation est disposé au stator ou au rotor.

On remarque que comme pour la MRV « pure », la vitesse de rotation est liée au nombre de dents au rotor. Pour une fréquence d'alimentation donnée, l'augmentation du nombre de dents au rotor N_r permet de diminuer la vitesse de rotation. C'est un grand avantage car il est plus simple mécaniquement de diminuer la taille des dents que celle des pôles [5, 15, 16].

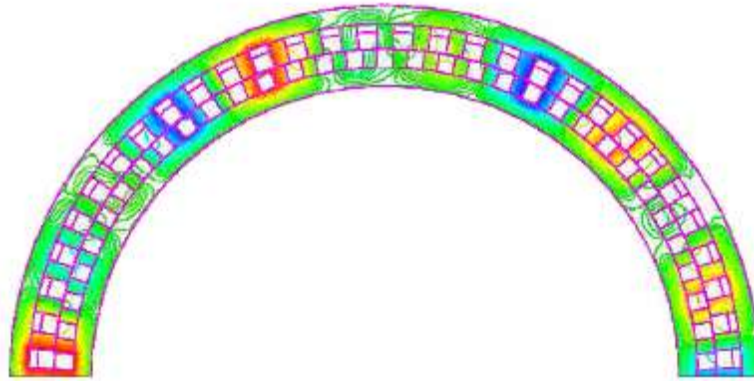


Figure. I.2 MRV excitée à effet vernier.

I.2.3. MRV hybrides

Par rapport aux précédentes structures, la particularité des MRV hybrides réside dans l'intégration d'aimants permanents afin d'améliorer leurs performances [10,13].

L'adjonction d'aimants dans les structures à double saillance permet de compenser un entrefer trop élevé mais on s'éloigne des structures à réductance pure. Il est cependant intéressant de signaler deux machines à aimants à double saillance dérivées des MRVDS : l'une met en œuvre des aimants placés au rotor, 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 : on obtient alors une machine à double saillance et aimants permanents statoriques (DSPMM) dite « MRV polarisée » figure (I.3) [8, 17, 18].

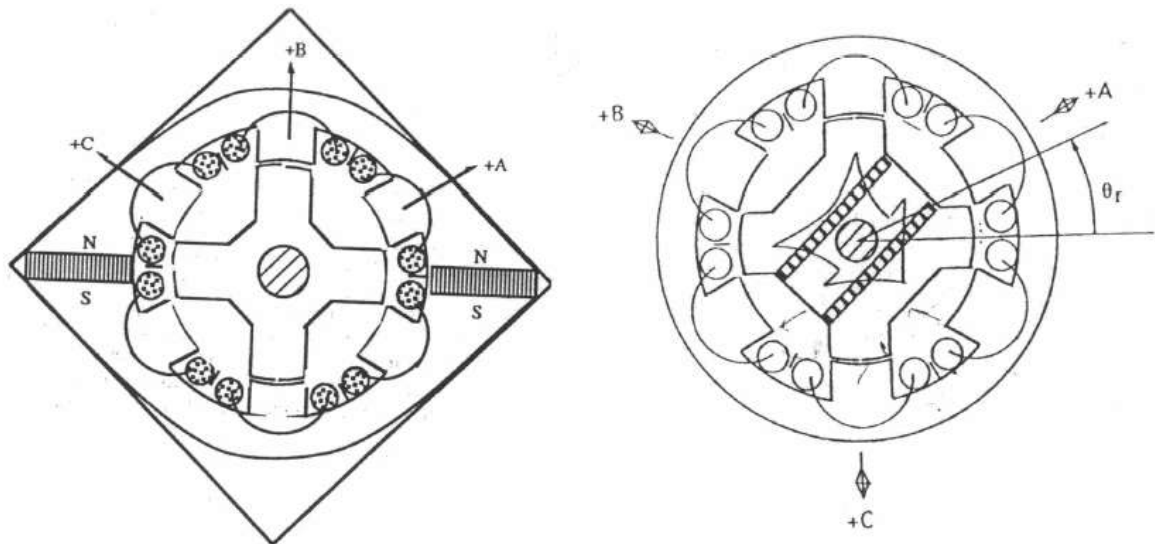


Fig. I.3 Utilisation d'aimants dans les machines à double saillance.

La MRV de la figure (I.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 » de la figure (I.5) rend cette structure intéressante pour les forts couples [13].

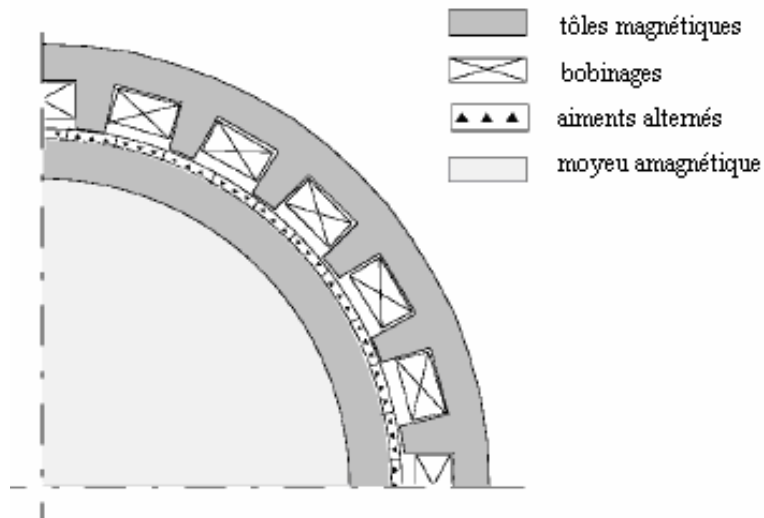


Figure I.4 MRV hybride à effet vernier [13].

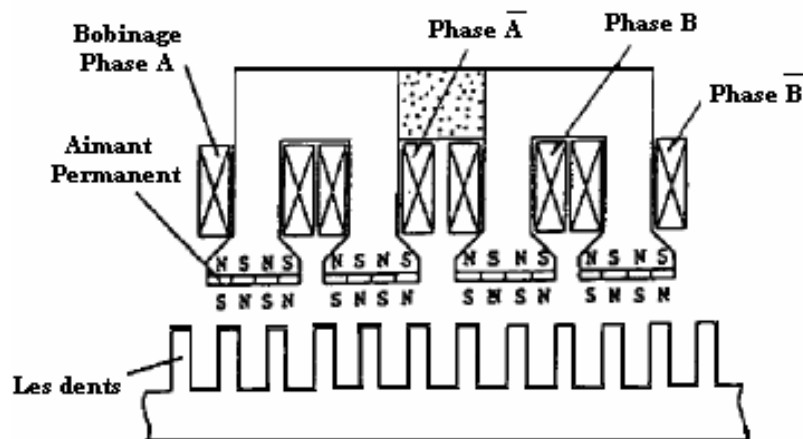


Figure I.5 MRV à plots aimantés [13].

I.3 Conversion d'énergie

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 (Fig. I.6).

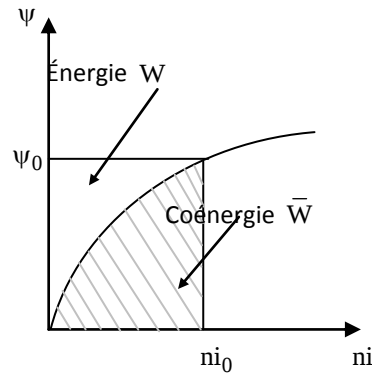


Figure. I.6 Énergie (W_{em}) et coénergie (W'_{em}) [19].

b- énergie magnétique :

$$W_{em} = \int i. d \Psi \quad (I.2.a)$$

$$T_e = - \left(\frac{\partial W_e}{\partial \theta} \right)_{\Psi=cst} \quad (I.2.b)$$

c- coénergie :

$$W'_{em} = \int \Psi. di \quad (I.3.a)$$

$$T_e = \left(\frac{\partial W_c}{\partial \theta} \right)_{i=cst} \quad (I.3.b)$$

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

$$T_e = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta_m} \quad (I.3.c)$$

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 déjà présentés dans la figure (I.8)[19].

Nous allons à présent examiner plus en détail le fonctionnement **générateur**, objet de ce travail.

I.4 Principe de base [14, 5, 20, 19]

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 (I.7)). 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 [21] :

- une position d'opposition (Figure (I.7).a) dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance maximale, ou une inductance minimale ;
- une position de conjonction (Figure (I.7).b) dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance minimale, ou une inductance maximale.

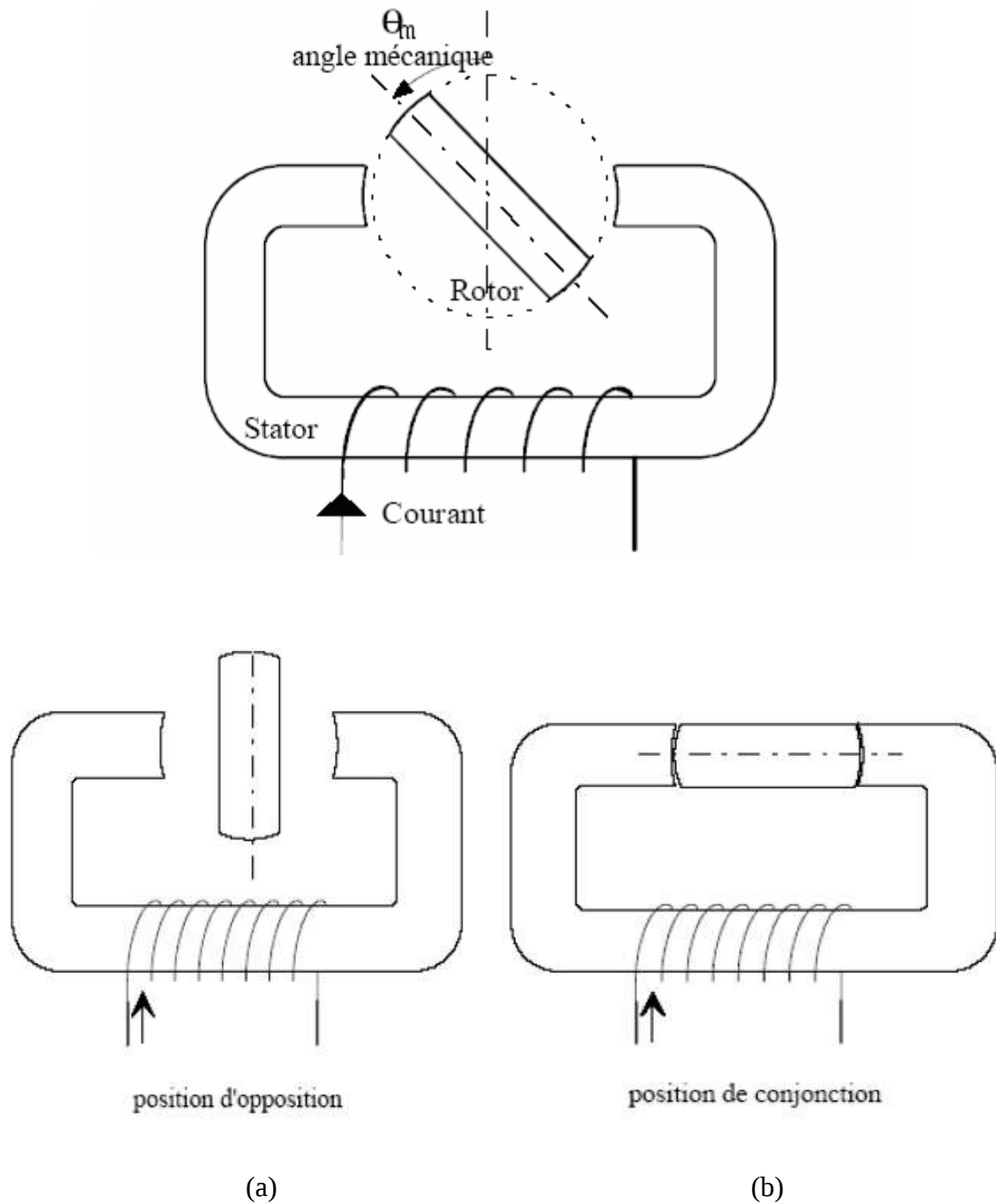


Figure I.7 Structure MRV de base et positions extrêmes du rotor [14].

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 réductance 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 (I.8)) donnera le régime de fonctionnement souhaité :

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

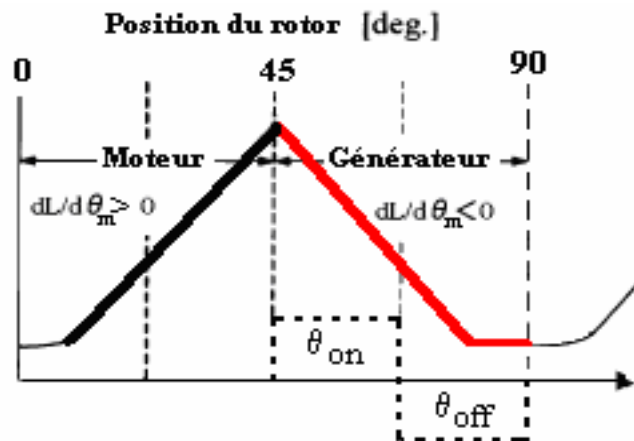


Figure I.8 Variation de l'inductance en fonction de la position du rotor [14].

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 (I.9).a).

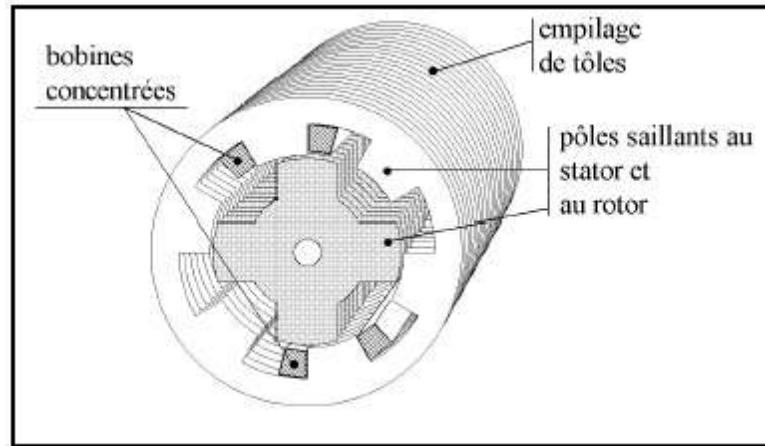


Figure (I.9).a Structure électromagnétique d'une MRVDS 6/4 triphasée.

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 (I.9).b).

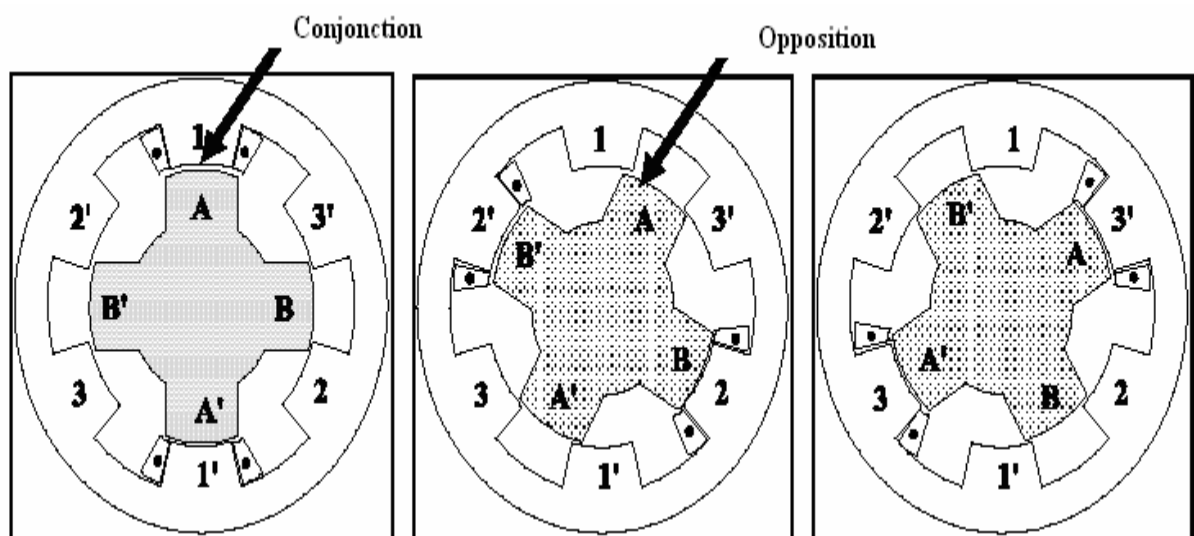


Figure (I.9).b Positions d'opposition et de conjonction d'une MRVDS 6/4.

La période de variation de la réductance 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 :

$$\theta_e = N_r \cdot \theta_m \quad (\text{I-4})$$

I.5.Applications critiques des MRV

Après environ deux décennies de recherche sur la minimisation des vibrations et des bruits acoustiques, cet inconvénient majeur de la MRV est limitée à un niveau acceptable pour les applications industrielles [26].

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 dites “critiques” apparues dans la littérature.

➤ **Haute vitesse.** Le premier train à grande vitesse équipé de la MRV est un train allemand : ICE3 (figure I.10). 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 $2,0 \cdot 10^5$ tr/min est atteinte [22].

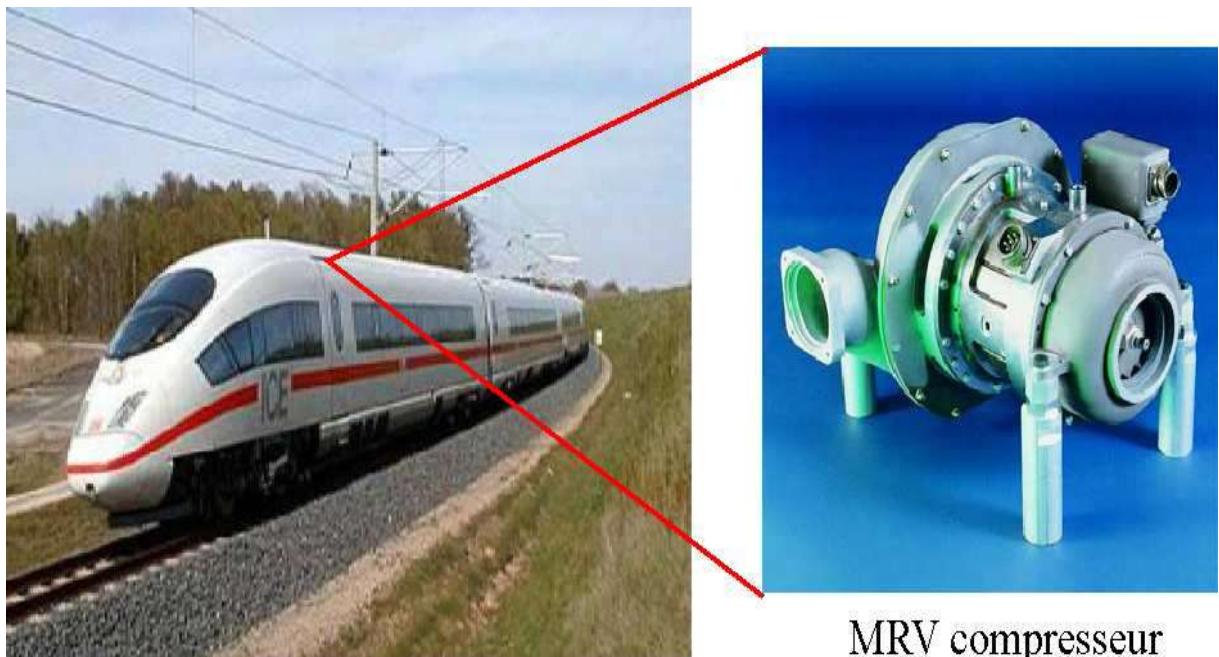
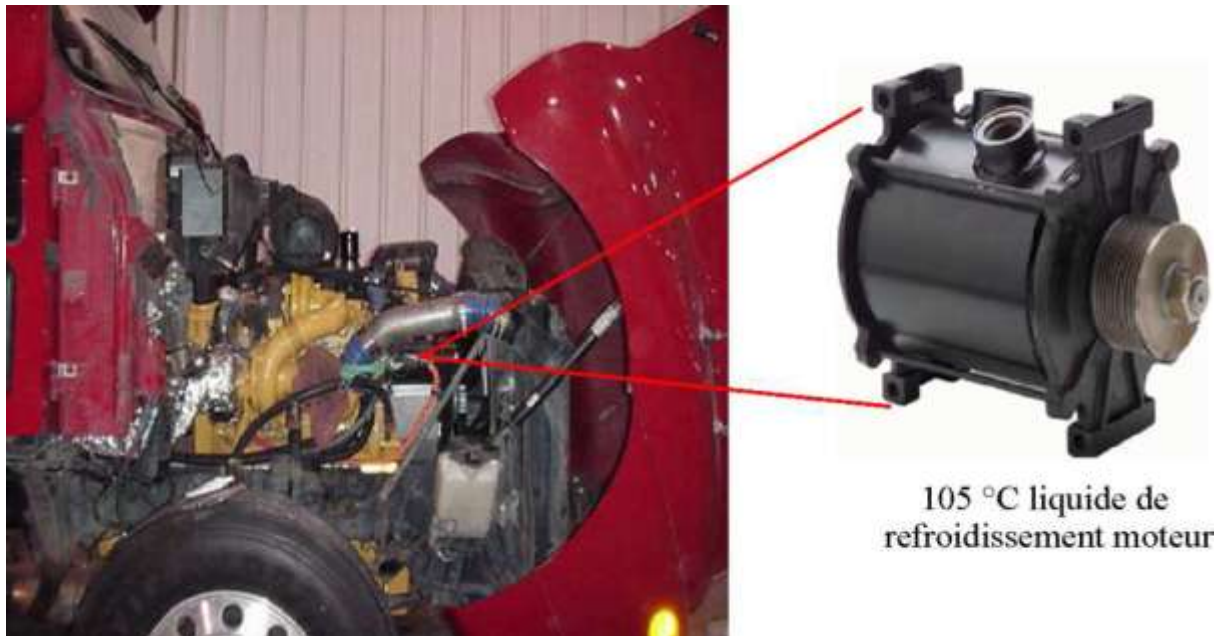


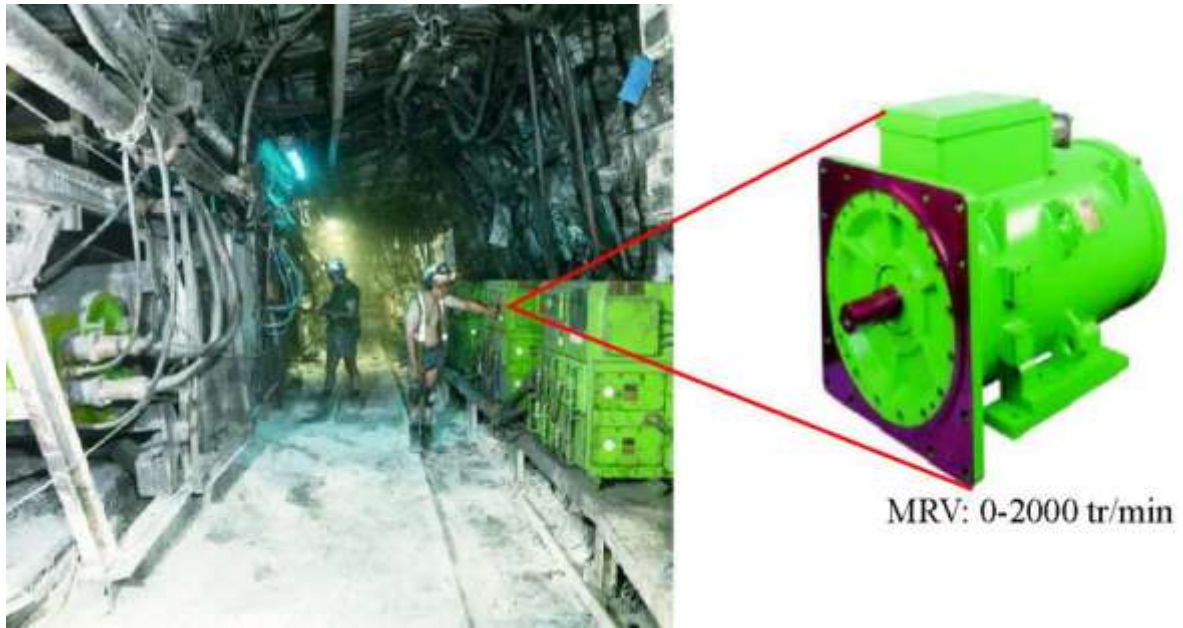
Figure I .10 MRV utilisée dans le train à grande vitesse pour la climatisation de l'air cycle [26].

➤ **Environnement extrême** : haute température ambiante, humide, sale, etc. L'une des applications à haute température de la MRV est illustrée à la figure I.11(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 I.11(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. [22]



(a) Environnement à haute température ambiante.



(b) Environnement humide et sale.

Figure I.11 MRV fonctionnent dans les environnements extrêmes [22].

I.6. Avantages et inconvénients des MRV

Par apport aux machines classiques AC et DC, les MRV présentent les avantages suivants [14, 23, 5]:

- ☐ Structure simple et robuste pour un faible coût de fabrication.
- ☐ Possibilité de fonctionnement à puissance quasi constante sur une large plage de vitesse
- ☐ Pertes essentiellement concentrées au stator donc refroidissement aisé.
- ☐ Fonctionnement dégradé possible grâce à l'indépendance de chaque phase.
- ☐ Couple massique relativement élevé, ...

La MRV a cependant quelques limites :

- ☐ Elle doit être commutée électroniquement et ne peut donc être alimentée directement par une source alternative (AC) ou (DC).
- ☐ Ses caractéristiques magnétiques non linéaires compliquent son analyse et son contrôle.

- Sa structure dentée, cause d'oscillations de couple et de bruits, surtout à vitesse élevée.

I.7.Principe de fonctionnement d'une GRV

La génératrice à réluctance variable est désirable dans le futur, elle contient une structure simple et solide se qui nous permet de l'a utilisé dans les centrales éolienne. La technologie du générateur à réluctance variable est basée sur les concepts que magnétisé vis-à-vis des pôles attire. Typiquement, il y a nombre inégal des pôles saillants sur le stator et rotor. Tous les deux sont construits avec de l'acier électrique stratifié de catégorie [20]. Tous les noyaux de fer du stator et du rotor dans la GRV sont les pôles saillants. La distribution du champ magnétique est différente quand la position relative entre le pole de rotor et la phase électrique sur le stator est différente. Ainsi l'inductance d'enroulement changera avec le changement de la position relative entre le pole de rotor et le pole de stator. Quand le rotor tourne, l'inductance des enroulements changera du maximum $L_{\max}$ en le minimum $L_{\min}$ périodiquement. L'inductance atteint le maximum quand les pôles de rotor et les pôles de stator sont en même position et minimum d'extensions quand les pôles de rotor et les pole de stator sont en opposition [23].

I.7.1.Les différentes phases de la GRV

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

- **phase (1) : d'excitation ou de magnétisation.**
- **phase (2) : de génération électrique.**

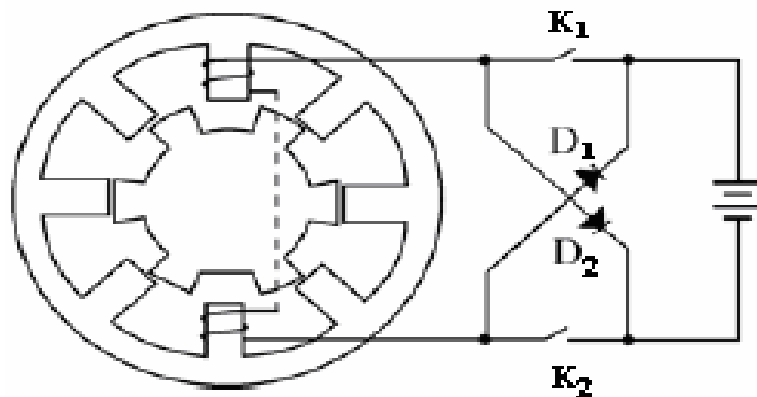


Figure I.12 Représentation d'une GRV [23].

- **phase (1)** : quand $[K_1, K_2]$ fermés le bobinage du stator est excité par un circuit externe (Figure. I.12.a); l'énergie électromécanique fournie par le circuit externe est convertie en énergie magnétique.

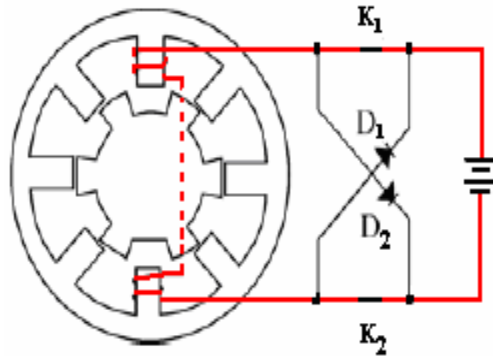


Figure. I.12.a Phase de magnétisation.

- **phase (2)** : quand $[K_1, K_2]$ ouverts et $[D_1, D_2]$ fermés, les énergies magnétique et mécanique sont converties en énergie électrique qui alimente de nouveau la source ou la charge. (Figure I.12.b)

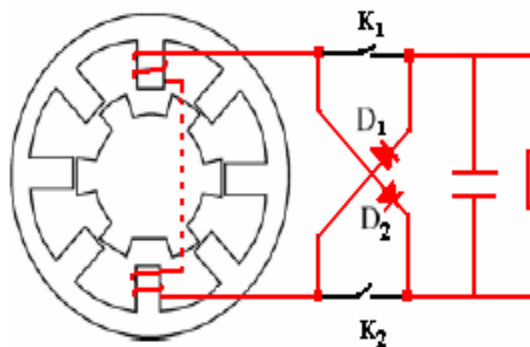


Figure. I.12.b Phase de génération.

I.7.2. Modes d'excitation de la GRV

La génératrice à réductance variable peut fonctionner en excitation séparée ou en auto excitée.

- **Dans la GRV à excitation séparée**, la boucle de l'excitation est indépendante de la génération ; elle est réalisée en permanence par un circuit externe composé d'une source continue et d'un interrupteur [14, 23, 24, 5].

Parce que l'excitation est fournie par une source extérieure pendant le processus courant entier du GRV, il n'y a aucun rapport entre la tension d'excitation et la tension de sortie à ce moment-là et les deux tensions peuvent être ajustées indépendamment. Par conséquent, le contrôle de l'excitation séparée est commode [5].

- **Dans la GRV auto excitée**, l'excitation initiale est fournie par une source extérieure de tension. Quand la tension générée (V_{DC}) atteint sa valeur de régime permanent (la valeur régulière pour le contrôle), la source extérieure est déconnectée. Alors l'excitation sera fournie par la tension produite par la GRV elle-même.

Pour ce mode, le volume de système est très réduit et l'efficacité est élevée, parce qu'il n'y a aucune source externe quand la tension est établie. La magnétisation est alors assurée et maintenue par la suite par un condensateur C_{DC} [14,23, 24].

I.8 Objectif

La fermeture des interrupteurs du convertisseur (diodes bloquées) doit être effectuée durant la décroissance de l'inductance, ce qui produit une tension ($+V_{DC}$) à la sortie du convertisseur : cette phase est appelée « phase de magnétisation de la GRV ». Pendant la croissance de l'inductance seules les diodes conduisent (interrupteurs ouverts), la tension de sortie devient ($-V_{DC}$) : cette phase est appelée « phase de génération de la GRV ».

En conséquence, le convertisseur délivre une tension en créneaux variant entre $+V_{DC}$ et $-V_{DC}$. Ainsi, l'objectif de la commande est de faire conduire les IGBT seulement pendant la phase de magnétisation (décroissance de l'inductance), comme illustré dans la figure (I.13). En réalité, on insiste à ce que la magnétisation de la machine soit faite lors de la décroissance de l'inductance pour la raison suivante : pour que le couple soit négatif (car il s'agit d'une génératrice), il faut que la dérivée de l'inductance soit négative [5].

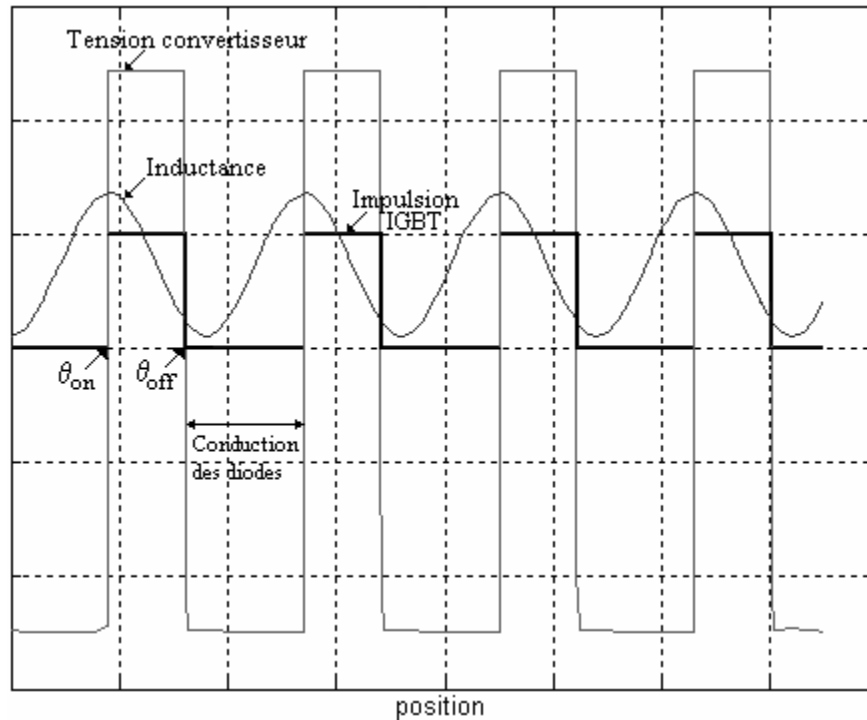


Fig.I.13 Conduction des IGBT pendant la décroissance de l'inductance [5].

I.9.Conclusion

Ce chapitre nous a permis de choisir, parmi les différentes structures de MRV existantes, une configuration à double saillance simple type MRV 6/4 .

Après avoir examiné le fonctionnement de ce prototype en mode générateur qui nous intéresse ici ainsi que les conditions de sa mise en œuvre, nous allons aborder dans le chapitre suivant la modélisation puis la simulation de la machine associée à son convertisseur et sa commande sous environnement MATLAB/SIMULINK.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et la simulation de la machine à réluctance variable en fonction moteur.

Chapitre II : Modélisation & Simulation Du Système MRV-Convertisseur

II.1.Introduction

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.2. Hypothèses simplificatrices [5, 29]

- ⌚ 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 et de l'inductance mutuelle.

II.3. Modélisation de la MRV

II.3.1. Les équations électromagnétiques [29 ,5 ,19]

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

$$V_s = Ri + \frac{d\psi}{dt} \quad (\text{II-1})$$

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-1) peut être développée comme suit:

$$V = Ri + \frac{d\psi}{di} \frac{di}{dt} + \frac{d\psi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II-2})$$

$\frac{\partial \Psi}{\partial i}$ 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.3.2. 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 [29, 5]:

$$\bar{W}(I, \theta) + W(\Psi, \theta) \geq \Psi^t I \quad (\text{II-3})$$

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

$$C_e(\Psi_1, \dots, \Psi_n, \theta) = \frac{\partial W}{\partial \theta}(\Psi_1, \dots, \Psi_n, \theta) \quad (\text{II-4})$$

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

$$C_e(\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \theta) = \frac{\partial W}{\partial \theta}(\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \theta) \quad (\text{II-5})$$

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.3.3. Modèle Linéaire de la MRV

Les caractéristiques électromagnétiques utilisées pour la simulation de la MRV 6/4 ont été obtenues du chapitre (I). La figure (II.1) montre le profil de l'inductance linéaire $L(\theta)$ avec chaque inductance de phase déplacée par un angle θ_s donné [34]

Par :

$$\theta_s = 2\pi \left(\frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \right) \quad (\text{II-6})$$

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 :

$$\theta_x = \left(\frac{\pi}{N_r} \right) - \frac{(\beta_r + \beta_s)}{2} \quad (\text{II-7})$$

$$\theta_y = \left(\frac{\pi}{N_r} \right) - \frac{(\beta_r - \beta_s)}{2} \quad (\text{II-8})$$

$$\theta_z = \frac{(\beta_r - \beta_s)}{2} \quad (\text{II-9})$$

$$\theta_z = (\theta_y + \theta_z + \theta_s) \quad (\text{II-10})$$

Lesquels sont indiqués dans la figure (II.1). La figure (II.2) montre l'angle δ correspondant au déplacement d'une phase par rapport à une autre, elle est donnée par:

$$\delta = 2\Pi \left(\frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \right) \quad (\text{II-11})$$

Le MRV 6/4 a les paramètres suivants:

$$L_{\min} = 0.008 H, L_{\max} = 0.06 H, \text{ et } \beta_r = 32.26^\circ, \beta_s = 30.85^\circ$$

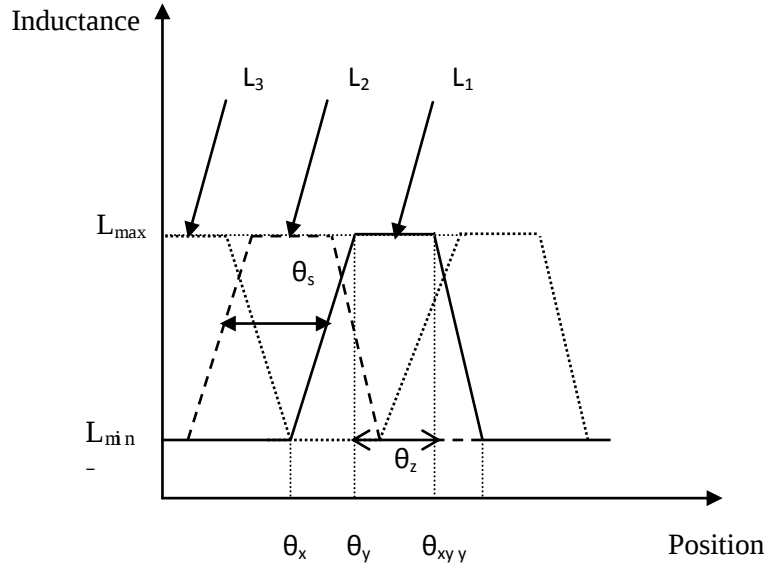


Figure II.1 Inductance en fonction de la position [21]

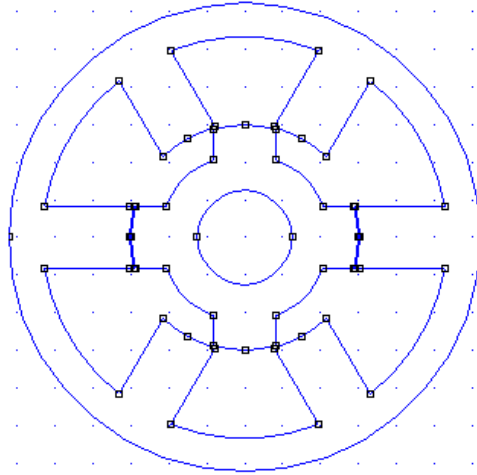


Figure II.2 L'angle δ correspond au déplacement d'une phase par rapport à une autre [24, 29]

L'équation électrique de chaque phase est donnée par:

$$V_i = R i_i + \frac{d\psi_i(\theta, i_i)}{dt}, \quad i = \{1, 2, 3\} \quad (\text{II-12})$$

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

$$\Psi_i(\theta, i_i) = L(\theta)i_i \quad (\text{II-13})$$

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

$$W_{\text{total}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 L(\theta + (n-i-1)\theta_s) i_i^2. \quad (\text{II-14})$$

Et le couple total du moteur est donné par :

$$C_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \frac{L(\theta + (n-i-1)\theta_s)}{d\theta} i_i^2 \quad (\text{II-15})$$

Les équations mécaniques sont :

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_e - C_r - F\omega \quad (\text{II-16})$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (\text{II-17})$$

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.3) le diagramme de simulation utilisé pour le modèle linéaire de la MRV. La figure (II.4) 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 du 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 .

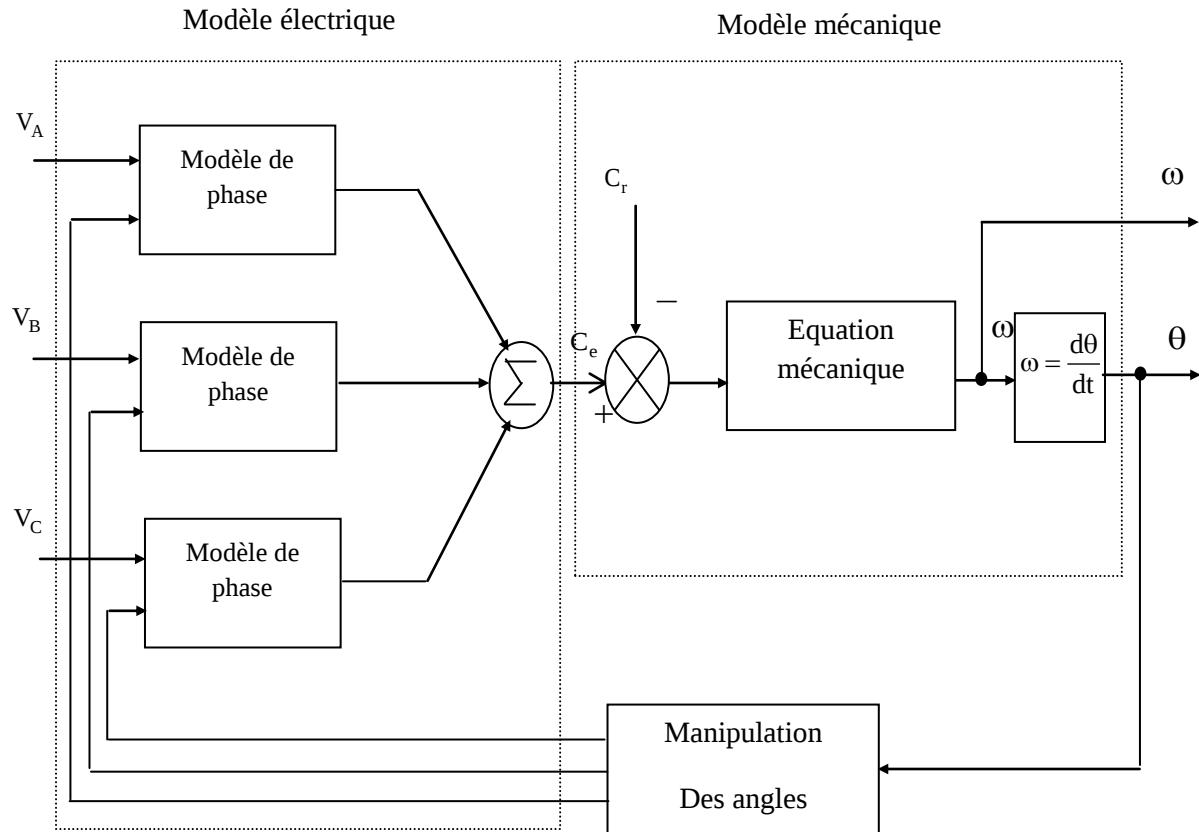


Figure II.3 Diagramme de simulation de MRV [24].

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, la 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.2), pour éviter le premier cas d'un couple de charge nul.

II.4. Commande en tension [30, 24]

Supposant une forme d'inductance idéale, les courbes de simulation dans la figure (II-4) 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_d qui permet le retour du flux magnétique vers zéro.

Pour appliquer la tension V à une phase, les deux IGBT Q_1 et Q_2 dans la figure (II.4) doivent être ON. Au contraire, pour appliquer la tension $-V$ et pour assurer la continuité de courant, les deux diodes D_1 et D_2 sont conductrices [24, 29].

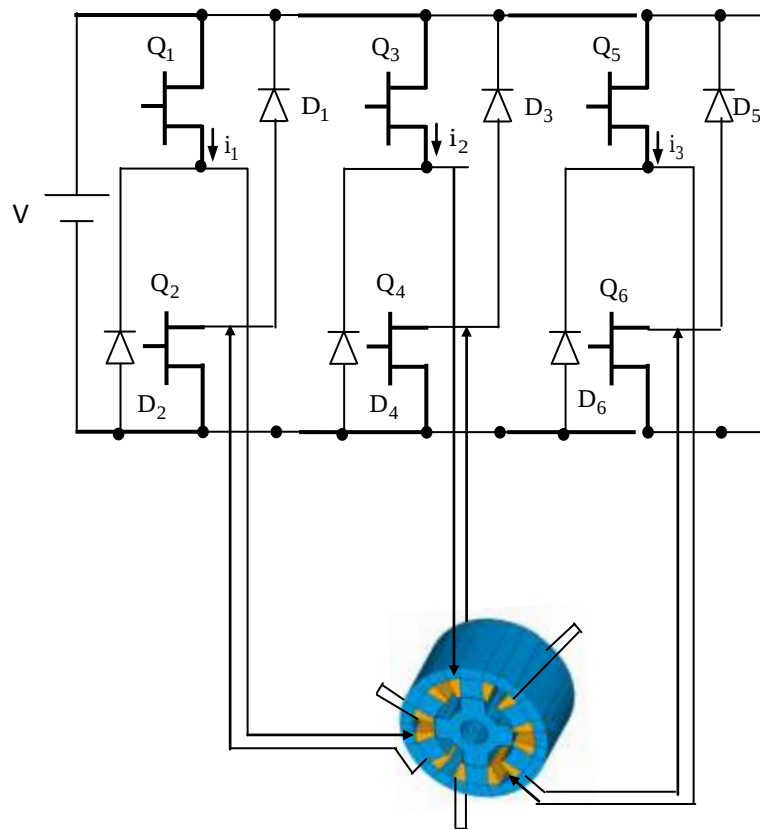


Figure II.4 Convertisseur H-pont [24, 31]

La relation de la tension de la phase:

$$V = Ri + \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (\text{II-17})$$

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

$$d\Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial \Psi}{\partial i} di \quad (\text{II-18})$$

$$\text{et} \quad \frac{d\Psi}{dt} = i \frac{dL}{d\theta} \omega + L(\theta) \frac{di}{dt} \quad (\text{II-19})$$

$$V = Ri + L(\theta) \frac{di}{dt} + i\omega \frac{dL}{d\theta} \quad (\text{II-20})$$

Dans l'équation (II-20), 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.4) 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.5.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.5.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 [24].

Bloc de simulation

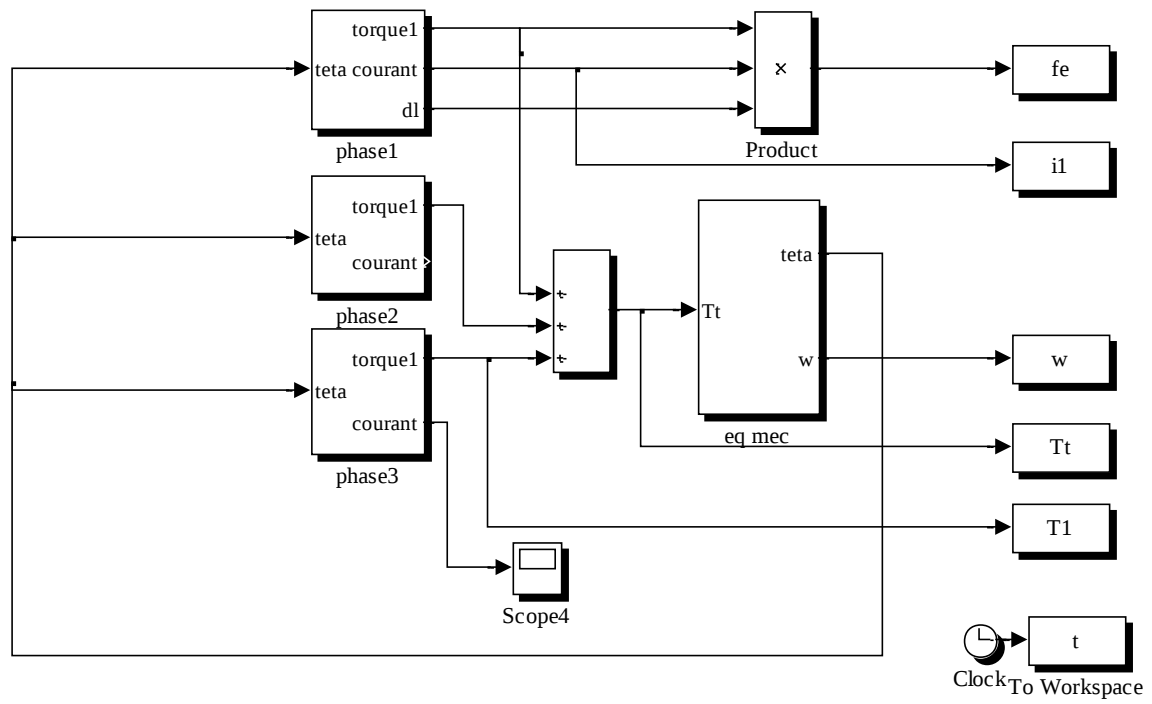
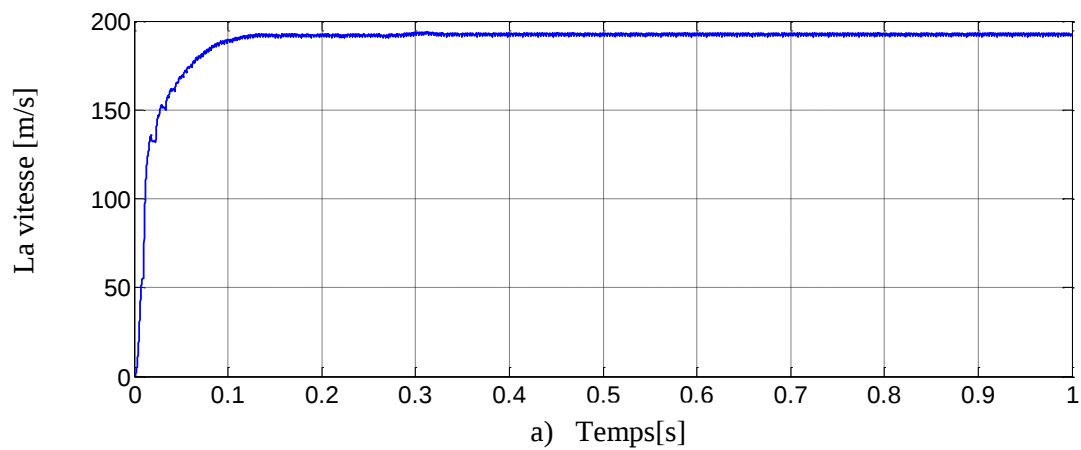
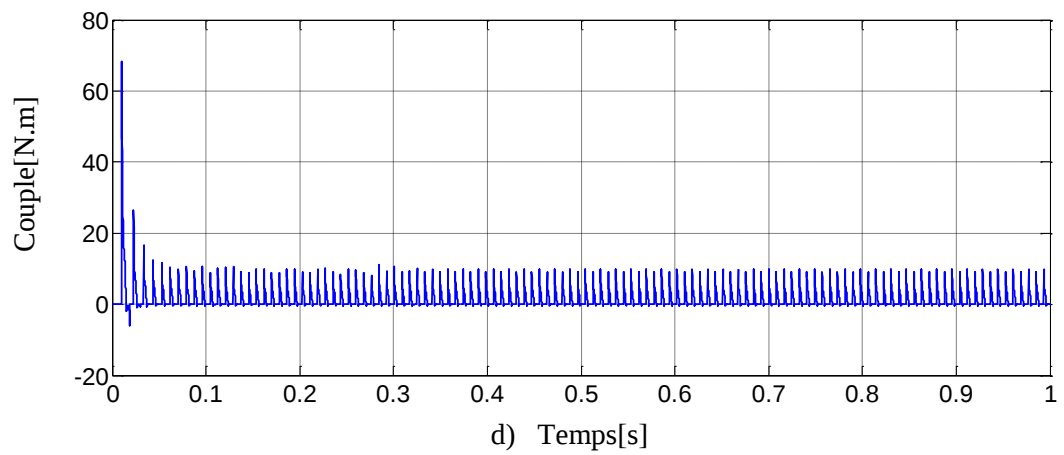
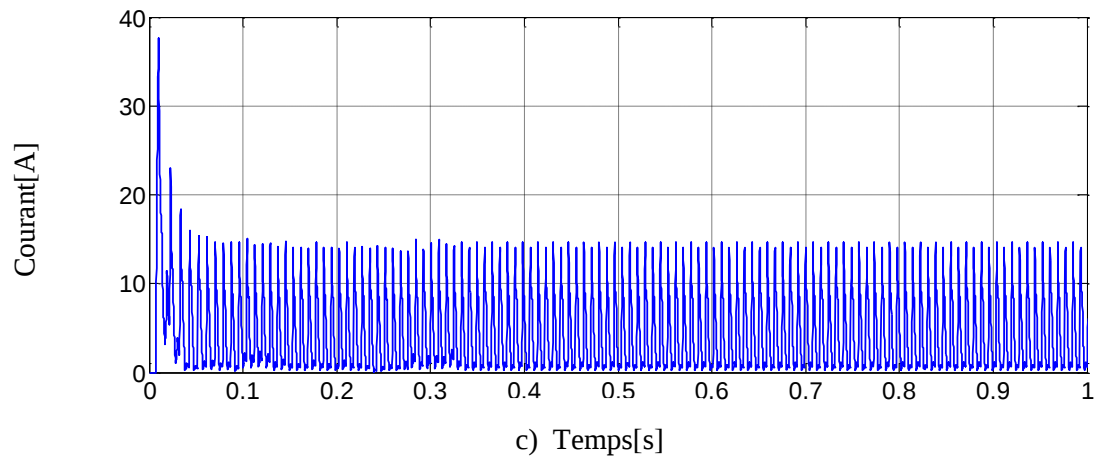
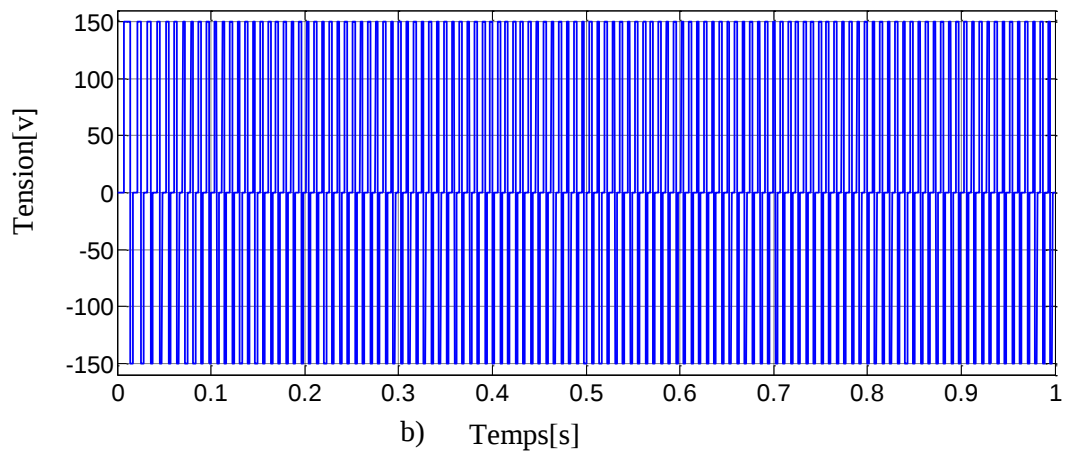


Figure II.5 Diagramme de simulation de MRV par phase (modèle linéaire).

II.5 Résultat de simulation





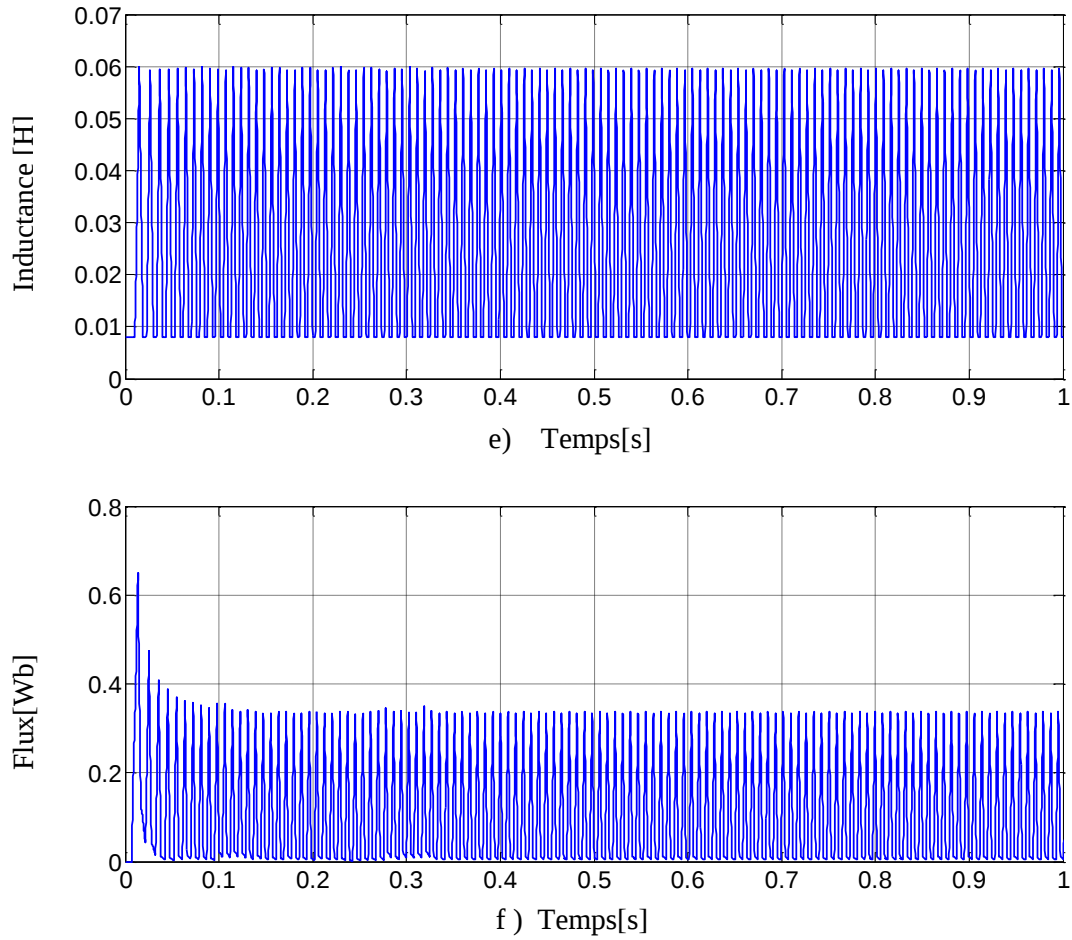
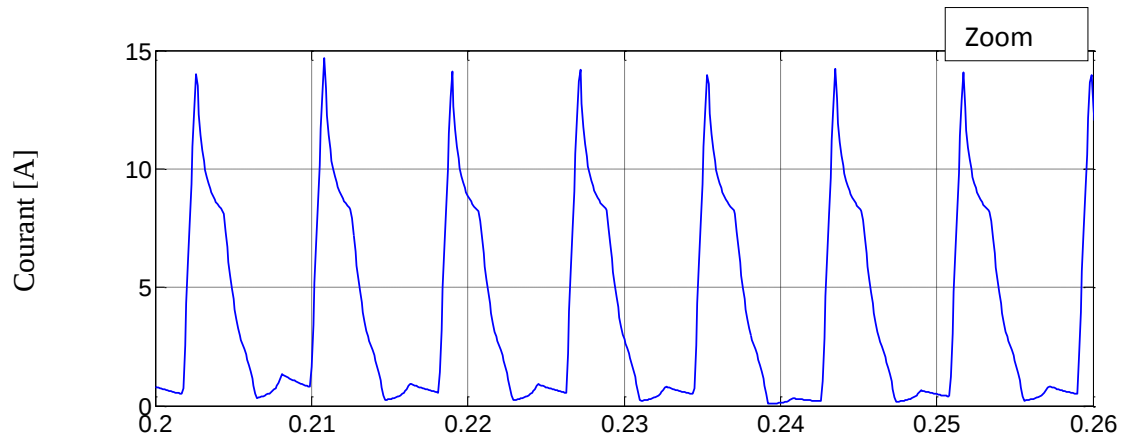


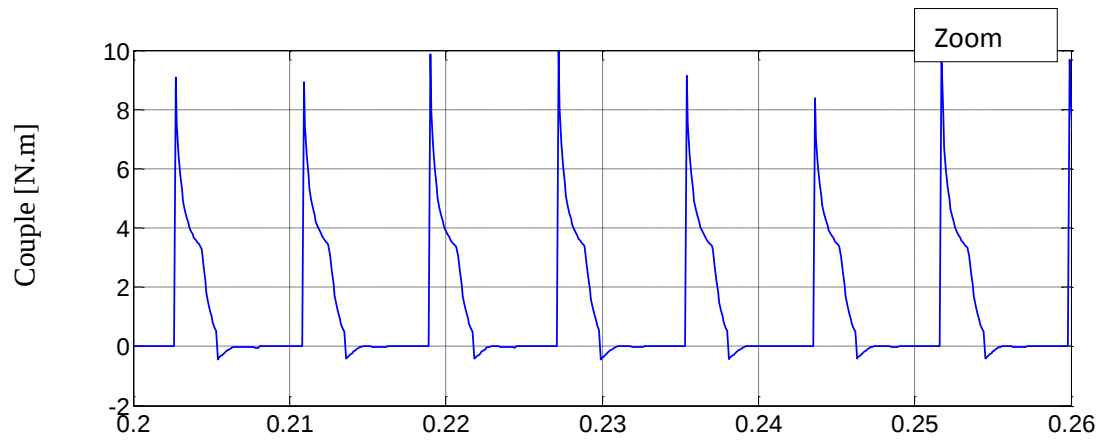
Figure II.6. a) vitesse b) tension. c) courant d) couple. e) Inductance. f) flux.

(De la phase).

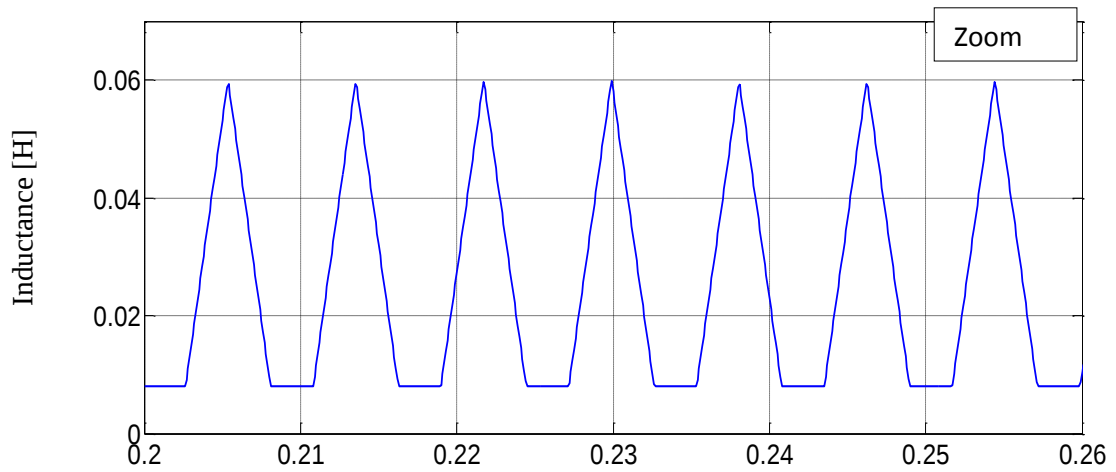
Pour illustrer l'importance de choisir un angle θ_{off} qui convient, nous avons mis plusieurs valeurs de θ_{off} comme illustré sur la figure (II.6). Dans la figure (II.6.a), nous pouvons voir que le courant de la phase n'arrive plus à la valeur zéro. Encore, on peut voir dans la zone (1) que le courant 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.6.b)) quand la tension de la phase passe de -320 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.



a) Temps[s]



b) Temps[s]



c) Temps[s]

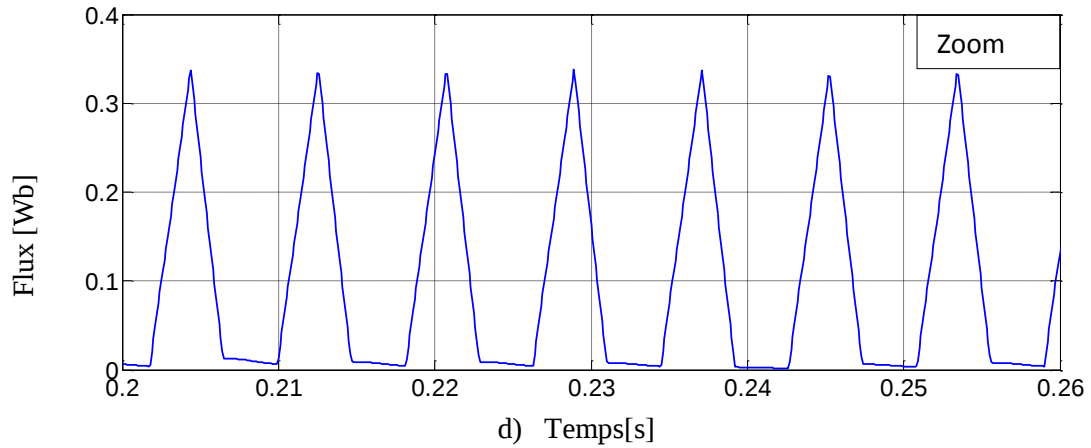


Figure II.7. a) Courant. b) couple. c) inductance. d) flux.

La figure (II.7) montre un deuxième ensemble de résultats de simulation qui utilisent $\theta_{on} = 5.72^\circ$ et $\theta_{off} = 34.37^\circ$, avec la machine qui fonctionne sans charge. On note dans la figure (II.7.a) que la valeur de l'angle θ_{off} est maintenant suffisante pour éviter que le courant commence à augmenter quand la position alignée est atteinte. On peut voir dans la figure (II.7.b) que le courant de la phase produit un couple négatif très faible. Cependant, le couple total est toujours positif, comme montré dans la figure (II.7.d), parce que le couple négatif produit par une phase est compensé par les autres couples des phases. Le signal de la vitesse du moteur présente des fortes oscillations dans le régime permanent quand l'ondulation du couple est grande, comme montré dans la figure (II.7.c).

II.6 Commande par hystérésis

II.6.1 schéma synoptique

Le schéma synoptique du circuit de commande monophasé permettant d'atteindre l'objectif précédent est représenté (Fig. II.8). 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) [5, 24].

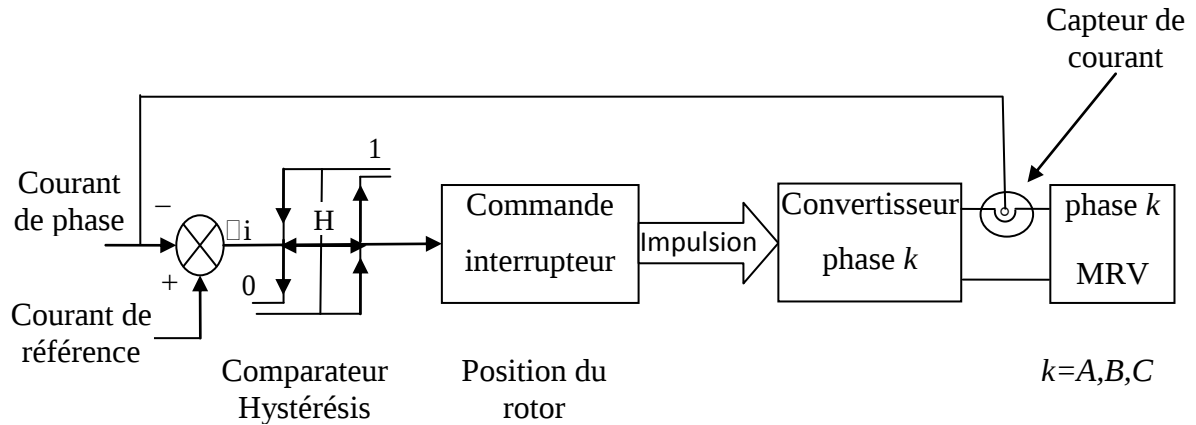


Figure .II.8. Schéma synoptique du circuit de commande proposé [5].

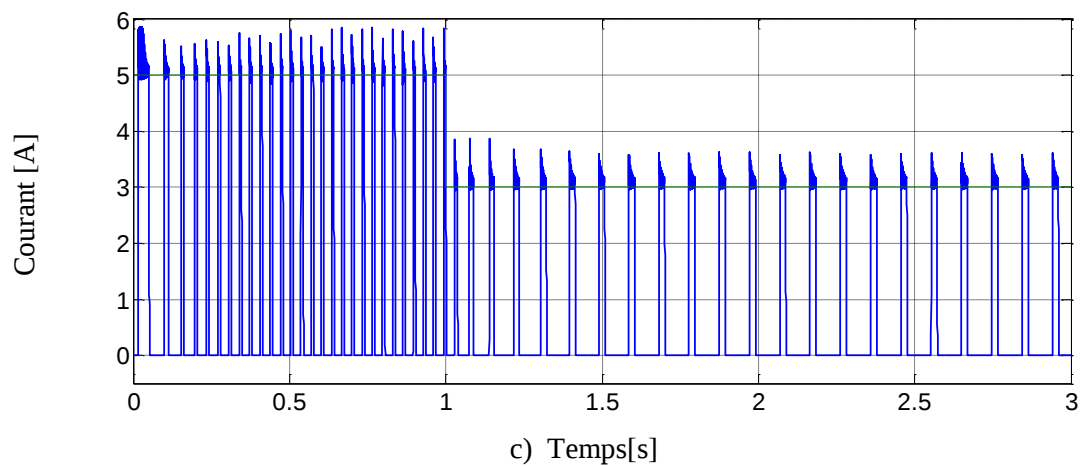
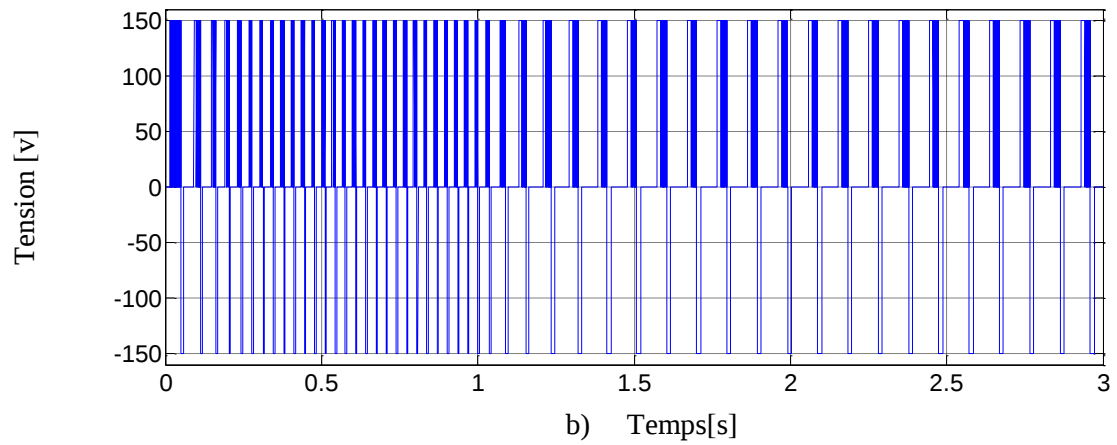
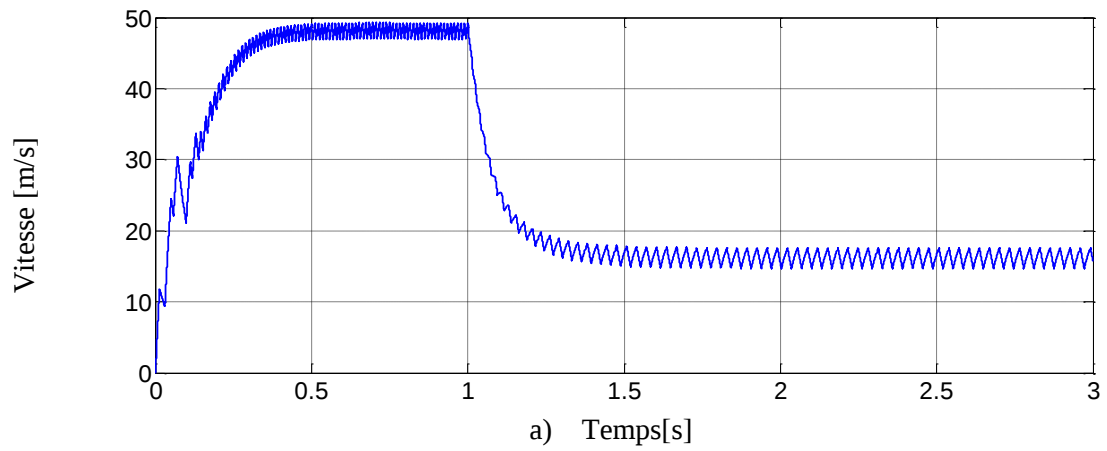
III.6.2 stratégie de la commande par hystérésis [24]

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.9) ont été obtenus pour $\theta_{on}=0^\circ$ et $\theta_{off}=30^\circ$, et un courant de référence $I_{ref}=6A$, avec le moteur qui fonctionne à vide. La figure (II.9.a) présente la forme de la tension par phase et la figure (II.9.b) présente la forme du flux par phase. La figure (II.9.b) 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.9.b) 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.9.d), et a pour conséquence des oscillations de vitesse importantes, comme montré dans figure (II.9.c).



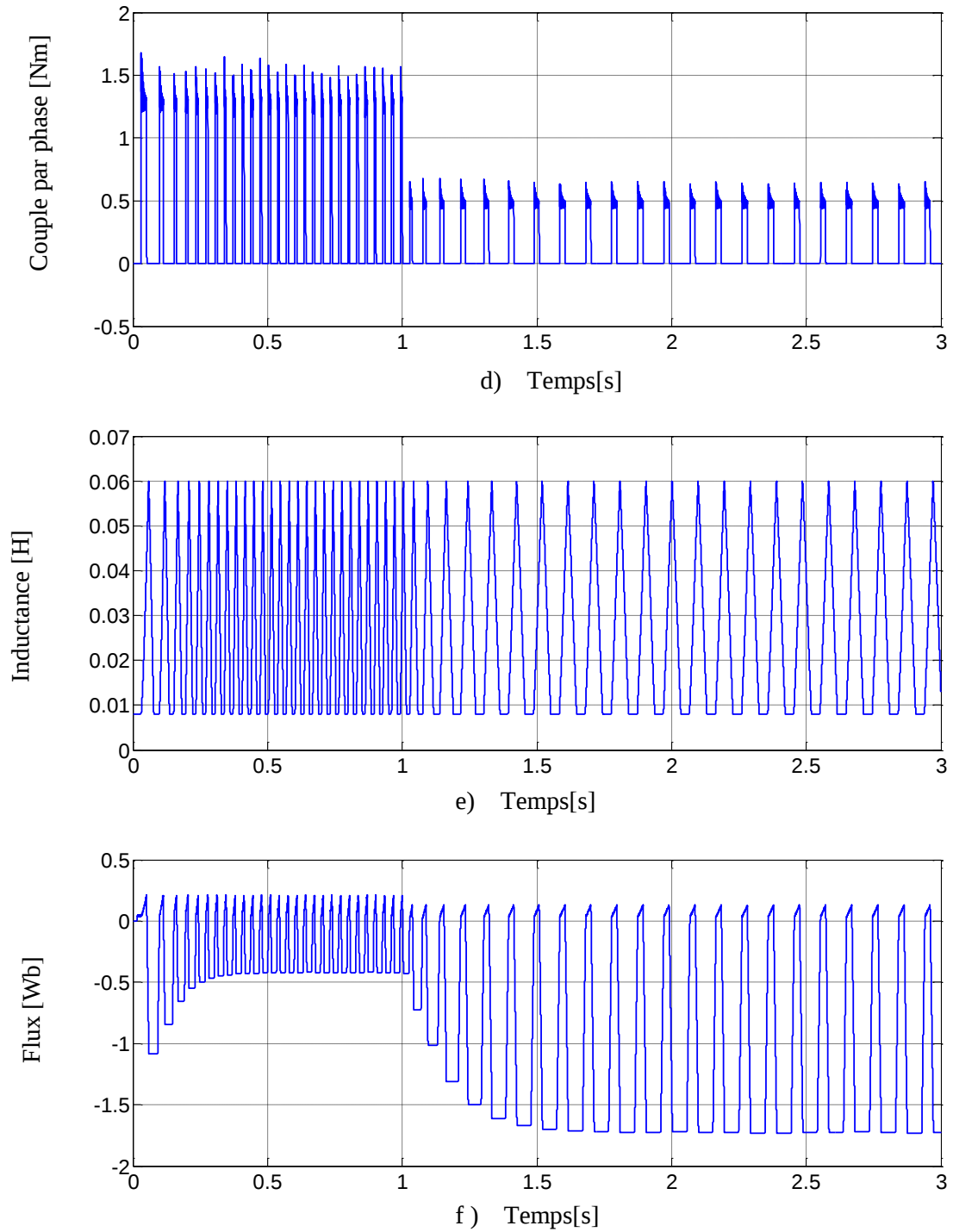
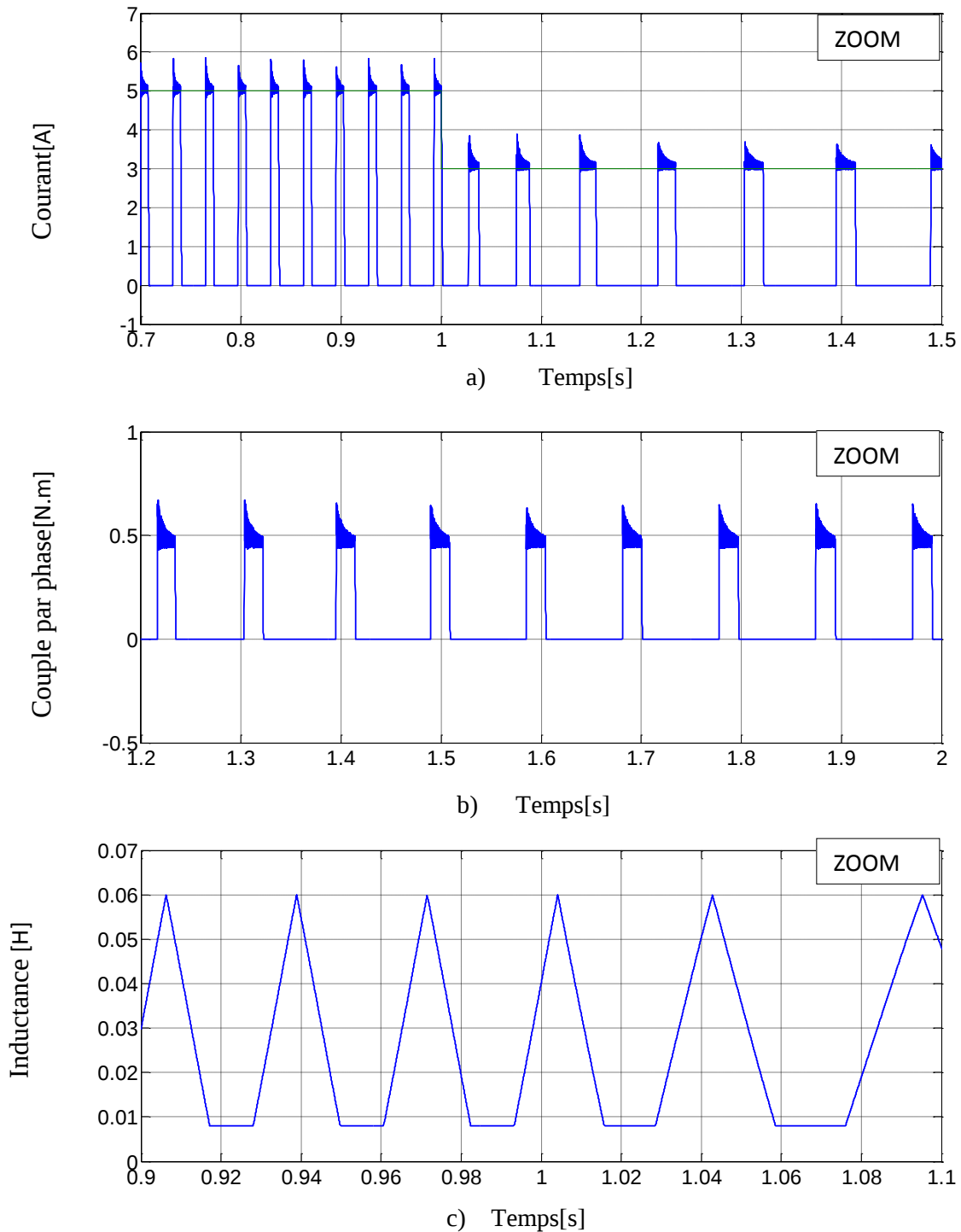


Figure II.9 a) vitesse. b) tension. c) Courant. d) Couple par phase. e) inductance. f) flux.

Pour diminuer les oscillations de vitesse il est nécessaire de produire plus de couple. Par conséquent, nous avons ajusté la valeur de l'angle θ_{off} de 30° à 38° . La nouvelle dynamique de la MRV est montrée dans la figure (II.9) pour $\theta_{\text{on}} = 0^\circ$ et $\theta_{\text{off}} = 38^\circ$, $I_{\text{ref}} = 6\text{A}$, et avec la machine qui continue à opérer sans charge. La figure (II.9.a) présente la forme du courant dans une phase. Dans la figure (II.9.b), on observe que la nouvelle valeur de θ_{off} fait encore que le courant de la phase se présente dans la région où l'inductance de la phase est

décroissante avec l'apparition d'un couple négatif. La figure (II.9.d) montre que l'ondulation du couple a été diminuée après avoir ajusté l'angle θ_{off} , et donc la vitesse de la machine présente maintenant moins d'oscillations comme montré dans la figure (II.9.c). Cependant, la réduction de l'ondulation n'est pas une tâche facile parce que d'autres paramètres comme la vitesse du moteur et les valeurs de la charge influent sur l'amplitude de l'ondulation du couple.



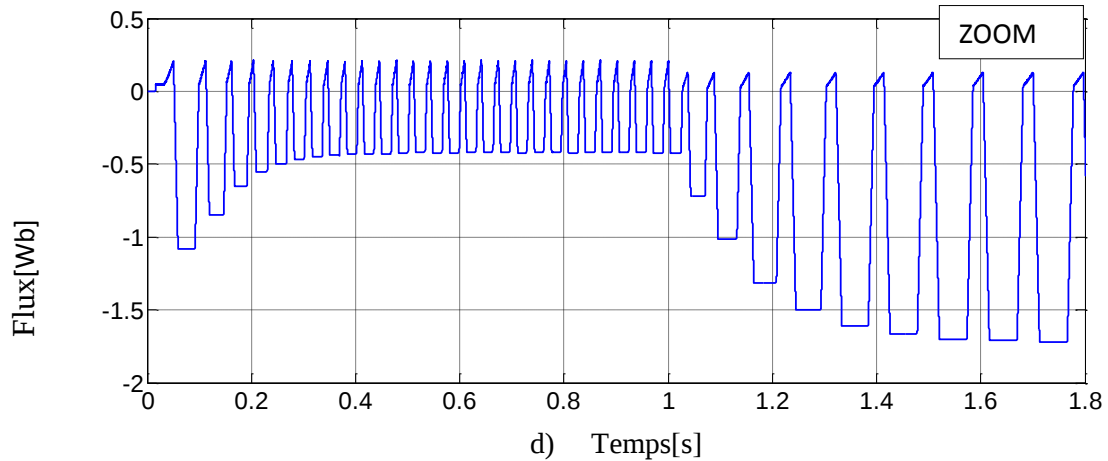


Figure II.10 a) Courant b) Couple par phase c) Inductance. d) Flux.

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 (figure (II.10)). 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.7 command 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.11)). 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 lente (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.

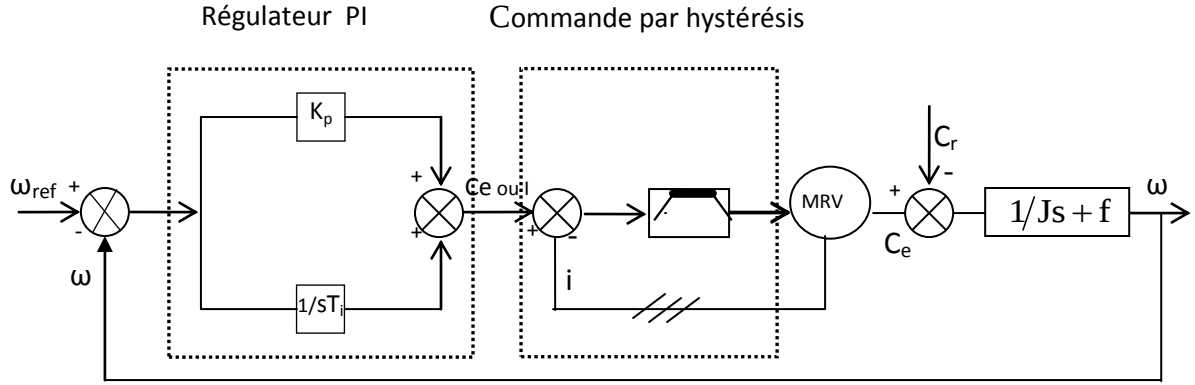


Figure II.11 Boucle de régulation de vitesse [21]

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:

$$\frac{\omega(s)}{\omega_{ref}} = \frac{\frac{K_{\omega}}{J}(s+a)}{s^2 + \left(\frac{f+K_{\omega}}{J}\right)s + \frac{K_{\omega}}{J}} = \frac{\omega_n^2}{a} \frac{(s+a)}{s^2 + 2\omega_n\zeta s + \omega_n^2} \quad (II.21)$$

Par identification on a :

$$\begin{cases} \frac{F+K_{\omega}}{J} = 2\omega_n\zeta \\ \frac{K_{\omega}}{J} = \omega_n^2 \end{cases} \quad (II.22)$$

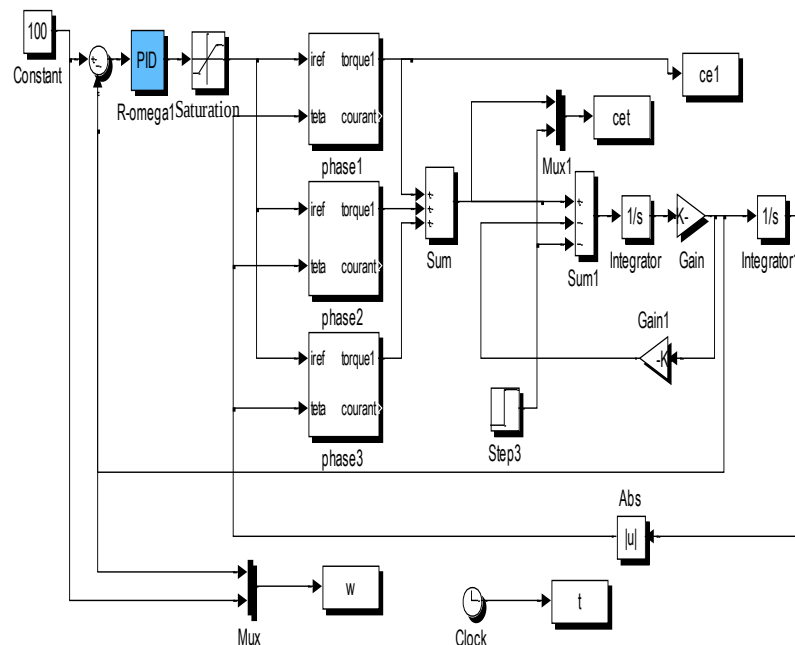
Si on choisit un coefficient d'amortissement égal à l'unité, la dynamique de la réponse de vitesse est fixée par la pulsation propre ω_n [34] .

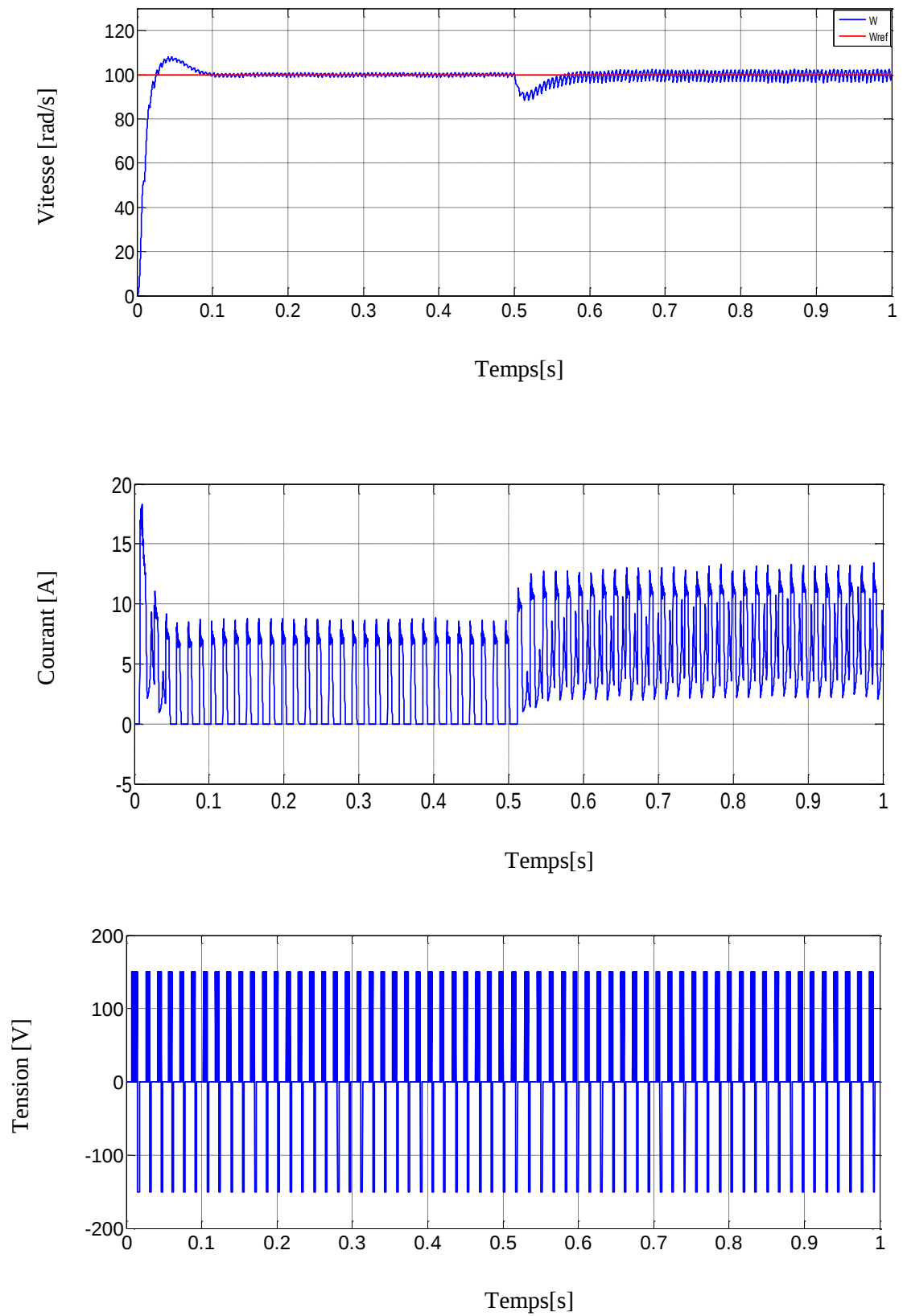
II.8 Résultats de simulation

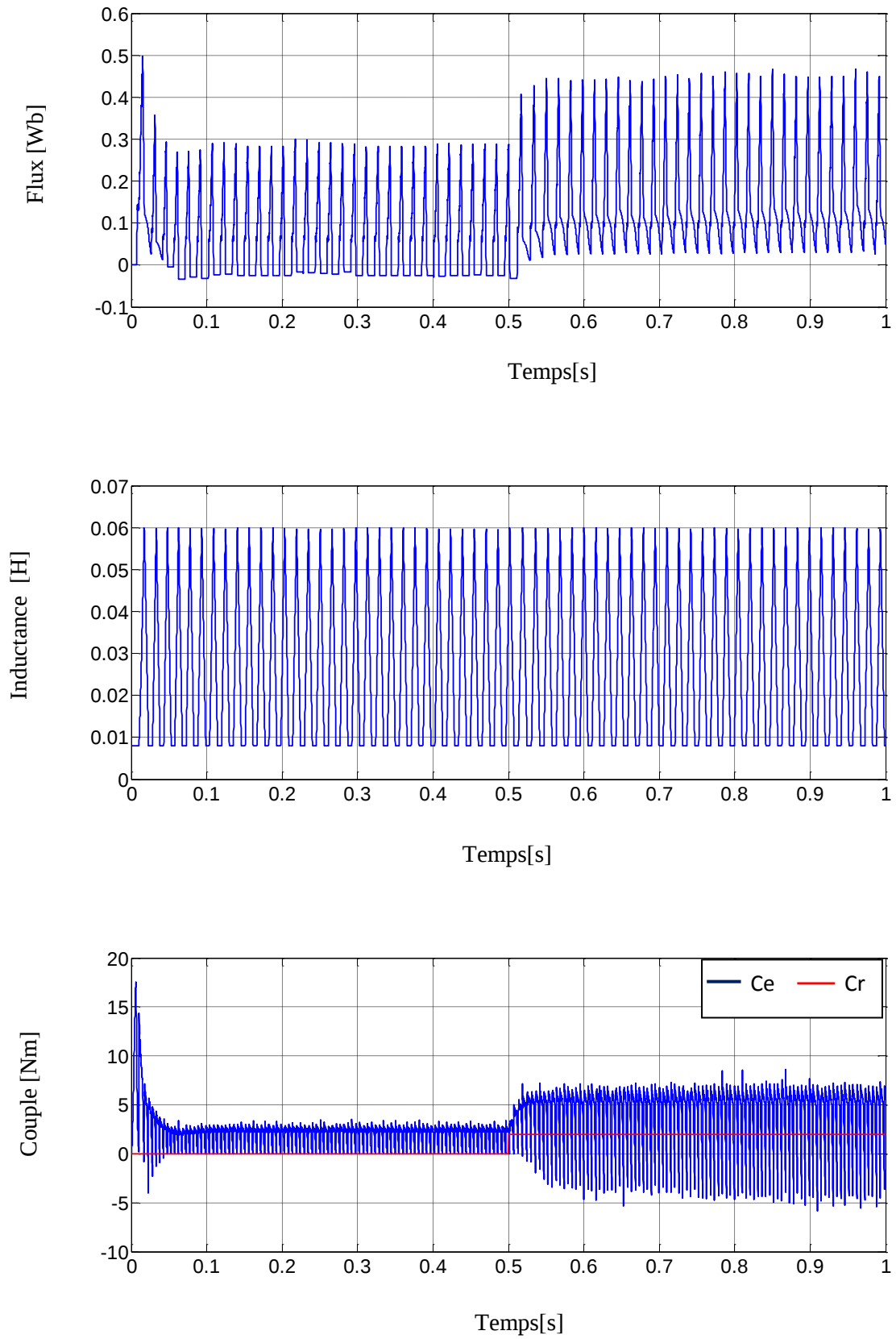
Les simulations reportées sur la figure (II.12) concernent l'application d'un échelon de vitesse de 100 rad/sec, puis nous avons introduit une charge de 2 N.m à l'instant $t = 0.5s$. Cet essai est fait avec un θ_{off} optimale vaut 35° .

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.12), nous pouvons observer que le courant, le flux et le couple augmentent à 0.5 s. Cette augmentation est due à l'application de la charge.







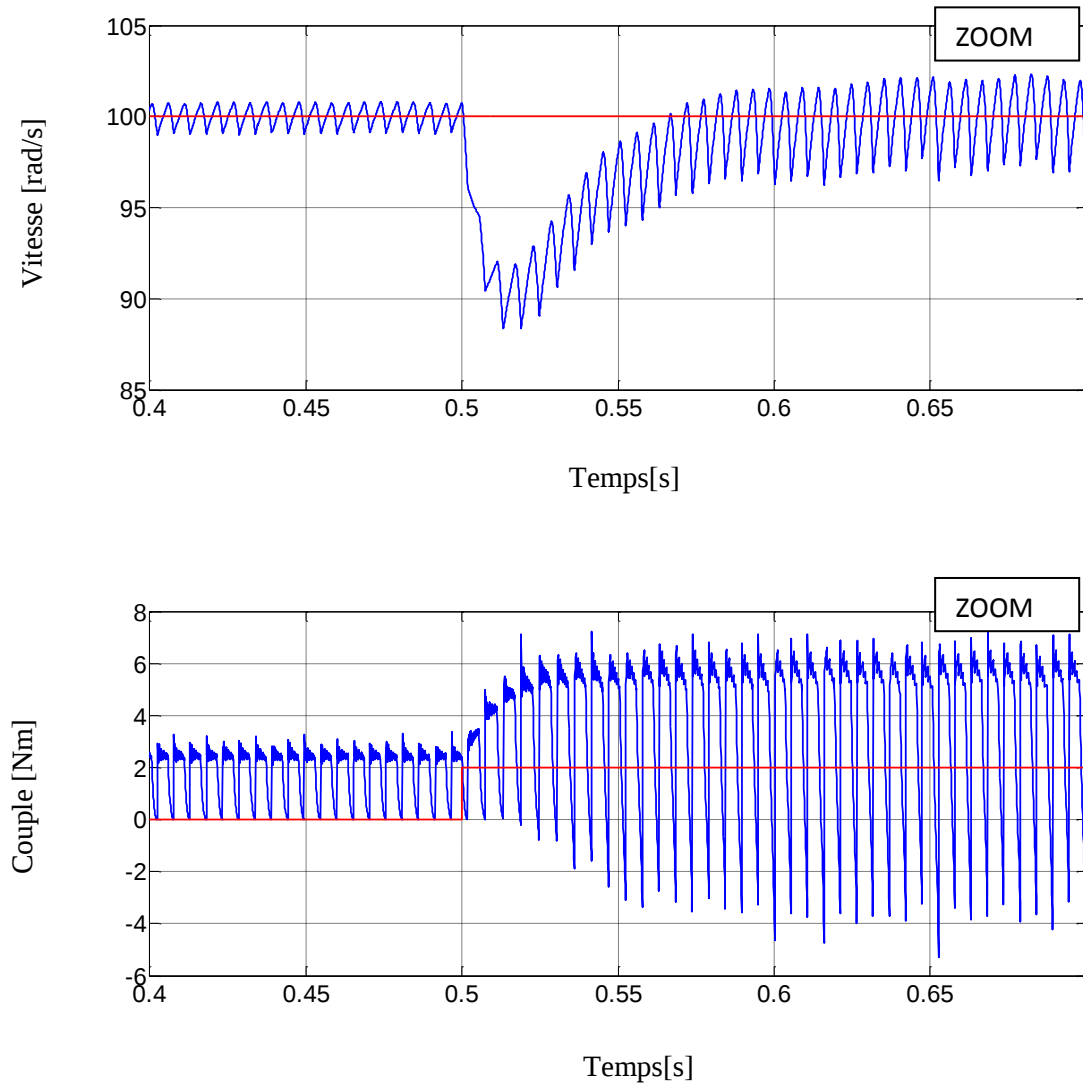


Figure II.12 Régulation de vitesse de la MRV par régulateur PI

(Démarrage a vide avec application da 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.9 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 III: Commande d'une GRV auto excitée

III.1 Introduction

En vue de répondre à de nouvelles exigences, nous constatons ces dernières années un engouement 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 Réluctance 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.

Pour analyser le fonctionnement de la GRV, plusieurs méthodes ont été existées, la référence introduit quelques modèles et fichier.m sous environnement MATLAB pour construire le modèle mathématique pour 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, nous l'avons associée à une turbine éolienne et simulée l'ensemble.

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 nous suffire étudier les caractéristiques de la GRV selon le modèle linéaire d'inductance [5].

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 [5, 33, 34].

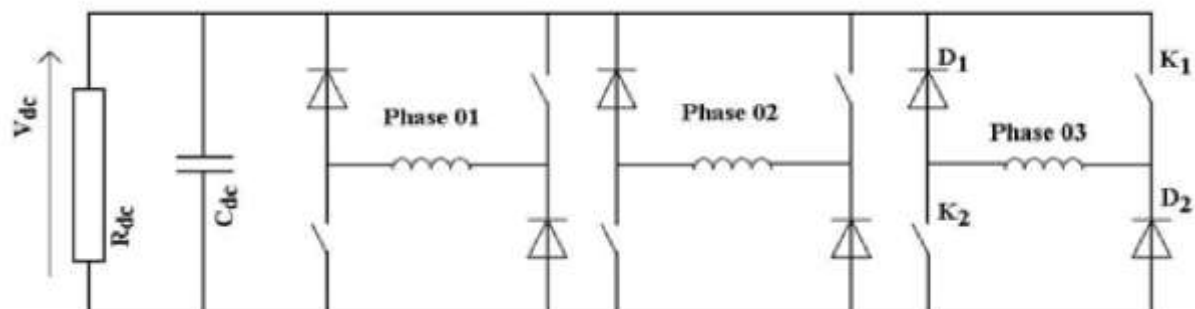


Figure III.1 Convertisseur triphasé en demi-pont asymétrique [5].

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. 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 (1 K, 2 K) 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.

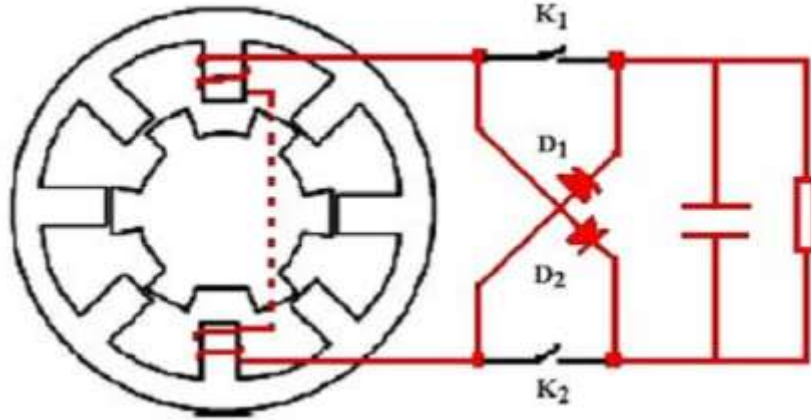


Figure III.2 Phases de magnétisation de la GRV [5, 34].

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 qui a présente dans la figure III.4.

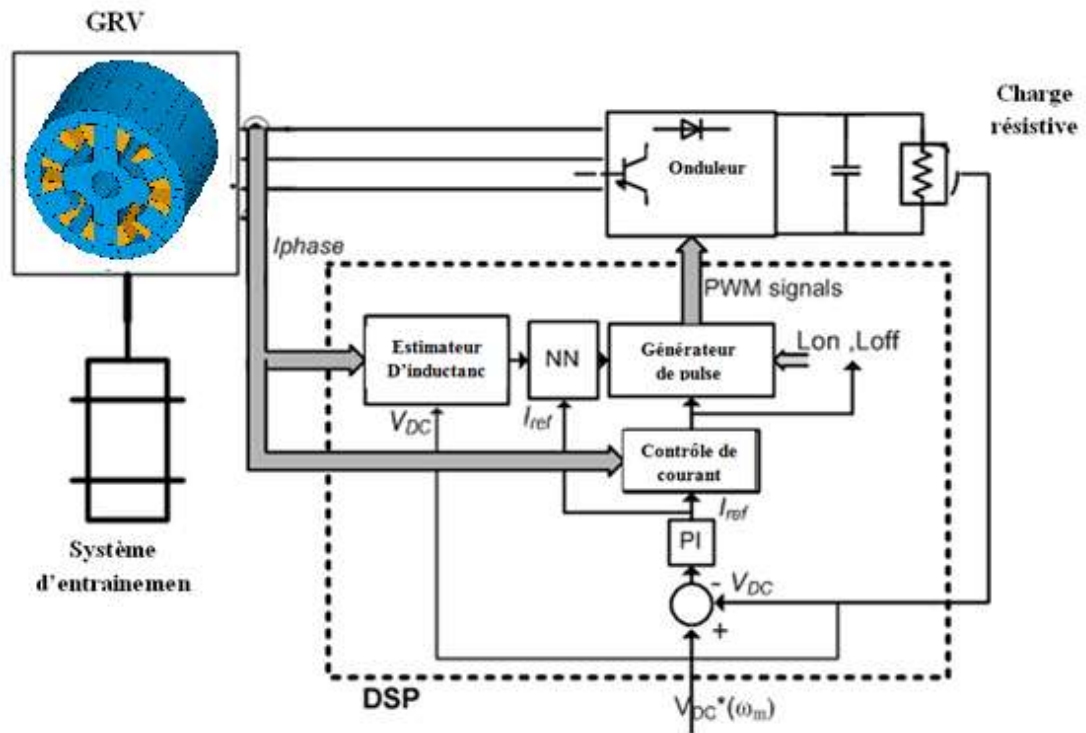


Figure.III.3 Système de contrôle pour la GRV [32].

Dans notre machine GRV on va utiliser le système qui présente dans la figure III.4 , cette figure base sur un système auto-excite par condensateur ou bien batterie, selon les caractéristiques de système d'excitation on a une tension référence (V_{DC}^*) comme consigne, à partir de la comparaisant entre V_{DC}^* et la tension mesure et avec un régulateur proportionnelle intégrale (PI), on a trouvé le courant référence i_{ref} qui doit être obtenir par la GRV pour avoir un courant mesure adopte avec le système d'excitation[5].

III.6 Système auto-excite 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 :

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

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 :

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

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.4) représente le modèle complet de simulation d'une GRV 6/4.

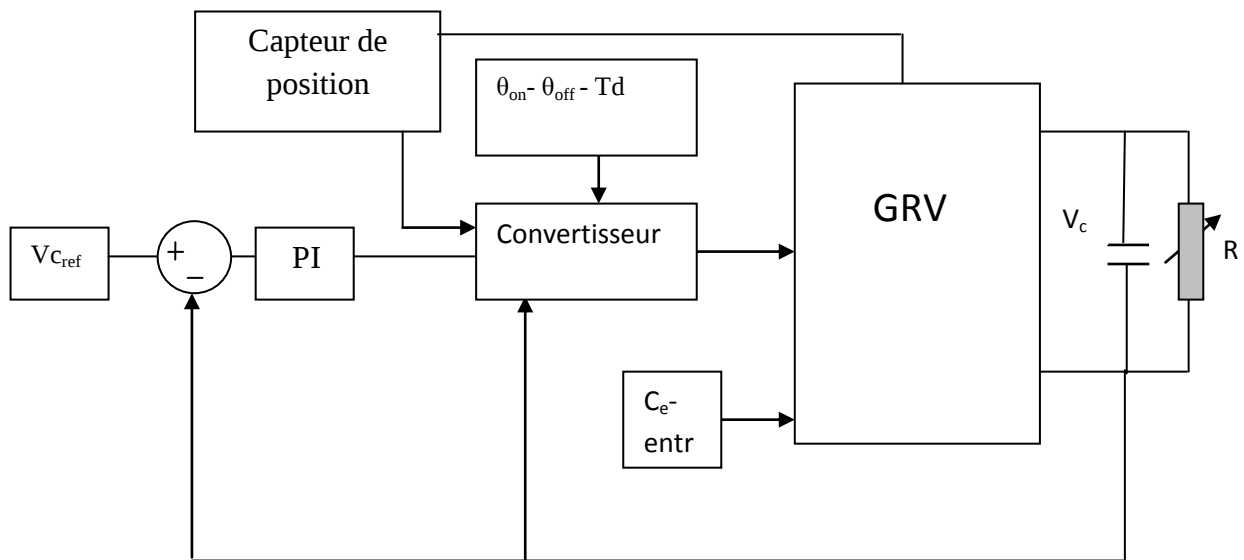


Figure.III.4 Modèle de la MRV sous MATLAB avec régulation de la tension.

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

La Fig.III.5 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.

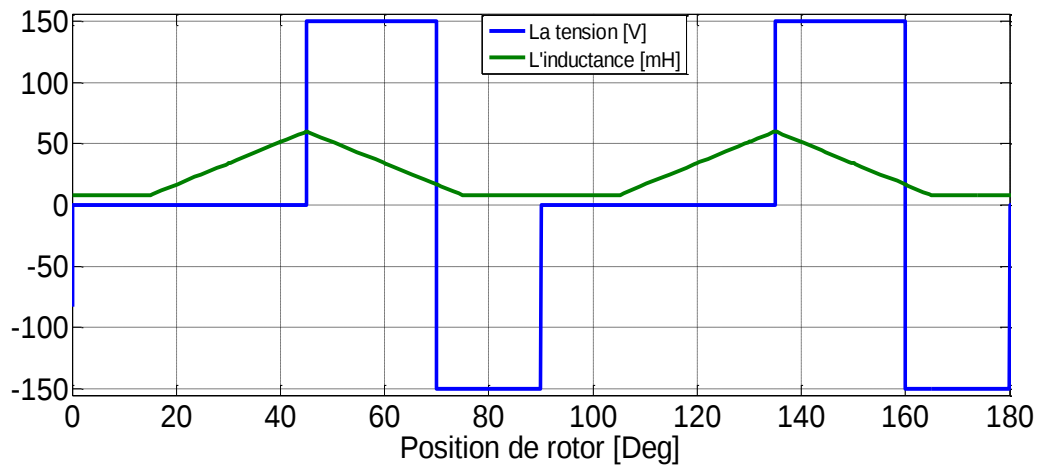


Figure.III.5 La position de la tension par rapport à l'inductance.

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. 6 montre le modèle du système complet réalisé dans Simulink/Matlab.

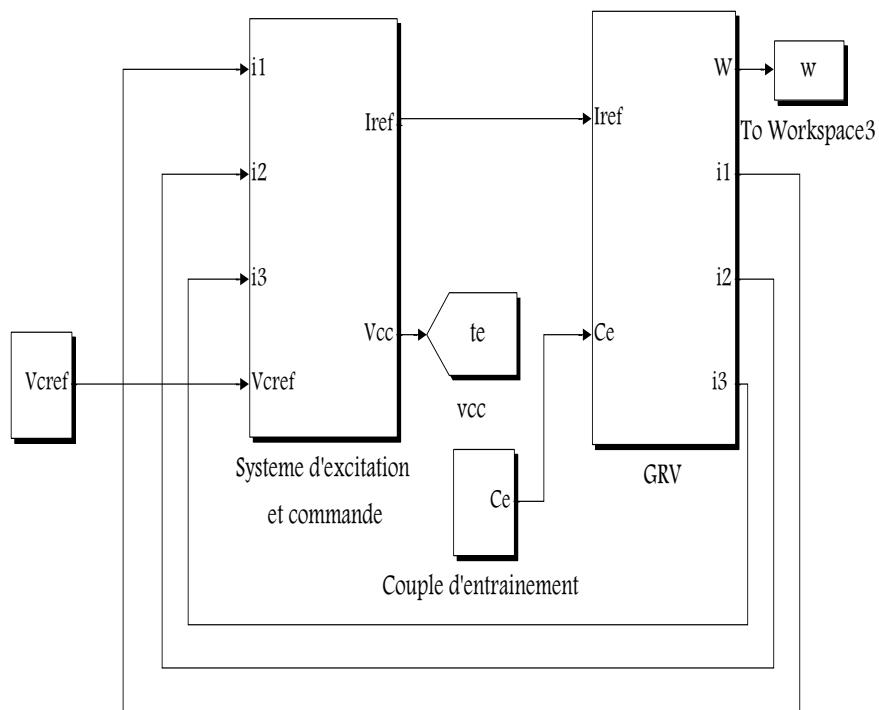


Figure.III.6 Schémas blocs globale de simulation

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 $20\ \Omega$.

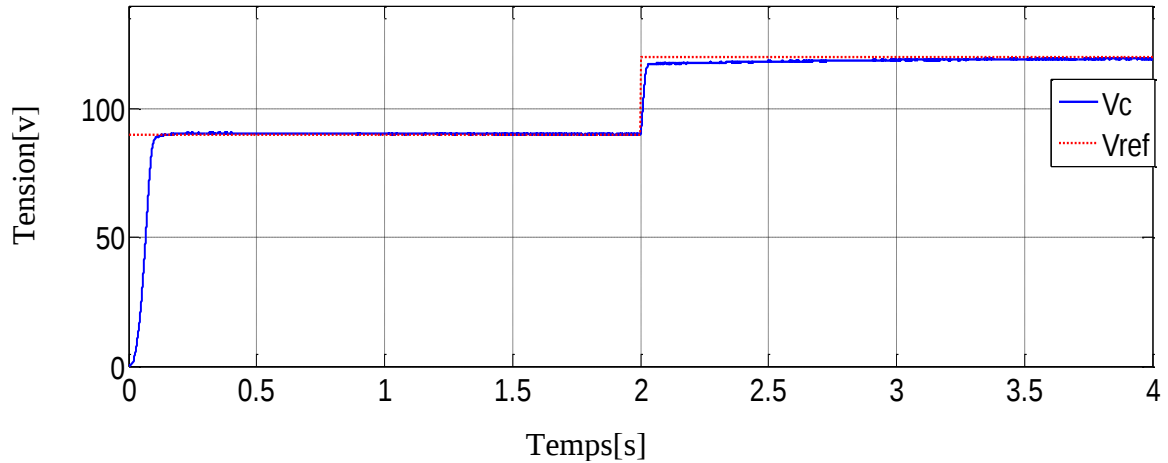


Figure.III.7 La tension de la buse continu.

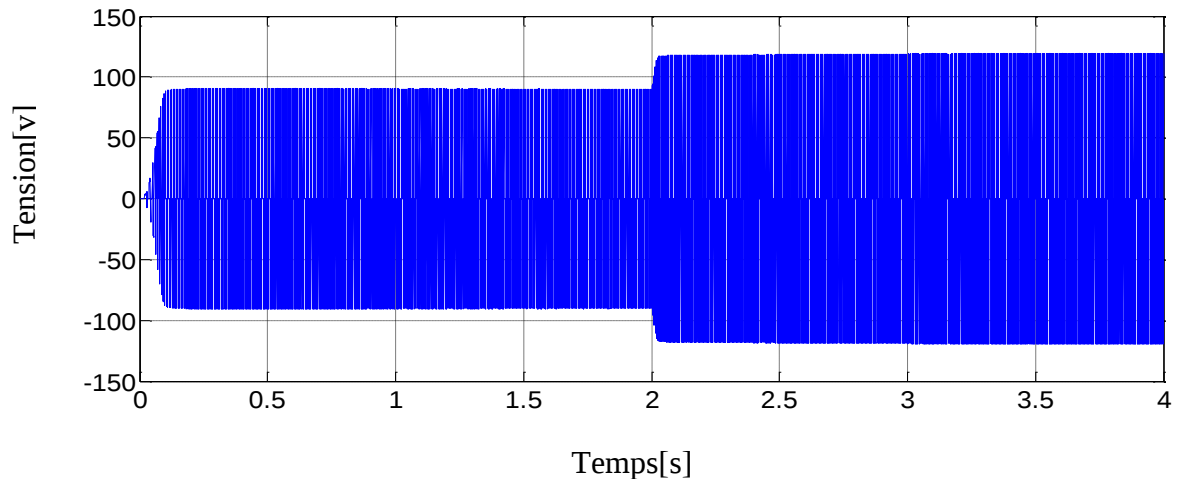


Figure.III.8 La tension de la phase A.

La Fig.III.7 montre la tension à la borne de la capacité qui à règle selon la tension référence, La Fig. III.8 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 Fig.III.09 représente les courbes de l'inductance de la phase A

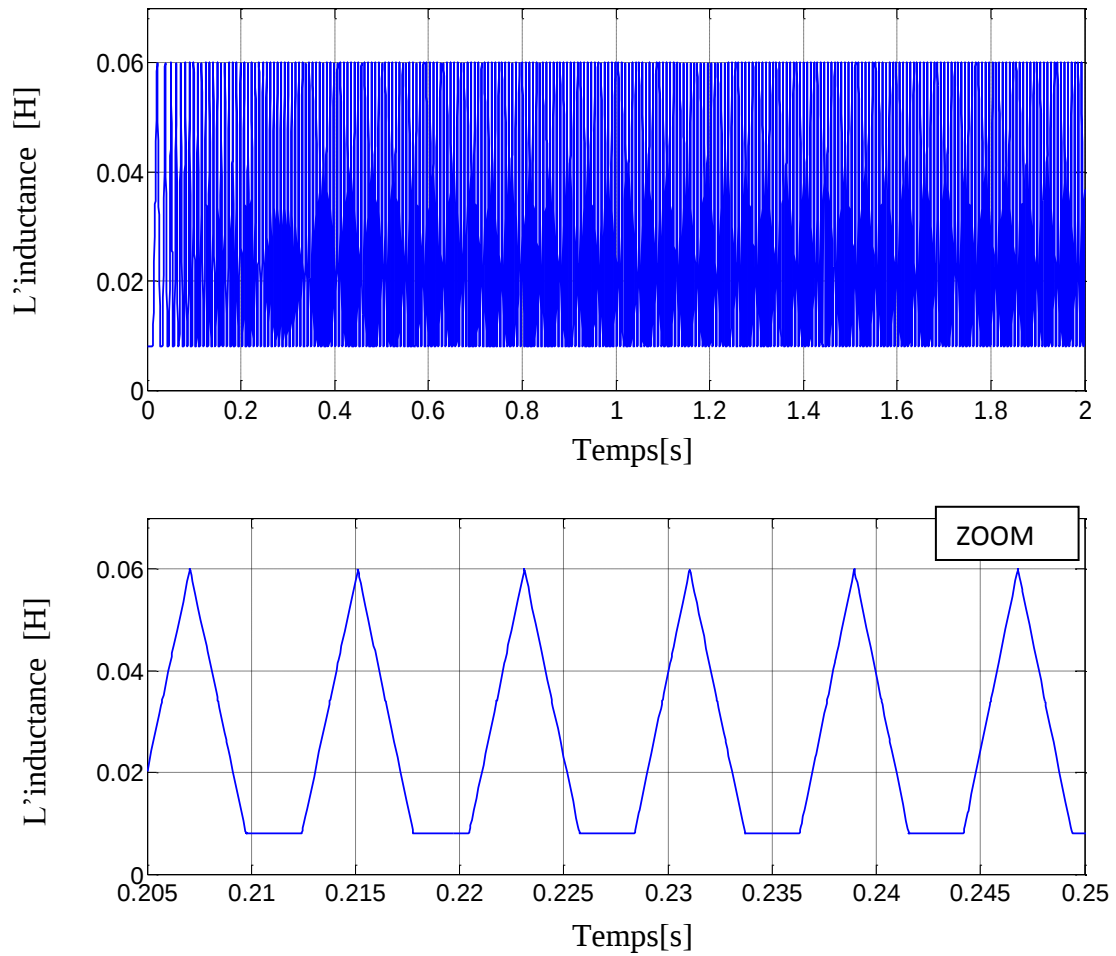


Figure.III.9 L'inductance de la phase A.

Dans la Fig.III.10 on illustre l'allure du courant statorique de la machine (phase A).

Le courant croit jusqu'à 8A, Après à l'instantané $t=2$ s, le courant est devenu 10 A parce que la tension est augmentée. L'allure est semblable à celle qu'on a l'habitude de rencontrer dans la littérature.

Nous savons que le décalage est θ_s enregistré entre I_A et I_B donc décale par $t = \theta_s / \Omega$, et un décalage de $2\theta_s$ est relevé entre I_A et I_C . On constate que lorsque le courant s'annule dans une phase, il est non nul dans les deux autres phases ; donc, la continuité du service est bien assurée.

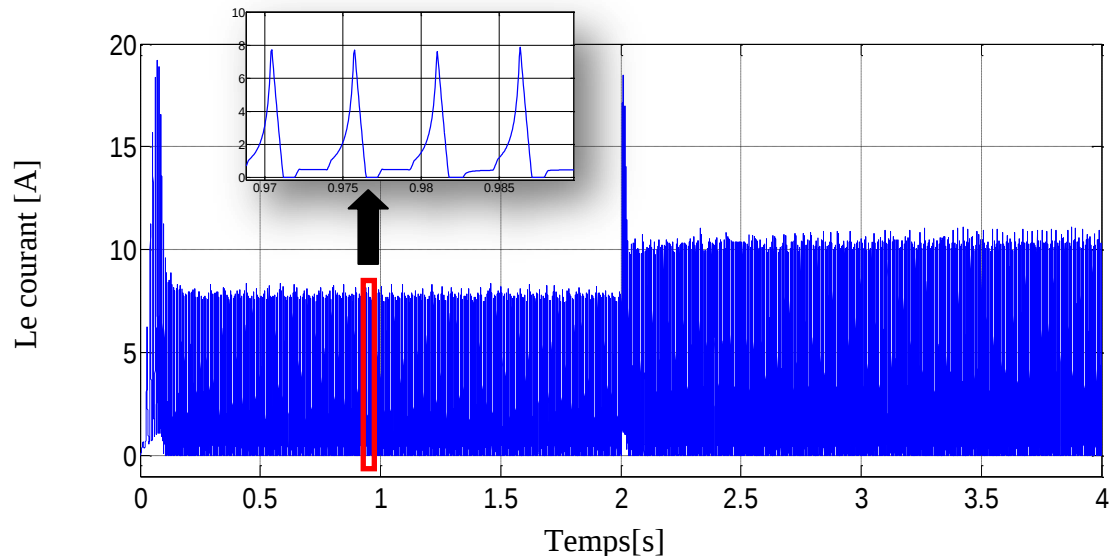
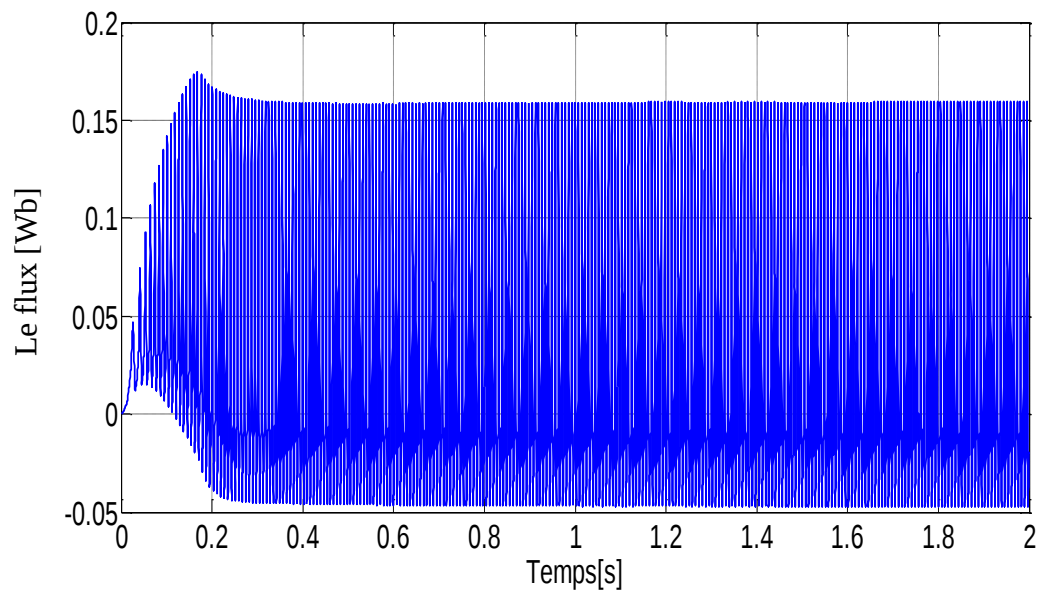


Figure.III.10 Le courant de la phase A.

Dans la Fig.III.11 on montre l'allure du flux statorique de la machine en fonction de temps. Le flux croît jusqu'à un maximum de 0.16 Wb, puis décroît et devient nul, et après un certain temps il reprend la croissance (comme pour le cas du courant).



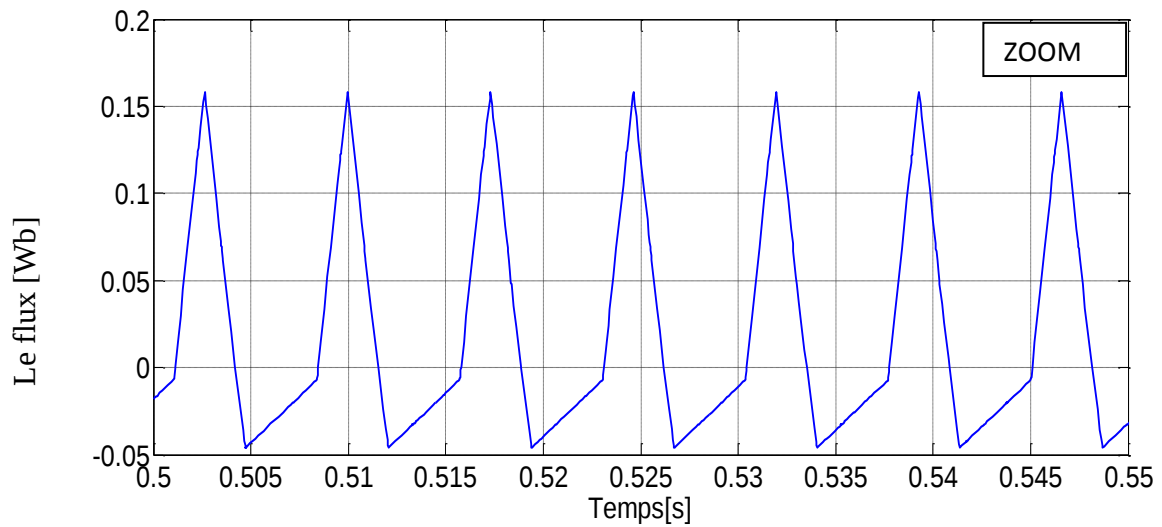


Figure.III.11 Le flux de la phase A.

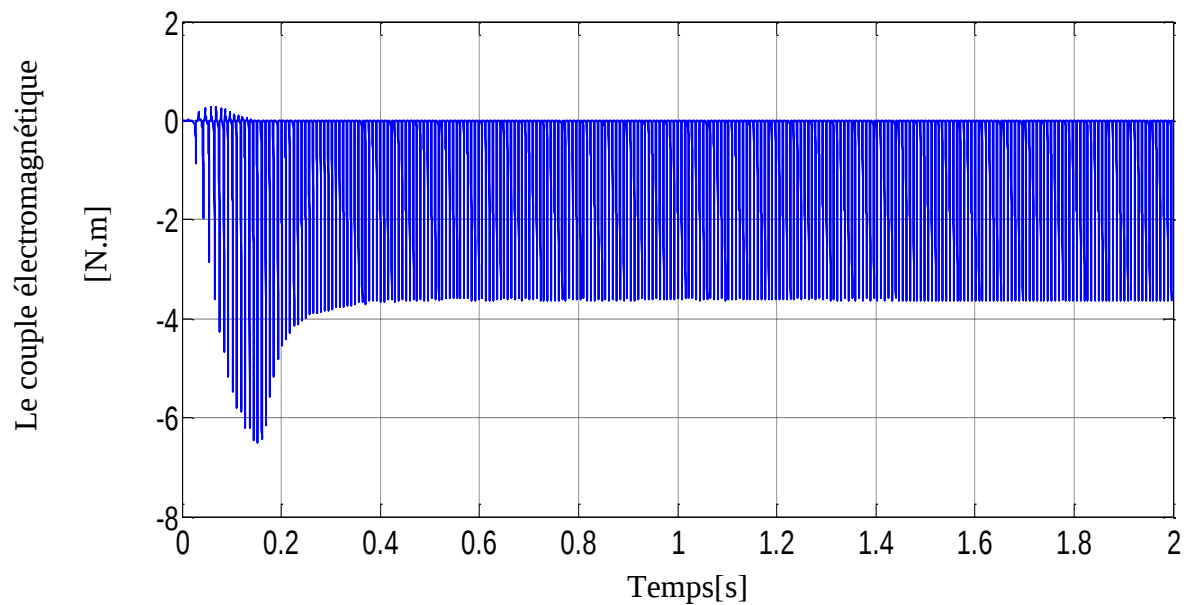


Figure.III.12 Le couple électromagnétique de la GRV.

Dans la Fig.III.12 on illustre l'allure du couple électromagnétique de la machine. C'est une courbe qui oscille autour d'une valeur moyenne négative.

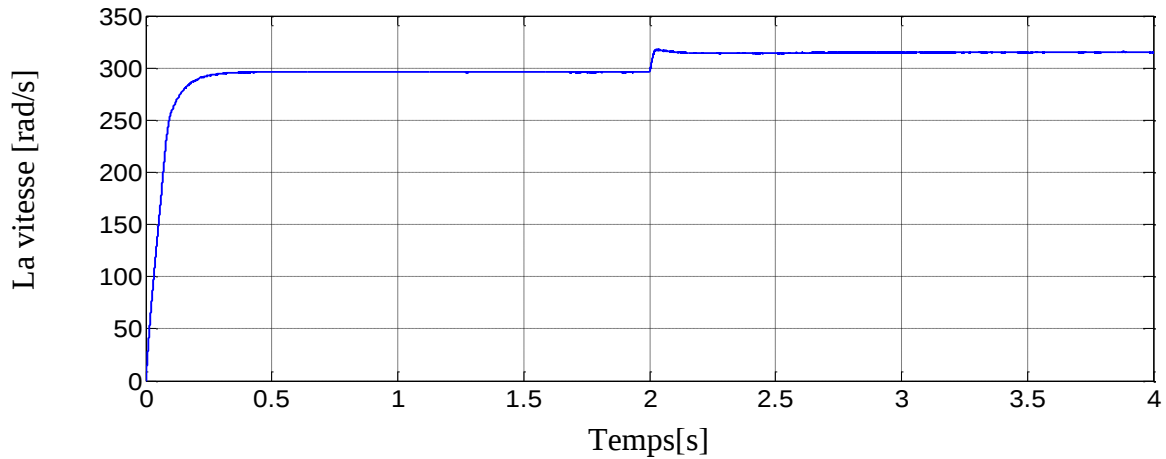


Figure.III.13 La vitesse de la GRV.

La vitesse est montré dans la Fig.III.13, alors on a ici la vitesse est augmenté 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

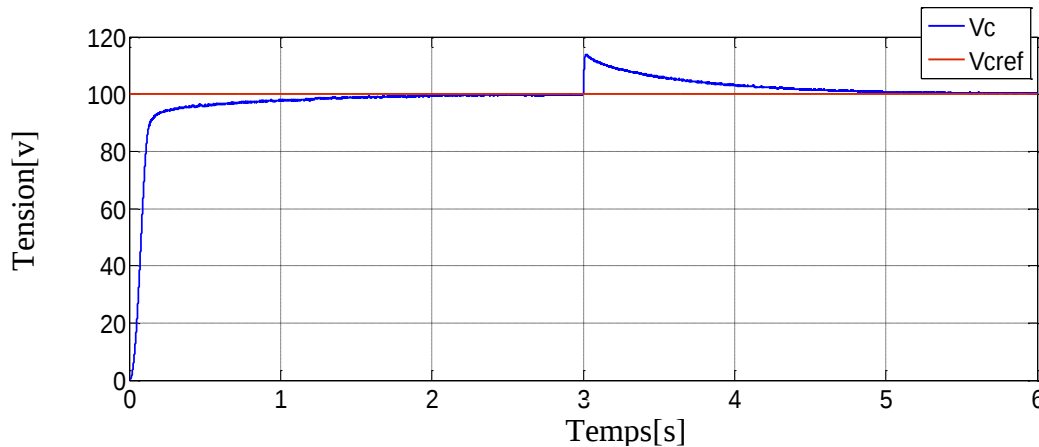


Figure.III.14 La tension de la buse continue.

La Fig.III.14 montre la tension à la borne de la capacité qui à reste constante comme la tension référence, La Fig. III.15 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 a la régulateur PI la valeur de la tension est toujours revenir à la valeur référence lors la variation de couple d'entraînement .

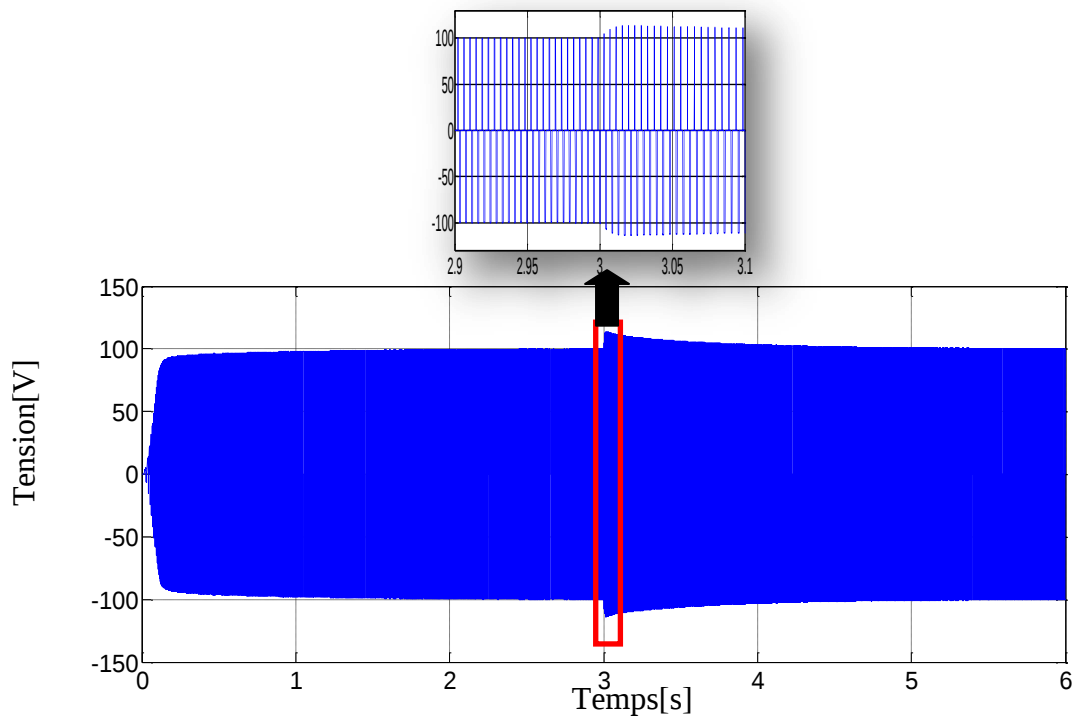


Figure.III.15 La tension de la phase A.

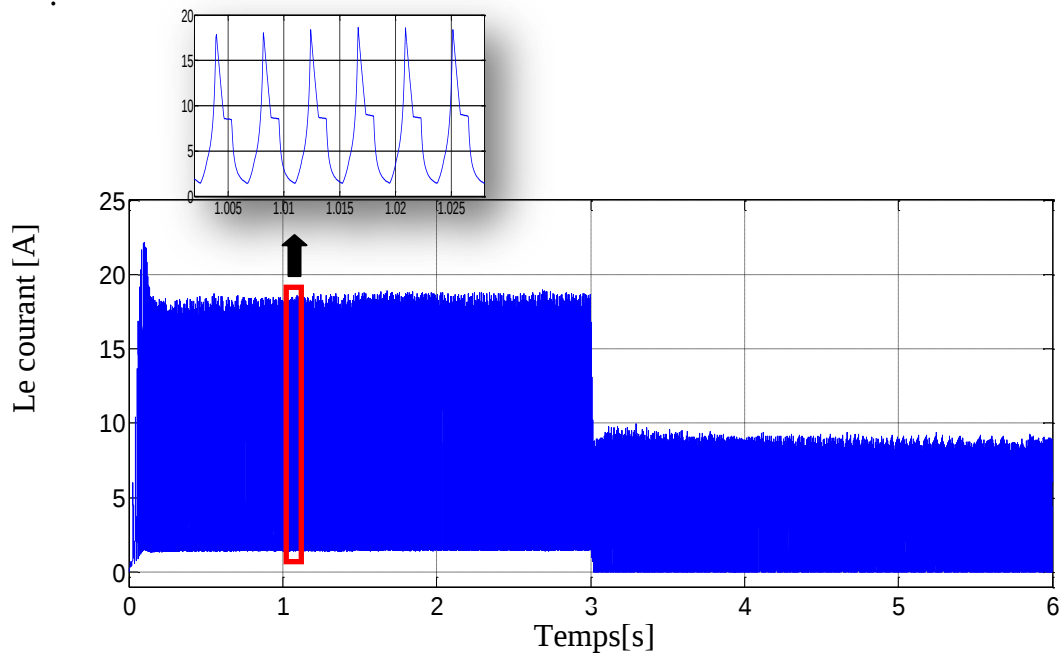


Figure.III.16 Le courant de la phase A.

Dans la Fig.III.16 présente l'allure du courant statorique de la machine (phase A) où on a remarqué le courant est diminué allant de 17 A jusqu'à 9A après l'instantané $t=3$ s parce que le couple d'entraînement est augmenté c'est-à-dire l'augmentation de puissance absorbe.

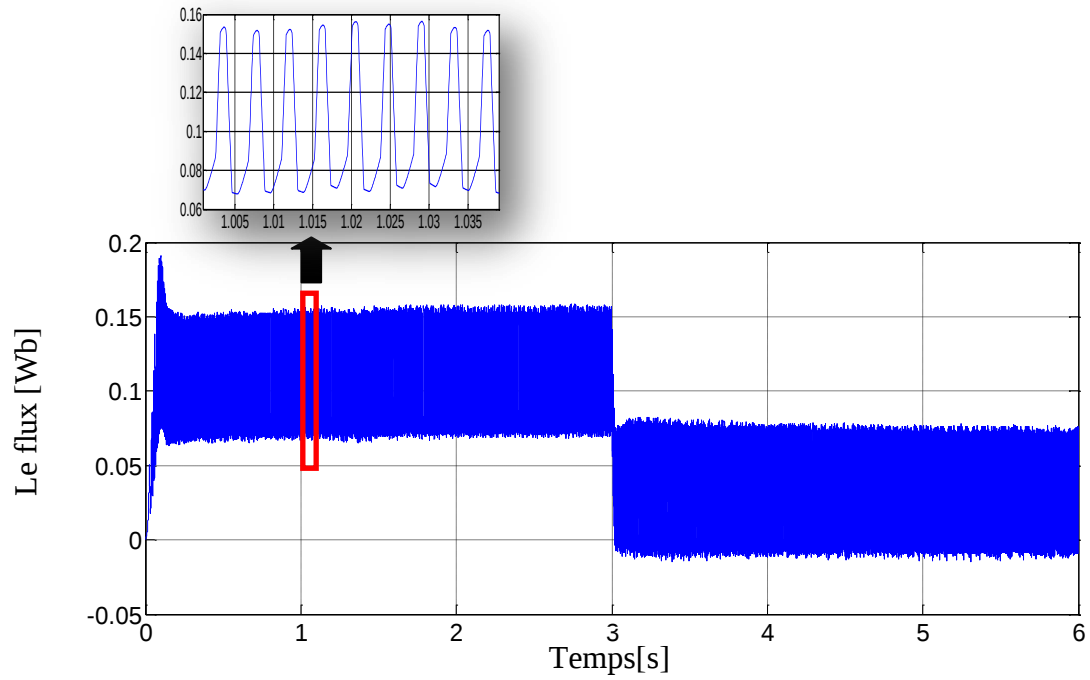


Figure.III.17 Le flux de la phase A.

La Fig.III.17 montre l'allure du flux statorique de la machine en fonction de temps. Au début, le flux était avec une valeur grande (0.15Wb) par contre après la diminution du couple d'entraînement cette valeur est décroissant jusqu'à la valeur 0.07 Wb, aussi nous savons que la flux est proportionnelle avec le courant électrique donc évidemment la même influence avec la variation de courant.

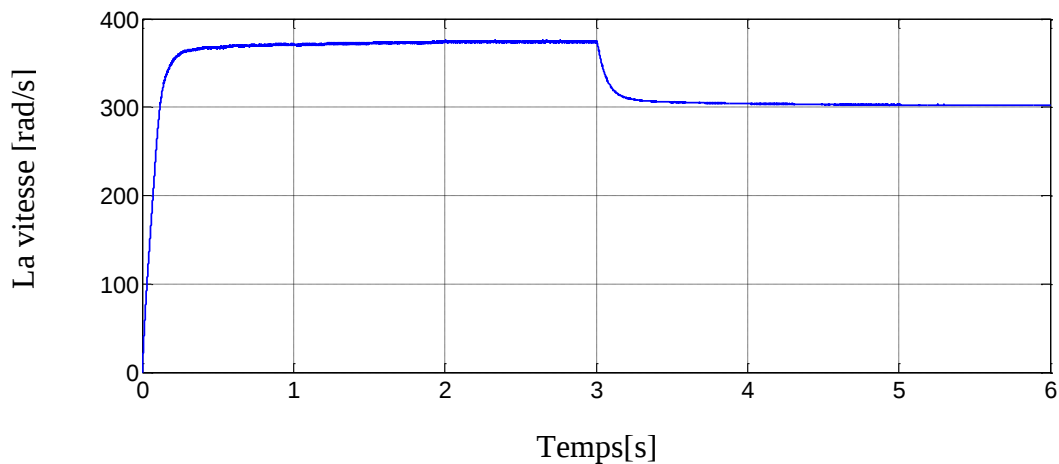


Figure.III.18 La vitesse de la GRV.

Il est naturel que la vitesse diminue comme présenté dans la Fig.III.18 et cela est dû à une baisse du couple d'entraînement, ce ci 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 IV: Association de la GRV à une turbine éolienne à vitesse variable.

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter le modèle de la turbine ensuite la simplicité des modèles aérodynamique et mécanique de la turbine qui va développer. Puis, nous allons développer les associations de la turbine avec la GRV qui a étudié dans la partie précédente, veux dire avec le système d'excitation, pour savoir l'importance de la variation de courant électrique avec variation de vent c'est-à-dire les influences de la vitesse mécanique de la turbine.

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 part 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 synchrone à réluctance variable pour des applications en conversion d'énergie éolienne. Cette structure a un stator dont la structure et le bobinage sont similaires à ceux d'une machine asynchrone. 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 générateur de cette structure 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 (figure (I.16)) ou encore sur un redresseur à MLI.

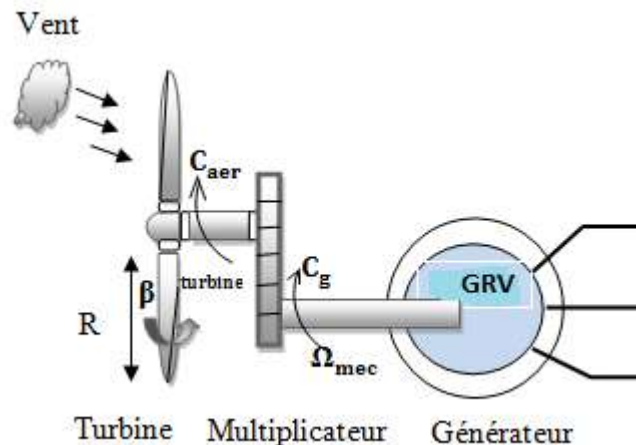


Figure IV.1 Schéma d'une turbine éolienne [39].

IV.4 Modélisation d'une turbine éolienne

La turbine qui sera modélisée comporte trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse turbine, qui entraînera une génératrice (GRV) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G la figure (IV.1) montre le schéma d'une turbine éolienne.

IV.4.1 La puissance d'une éolienne

La puissance cinétique du vent à travers une turbine éolienne de rayon R , est donnée par la relation suivante [39] :

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

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_{ent} : 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 [35].

IV.4.2 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 [35, 34], La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

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

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

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

IV.4.3 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 [33]. 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 (IV.2).

La figure IV.3 présente la puissance disponible d'une éolienne.

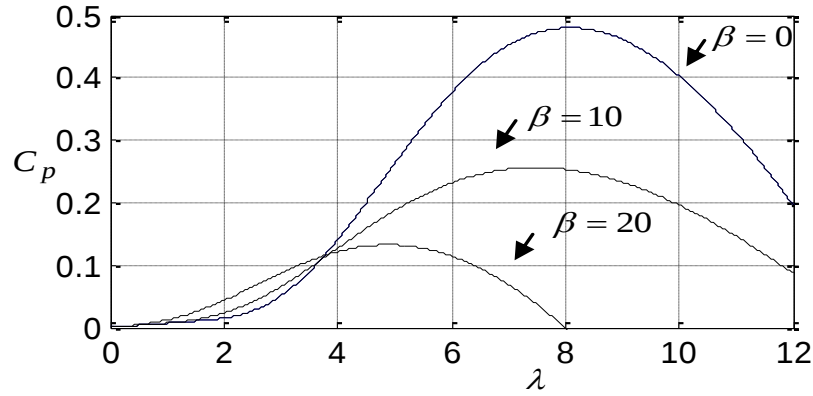


Figure IV.2 Évolution du coefficient de puissance de l'éolienne [29].

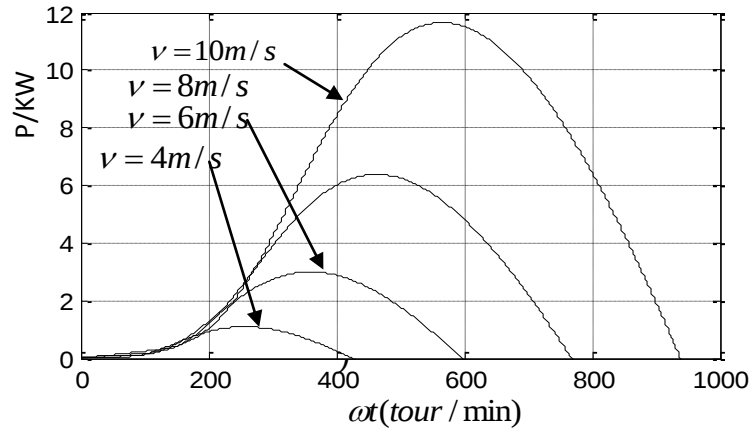


Figure IV.3 Puissance disponible d'une éolienne donnée[29].

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

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

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

IV.4.4 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 [33] :

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

Avec :

C_g : Couple issu du multiplicateur.

C_{aer} : Couple aérodynamique.

G : Gain du multiplicateur

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (IV.6)$$

IV.4.5 Équation dynamique de l'arbre

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit [20] :

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

Avec :

J_t : c'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

C_{mes} : 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

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

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

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

IV.5 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 IV.4).

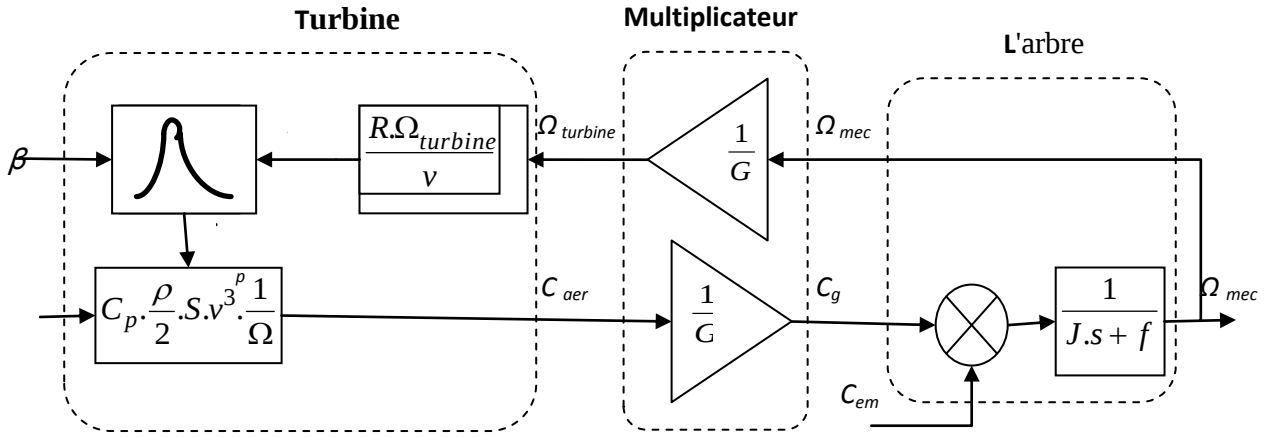


Figure VI.4 Schema bloc du modèle de la turbine. [31]

IV.6 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 erroné 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 ou 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 :

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

La référence de la puissance de la turbine correspond :

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

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 :

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

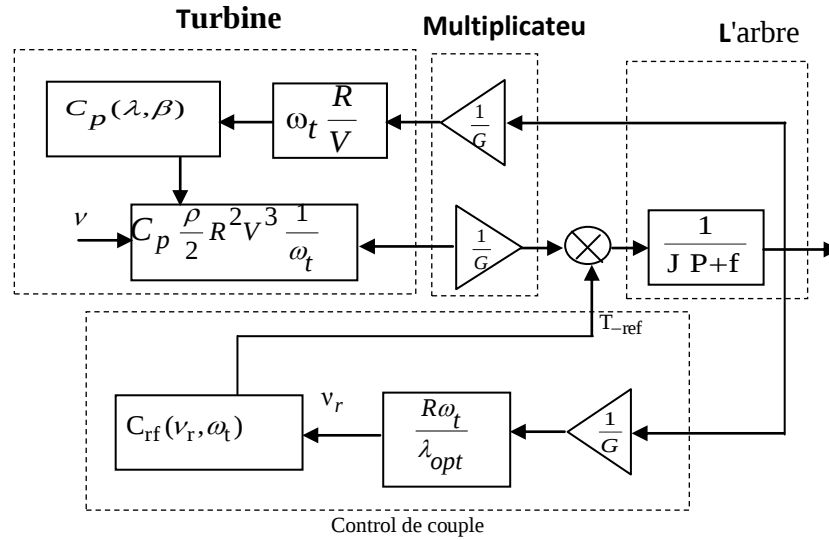


Figure IV.5 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

IV.7 Association de la GRV a une turbine éolienne

IV.7.1 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 (équation IV-3). 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 Fig.IV.6.

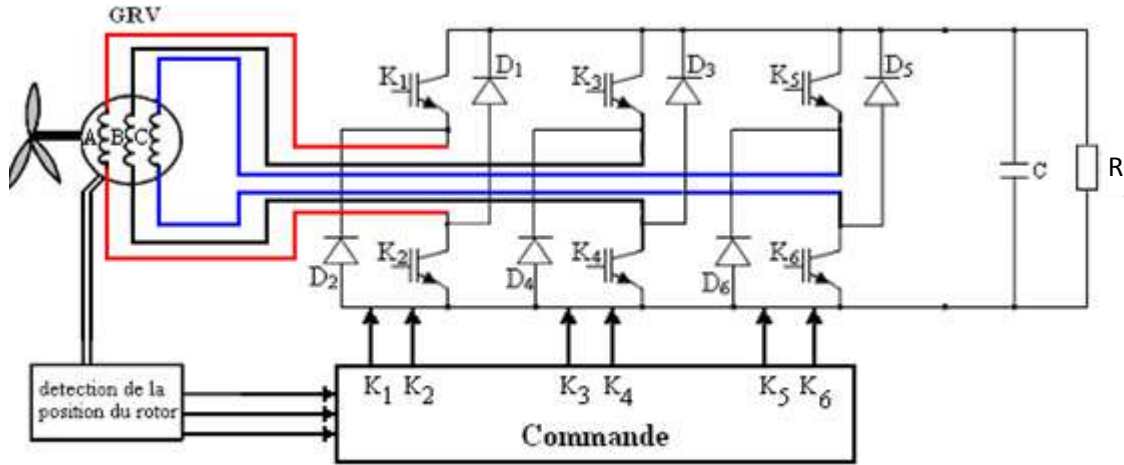


Figure. IV.6 Association d'une GRV et d'une turbine éolienne.

IV.7.2 Modèle de simulation

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 au cube de la vitesse du vent.

La Fig.IV.7 représente le modèle global de simulation du bloc GRV-Turbine.

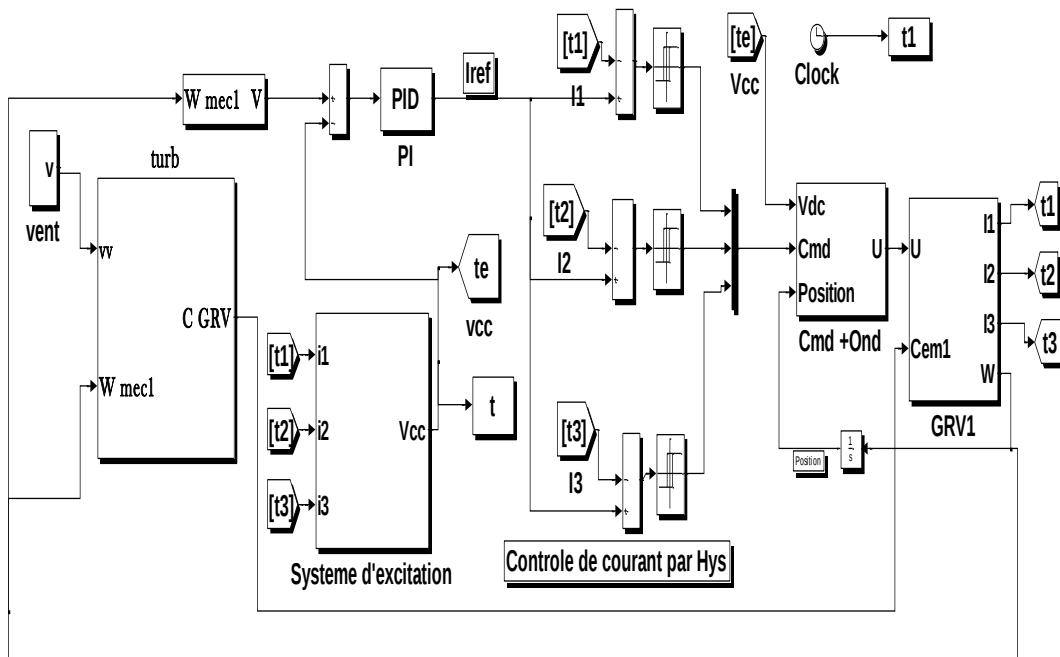


Figure. IV.7 Modèle de simulation de l'association GRV-Turbine éolienne.

IV.7.3 Résultats de simulation

Pour la simulation de l'association GRV-turbine éolienne, 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.8 qui a présenté ci-dessous.

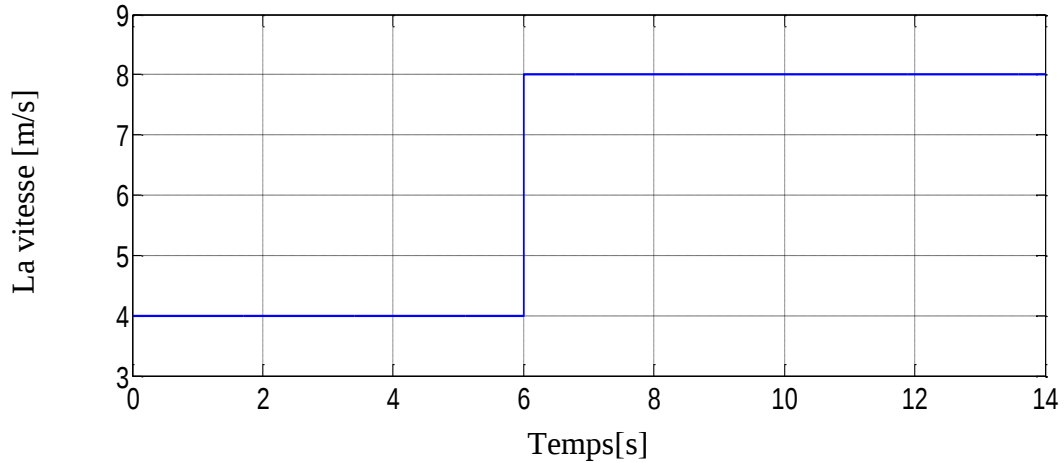


Figure. IV.8 La vitesse de vent (m/s)

Alors, la nouvelle allure de la vitesse mécanique de la turbine est indiquée dans la figure IV.9. Après à l'instantané $t=4$ s, la courbe devient autour de 30 rad/s cependant la vitesse égale 62 rad/s après l'instant $t=7$ s, donc, l'augmentation de vitesse est évidemment parce que la vitesse de vente est augmente où la puissance génère par la turbine est aussi augmente.

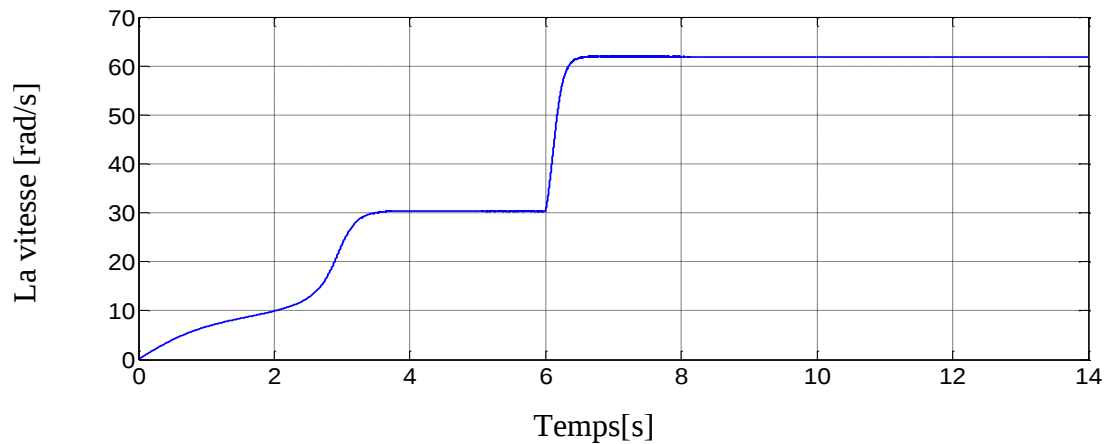


Figure. IV.9 La vitesse de la GRV.

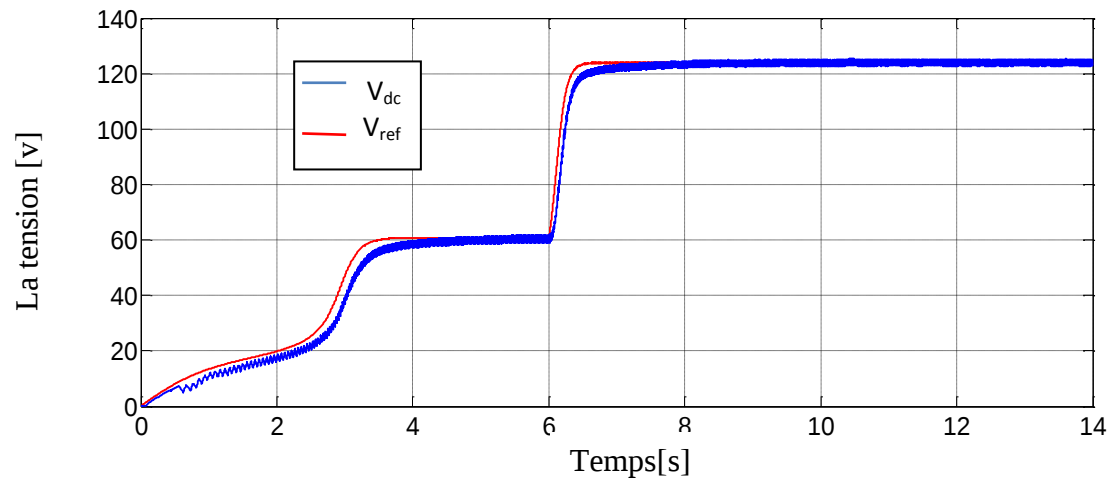


Figure. IV.10 La tension du bus continue

Dans la figure suivante (Figure. IV.13) 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 ce ci pour assure le courant de référence adapté avec la puissance généré par la turbine.

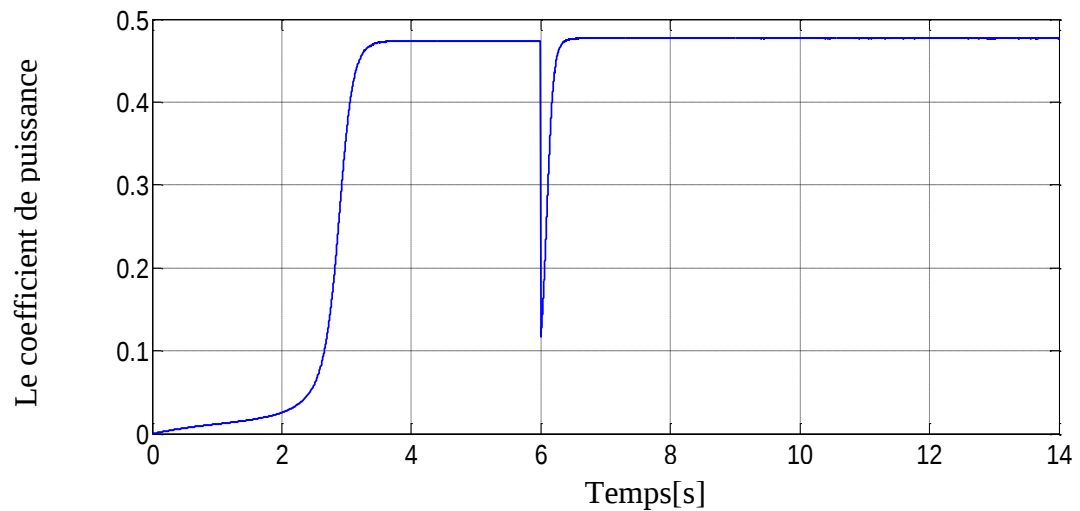
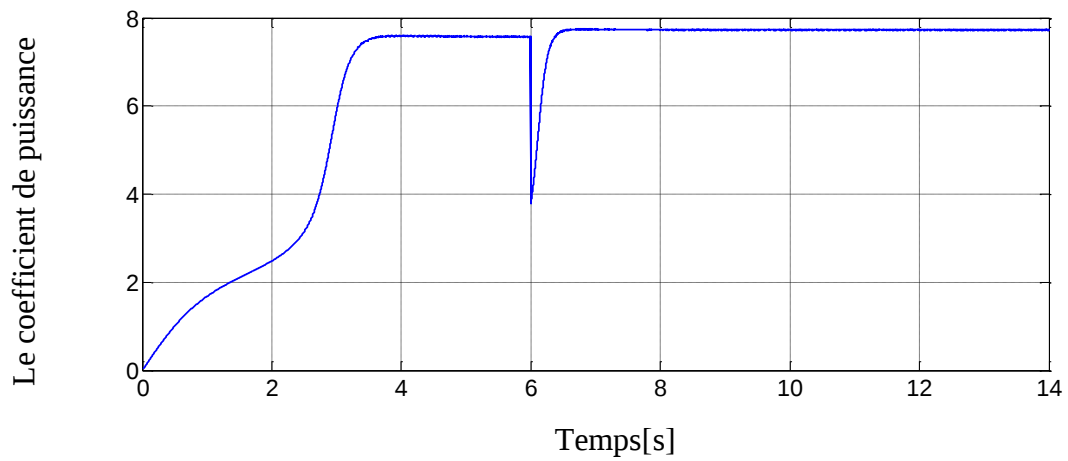
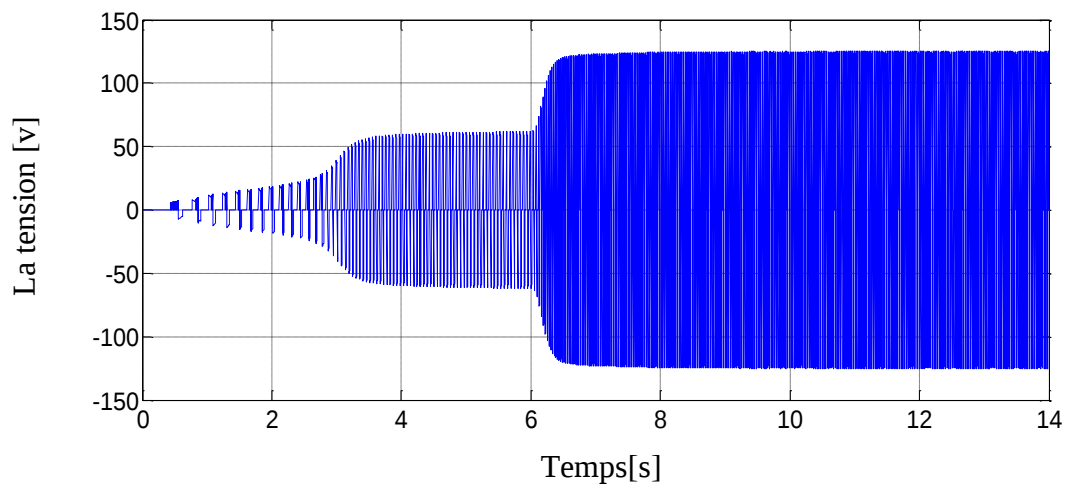


Figure. IV.11 C_p .

**Figure. IV.12** Landa.**Figure. IV.13** La tension de la phase A.

A partir de la figure VI.14 on a s'attend à une augmentation au niveau du courant statorique, ce dernier a cause du courant de référence a 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 enregistrent avec les trois variations sont (2.4A, 7.5A et 17A) .

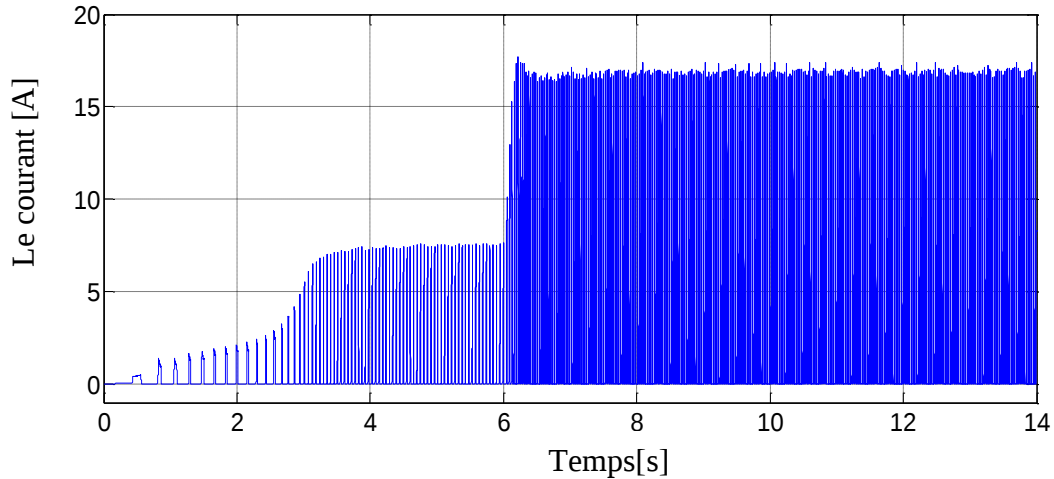


Figure.VI.14 Le courant de la phase A.

On précise ici que la Fig. IV.14 est un agrandissement (zoom) d'une portion de la courbe de la Fig. IV.13 dans l'intervalle de temps 4 s jusqu'à 14 s pour bien voir les allures et les comportements du courant pendant la variation de vitesse.

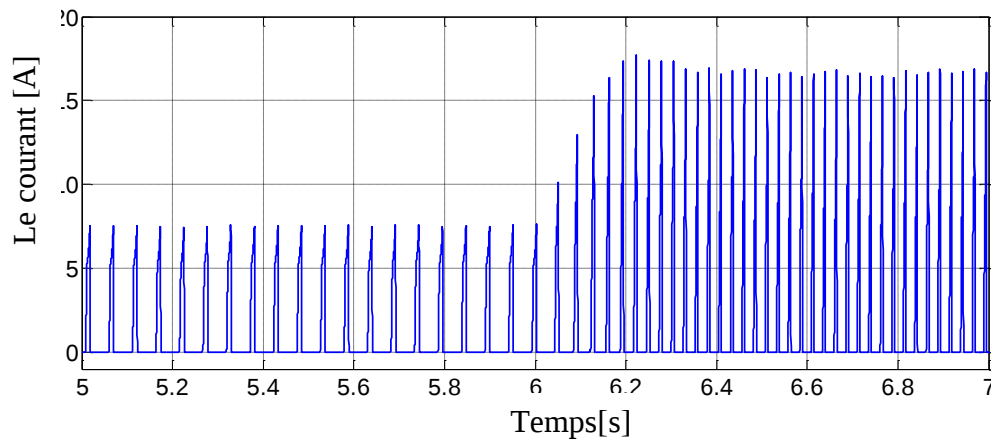


Figure.IV.15 Zoom d'une portion de la courbe de la Fig.IV.13.

Dans la dernière figure IV.16 on a présenté le couple électromagnétique de la machine à réluctance variable ou par cette figure on a remarqué que la valeur de couple est négative parce que le régime de fonctionnement de cette machine est sous conduction de régime génératrice.

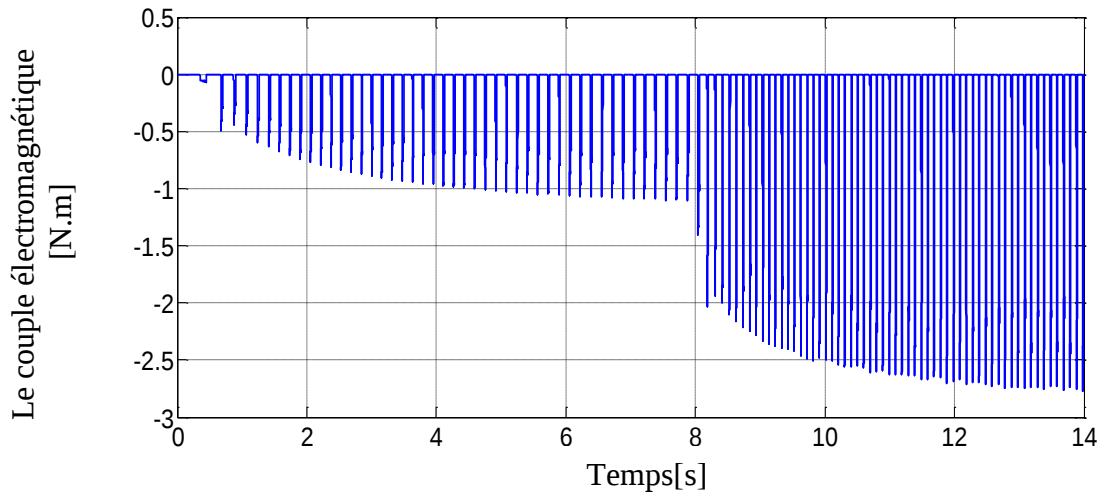


Figure.IV.16 Le couple électromagnétique.

À partir des résultats illustrés sur la on constate que la courbe de la grandare 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.

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

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait la description et la discussion de la modélisation et la simulation de la turbine et leur association avec la GRV. Plusieurs simulations ont été réalisées afin d'étudier le comportement dynamique du système global.

L'association de la GRV étudiée a révélé un avantage très important de ce type de machine : la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie du vent, utilisant une GRV, ne nécessite pas des vitesses élevées du vent contrairement à d'autres systèmes qui exigent une vitesse élevée.

CONCLUSION GENERALE

Notre travail 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 de 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 sont comme suit :

Un premier chapitre a permis d'exposer 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.

Au second chapitre, 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 différent point de fonctionnement , où nous avons noté que tension de système auto-excité avec le couple d'entraînement sont porté un rôle primordiale sur le courant produit par la machine, ce dernier est très important pour avoir le courant satisfaire pour le système. .

Enfin, nous savions l'importance de la chaine complémentaire de la génératrice électrique, évidemment est la source d'énergie mécanique donc nous avons présenté une turbine éolienne avec leurs constitutions et principes de fonctionnement, après la modélisation de la chaine de turbine nous avons fait l'association de GRV-turbine, on a exposé les résultats de simulation de l'association commandée par un régulateur hystérésis avec un système auto-excité, par la commande de système propose on a ressué des résultats robuste aussi le courant produit bien régler, qui a adopté avec le fonctionnement de système, tout ceci avec différents vitesses de vente.

Comme perspectives de ce travail présent, 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 optimisé 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.
- Le fonctionnement sans capteur de vitesse de la MRV

Bibliographies

- [1] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives", 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] 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.
- [5] FEYROUZ MESSAI, "Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réductance Variable", Université Mentouri De Constantine 2009.
- [6] B. Multon, "Conception Et Alimentation Electronique Des Machines A Reluctance Variable A Double Saillance", Habilitation à Diriger des Recherches, 1994
- [7] G. Segulier, F. Notellet, "Electrotechnique Industrielle", 2ème édition pages 371-384.
- [8] S. TAIBI, "Contribution à l'étude, la conception, le dimensionnement et l'optimisation des machines à réductance variable de type vernier ", Thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies de Lille. 2002.
- [9] I. HOUARA, " Contribution à l'étude, la modélisation et l'optimisation de machines à réductance variable d'une structure machine à réductance variable excitée par des aimants permanents ", Thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies de Lille. 1998.
- [10] A. TOUNZI, HDR, "Contribution à la conception et la modélisation des machines électriques ", Application aux MRV à deux circuits.

-
- [11] F.M. Sargos, " Etude théorique des performances des machines à réluctance variable", Thèse de Doctorat, I.N.P.L, Mars 1981.
 - [12] F. Meibody-Tabar, " Etude d'une machine synchrone à réluctance variable pour des applications à grande vitesse", Thèse de Doctorat, I.N.P.L, Nancy, 1986
 - [13] 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.
 - [14] L. Moreau, "Modélisation, Conception et Commande de GRV ", Thèse Doctorat, Univ. Nantes, 9 Dec 2005
 - [15] A. Dekhinet, S. Taïbi, " Conception d'une structure de MRV de type vernier à rotor lisse excitée : pré-dimensionnement et étude des performances ", 5th International Conference on Electrical Engineering Batna, 27-29 Oct 2008.
 - [16] M. Machmoum, L. Moreau, M. Zaim, G. Barakat, N. Takorabet, C. Chillet, D. Matt, S. Taïbi, A. Tounzi, C. Espanet, A. Miraoui, H. S. Zire, "Comparaison De Structures Electromagnetiques Pour Des Applications A Faible Vitesse Et Fort Couple", RS Série RIGE, maîtrise de l'énergie électrique, pp 259 à 286. 2005.
 - [17] 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.
 - [18] 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.
 - [19] A. Guettaf, "Contribution A La Conception De La Machine A Reluctance Variable, En Vue De Sa Commande", Université de Biskra, 2005.
 - [20] 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.

-
- [21] E. Hoang, "Etude, modélisation et mesure des pertes magnétiques dans les moteurs à réluctance variable à double saillance", Thèse ENS Cachan ,1995
- [22] 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 Juillet 2011.
- [23] P. Z. Ping, J. Ying, Z. Hui, "Study On Switched Reluctance Generator", Journal of Zhejiang University Science, 2004.
- [24] Serhoud Hicham, "Contribution à l'étude de la machine synchrone à réluctance variable", Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Université de Biskra 2009.
- [25] Farid.M. "Etude d'une machine synchrone à réluctance variable pour des applications à grande vitesse". Thèse de doctorat, polytechnique de lorraine, Novembre 86.
- [26] Khelef salah eddine, hada abd elmounim, "commande de la machine a réluctance variable" université d'el-oued master académique 2013.
- [27] 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. 2011
- [28] B. Malik, "Commande De La Machine A Reluctance Variable En Vue D'une Application Alterno-Demarreur Intégré", Mémoire de Magister, Université de Batna, 2006.
- [29] R. Krishnan, « Switched Reluctance Motor Drives: Modelling, Simulation, Analysis, Design & Applications », pp. 351-384, CRC Press, 2001.
- [30] 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.

-
- [31] E. Hoang, "Etude, modélisation et mesure des pertes magnétiques dans les moteurs à réluctance variable à double saillance", Thèse ENS Cachan, 1995
- [32] Estanislao Echenique, Juan Dixon, Senior Member, IEEE, Roberto Cárdenas, Senior Member, IEEE, and Ruben Peña, Member, IEEE "Sensorless Control for a Switched Reluctance Wind Generator, Based on Current Slopes and Neural Networks". Pontificia University Catolica de Chile. Downloaded on March 10, 2009.
- [33] I.hamzaoui, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur", mémoire de magistère, ENP, Janvier 2008.
- [34] sould 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.
- [35] 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.
- [36] CHERIF,"Modélisation de Générateur Asynchronea Double Alimentation Pour la production de l'énergie éolienne», mémoire de licence, Université d'EL-Oued, 2012.
- [37] Labiod Chouaib , "Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable», mémoire de magister, Université de Biskra, Mai 2014.
- [38] M. GABSI, A. D. VRIES, M. L. PINCART, Y. BONNASSIEUX, M. LECRIVAIN, and C. PLASSE, "Sine wave current feeding of doubly salient switched reluctance machines. Application to the car starter generator", In proceeding of ICEM'04, Cracow, Polond, 5-8 Sep 2004.

$$P = 750W$$

$$U_{\text{excitation}} = 150 \text{ V}$$

$$R = 3 \Omega$$

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

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

$$J = 0.0013 \text{ Kg m}^2$$

$$\rho = 1,25 \text{ Kg/m}$$

$$R_t = 2\Omega$$

$$G = 2$$