

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Electrotechnique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme

D'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Présenté par

FERDJALLAH KHERKHACHI Esseddik & FERHOUN Mohcine

Thème

**Commande d'une génératrice à réluctance variable
utilisée dans une application d'éolienne
non autonome**

Soutenu le 29 Juin 2011 devant le jury composé de :

Président	Pr. R. IBTIOUEN
Examineur	Dr. S. HADJI
Promoteurs	Dr. H. SAHRAOUI Pr. M.O. MAHMOUDI

Juin 2011

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi PB 182 El Harrach 16200, Alger Algérie

Remerciement

Nous remercions Allah, le tout puissant de nous avoir donné la volonté, la patience et la santé durant toutes ces longues années d'études.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à nos promoteurs, Monsieur M.O.MAHMOUDI Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, et à Madame H.SAHRAOUI, docteur à l'Ecole Nationale Polytechnique, de nous avoir confié ce sujet et de l'aide précieuse qu'ils nous ont toujours apportée jusqu'à l'achèvement de ce travail. Leurs insignes observations et suggestions ont été d'un grand apport pour son aboutissement. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre sincère reconnaissance.

Nous remercions vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être rapporteurs de notre mémoire.

Des remerciements vont également à tous ceux qui nous ont apporté, de près ou de loin, orientation, soutien et aide dans la réalisation et la concrétisation de ce travail.

Nos vifs remerciements à tous nos enseignants du primaire à l'université, ainsi que les électrotechniciens de la promotion 2011.

Nous tenons à remercier toutes personnes qui nous ont aidés dans notre cursus.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

Mes Chers Parents,

*Mon **père** qui ne cesse pas de M'encourager, et qui*

M'a toujours soutenu,

*Ma chère **mère** symbole de sacrifice et qui est tout*

pour moi, pour Sa Tendresse profonde

« Que Dieux me les protègent ».

A mes chers frères et sœurs

*A mon CopCh **Yacine***

*A mon partenaire **Mohcine***

A mes amies et tous ceux qui me connaissent.

Seddik

Dédicace

A qui puis-je dédier cet humble travail si ce n'est à mes très chers parents, dont la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont les geysers de ma réussite. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie ce modeste travail ;

A mes très chères frères et sœurs nièces, neveux et à ma grande famille.

A mes camarades Seddik, Khaled et Boualem.

A tous ceux qui m'aiment et mon soutenu de prêt ou de loin et tous ceux que j'aime.

Mohcine

Mots Clés

Éolienne, SRG, SIMPLORER, simulation, modèle linéaire, régime permanent, couplage au réseau, mode de glissement, harmonique, filtrage, puissance active, puissance réactive.

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو دراسة المولدة ذات المقاومة المغناطيسية المتغيرة ثنائية المسننات المستعملة في توليد الطاقة الكهربائية الناجمة عن دوارة الرياح. اقترحنا عدة أمثلة لمحاكاة عمل المولدة عند سرعة دوران كبيرة و صغيرة , اخترنا العمل ببرنامج SIMPLORER® لخصائصه المميزة بالنسبة لعمليات المحاكاة الكهربائية , اعتمادا على النموذج الخطي للوشية مثلنا عمل المولدة بتغذية ذات موجة مكتملة , و بتغذية عن طريق تعديل شدة التيار بهدف دراسة عملها في حالة النظام المستقر. قمنا أيضا بدراسة تأثير عناصر التحكم في المولدة. كان هناك تحليل كامل لهذا التأثير بحثا عن عناصر التحكم المثالية. بالإضافة إلى هذا قمنا بدراسة الربط على الشبكة الكهربائية , مقترحين المموج المناسب. و أخيرا قمنا بدراسة الخصائص المرافقة للربط بالشبكة الكهربائية مع تصفية التذبذبات و التحكم في القدرة و تحسين معامل الجودة.

كلمات مفتاحية : دوارة الرياح , المولدة ذات المقاومة المغناطيسية المتغيرة , برنامج SIMPLORER® التمثيل, النموذج الخطي, النظام المستقر, التذبذبات, التصفية.

Résumé :

L'objectif de ce travail consiste à l'étude de la génératrice à réluctance variable à double denture appelée SRG, utilisée pour la production d'énergie électrique dans un système éolien non autonome. Des modèles de la génératrice pour le fonctionnement à faibles et grandes vitesses sont proposés. Le Logiciel Simplorer est choisi pour la simulation grâce à ces performances particulières par rapport aux autres logiciels. En se basant sur le modèle linéaire de l'inductance, des simulations du fonctionnement de la SRG pour l'alimentation pleine onde et l'alimentation régulée en courant sont effectuées dans le but d'étudier le comportement de la SRG en régime permanent. Une étude de l'influence des paramètres de commande est, ensuite, présentée, et une analyse complète de cette influence sur les performances de la génératrice nous a permet de déduire ses paramètres de commande optimums. De plus, une étude du couplage au réseau est réalisée, en proposant le convertisseur adéquat, en fin la dernière partie se porte sur le couplage au réseau électrique et les aspects de filtrage d'harmonique, le contrôle de puissance et l'amélioration de facteur de puissance.

Mots clés : éolienne, SRG, SIMPLORER, simulation, modèle linéaire, régime permanent, harmonique, filtrage.

Abstract:

This work concerns Switched reluctance generator called SRG, used for the production of electrical energy in a no autonomous wind system. Generator modeling for operating with both low and high speeds is proposed. The SIMPLORER Software is chosen for simulation for its particular performances compared to the other software. Using the linear model of inductance, simulation of the operation of the SRG for the full wave supply and the current controlled were done in order to study the behavior of the SRG in permanent mode. The influence of the control parameters was also presented, and a complete analysis of this influence on the performances of the generator permits to deduce its optimum control parameters. Moreover, the coupling to the electrical grid is carried out; proposing the adequate inverter, and the aspects of filtering of harmonic to improve the power control for a good power factor

Key Words: Wind system, SRG, SIMPLORER, simulation, linear model, permanent mode, harmonic, filtering.

Sommaire

Remerciements	i
Dédicace	ii
Résumé	iv
Sommaire	vi
Liste des symboles.....	x
Liste des figures	xiii
Introduction générale	xvi

Chapitre I : Etat de l'art de l'énergie éolienne.

Introduction :	2
Historique	2
I.1 Développement de l'énergie éolienne	3
I.1.1 Développement à l'échelle mondiale	3
I.1.2 Les pôles de l'énergie éolienne dans le monde	5
I.1.2.1 La Chine	5
I.1.2.2 les Etats-Unis	6
I.1.2.3 Union Européenne	6
I.1.3 L'énergie éolienne en Algérie	7
I.2 Structure des éoliennes	8
I.2.1 Description des éoliennes	9
I.2.2 Les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable.....	11
I.3 Principe de conversion et techniques d'extraction de la puissance.....	12
I.3.1 Théorie de Betz	12
I.3.2 Production de la puissance mécanique	16
I.4 Modélisation et système de contrôle	17

I.4.1	Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	17
I.4.2	Modélisation de la turbine	19
I.5	Application des éoliennes	20
I.5.1	Eolienne autonome	20
I.5.2	Eolienne non autonome	20
	Conclusion	21

Chapitre II : Fonctionnement et alimentation de la génératrice à réluctance variable.

	Introduction	23
II.1	Description des SRG	23
II.2	Structure à circuit magnétique simple.....	24
II.3	Principe de fonctionnement	25
II.3.1.1	Énergie et coénergie	28
II.3.1.2	Modèle électrique	29
II.4	Excitation et stratégie d'alimentation	29
II.4.1	Mode d'excitation	30
II.4.2	Topologie des convertisseurs	30
II.4.2.1	Structure à demi-pont asymétrique	31
II.4.2.2	Structure m+1 transistors	31
II.4.3	Stratégie d'alimentation	32
II.4.3.1	Alimentation en pleine onde	32
II.4.3.2	Alimentation par hystérésis	32
II.4.3.3	Alimentation par la PWM	36
II.5	Choix et Application de la SRG dans le domaine éolienne	36
II.5.1	Choix et paramètres de la SRG	36
II.5.2	Choix du convertisseur	37
	Conclusion	38

Chapitre III : Modélisation du fonctionnement de la SRG sous SIMPLORER®

Introduction	40
III.1 Présentation du logiciel SIMPLORER®	40
III.2 Modélisation de la SRG sous SIMPLORER®	43
III.2.1 Modèle « linéaire » de la SRG	43
III.2.2 Modèle « linéaire de l'inductance »	44
III.2.3 Modélisation sous SIMPLORER	46
III.3 Simulation de fonctionnement de la SRG sous SIMPLORER	48
III.3.1 Résultats de simulation pour les grandes vitesses	48
III.3.2 Interprétation des résultats	50
III.3.3 Modèle analytique	51
III.4 Simulation à faibles vitesses	54
III.4.1 Alimentation par hystérésis hard chopping	54
III.4.2 Alimentation par MLI.....	56
Conclusion	58

Chapitre IV Analyse des performances de la SRG.

Introduction	60
IV.1 Présentation des méthodes d'analyse utilisées par SIMPLORER	
• Analyse de Monte Carlo	60
• Approximation successive	60
IV.2 Influence de la vitesse sur les performances de la machine	60
IV.3 Influence de θ_{on} et de θ_{off} à grande vitesse	62
IV.3.1 Influence séparée des angles de commande	63
IV.3.2 Influence simultanée	63
IV.4 Influence de θ_{on} , θ_{off} et I_{ref} à faibles vitesses	65
IV.4.1 Alimentation par MLI	65

VI.4.2 Alimentation par hystérésis (soft chopping)	69
VI.5 Application des paramètres optimums	71
IV.5.1 A grande vitesse	71
IV.5.2. A faible vitesse	73
Conclusion	75

Chapitre V : Couplage au réseau.

Introduction	77
V.1 Principe de couplage	77
V.2 Modélisation du système de couplage	78
V.2.1 L'onduleur triphasé à trois niveaux	78
V.2.1.1 Fonctionnement d'un bras de l'onduleur	79
V.2.1.2 Différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux	80
V.2.1.3 Commande MLI triangulo-sinusoïdale	82
V.2.1.4 Résultats de simulation	85
V.2.2 Modèle du transformateur	87
V.2.3 Modèle du filtre	87
V.3 Schéma de liaison adapté sous Simplorer	89
V.4 Etudes d'harmonique et filtrage	91
V.5 Etude des puissances	96
V.5.1 Couplage sans contrôle de puissance	96
V.5.2 Couplage avec contrôle de puissance	97
V.5.2.1 La commande par mode de glissement	98
V.5.2.2 Application à la SRG	100
V.5.2.3 Résultats de simulation	102
Conclusion	103
Annexe	
Bibliographie	

Liste des symboles.

C_p : coefficient de puissance

C : capacité du condensateur dans l'étape continue

C_p : coefficient de puissance

S: diamètre de la turbine

v : la vitesse du vent

ρ : densité volumique de l'air

β : angle de calage des pales

λ : vitesse spécifique de l'aéroturbine

R_s : résistance série (Ω)

k : constante de Boltzmann ($k = 1,38.10^{-23}$)

S : surface active des panneaux (m²)

SRM : Swiched Reluctance Machine.

N_s : nombre de dents statorique.

N_r : nombre de dents rotorique.

U: tension d'alimentation.

V_{dc}:Tension de bus continue

i : courant par phase.

Δi : bande de hachage en hystérésis.

e : fem induite totale.

R : résistance d'une phase.

N, n : nombre de spire par phase.

Φ : flux d'une spire par phase.

Ψ : flux total de toutes les spires par phase.

L_{1,2,3} : inductance des phases 1,2 et 3.

L_{max} : inductance maximale dans la position de conjonction ou d'alignement.

L_{min} : inductance minimale dans la position d'opposition ou de non alignement.

C : couple électromagnétique.

θ_e : angle électrique.

θ : angle mécanique.

θ_{on}, tetaon : angle d'alimentation.

θ_{off}, tetaoff: angle d'extinction.

θ_n : durée d'application de la tension négative.

ω_b : vitesse de base.

β_s : angle d'ouverture de la dent statorique.

β_r : angle d'ouverture de la dent rotorique.

W'_{em}, W' : coénergie électromagnétique.

W_e : énergie électrique.

W_{em} : énergie électromagnétique stockée.

W_m : énergie mécanique.

m : indice de modulation

r : taux de modulation

THD%: Taux de distorsion

D%: Taux global de distorsion

H_n%: Taux individuel d'harmoniques

Y_n: valeur efficace de l'harmonique de rang n.

MLI: Modulation de la Largeur d'Impulsion.

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.

Liste des figures

Fig. I.1 : Nouvelle capacités éolien installées dans le monde [MW].....	4
Fig. I.2 : Les capacités éoliennes totales installées dans le monde [MW].	4
Fig. I.3 : Meilleur pays en développement du parc éolien entre 2009 et 2010.	5
Fig. I.4 : éoliennes offshore	5
Fig. I.5 : pays de l'Union Européenne les plus développés en énergie éolienne.....	6
Fig. I.6 : Meilleur pays en rapport de capacité installé/surface [kW/km ²].....	7
Fig. I.7 : Meilleur pays en rapport de capacité installé/personne [kW/personne].....	7
Fig. I.8 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).....	7
Fig. I.9 : Types d'aérogénérateurs	8
Fig. I.10 : Les principaux éléments constituant une éolienne.....	9
Fig. I.11 : Principe de l'éolienne à vitesse fixe.....	10
Fig. I.12 : Principe de l'éolienne à vitesse variable.....	12
Fig. I.13 : Tube de courant autour d'une éolienne.....	13
Fig. I.14 : Coefficient de puissance	15
Fig. I.15 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	15
Fig. I.16 : Coefficient de la puissance disponible sur l'arbre du générateur en fonction de la vitesse du vent	16
Fig. I.17 : Système mécanique de l'éolienne	17
Fig. I.18 : Modèle mécanique simplifiée de la turbine.....	19
Fig. I.19 : Schéma de la turbine éolienne	19
Fig. II.1 : Structure des SRG à plots	25
Fig. II.2 : illustration des positions d'opposition et de conjonction	25
Fig. II.3 : Modèle linéaire de l'inductance	26
Fig. II.4 : Principe de fonctionnement de la SRG	27
Fig. II.5 : phases d'excitation et de désexcitation de la SRG	27
Fig. II.6 : Energie et coénergie magnétique	28
Fig. II.7 : convertisseur à demi-pont asymétrique à trois bras	31
Fig. II.8 : Schéma d'un convertisseur à un seul interrupteur par phase	31
Fig. II.9 : alimentation en pleine onde	32
Fig. II.10 : schéma globale de la commande d'alimentation par hystérésis	33
Fig. II.11 : Alimentation par hystérésis (soft shopping)	34
Fig. II.12 : Alimentation par hystérésis hard shopping	35
Fig. II.13 : Alimentation par la technique de la MLI	36

Fig. III.1 : Interface principale de SIMPLORER	41
Fig. III.2 : Exemple d'analyse en utilisant DAY Post Processor	43
Fig. III.3 : Schéma électrique d'une phase de la SRG.....	44
Fig. III.4 : Approximation linéaire de l'inductance des trois phases de la SRG	45
Fig. III.5 : Modèle Simplorer de l'ensemble convertisseur SRG Charge.....	47
Fig. III.6 : Test de fonctionnement à grande vitesse.....	49
Fig. III.7 : Courant de phase obtenu par le modèle analytique et numérique	53
Fig. III.8 : Couple de phase obtenu par le modèle analytique et numérique	53
Fig. III.9 : Alimentation par hystérésis hard	55
Fig. III.10 : Zoom sur le couple obtenu par hystérisé hard et soft.....	56
Fig. III.11 : Alimentation par la PWM.....	57
Fig. IV.1 : Influences de la vitesse sur le courant et la puissance générée.....	61
Fig. IV. 2 : Influence des paramètres de commande sur la puissance générée	63
Fig. IV.3 : Influence de θ_{on} et de θ_{off} sur la puissance générée.....	64
Fig. IV.4 : Influence de θ_{off} et de la vitesse sur la puissance générée	64
Fig. IV.5 : Influence de θ_{on} et de la vitesse sur la puissance générée.....	64
Fig.IV.6 : Puissance électromagnétique générée par la technique MLI.	66
Fig.IV.7 : Influence de θ_{on} et du courant de référence sur la puissance générer	68
Fig.IV.8 : Influence de θ_{on} et de la vitesse sur la puissance générée.....	68
Fig.IV.9 : Influence de θ_{off} et de la vitesse sur la puissance générée	70
Fig.IV.10 : Influence de θ_{off} et du courant de référence sur la puissance générer	70
Fig.IV.11 : Résultats de simulation à grandes vitesses pour les paramètres optimums	72
Fig.IV.12 : Résultats de simulation à faibles vitesses pour les paramètres optimums	74
Fig. V.1 : Schéma globale de la liaison au réseau	77
Fig. V.2 : Onduleur triphasé à trois niveaux	78
Fig. V.3 : Structure d'un bras de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC	79
Fig. V.3 : Interrupteur bidirectionnelle équivalent de la paire transistor diode	79
Fig. V.5 : Les cinq configurations possibles d'un bras d'onduleur à trois niveaux	81
Fig. V.6 : principe de la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses bipolaire	84
Fig. V.7 : Commande MLI triangulo-sinusoidale à double porteuse sous Simplorer	84
Fig. V.8 : Résultats de simulation pour $m = 21$	85
Fig. V.9 : Résultats de simulation pour $m = 33$	86
Fig.V.10 : Modèle du filtre	88
Fig. V.11 : Modèle de la liaison sous SIMPLORER	89
Fig.V.12 : Tension à la sortie de l'onduleur avant le couplage	90

Fig.V.13 : Tension composée de sortie de l'onduleur et de réseau après couplage	90
Fig. V.14 : Courant des phases après couplage	90
Fig. V.15 : Le spectre d'harmonique du courant de phases avant filtrage pour $m=21$	92
Fig. V.16 : Spectre d'harmonique du courant de phases avant filtrage pour $m=33$	93
Fig. V.17 : Spectre d'harmonique du courant de phase après filtrage	94
Fig.V.18 : Résultats de couplage direct	96
Fig. V.19 : Schéma de liaison au réseau avec contrôle de puissance	97
Fig. V.20 : Choix du référentiel	100
Fig. V.21 : Résultat de simulation en boucle fermée	102

Introduction générale

La MRV est une machine robuste et appropriée pour les faibles et grandes vitesses de fonctionnement. Elle est aussi intéressante dans un environnement hostile due à l'absence d'enroulements ou d'aimants permanents au rotor. De plus, l'absence des courants rotoriques conduit à la présence des pertes uniquement au stator, ce qui facilite le refroidissement et contribue à la réduction de la taille de la machine. Pour toutes ces caractéristiques, la MRV peut être utilisée comme génératrice dans plusieurs applications où la robustesse est exigée.

Dans le passé, la SRG a été surtout utilisée, dans les applications d'automobile et d'aérospatial. Son utilisation a été étendue, par la suite, à la conversion de l'énergie éolienne après plusieurs études de faisabilité et de test sur des modèles réduits. D'autres travaux ont été réalisés pour le couplage de la SRG au réseau, et le contrôle de la puissance envoyée.

Notre travail s'insère dans ce thème. Il consiste à concevoir un modèle sous Simplorer et un dispositif de commande d'un système éolien couplé au réseau électrique et basé sur le générateur à reluctance variable, qui n'est jusque là qu'au stade d'expérimentations. Nous devons ainsi, étudier Les caractéristiques des signaux à injecter au réseau, le filtrage et la qualité d'énergie fournie

Ce travail est subdivisé en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, après un bref historique sur les éoliennes et leur développement, les différentes structures existantes et les différents types d'éoliennes sont présentées, ainsi que le principe de la conversion de l'énergie du vent.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la génératrice à reluctance variable, en décrivant le principe de fonctionnement, les modes d'excitation, les types d'alimentations ainsi que les techniques de régulation de courant appliquées pour les faibles vitesses.

Au troisième chapitre, la modélisation de la génératrice à reluctance variable par le logiciel SIMPLORER® est proposée en considérant le modèle linéaire de l'inductance. La simulation de fonctionnement de la génératrice en régime permanent, est ainsi réalisée pour les différents types d'alimentation et différentes techniques de régulation de courant.

Le quatrième chapitre concerne l'étude de l'analyse des performances de la génératrice en fonction des paramètres de commande, dans le but de trouver les paramètres optimaux de commande.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude du couplage de la génératrice éolienne au réseau électrique, et à la conception d'un système de commande afin de contrôler la puissance envoyée au réseau.

Chapitre I

Etat de l'art sur l'énergie éolienne.

Introduction :

Le changement climatique constaté ces dernières décennies du au réchauffement de la planète, et les crises pétrolières qu'ont traversé, les pays développés ont conduit les utilisateurs des énergies fossiles à revoir leur politique d'énergie. En effet, la réduction des gaz à effet de serre et la préservation de l'énergie font, alors, parti des principales stratégies des politiques d'énergie actuelles. Les sources d'énergies renouvelables se présentent comme une des solutions à ce problème. Parmi ces sources, l'énergie éolienne est l'une des premières énergies, à être utilisée. Avec le regain d'intérêt et le développement de l'électronique de puissance, cette source occupe, actuellement, la plus grande partie des sources d'énergie renouvelable [14].

Dans ce chapitre, un historique sur les éoliennes et leur développement ces dernières années est présenté en premier lieu afin de montrer l'intérêt qu'elle suscite dans la production d'énergie. Les différentes structures d'éoliennes utilisées pour la production de l'énergie électrique sont, ensuite, décrites. De plus, le principe de conversion d'énergie du vent ainsi que les stratégies de contrôle d'une éolienne sont présentées.

Historique :

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau.

Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C environ. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV^{ème} siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIX^{ème} siècle, le nombre

des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, et L'industrialisation les moulins à vent commencent leur disparition progressive [2].

C'est en 1891 que le Danois Poul LaCour construisit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité. Depuis, la technologie des aérogénérateurs a évidemment évoluée. Ceci a permis, à l'énergie éolienne, de devenir ces dernières années une alternative aux sources d'énergie traditionnelles. Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, il leur reste encore une grande marge de progrès technologique.

A la suite de la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois améliorèrent cette technologie durant la 1^{ère} et la 2^{ème} guerre mondiale pour faire face à la pénurie d'énergie électrique. Malgré certains succès technologiques obtenus à cette époque, l'intérêt pour l'exploitation de l'énergie éolienne à grande échelle déclina à la fin de la 2^{ème} guerre mondiale.

C'est avec la crise pétrolière des années 70 avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante que l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualité et connaît un développement galopant, et l'intérêt de développer les aérogénérateurs ressurgit. Ainsi plusieurs pays se retournent vers cette énergie afin de l'utiliser dans la production de l'énergie électrique. Ils commencèrent à investir pour améliorer la technologie des aérogénérateurs, ce qui donna naissance aux aérogénérateurs modernes [2].

On aménage maintenant des parcs à éoliennes multiples produisant plusieurs mégawatts. Au cours des dix dernières années, la puissance typique de génération d'électricité pour une seule éolienne est passée d'environ 100 kW à 2 MW voir 5 MW. Entre 1995 et la fin de 2003, environ 76% des nouvelles connexions d'aérogénérateurs au réseau étaient installées en Europe [3].

I.1 Développement de l'énergie éolienne

I.1.1 Développement à l'échelle mondiale

Le parc éolien mondial a connu une augmentation de puissance l'an dernier (2010) de 22%, soit un investissement de 47,3 milliards d'euros. Selon le GWEC (Global Wind Energy Council), 35,8 GW d'énergie éolienne ont été installés à travers le monde pour la seule année 2010.

Pour la première fois, plus de la moitié des nouvelles capacités ont été construites en dehors des marchés historiques qui sont l'Europe et l'Amérique du Nord. À elle seule, la Chine a accueilli 46,1% des nouvelles éoliennes (16 GW). Elle est devenue le premier producteur mondial d'équipement éolien, devant le danois Vestas, l'américain GE ou l'allemand Siemens [4].

Le chiffre d'affaire du secteur de vent dans le monde entier a atteint 40 milliards d'Euros (55 milliards de \$) en 2010, alors qu'en 2009 on l'estime à 50 milliards d'Euros. Cette diminution est due aux faible prix des turbines éoliennes d'une part et d'autre part à la crise financière(2010), particulièrement marqué aux États-Unis où la puissance installée (5 GW) a chuté de 50% par rapport à 2009 (10 GW). La figure (I.1) montre cette diminution en 2010 mais comme on le constat elle a repris son taux de croissance en 2011.

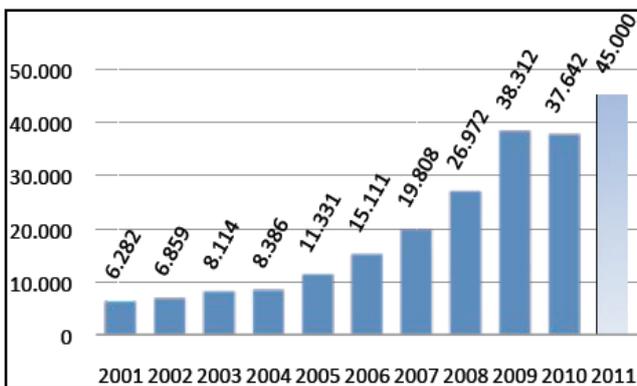


Fig. I.1 : Nouvelle capacités éolien installées dans le monde [MW]

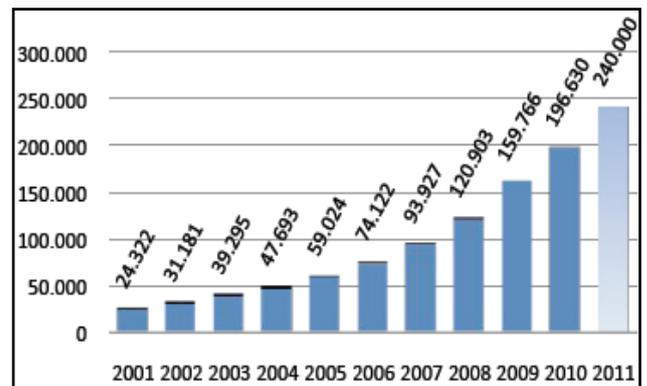


Fig. I.2 : Les capacités éoliennes totales installées dans le monde [MW] [5]

En effet, la crise financière de 2010 n'a pas trop influé sur l'élargissement du parc d'éolien mondial car vers la fin 2010, 20 pays ont eu des installations de plus de 1 000 MW, comparées à 17 pays en fin 2009 et 11 pays en fin 2005. Dans le monde entier, 39 pays ont eu des fermes de vent d'une capacité de 100 mégawatts ou plus installés, comparée à 35 pays il y a un an, et 24 pays il y a cinq ans.

La figure(I.2) montre les dix premiers pays ayant le plus grand développement du parc éolien entre 2009 et 2010 [5].

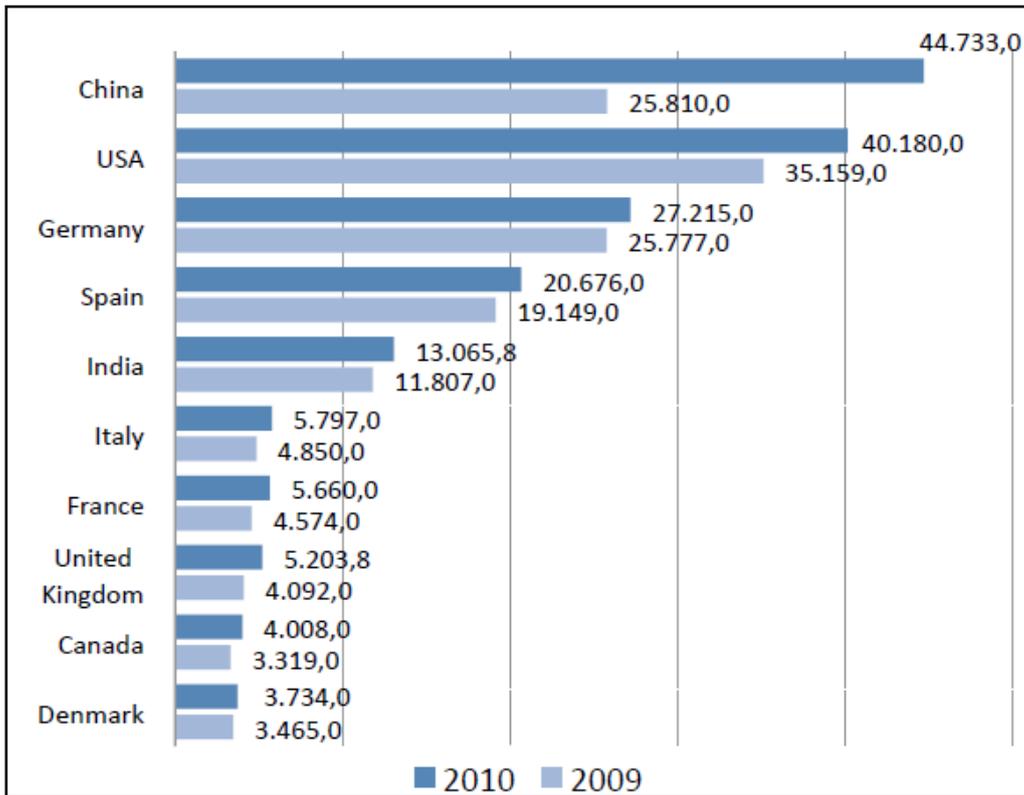


Fig. I.3 : Meilleur pays en développement du parc éolien entre 2009 et 2010

I.1.2 Les pôles de l'énergie éolienne dans le monde

I.1.2.1 La Chine

La Chine a détrôné les États-Unis et héberge désormais le premier parc éolien de la planète, avec 42 gigawatts (GW), soit les deux tiers de la capacité du parc nucléaire français, contre 40 GW pour les Américains, en 2010 elle a accueilli 46,1% des nouvelles éoliennes (16 GW), en plus elle est devenue le premier producteur mondial d'équipement éolien [5].



Fig. I.4: éoliennes offshore (projet de Shanghai's East Sea Bridge) La Chine

I.1.2.2 Les Etats-Unis

Les Etats-Unis ont vu une diminution importante des nouvelles installations en 2010, ajoutant seulement 5.6 GW, après 9.9 GW en 2009. Le principal état était le Texas d'une capacité totale de 10 GW. Vers la fin de 2010, un parc éolien de 5 GW était en construction. En 2011, les diverses prévisions suggèrent une nouvelle capacité de jusqu'à 10 GW. Le département américain de l'Énergie a consacré quelques \$ 50.500.000 pour faire avancer la technologie de l'énergie éolienne offshore aux Etats-Unis et l'administration américaine a déjà annoncé qu'elle aimerait voir le premier parc éolien offshore américain construit sous son mandat [3] [5].

I.1.2.3 Union Européenne

A la fin de 2010, l'Europe comptait un total de 1.136 éoliennes offshore installées et raccordées au réseau dans 45 parcs éoliens répartis dans 9 pays de l'Union et développant une capacité de 2.946 MW, soit de quoi alimenter 2,9 millions foyers. Les 5 pays de l'Union Européenne développant une capacité d'énergie éolienne offshore en 2010 sont les suivants :

Position 2010	Country	Total Offshore Capacity 2010 [MW]	Added Offshore Capacity 2010 [MW]	Rate of Growth 2010 [%]	Total Offshore Capacity 2009 [MW]	Total Offshore Capacity 2008 [MW]
1	United Kingdom	1341	653	94,9	688	574
2	Denmark	854	190,4	28,7	663,6	426,6
3	Netherlands	249	2	0,8	247	247
4	Belgium	195	165	550,0	30	30
5	Sweden	164	0	0,0	164	134

Fig. I.5: pays de l'Union Européenne les plus développés en énergie éolienne offshore

Pour l'union européenne, le Danemark est classé premier pour la capacité installée par personne (0.675 kilowatts/personne), suivi de l'Espagne (0.442 kW/personne), le Portugal (0.344 kW/personne) et l'Allemagne (0.334 kilowatts/personne). Dans cette perspective, le leader mondial (la Chine) débarque seulement sur l'endroit 27 (0.033 kilowatts/personne), les Etats-Unis atteignent le numéro 9 (0.128 kilowatts/personne). Également par rapport à la surface utilisée, le Danemark est le numéro un dans le monde avec 86.6 kilowatts par kilomètre carré, suivi de l'Allemagne (76.2 kW/km²), Pays Bas (53.8 kW/km²), l'Espagne (40.9 kW/km²), et le Portugal (40.2 kW/km²). La figure (I.6) représente les statistiques données en 2011 par l'association d'énergie éolienne du monde (WWEA) [3] [5].

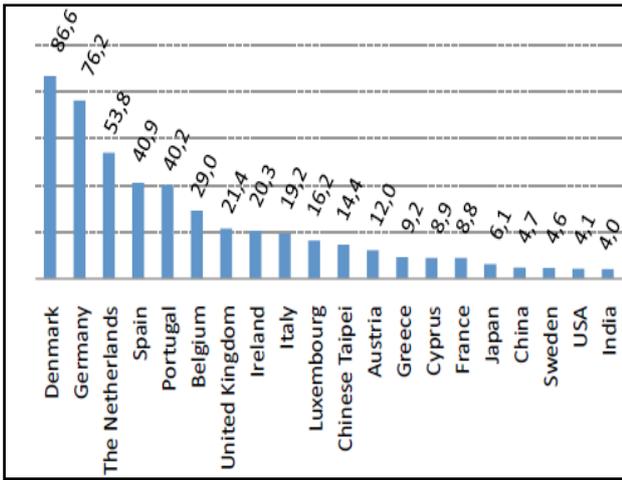


Fig. I.6 : Meilleur pays en rapport de capacité installé/surface [kW/km²]

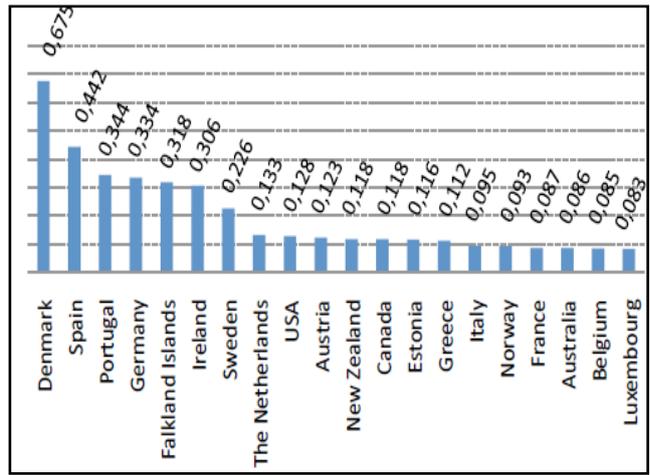


Fig. I.7 : Meilleur pays en rapport de capacité installé/personne [kW/personne]

En général, ces trois derniers sont les géants de l'énergie éolienne dans le monde, mais on peut citer aussi d'autres pays émergents comme le Japon l'Inde, le Brésil et le Mexique qui investit aussi significativement dans l'énergie éolien.

I.1.3 L'énergie éolienne en Algérie

En ce qui concerne l'Algérie, l'utilisation de l'énergie éolienne est encore a ses premiers pas. Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie. La figure (I.8) est une représentation de la vitesse sous forme de carte [6].

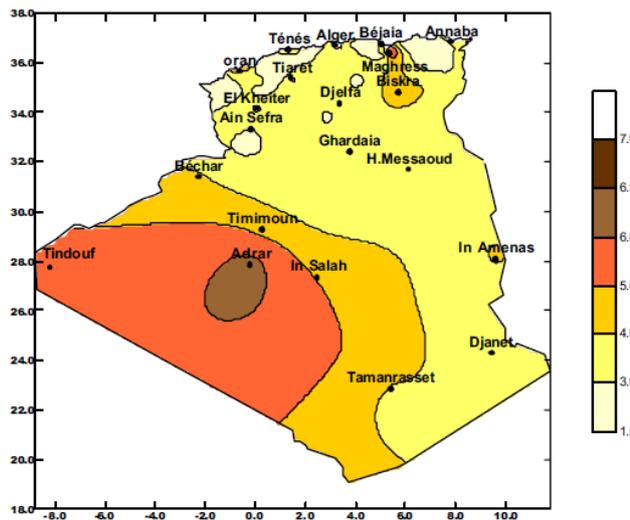


Fig. I.8 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).

Selon le Centre de Développement des Energies Renouvelables Le potentiel éolien technique de ces régions a été estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitable soit l'équivalent de 75% des besoins nationaux en 2007 [7].

Le directeur du groupe SONELGAZ a souligné que « 2000 mégawatts seront produits à partir de l'énergie éolienne », mais les experts marquent que l'exploitation du potentiel éolien de ces régions se heurte souvent à de fortes contraintes d'ordre technique et économique, tel que l'éloignement, l'absence de connexion avec le réseau électrique national et bien d'autres contraintes, ce qui entraînerait un investissement plus lourd.

I.2 Structures des éoliennes

Les éoliennes capturent l'énergie cinétique du vent dans le rotor qui se compose de deux pales ou plus, mécaniquement couplées à un générateur électrique. Deux différentes configurations sont disponibles pour la conception de la turbine, la configuration à axe horizontale et la configuration à axe verticale. L'éolienne à axe verticale a la forme d'un batteur d'œufs, et s'appelle souvent le rotor de Darrieus (son inventeur). Elle a été employée dans le passé en raison de l'avantage structural spécifique. Cependant, la plus moderne conception et la plus utilisée est celle à axe horizontal pour ces nombreux avantages tel que : un coût moins important et elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques.

Excepté le rotor, tous les autres composants sont les mêmes dans les deux conceptions, avec une certaine différence dans leur placement.



Aérogénérateurs à axe horizontal.



Aérogénérateurs à axe vertical

Fig. I.9 : Types d'aérogénérateurs.

I.2.1 Description des éoliennes

Une éolienne est constituée par une tour au sommet de laquelle se trouve la nacelle. La tour a la forme d'un tronc en cône où, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle. La nacelle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande. Tous ces éléments sont représentés sur la figure (I.10) [2].

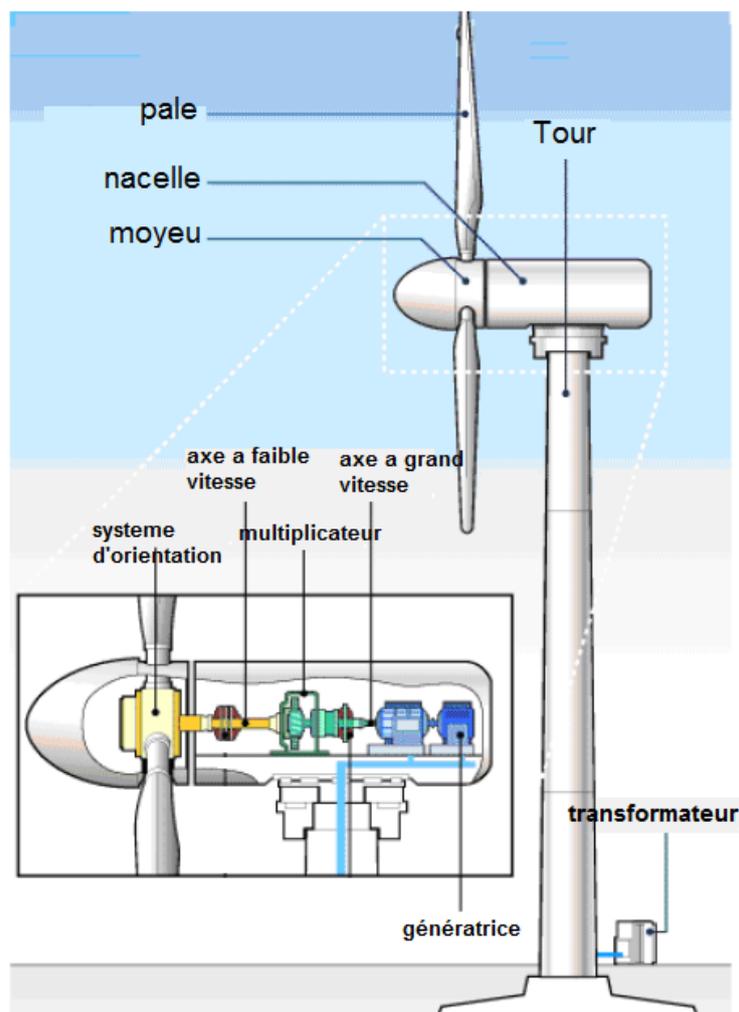


Fig. I.10 : Les principaux éléments constituant une éolienne.

LE ROTOR :

Il est composé, généralement, de 3 pâles à inclinaison variable. L'autre partie est le moyeu qui supporte les pâles sur l'arbre.

LA NACELLE :

La nacelle contient tout le système de production d'énergie, elle est constituée par :

- Un générateur d'électricité
- Un échangeur de chaleur
- Un transformateur
- Une boîte de vitesse
- Un système de refroidissement
- Un contrôleur de puissance
- Un arbre principal.

LA TOUR :

C'est l'un des principaux composants d'une éolienne car elle supporte le poids de l'ensemble. Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Etant donné que la vitesse du vent augmente lorsque l'on s'éloigne du sol, une tour peut mesurer entre 50 pour les plus petites (~400kW) à 140 m de haut pour les plus grandes (~3.5MW) [3].

La turbine éolienne est munie de pâles fixes ou orientables et tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 tr/mn. Plus le nombre de pâles est grand, plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite.

Un multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné à environ 1500 tr/mn). Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

La génératrice dont la fonction première est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Cette fonction peut être réalisée au moyen de deux types de machines: les plus couramment utilisées sont : une génératrice asynchrone ou alors une génératrice synchrone. De plus un convertisseur de puissance associe éventuellement à la génératrice selon le type (direct ou indirect) de connexion au réseau [8].

Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur ou à l'eau.

Les signaux électroniques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne pour démarrer l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5 m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25 m/s afin d'assurer la protection de l'éolienne.

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse est variable. La partie suivante décrit d'une manière assez générale le fonctionnement général de ces deux procédés.

I.2.2 Les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable

La puissance éolienne résulte de la vitesse de rotation de l'arbre mécanique de l'éolienne, de la vitesse du vent et de la caractéristique C_p . Elle peut être optimisée dans le but de maximiser l'énergie captée par l'éolienne.

• Les éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau selon figure (I.11). Sa vitesse est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hypersynchrone selon figure (I.11) et génère de la puissance électrique sur le réseau [3]. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique (Ω_{mec}) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme ($\Omega_s = 1500$ tr/mn), ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur de vitesse.

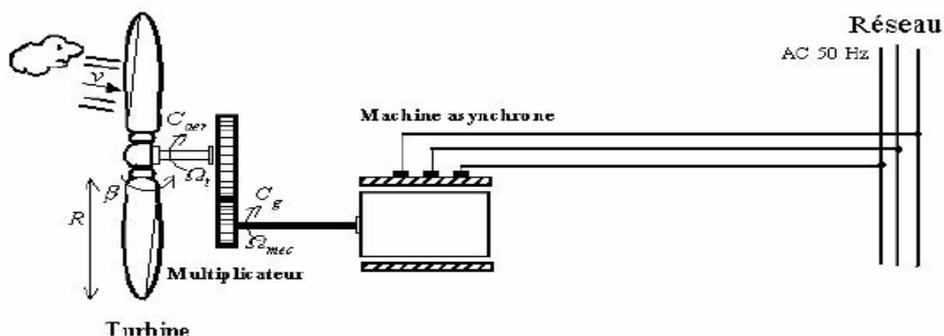


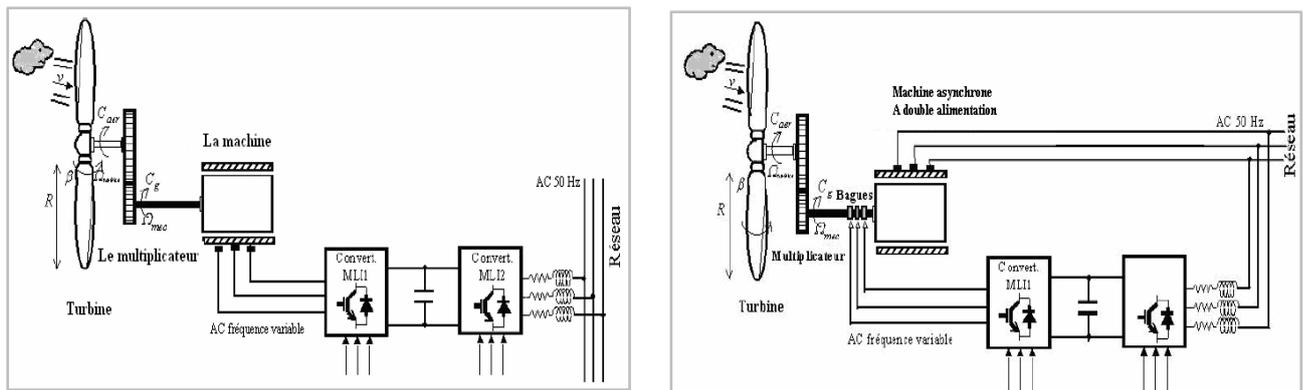
Fig. I.11 : Principe de l'éolienne à vitesse fixe.

• Les éoliennes à vitesse variable

Les deux structures existantes à vitesse variable sont représentées sur la figure (I.12) :

- la configuration de la figure (I.12.a), est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques.

- La configuration de la figure (I.12.b), est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné (MADA). La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique [8].



(a)

(b)

Fig. I.12 : Principe de l'éolienne à vitesse variable.

I.3 Principe de conversion et techniques d'extraction de la puissance

I.3.1 Théorie de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (I.13) sur lequel nous avons représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$ (I.1)

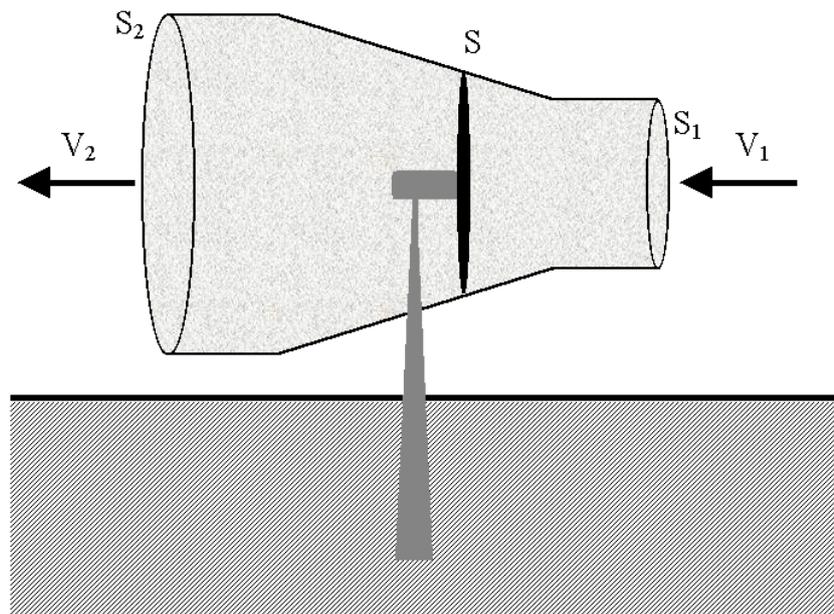


Fig. I.13 : Tube de courant autour d'une éolienne.

D'après la loi de la conservation de débit

$$S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2 = S \cdot V \quad (\text{I.2})$$

La force développée par les pales, d'après Euler égale à :

$$F = \rho \cdot Q \cdot (V_1 - V_2) = \rho \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{I.3})$$

Et donc on trouve la puissance développée :

$$P = \rho \cdot S \cdot V_2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{I.4})$$

La puissance véhiculée par le vent en amont est donnée par l'expression suivante :

$$P_1 = \frac{1}{2} m V_1^2 \quad (\text{I.5})$$

De la même manière, la puissance véhiculée par cette même masse d'air ralentie à la vitesse V_2 en aval s'exprime par :

$$P_2 = \frac{1}{2} m V_2^2 \quad (\text{I.6})$$

Cette diminution de la vitesse du vent, traduit la perte du fluide en énergie cinétique qui est récupérée par la turbine éolienne, sous forme d'énergie mécanique.

Comme la puissance transmise du vent aux pales peut être exprimée en appliquant la 2^{ème} loi de Newton, on aura :

$$P_{\text{aéro}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I.7})$$

En égalisant (I.4) et (I.7), on retrouve l'expression (I.1).

La masse d'air passant ainsi par la surface S toutes les secondes s'exprime par :

$$m = \rho \cdot S \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{I.8})$$

Ainsi, la puissance transmise à l'aérogénérateur peut s'exprimer en injectant l'expression (I.8) dans l'équation (I.7), par :

$$P_{\text{aéro}} = (\rho \cdot S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)) / 4. \quad (\text{I.9})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , et la puissance P_m correspondante serait alors :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (\text{I.10})$$

On définit le Coefficient de puissance qui est propre à chaque éolienne et qui représente le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible, par :

$$C_p = \frac{P_{\text{aéro}}}{P_m} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{V_2}{V_1} \right] \quad (\text{I.11})$$

Et par la suite $C_{p_{\text{max}}} = 0,59 = 59\%$, va caractériser ce qu'on appelle la **limite de Betz**.

En effet, la représentation de la caractéristique correspondant à l'équation (I.11), montre bien que le rapport $P_{aréo}/P_m$, présente un maximum égal à $16/27$, soit 0.59 appelé limite de Betz Figure(I.14). Cette limite fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée, mais en réalité, elle n'est jamais atteinte. De plus, on introduit une autre variable sans dimension λ appelée vitesse relative, qui représente le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent, et qui caractérise les performances aérodynamiques propres à chaque éolienne dont va dépendre le coefficient de puissance Figure (I.14) [1].

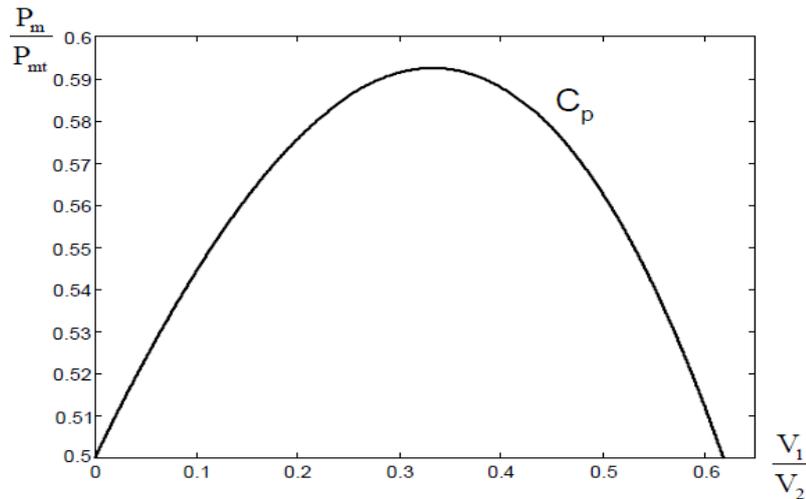


Fig. I.14 : Coefficient de puissance

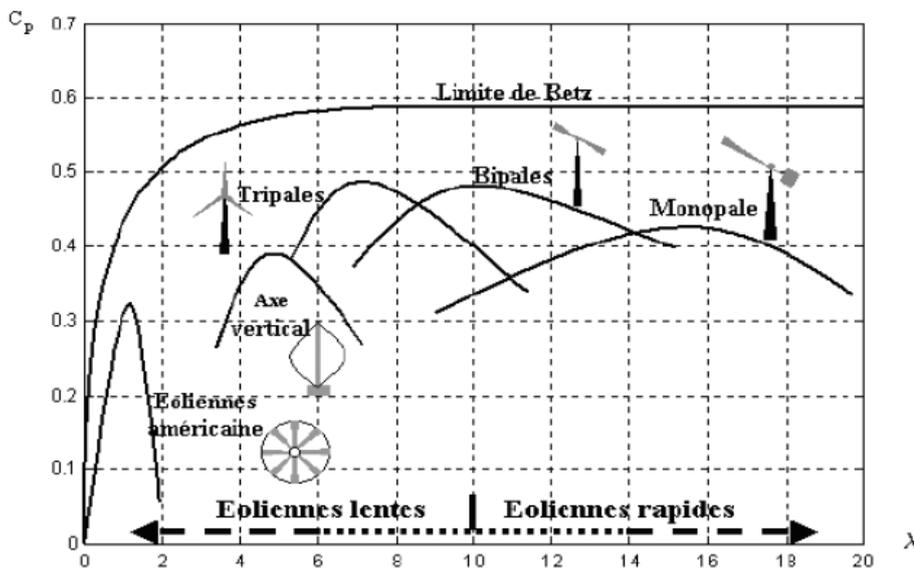


Fig. I.15 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

On voit clairement sur la figure (I.14) que le coefficient de puissance dans les éoliennes à marche rapide (éolienne généralement mono et bipales) est très important que celui des éoliennes à marche lent.

Pour les éoliennes mono pales, bipales et tripales, la variation du coefficient de puissance est moins sensible autour d'une vitesse relative optimale. Par contre, pour les éoliennes à marche lente, la variation de C_p est très sensible, d'autant plus qu'elles présentent un facteur de puissance plus réduit.

I.3.3 Production de la puissance mécanique

En combinant les équations (I.8), (I.10), et (I.11), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{aéro}} \cdot P_{aéro} = C_p \cdot P_{aéro} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \tag{I.12}$$

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{\Omega_T R}{V_1} \tag{I.13}$$

Ω_T : vitesse de rotation de la turbine.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse G , la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_g R}{G V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \tag{I.14}$$

Ω_g : vitesse de rotation de l'arbre du générateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses du vent figure (I.16) [1].

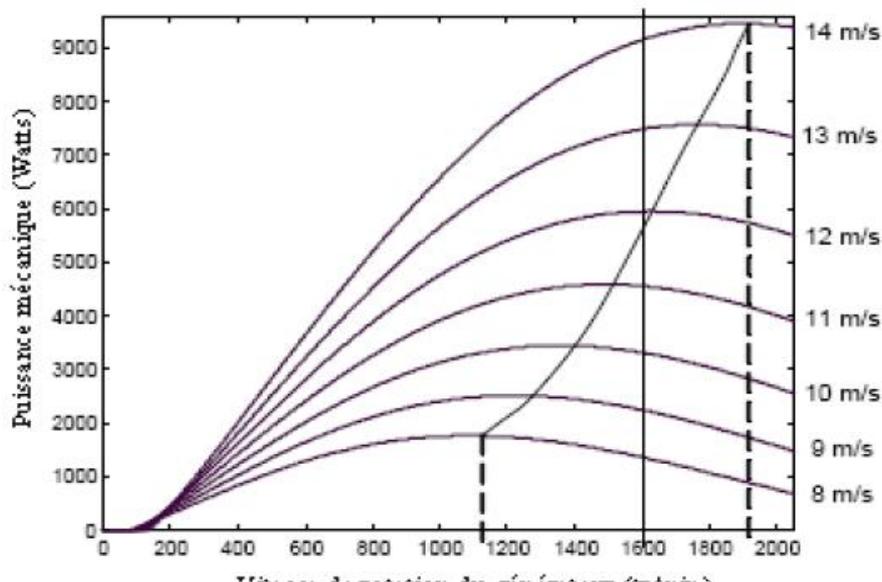


Fig. I.16 : Coefficient de la puissance disponible sur l'arbre du générateur en fonction de la vitesse du vent.

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe les maximas théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse du vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple [1].

I.4 Modélisation et système de contrôle

I.4.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables de longueur R. Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à la vitesse de la turbine et qui est relié à un multiplicateur de gain G. Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (figure I.17) [3].

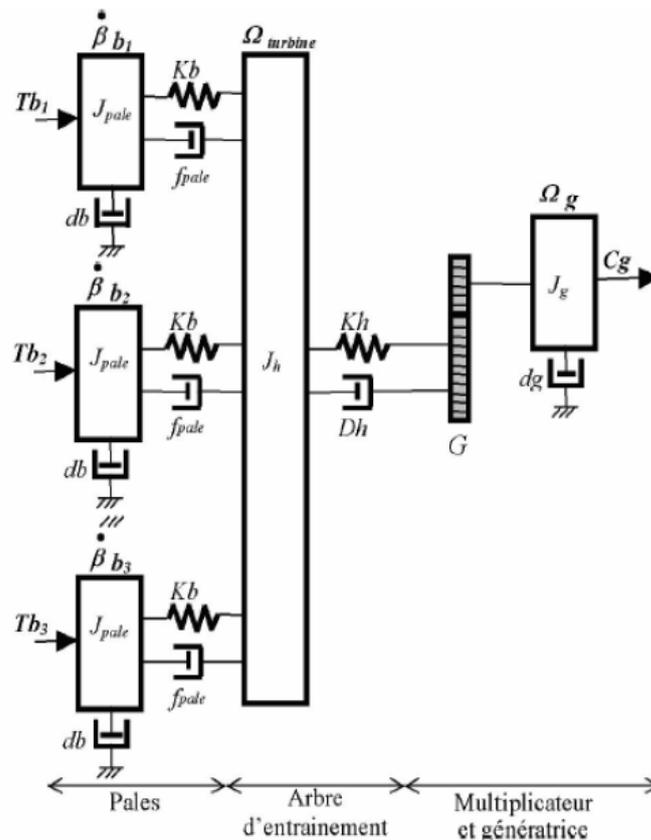


Fig. I.17 : Système mécanique de l'éolienne

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie J_{pale}
- la même élasticité K_b
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air d_b .

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées β_{b1} , β_{b2} , β_{b3} . Chaque pale reçoit une force T_{b1} , T_{b2} , T_{b3} qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée [3].

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie J_h
- son élasticité K_h
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie J_g
- un coefficient de frottement d_g

Ce rotor transmet un couple entraînant (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($T_{b1} = T_{b2} = T_{b3}$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (d_b) est très faible et peut être ignoré.

De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses figure(I.18) dont la validité, par rapport au modèle complet, a déjà été vérifiée [9].

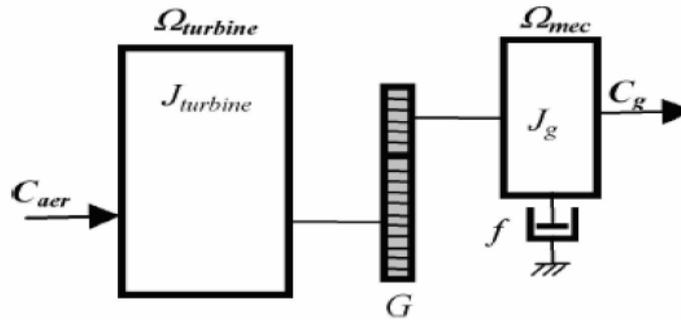


Fig. I.18 : Modèle mécanique simplifiée de la turbine.

I.4.2 Modélisation de la turbine

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G figure (I.19).

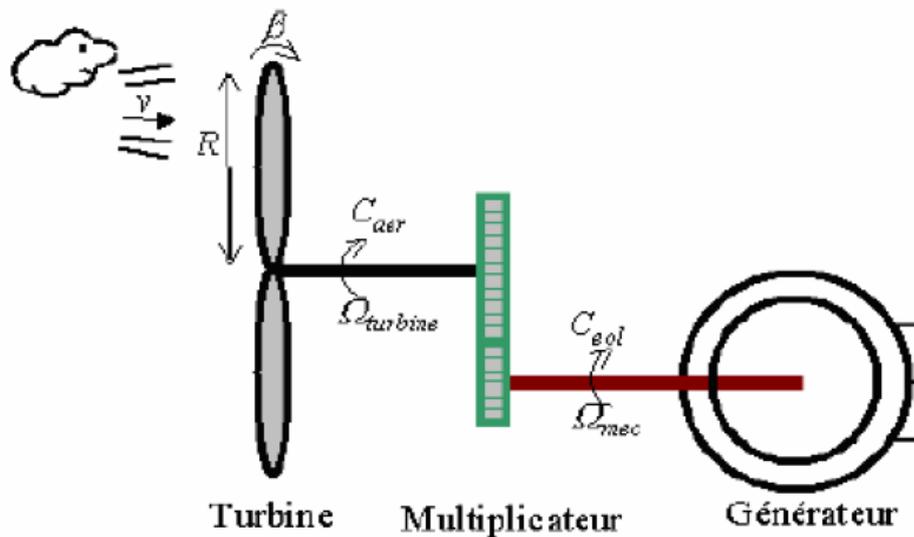


Fig. I.19 : Schéma de la turbine éolienne.

La puissance du vent est définie de la manière suivante [3] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot S_{éolienne} \cdot \rho \cdot V^3 \tag{I.15}$$

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent (P_{vent}). La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne $P_{éolienne}$ peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_{\text{éolienne}} = C_p \cdot P_{\text{vent}} \quad (\text{I.16})$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine.

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par : [9]

$$C_{\text{aéro}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{\text{turbine}}} \quad (\text{I.17})$$

I.5 Application des éoliennes

I.5.1 Eolienne autonome

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans des gammes de puissance de quelque dizaine de Watts à quelque dizaine de kW pour l'alimentation d'appareils électriques d'instrumentation ou d'éclairage. Les plus petites éoliennes sont utilisées pour les bateaux, le camping ou les stations météo. Des machines de plus fortes puissances sont utilisées, quand à elles, pour la production destinée à alimenter en énergie électrique des chalets isolés ou encore des villages [2] [3].

Les points communs entre toutes ces productions éoliennes sont leurs faibles puissances et leur association à une unité de stockage d'énergie, généralement constitué de batterie d'accumulateur.

L'éolienne charge les batteries par la tension continue produite soit directement par une génératrice à courant continu pour les plus faibles puissances, soit par une génératrice de type synchrone, à aimant ou bobiné, via un pont redresseur et une électronique plus ou moins élaborée pour réguler leur charge.

La tension continue des batterie est ensuite utilisé soit directement pour de l'éclairage en tension continue ou alors mis en forme par un onduleur pour obtenir une alimentation sinusoïdale 50Hz permettant l'utilisation de tous les appareils électrique classique

I.5.2 Eolienne non autonome

Les éoliennes connectées au réseau de distribution sont souvent en fonctionnement pour tester le potentiel éolien du site considéré, ou

appartiennent à des industriels ou des privés qui produisent leur propre électricité et revendent l'excédent au distributeur local.

Ce type de production décentralisée se rencontre de plus en plus avec le développement des primes et autres aides à la production d'énergie électrique propre. Le prix de rachat de kW/h étant important, cela facilite et encourage le développement de l'éolien.

Les puissances de ces éoliennes peuvent varier, selon qu'il s'agit d'un exploitant privé ou d'industriel, de 50kW à 4.5MW pour les plus récentes éoliennes du marché. Les amortissements qui s'étalent sur 20 à 30 années sont considérablement réduits par toutes les aides. Une telle installation peut être rentable en 10 à 15 ans [9].

Ces éoliennes fonctionnent en permanence et ont, le plus souvent, besoin d'être raccordées à un réseau puissant. Il n'y a pas d'unité de stockage pour ce type de production et la puissance produite fluctue beaucoup à la fonction du vent

Conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art sur les éoliens a été présenté. En effet, après avoir donné un bref historique et le développement actuel des éoliennes, Nous avons donné une vue d'ensemble des différents types d'éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Nous avons décrit aussi de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine éolienne. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, le principe de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz) est donné.

Par ailleurs, après avoir présenté, le mode de fonctionnement des différents types d'éoliennes (calage variable ou décrochage aérodynamique), une méthode de modélisation de système de contrôle de l'éolienne et de la turbine est décrite.

Chapitre II

Fonctionnement et alimentation de la génératrice à réluctance variable.

Introduction

Actuellement, la plupart des machines utilisées dans les éoliens sont des Machines Synchrones à Aimant Permanent (MSAP). En effet la MSAP présente un bon rendement. Toute fois son inconvénient majeur réside dans le prix des aimants [9]. Pour cette raison, les chercheurs se sont tournés vers d'autres solutions, notamment l'utilisation des génératrices à réluctance variable communément appelées SRG (Switched Reluctance Generator), dont le principe est basé sur celui de l'électroaimant.

Le concept de ces machines a été établi au début de 1838 par Davidson pour propulser une locomotive ferroviaire [2]. Cependant, la pleine capacité n'a pas pu être utilisée. L'arrivée des semi-conducteurs et l'apparition de la micro-informatique, ont rétabli l'intérêt des MRV. Beaucoup de recherches ont été effectués ces dernières années afin d'introduire cette machine dans le secteur industriel pour les avantages qu'elles présentent par rapport aux machines déjà présentes sur le marché [2]. En effet, cette machine a une simple construction et un cout faible, due à l'absence de toute forme d'excitation au rotor. Elle présente, ainsi l'avantage de tolérer des hautes températures au rotor, et d'avoir une bonne dynamique due à la faible inertie du rotor. De plus, l'indépendance des phases la rend plus tolérante aux défauts. Ces avantages la distinguent des autres machines surtout dans certaines applications.

La MRV a été pour longtemps, utilisée en fonctionnement moteur en tant qu'actionneur dans les applications d'aéronautique et dans l'électroménager. Ce n'est que ces dernières années que les chercheurs s'intéressent à son utilisation en tant que génératrice. Actuellement, avec le développement de l'énergie éolienne, plusieurs travaux ont été réalisés [3], afin d'introduire cette machine dans le secteur industriel de la production d'énergie électrique.

Dans ce chapitre, quelques structures des SRG sont présentées, ainsi que leur principe de fonctionnement. L'excitation de la SRG doit être réalisée en fonction de la caractéristique d'inductance, le principe est décrit, et les modes d'excitation sont présentés suivis des stratégies d'alimentation utilisées en général dans les MRV.

II.1 Description des SRG

Les SRG sont des machines à réluctance variable à doubles dentures qui fonctionnent par effet de réluctance variable produit par la présence de la double saillance au niveau du rotor et du stator. Contrairement aux machines synchrones à réluctance variable qui sont des machines synchrones à champ tournant (alimentation sinusoïdale), les SRG sont à champ pulsé (alimentation

en courant unidirectionnel). De part ce type d'alimentation, le stator de la SRG peut être assimilé à une succession d'électroaimants [12].

Elles présentent généralement un nombre de dents au stator plus important que le nombre de dents au rotor et elles peuvent être à circuit magnétique unique ou multiple. Leur alimentation est unipolaire contrairement à celles des machines synchrones et asynchrones, et les performances de couple sont analogues à celles de ces machines à courant continu type série [10] [3]. On y distingue plusieurs combinaisons du nombre de dents statoriques et rotoriques, auxquelles correspondent plusieurs structures dont l'appellation est relative à ces combinaisons : par exemple la structure 6/4 (6 dents au stator et 4 au rotor), la structure 8/6 et la structure 12/8.

Les SRG présentent des avantages par rapport aux autres machines qui sont [2] :

- Structure simple et robuste pour un faible coût de fabrication.
- Pertes joule essentiellement concentrées au stator donc refroidissement aisé.
- Défaut de phase toléré grâce à l'indépendance de chaque phase.
- Possibilité de fonctionnement à puissance constante sur une large plage de vitesse.
- Possibilité d'utilisation dans un environnement dur (température élevée) grâce à l'absence des conducteurs et aimant permanent au rotor.
- Le convertisseur de la machine ne nécessite pas beaucoup de composants, vu que l'alimentation en courant est unipolaire

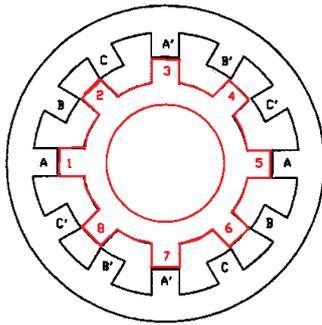
Cependant, les SRG présentent quelques inconvénients tels que [11] :

- Un couple instantané fortement pulsatoire, surtout à grande vitesse.
- Présente un bruit acoustique important.
- Mauvais facteur de puissance

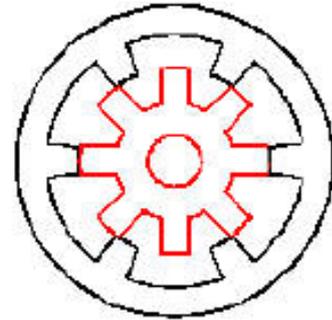
II.2 Structure à circuit magnétique simple

Ce sont des génératrices ayant un seul stator et rotor, elles sont donc dotées d'un seul circuit polyphasé constituant l'induit. La conversion de l'énergie électromagnétique est due seulement à la variation de la réluctance de l'entrefer.

La SRG à plot qui est utilisée dans notre travail fait partie de cette catégorie. Dans cette machine, une phase ne peut normalement produire un couple positif ou négatif que pendant la moitié de la période électrique. Avec seulement deux phases en opposition (moteur biphasé), il subsisterait des positions où le couple serait nul. Un minimum de trois phases est donc nécessaire pour avoir un couple non nul dans toutes les positions [13].



Structure d'une SRG 12/8



Structure d'une SRG 6/8

Fig. II.1 : Structure des SRG à plots.

II.3 Principe de fonctionnement

La variation d'énergie magnétique entre la position de conjonction (reluctance minimale) et la position d'opposition (reluctance maximale) figure (II.4) constitue le principe de base pour le fonctionnement de la SRG, cette variation est due à la variation de réluctance qui consiste à modifier l'inductance propre d'une bobine. [2].

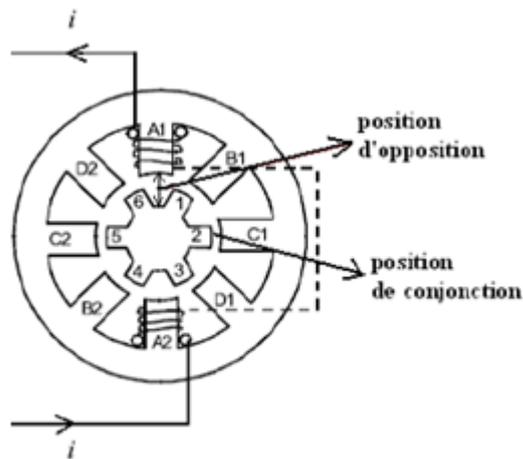


Fig. II.2 : illustration des positions d'opposition et de conjonction.

Pour mieux illustrer le principe de fonctionnement d'une telle machine, on se base sur le modèle trapézoïdale de l'inductance (figure II.5).

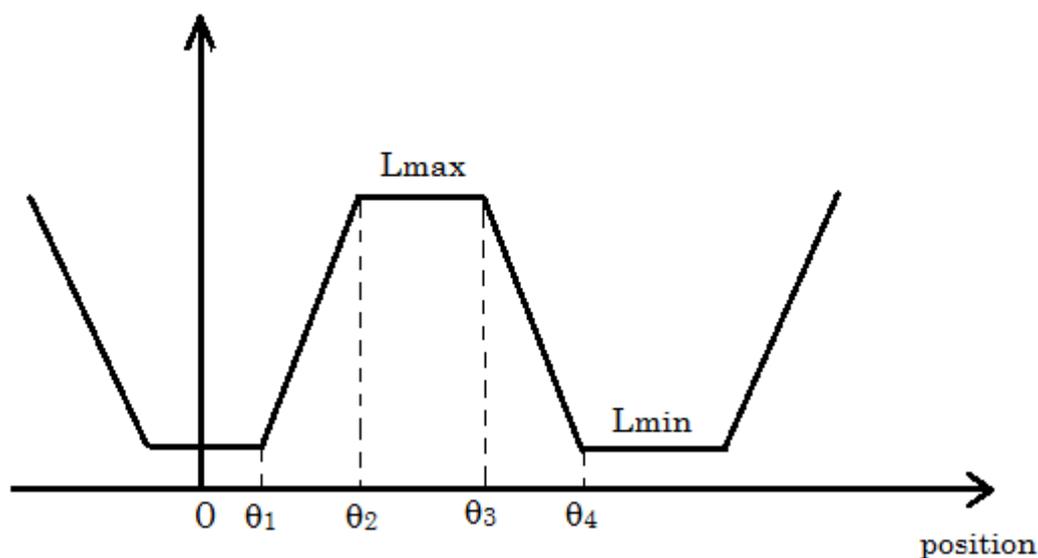


Fig. II.3 : Modèle linéaire de l'inductance.

Lorsque les dents statoriques et rotoriques sont parfaitement alignées, le flux est maximal et l'inductance est minimale. La distribution du champ magnétique varie lorsque la position relative entre les dents rotoriques et statoriques varie, ainsi l'inductance L varie avec cette variation. Quand le rotor tourne l'inductance des enroulements changera de L_{max} en L_{min} périodiquement. L'inductance atteint le maximum quand les axes des dents rotoriques et statoriques sont en opposition et atteint le minimum quand ses dents sont en position de conjonction figure (II.2).

Quand les deux interrupteurs $S1$ et $S2$ sont fermés figure (II.3) les enroulements sur le stator sont excités par une source externe et les énergies électrique et mécanique proviennent de ces sources et sont converties en énergie magnétique. Quand $S1$ et $S2$ sont ouverts et les deux diodes $D1$ et $D2$ sont en conduction, l'énergie magnétique emmagasinée et l'énergie mécanique issue de l'éolienne sont, alors, converties en énergie électrique [15].

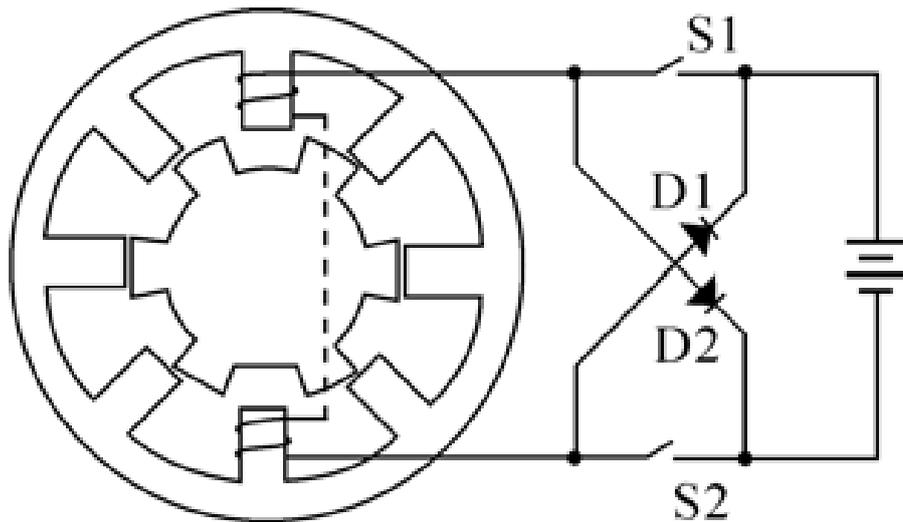


Fig. II.4 : Principe de fonctionnement de la SRG.

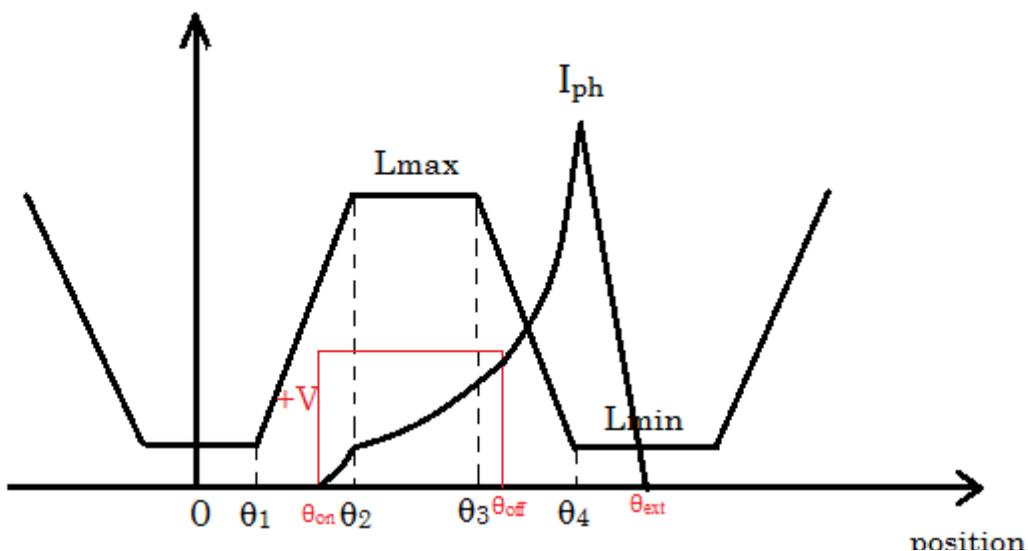


Fig. II.5 : phases d'excitation et de désexcitation de la SRG.

Il y a plusieurs paramètres qui influent considérablement sur la génération de l'énergie tels que l'angle d'excitation θ_{on} , l'angle de désexcitation θ_{off} (figure II.5), la tension d'excitation et la vitesse d'entraînement [15].

En fonctionnement génératrice le bobinage statorique est excité à θ_{on} qui doit être compris entre θ_1 et θ_2 (pente positif de l'inductance). En effet c'est dans cette partie que l'énergie est emmagasinée sous forme magnétique dans l'entrefer. La génération d'énergie électrique survient quand l'inductance décroît (entre θ_3 et θ_4) un angle de désexcitation θ_{off} est alors choisi dans cette zone, permettant ainsi la récupération d'énergie électrique.

II.3.1 Énergie et coénergie

La caractéristique du flux en fonction du courant est présentée sur la figure (II.6), considérée pour un circuit magnétique comportant une phase à n spires parcourue par un courant constant i .

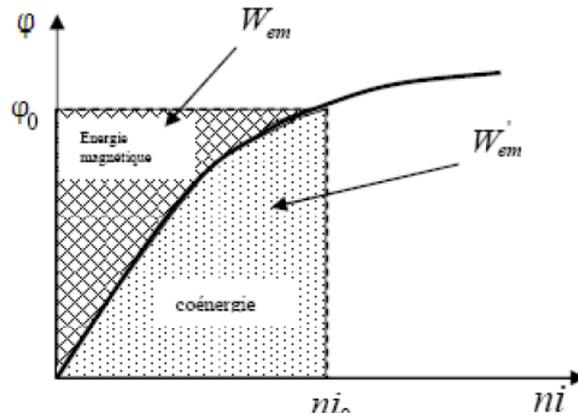


Fig. II.6 : Energie et coénergie magnétique.

L'énergie et la coénergie magnétique sont définies par :

$$W_{em} = \int_0^{\varphi_0} ni. d\varphi \quad (II.1)$$

$$W'_{em} = \int_0^{ni_0} \varphi. dni \quad (II.2)$$

Où W_{em} représente l'énergie magnétique et W'_{em} la coénergie magnétique.

L'expression du couple électromagnétique ainsi produit est donnée par la formule suivante :

$$\Gamma_{em} = \frac{\partial W'_{em}}{\partial \theta} \text{ à courant } i \text{ constant} \quad (II.3)$$

Le flux produit par la phase est donné par :

$$\varphi(\theta, i) = L(\theta, i).i \quad (II.4)$$

En régime non saturé le flux ne dépend que de la position θ , ainsi l'expression du couple électromagnétique devient :

$$\Gamma_{em} = \frac{1}{2} n \frac{dL(\theta)}{d\theta}.i^2 \quad (II.5)$$

Il est clair que le couple électromagnétique ne dépend pas du signe du courant mais de la variation de l'inductance. Aussi, il est à noter que les SRG fonctionnent naturellement en régime saturé, par conséquent le couple se calcul par l'expression (II.3).

II.3.1.2 Modèle électrique

L'analyse du fonctionnement de la SRG nécessite l'établissement d'un modèle électrique de la machine. En supposant que la mutuelle entre les phases est négligeable ce qui est généralement le cas dans cette machine, la tension aux bornes de chaque phase est donnée par

$$U = R.i + \frac{d\varphi}{dt}. \quad (\text{II.6})$$

Où φ représente le flux produit par une phase, R la résistance de la bobine et U la tension de phase.

En développant l'équation (II.6), on trouve :

$$U = R.i + \frac{d\varphi}{di} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{d\varphi}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.7})$$

En régime permanent : $\frac{d\theta}{dt} = \omega = \text{cste.}$

En remplaçant (II.7) dans (II.8) nous obtenons :

$$U = R.i + L(\theta,i) \cdot \frac{di}{dt} + i \left(\frac{dL}{di} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{dL}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (\text{II.8})$$

L'équation (II.8) peut être exprimée comme suit :

$$U = R.i + \left(L(\theta,i) + \frac{dL(\theta,i)}{di} \cdot i \right) \cdot \frac{di}{dt} + e \quad (\text{II.9})$$

Avec : $e = \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot i = \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \cdot i \cdot \omega$ représente la f.é.m. produit par la machine

II.4 Excitation et stratégie d'alimentation

Les performances de la SRG dépendent directement de son alimentation. Des études ont montré que l'alimentation par des courants rectangulaires unidirectionnels permet un gain en couple et l'utilisation de convertisseurs simple et robuste [11].

L'excitation de la SRG ne peut se faire directement à partir de la source, elle doit donc se faire à travers un convertisseur formé d'interrupteurs IGBT ou MOSFET, pour l'excitation et des diodes pour la récupération de l'énergie électrique.

II.4.1 Modes d'excitation

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

- Dans la SRG 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.

- Dans la SRG auto excitée (notre cas)

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 SRG elle-même.

II.4.2 Topologie des convertisseurs

Depuis l'avènement de l'électronique de commande et grâce au développement de la technologie des semi-conducteurs, une grande variété de convertisseurs a pu voir le jour pour répondre aux exigences d'alimentation des machines. Les convertisseurs ont apportés alors des meilleures performances aux systèmes, un coût réduit des composants, et surtout un rendement élevé.

Classés, en fonction des applications, Plusieurs structures existent [10]. Elles se distinguent par leur nombre de semi-conducteurs et la manière dont elles sont connectées aux bobines du stator. Pour chacune d'elle, il y a des avantages et des inconvénients.

Deux structures principales les plus utilisées sont présentées :

II.4.2.1 Structure à demi-pont asymétrique

La structure à demi-pont asymétrique est la plus couramment utilisée. En effet ce type de convertisseurs assure une très grande fiabilité vu que chaque phase est alimentée indépendamment des autres [10]. Ce convertisseur assure à sa sortie trois niveaux de tension V , $-V$ ou 0 . Chaque bras contient deux IGBTs montés en amont et en aval avec la phase. Le schéma de cette structure est illustré sur la figure suivante :

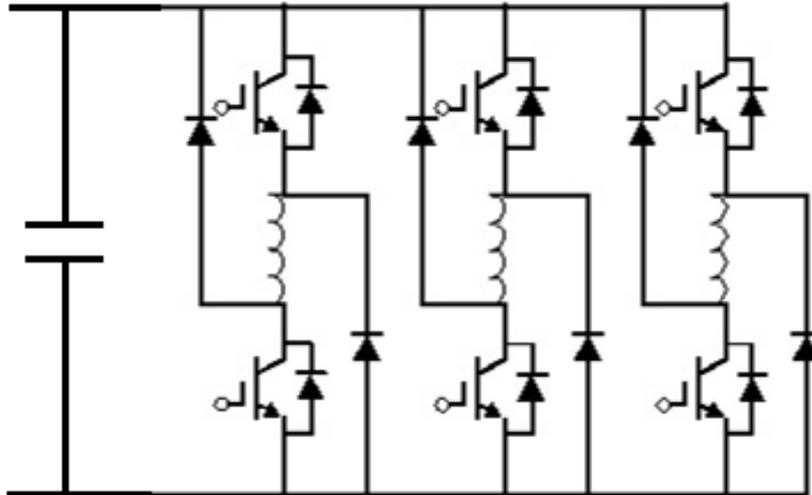


Fig. II.7 : convertisseur à demi-pont asymétrique à trois bras.

II.4.2.2 Structure $m+1$ transistors

Pour cette structure chaque phase nécessite, un semi conducteur propre à elle et un autre partagé avec les autres phases, figure (II.8). Cette structure permet de réduire le nombre de composants, ce qui rend ce convertisseur moins dissipatif et facile à commander, mais moins fiable [10].

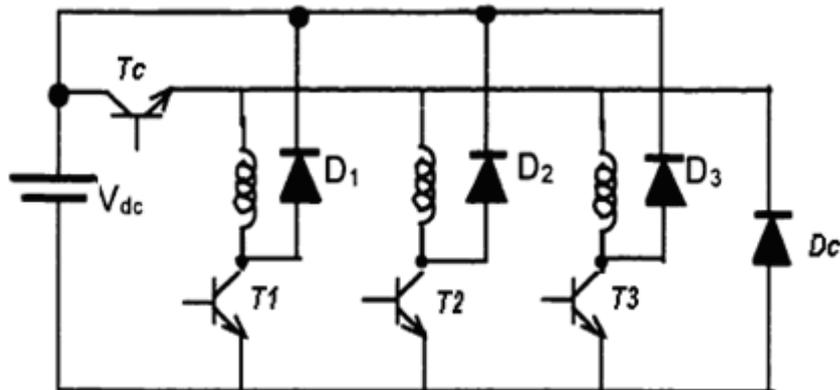


Fig. II.8 : Schéma d'un convertisseur à un seul interrupteur par phase.

II.4.3 Stratégies d'alimentation

II.4.3.1 Alimentation en pleine onde

Dans ce mode d'alimentation, chaque phase est alimentée par un créneau de tension à des instants particuliers liés à la forme de l'inductance et au mode de fonctionnement. Cette stratégie d'alimentation est surtout utilisée pour les grandes vitesses, où le courant et le couple dépendent de la vitesse et des angles de commande [11].

Cette alimentation est illustrée par la figure (II.9)

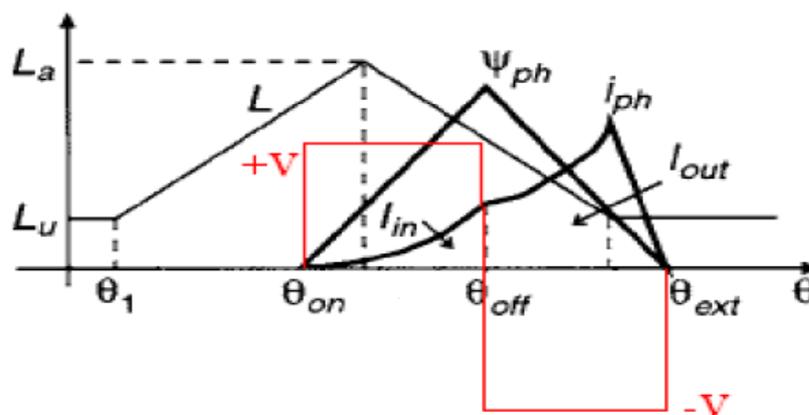


Fig II.9 : alimentation en pleine onde.

II.4.3.2 Alimentation par hystérésis

Utilisée pour les faibles vitesses, son principe consiste à commander les transistors T_1 et T_2 suivant des séquences permettant d'avoir trois niveaux de tension pour chaque phase, $+V$, $-V$ et 0 . La fréquence de commutation des tensions est libre et essentiellement variable [2].

Le but de cette stratégie d'alimentation est de réguler le courant de chaque phase de la SRG autour d'une valeur choisie, variant dans une bande ΔI que l'on se fixe préalablement.

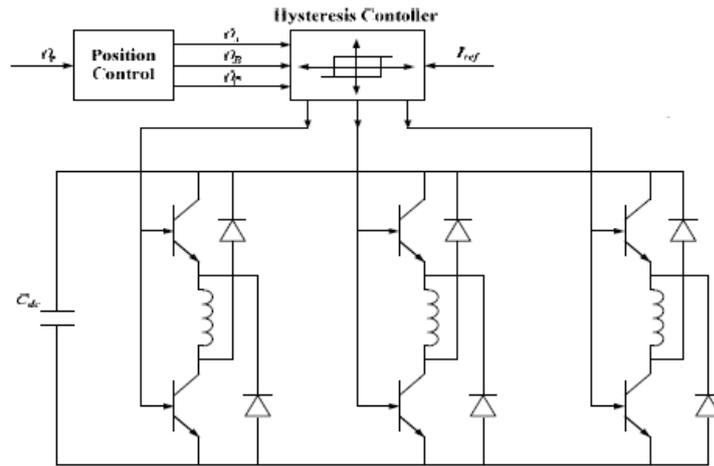


Fig. II.10 : schéma globale de la commande d'alimentation par hystérésis

On distingue deux techniques d'alimentation par hystérésis :

➤ **Technique « soft chopping »**

Aussi appelée hystérésis à deux niveaux, cette technique consiste à exciter et désexciter chaque phase de la SRG selon les séquences de commande des interrupteurs indiquées dans le tableau ci-dessous, (Tab. II.1).

Etat des interrupteurs	V_{phase}	Courant de phase
T1 et T2 fermés D1 et D2 ouverts	$+V_{\text{dc}}$	Croissant
T1 et T2 ouverts D1 et D2 fermés	$-V_{\text{dc}}$	Décroissant
T1 et D1 fermés Ou T2 et D2 fermés	0	Croissant

Tab. II.1 État des interrupteurs pour la stratégie « soft chopping ».

Avec :

V_{dc} : étant la tension du bus continu.

V_{phase} : représente la tension de la phase.

Le principe consiste à exciter la phase en appliquant une tension VDC (T_1 et T_2 fermés). Comme la f.é.m. est inférieur à la tension du bus continu (faible vitesse) alors le courant augmente jusqu'à atteindre la limite supérieure imposée par la bande Δi , à cet instant les diodes D_1 et D_2 entrent en conduction en ouvrant T_1 et T_2 , et une tension $-V_{DC}$ est alors appliquée à la phase conduisant à la décroissance du courant généré, jusqu'à atteindre la limite inférieure imposée par la bande Δi . Et c'est à cet instant que l'on ferme T_1 ou T_2 , la tension de la phase s'annule et par conséquent le courant croît en phase de roue libre jusqu'à atteindre la limite supérieure pour ensuite mettre en conduction les diodes D_1 et D_2 . Ce cycle se répète pendant toute la durée correspondant à la génération de l'énergie électrique. Cette technique est illustrée par la figure (II.11).

Pendant la phase de roue libre, il est possible de travailler avec T_1 et D_1 ou bien avec T_2 et D_2 . On alterne alors entre les deux configurations à fin de limiter les échauffements et les sollicitations des composants.

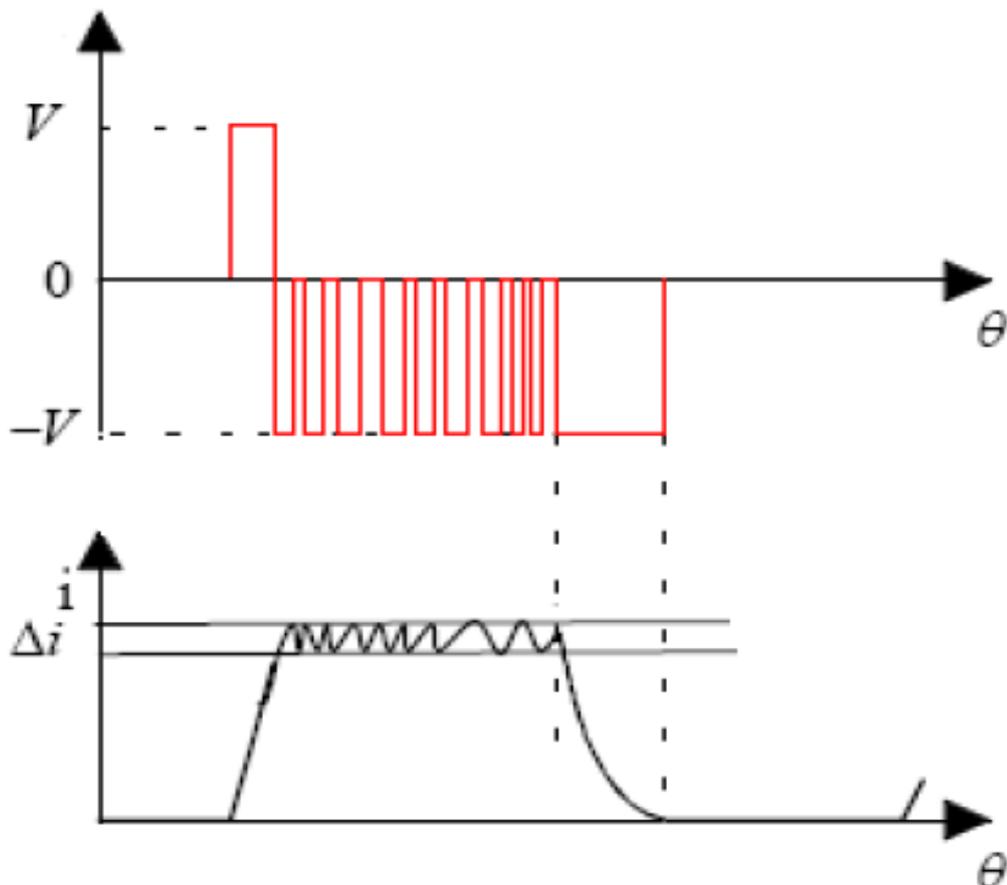


Fig. II.11 : Alimentation par hystérésis (soft shopping).

➤ **Technique « hard chopping »**

Appelée aussi hystérésis a trois niveaux, a la différence de la technique précédente, Cette technique utilise les deux transistors par phase en même temps pour la régulation du courant et la commutation des phases figure (II.12).

Les séquences de conduction sont illustrées par le tableau suivant.

Etat des interrupteurs	V_{phase}	Courant de phase
T1 et T2 fermés D1 et D2 ouverts	$+V_{\text{dc}}$	Croissant
T1 et T2 ouverts D1 et D2 fermés	$-V_{\text{dc}}$	Décroissant

Tab. II.2 État des interrupteurs pour la stratégie hard chopping

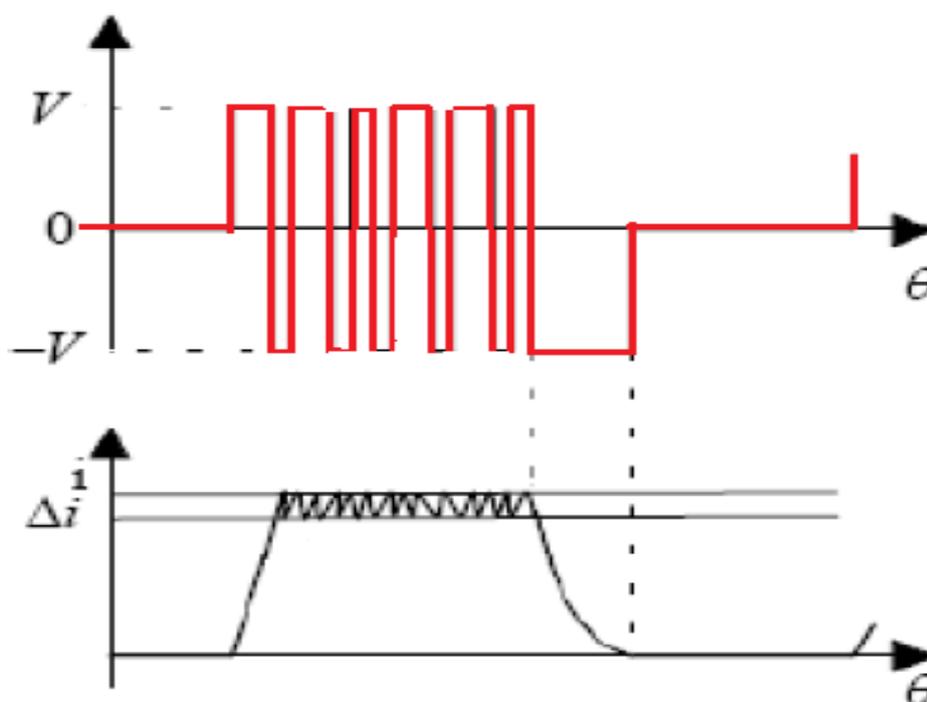


Fig. II.12 : Alimentation par hystérésis hard shopping

II.4.3. 3 Alimentation par la PWM

Une autre technique de régulation de courant à basse vitesse fréquemment utilisée est la PWM (Pulse Width Modulation) pour maintenir le courant de phase autour d'une valeur donnée. Elle consiste à commander les IGBT, de sorte à imposer différents niveaux de tension avec une fréquence de commutation constante et un rapport cyclique variable qui dépend de l'erreur du courant (Fig. II.13).

Le rapport cyclique se détermine en comparant un signal de référence appelé porteuse à un signal correspondant à l'erreur en courant.

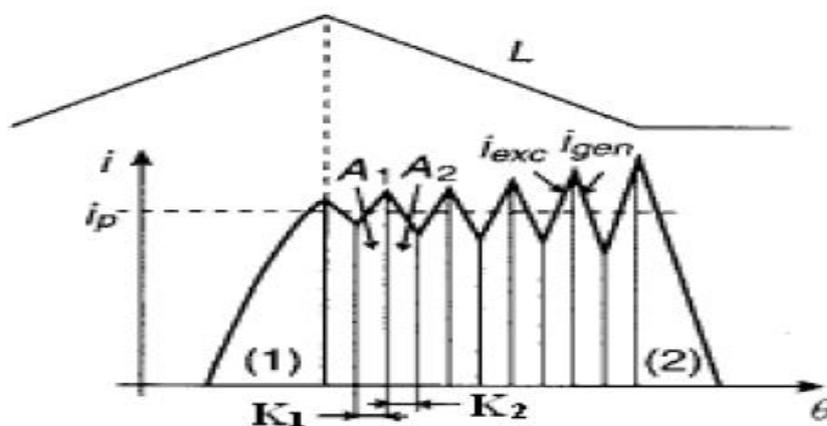


Fig. II.13 : Alimentation par la technique de la PWM.

Avec : $K_1 = d$ et $K_2 = 1 - d$; ou d représente le rapport cyclique.

II.5 Choix et Application de la SRG dans le domaine éolien

II.5.1 Choix et paramètres de la SRG

La structure de la SRG choisit dans notre travail est la structure 12/8 (figure II.1) dont les paramètres géométriques et mécaniques et les caractéristiques électromagnétiques ont été tirées d'un article donné en référence [14].

Les paramètres électriques de la machine sont donnés dans le tableau suivant (Tab. II.3) :

Paramètres	Valeur
Puissance (kW)	4
Tension d'alimentation (V)	42
Resistance du bobinage (Ω)	0.024
Nombre de phases	3

Tableau 1.3 : Paramètres électrique de la machine

II.5.2 Choix du convertisseur

Les critères de sélection fondamentaux pour déterminer le convertisseur le plus approprié incluent ce qui suit [2]:

- Courant unidirectionnel et tension bidirectionnel.
- Coût minimum de convertisseur.
- Efficacité maximum en mode de génération et en fonctionnement moteur.
- Les différentes phases de fonctionnement en générateur doivent être indépendantes.

En se basant sur les critères précédents et en tenant compte de la structure de la machine choisit on opte pour le choix du convertisseur de structure à demi-pont asymétrique à trois bras présenté sur la figure II.9. Ce convertisseur est également connu comme convertisseur classique

Utilisée dans la plus part des applications, c'est la structure la plus fiable et la plus simple à commander. Deux modes de régulation de courant sont associés à ce convertisseur afin d'assurer l'alimentation à faibles vitesses.

Conclusion

La SRG est une machine simple à construire. Elle présente des performances semblables à celles des machines asynchrones et des machines synchrone à aimants permanent, sauf qu'elle est plus tolérante aux défauts et aux conditions de hautes températures. Elle présente, aussi, une meilleure dynamique. Son alimentation simple et unidirectionnelle permet d'utiliser des convertisseurs dont le nombre de composants est réduit. Tous ces avantages rendent la SRG concurrente des autres machines usuellement utilisés dans certaines applications notamment dans le secteur de la production d'énergie.

Chapitre III

Modélisation du fonctionnement de la SRG sous SIMPLORER®.

Introduction

En général, les convertisseurs électromécaniques associés à des convertisseurs d'alimentation sont modélisés par le logiciel MATLAB Simulink, qui assure une modélisation par bloc où chaque bloc représente un modèle programmé. Le logiciel SIMPLORER, que nous nous proposons d'utiliser dans notre cas, permet d'assurer cette modélisation d'une autre manière, en proposant un système interactif qui facilite la modélisation, et l'analyse des résultats de simulation. [16].

Dans ce chapitre, nous allons analyser le fonctionnement de la SRG en régime permanent. Pour cela, la machine est modélisée sous SIMPLORER pour le régime non saturé, et un modèle « linéaire de l'inductance » est adopté. Un modèle de convertisseur est, alors, choisi pour l'alimentation en pleine onde et l'alimentation régulée en courant. Pour assurer l'alimentation régulée en courant, deux techniques de régulation de courant sont prévues et modélisées : l'hystérésis et la MLI. Pour la technique hystérésis, les deux modes de hachage sont testés : le soft chopping, et le hard chopping.

La simulation est ensuite effectuée en régime permanent pour les faibles et grandes vitesses de fonctionnement. Cette simulation nous permet de déterminer le fonctionnement de la génératrice à travers ses caractéristiques, et de confirmer les modèles proposés, et d'analyser le comportement de la génératrice en régime permanent pour les fonctionnements à faible et grandes vitesses.

III.1 Présentation du logiciel SIMPLORER®

SIMPLORER est un logiciel de simulation, conçu pour permettre aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et optimiser des systèmes complexes comprenant l'électromécanique, l'électromagnétique, et d'autres applications en mécatronique. SIMPLORER utilise des interfaces permettant l'importation et l'exportation des modèles de la simulation vers plusieurs logiciels tels que MATLAB et Maxwell. La rapidité et la stabilité de ses algorithmes de simulation réduisent le temps de simulation et fournissent des résultats fiables. De plus, l'interface graphique simple à utiliser de SIMPLORER rend les systèmes les plus complexes faciles à simuler.

En effet, Un modèle de simulation sous SIMPLORER peut contenir des circuits électriques, des blocs fonctionnels et des graphes d'état que l'on peut trouver dans la bibliothèque de base de données. Les ingénieurs peuvent, ainsi, construire des prototypes virtuels avec tous les aspects d'un système comprenant

l'électronique de réglage, les capteurs, les moteurs, les générateurs, les convertisseurs de puissance et les circuits de commande. Ce qui permet d'étudier le fonctionnement des systèmes réels et de vérifier leurs conceptions globales.

Présentation des principaux blocs « SIMPLORER »

La modélisation est réalisée sur la page « SIMPLORER Schematic » (figure III.1). Les éléments choisis pour la modélisation sont ramenés sur cette page à partir de la bibliothèque, et programmés.

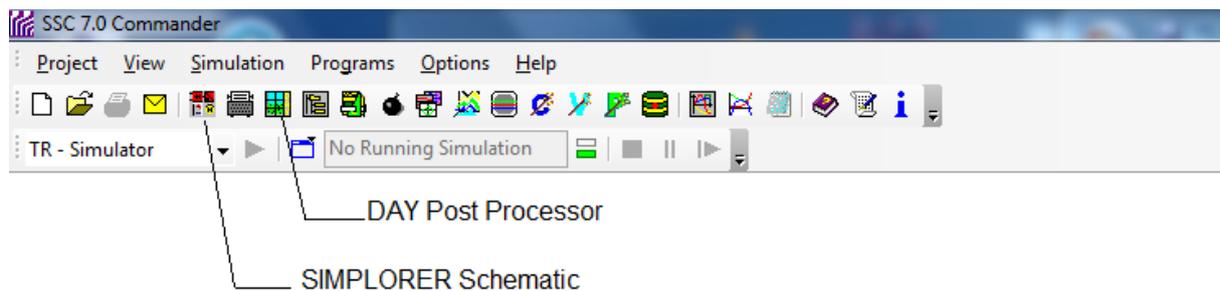
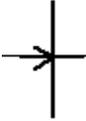


Fig. III.1 Interface principale de SIMPLORER.

Simplorer Comprend certains blocs particuliers tel que :

- **Initial values :**  Ce bloc définit les valeurs initiales des variables, et calculées une fois, au début de la simulation. Elles peuvent être employées dans chaque composant sur la feuille.
- **constant value :**  Ce bloc représente une constante que l'on peut introduire à chaque étape de simulation.
- **Multiplier, negator, summation, comparator :**  ce sont des blocs qui effectuent des opérations prédéfinies en fonction des entrées en cours de la simulation, tel que la somme, négation, comparaison ...etc. et ils envoient le résultat à la sortie, qui peut être réinjecté dans un autre bloc de calcul ou d'affichage.

- **Equation bloc :**  Le bloc **EQUBL** permet de relier les signaux d'entrée et de sortie qu'on choisit à partir des formules mathématiques disponibles.
- **Stat graph :**  Ce bloc définit l'état du système à chaque instant durant la simulation.
- **Transition :**  bloc permettant de tester les conditions de transfert entre les états du système

Pour effectuer les analyses des résultats, SIMPLORER® comprend un module puissant dédié à cette tâche : le DAY Post Processor (figure III.2). Il nous permet de traiter les résultats de simulation et de réaliser des analyses détaillées de données. Il est, par exemple, capable de :

- Calculer les valeurs moyennes, efficaces, maximum, minimum, intégrer ou dériver (numériquement) un paramètre choisi.
- Calculer et représenter la FFT d'un signal donné, et calculer le taux de distorsion des harmoniques.
- Effectuer des opérations mathématiques (somme, multiplication ...) sur les résultats.
- Transformer des résultats sous forme graphique en résultat numérique (sous forme de tableau) et vice versa.

D'autres options très utiles pour la simulation et l'analyse dans les autres domaines sont disponibles.

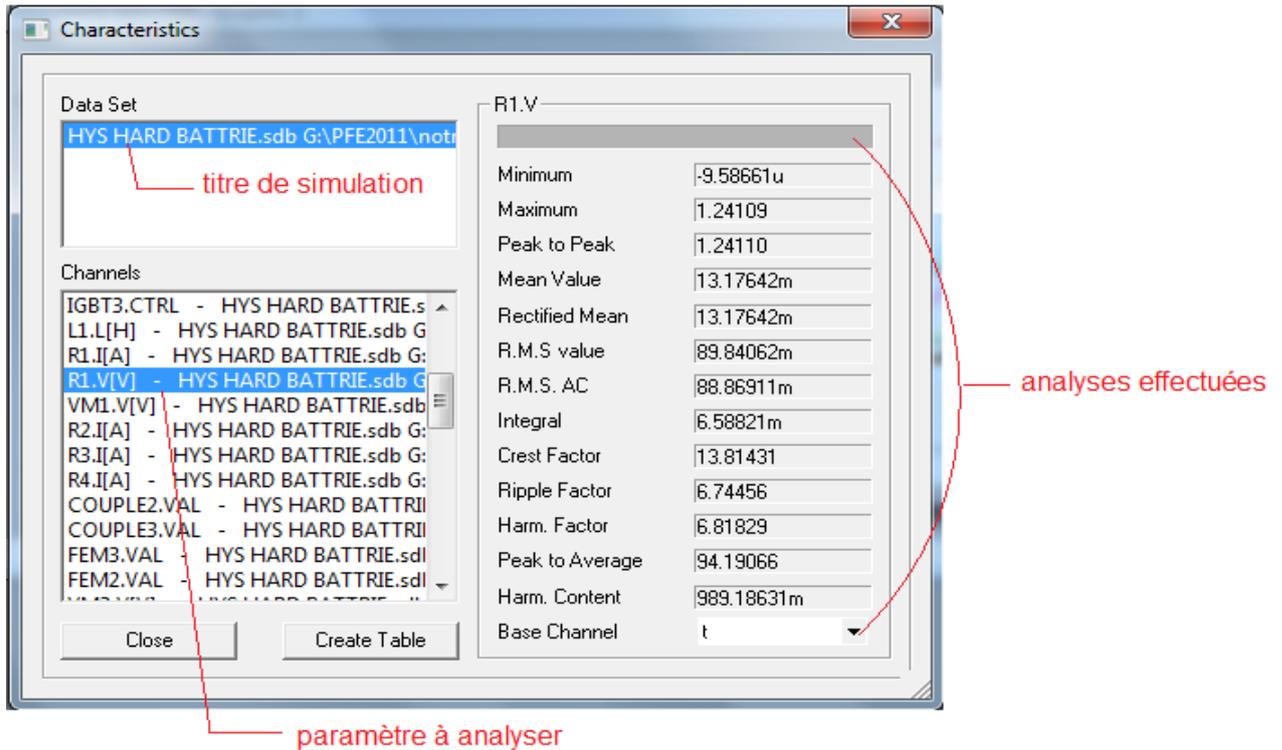


Fig. III.2 : Exemple d'analyse en utilisant DAY Post Processor.

III.2 Modélisation de la SRG sous SIMPLORER

Le modèle de la SRG sous SIMPLORER est établi à partir des équations de la machine données au chapitre précédent. Dans ce cas, on se limitera à un modèle dit "linéaire de l'inductance", en imposant les hypothèses suivantes :

- ✓ La machine fonctionne en régime non saturé.
- ✓ Les paramètres de chaque phase sont symétriques.
- ✓ L'inductance mutuelle et l'inductance de fuite sont négligées.
- ✓ La résistance est indépendante de la température.

III.2.1 Modèle « linéaire » de la SRG

Le modèle « linéaire » de la SRG peut être représenté par l'équation suivante :

$$U = R \cdot i + L(\theta) \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL(\theta)}{d\theta} \cdot \omega \tag{III.1}$$

Où $e = i \cdot \frac{dL(\theta)}{d\theta} \cdot \omega \tag{III.2}$

Représente la f.é.m. produite par la machine.

Le modèle électrique de la SRG, pour une phase, peut être représenté par le schéma suivant :

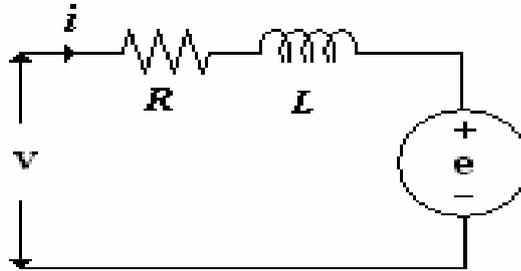


Fig. III.3 Schéma électrique d'une phase de la SRM.

Et le couple électromagnétique pour chaque phase est donné par l'expression suivante :

$$\Gamma_{em} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL(\theta)}{d\theta} \cdot i^2 \quad (\text{III.3})$$

III.2.2 Modèle « linéaire de l'inductance »

Le modèle « linéaire de l'inductance » est établi en négligeant la saturation, et en approximant la variation d'inductance en fonction de téta à une variation trapézoïdale. Ceci est illustré sur la figure ci-dessous [17].

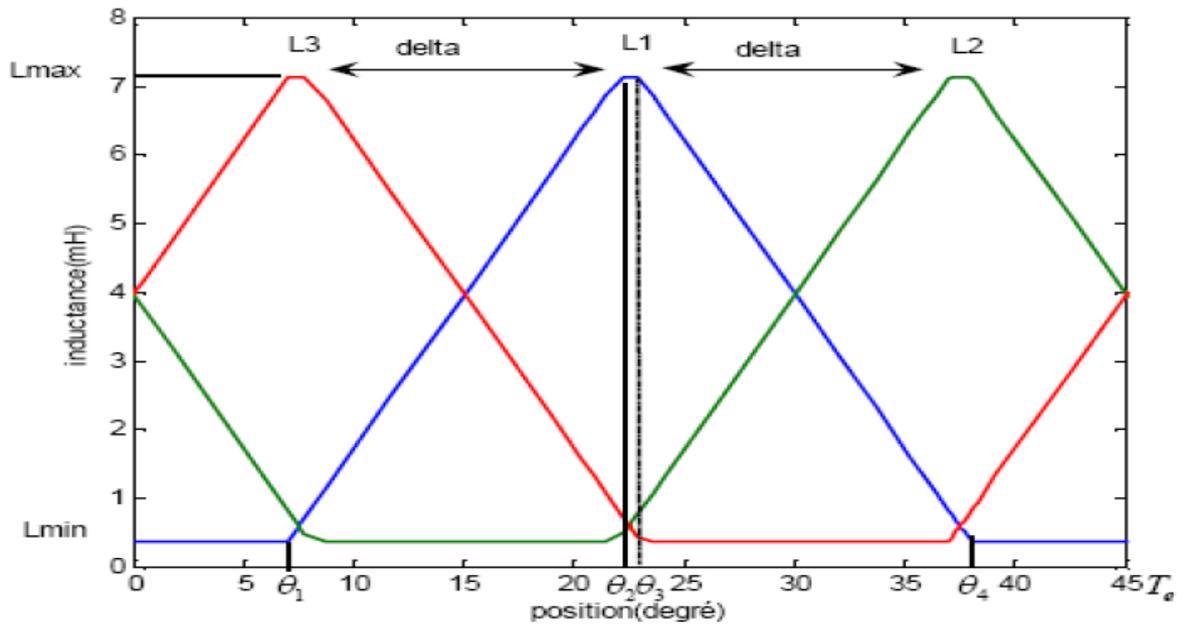


Fig.III.4 : Approximation linéaire de l'inductance des trois phases de la SRG en fonction de la position.

Ces caractéristiques sont obtenues de la référence [17] (annexe chapitre II) Ainsi les valeurs maximale et minimale de l'inductance pour chaque phase sont données par :

$$\begin{cases} L_{\min} = 0.3765 \text{ mH} \\ L_{\max} = 7.12 \text{ mH} \end{cases}$$

A partir des paramètres géométriques de la machine on calcule les angles remarquables suivants :

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{2\pi}{N_r} - (\beta_s - \beta_r) \right] \tag{III.4}$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \beta_s \tag{III.5}$$

$$\theta_3 = \theta_2 + (\beta_r - \beta_s) \tag{III.6}$$

$$\theta_4 = \theta_3 + \beta_s \tag{III.7}$$

$$T_e = \theta_1 + \theta_4 = \frac{2\pi}{N_r} \tag{III.8}$$

Avec T_e représente la période électrique de l'inductance.

Les équations décrivant la variation de l'inductance sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{ll} L(\theta) = L_{min} & \text{Si } 0 < \theta < \theta_1 \quad \text{(III.9)} \\ L(\theta) = p \cdot (\theta - \theta_1) + L_{min} & \text{Si } \theta_1 < \theta < \theta_2 \quad \text{(III.10)} \\ L(\theta) = L_{max} & \text{Si } \theta_2 < \theta < \theta_3 \quad \text{(III.11)} \\ L(\theta) = -p \cdot (\theta - \theta_4) + L_{min} & \text{Si } \theta_3 < \theta < \theta_4 \quad \text{(III.12)} \\ L(\theta) = L_{min} & \text{Si } \theta_4 < \theta < T_e \quad \text{(III.13)} \end{array} \right.$$

Avec $p = |(L_{max} - L_{min}) / (\theta_2 - \theta_1)|$

Les inductances sont toutes décalées les unes des autres par un angle de décalage donné par :

$$\delta = 2\pi \cdot \left[\frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \right] \quad \text{(III.14)}$$

III.2.3 Modélisation sous SIMPLORER

Dans ce cas, la structure du convertisseur à demi-pont asymétrique a été choisie pour sa simplicité, et surtout sa fiabilité (indépendance des phases). Chaque bras du convertisseur est conçu de deux IGBT et de deux diodes de récupération. Ces composants sont choisis de la base de données du logiciel, en fonction des exigences de la SRG.

Par ailleurs, l'excitation de la SRG est effectuée en mode auto-excité, où l'excitation initiale est réalisée par une source de tension externe. La source externe est déconnectée après l'excitation du premier bras, et la magnétisation est alors assurée par le condensateur Cdc. La diode D7 est ajoutée au circuit afin d'isoler le condensateur Cdc de la source. De plus, une résistance en série avec une inductance sont choisis comme charge de la SRG.

Le schéma électrique global de l'ensemble SRG Convertisseur charge est représenté sur la page « SIMPLORER schematic » et il est donné sur la figure suivante :

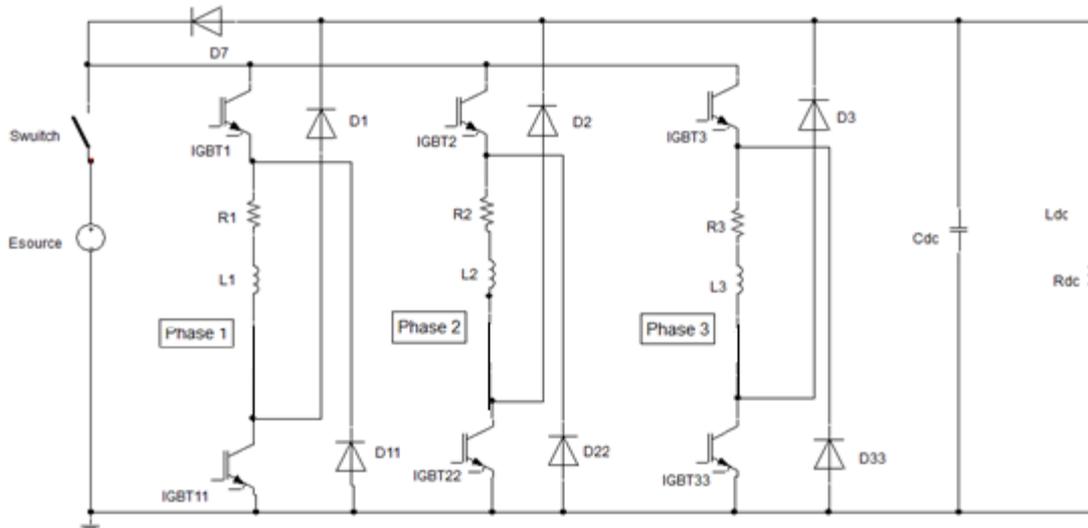


Fig. III.5 Modèle Simplorer de l'ensemble convertisseur SRG Charge.

La résistance R_i et l'inductance $L_i(i=1,2,3)$ représentent respectivement la résistance et l'inductance d'une phase de la machine. L'inductance variant en fonction de la position téta, est introduite à partir d'une table à travers la boîte de dialogue de SIMPLORER. Les f.é.m. n'apparaissent pas sur le modèle SIMPLORER mais elles sont prises en compte dans la simulation.

Le courant total du bus continu (i_{tot}) est lié aux courants de phases (i_j) par la relation suivante :

$$i_{tot}(\theta) = S_1 \cdot i_1(\theta) + S_2 \cdot i_2(\theta) + S_3 \cdot i_3(\theta) \tag{III.15}$$

Avec $S_j(j= 1,2,3)$ représente une fonction de commutation définie comme suit:

$$\left. \begin{array}{l} 1 \quad \text{si les diodes } D_j \text{ et } D_{jj} \text{ sont passants} \\ 0 \quad \text{si } IGBT_j \text{ et } D_j \text{ ou } IGBT_{jj} \text{ et } D_{jj} \text{ sont passants} \\ -1 \quad \text{si les IGBT sont passants} \end{array} \right\} \tag{III.16}$$

La tension du bus continu V_{dc} et le courant de charge i_{dc} sont liés par l'expression suivante :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{i_{tot} - i_{dc}}{C_{dc}} \tag{III.17}$$

III.3 Simulation de fonctionnement de la SRG sous SIMPLORER

Afin de tester le fonctionnement de la SRG et le montage présenté précédemment (Figure.III.5), la simulation est effectuée pour une grande vitesse dans un premier temps. la SRG est alors alimentée par la technique pleine onde. En second lieu, le fonctionnement à faibles vitesses est simulé : l'alimentation régulée en courant est testée pour deux techniques de régulation : la technique par hystérésis, et la technique MLI.

III.3.1. Résultats de simulation pour les grandes vitesses

A grandes vitesses la puissance générée par la machine avoisine sa puissance nominale et le courant atteint des valeurs importantes c'est pourquoi on utilise la technique pleine onde.

Pour une vitesse $\omega=250$ tr/mn supérieur à la vitesse de base ($\omega_b=155$ tr/mn), et en fixant un angle d'excitation $\theta_{on}=17$ deg permettant un fonctionnement en générateur (dans la partie croissante de l'inductance) et un angle de désexcitation $\theta_{off}=30$ deg dans la zone décroissante de l'inductance, on obtient les résultats suivants :

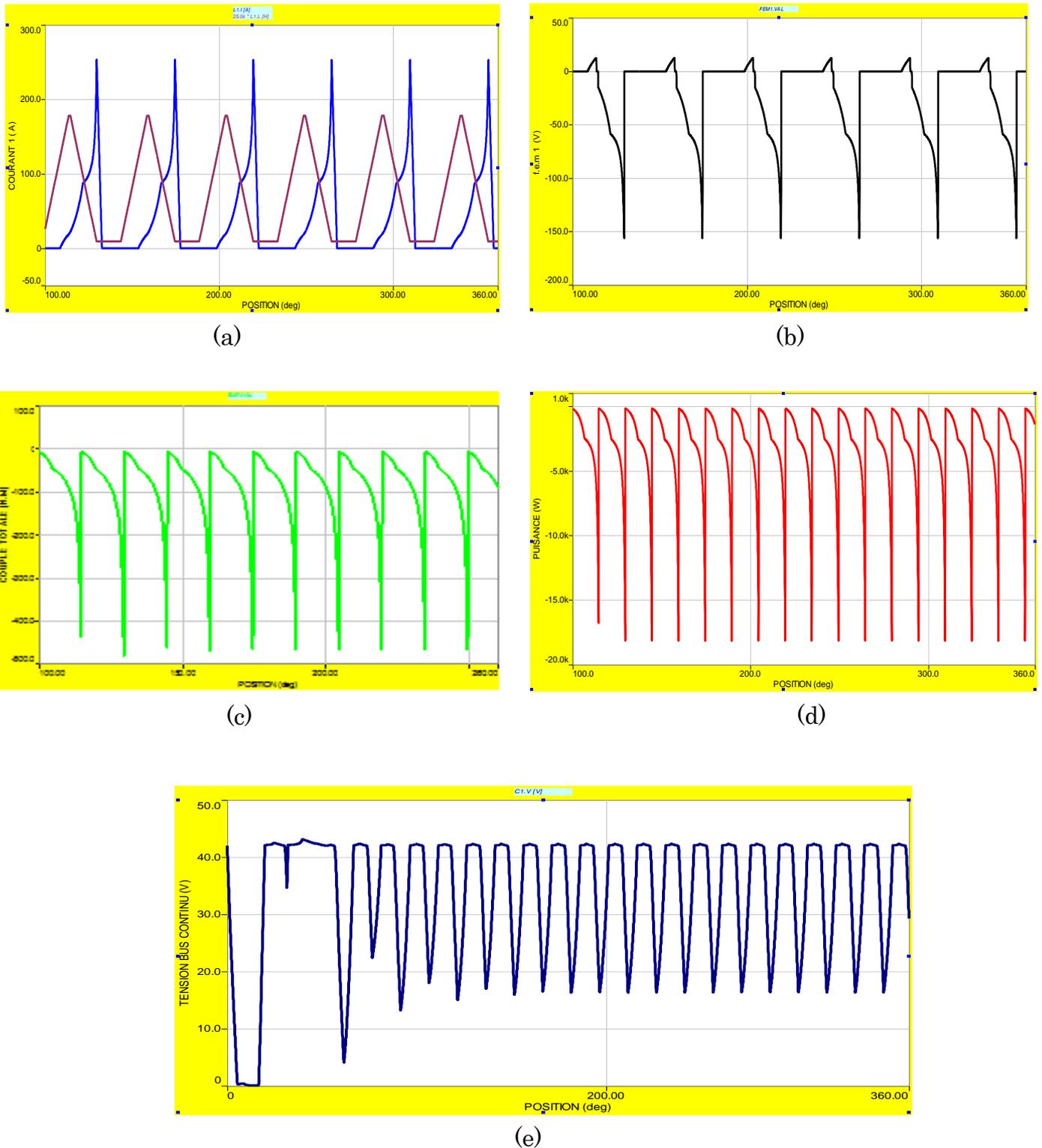


Fig. III.6 Test de fonctionnement à grande vitesse

(a) Courant et inductance de phase, (b) f.é.m. de phase, (c) Couple Electromagnétique totale, (d) Puissance électromagnétique totale, (e) Tension de bus continu.

III.3.2 Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus dans cette simulation, on constate bien que la machine génère de la puissance électromagnétique. Le courant produit atteint des valeurs de l'ordre de 200 A dans ces conditions. L'allure du courant de phase est analogue à celui obtenu pour un fonctionnement moteur, et similaire aux résultats trouvés en bibliographie [15,17]

En se référant à la figure de courant (fig.III.6.a) l'allure de courant peut être subdivisée en 3 parties suivant les séquences de conduction :

(a) Phase d'excitation $\theta_{on} < \theta < \theta_{off}$

Dans cette phase dite de magnétisation le courant augmente avec l'augmentation de θ , et l'allure de courant présente trois parties :

➤ $\theta_{on} < \theta < \theta_1$

$$V_{dc} = 42V, \quad dL/d\theta > 0, \quad \text{f.é.m.} < 0, \quad \Gamma > 0$$

La durée de cette phase varie avec la vitesse d'entraînement, pour une vitesse très grande le courant croît plus lentement sous la tension d'alimentation. L'énergie électrique fournie est emmagasinée sous forme d'énergie magnétique dans l'entrefer.

➤ $\theta_1 < \theta < \theta_2$

$$V_{dc} = 42V, \quad dL/d\theta = 0, \quad \text{f.é.m.} = 0, \quad \Gamma = 0$$

Le courant de phase augmente rapidement, et l'énergie fournie par la source est totalement convertie en énergie magnétique.

➤ $\theta_2 < \theta < \theta_{off}$

$$V_{dc} = 42V, \quad dL/d\theta < 0, \quad \text{f.é.m.} > 0, \quad \Gamma < 0$$

Dans cette région l'inductance décroît et la f.é.m. croît positivement et s'ajoute à la tension d'alimentation. Ce qui a pour effet d'augmenter le courant de phase. Cette phase permet générer assez de courant.

(b) Phase de génération $\theta_{off} < \theta < \theta_{génération}$

$$V_{dc} = -42V, \quad dL/d\theta < 0, \quad \text{f.é.m.} < 0, \quad \Gamma < 0$$

Dans cette phase l'énergie stockée auparavant dans l'entrefer de la machine sera convertie en énergie électrique. Le courant généré est fournie à la

charge. La forme du courant dépend de la f.é.m. et de la tension appliquée et varie suivant la vitesse choisie.

(c) Phase de fin génération $\theta_{\text{génération}} < \theta < \theta_{\text{extinction}}$

$$V_{dc} = -42V, \quad dL/d\theta = 0, \quad \text{f.é.m.} = 0, \quad \Gamma = 0$$

Pendant cette phase le courant décroît subitement puisque la tension est négative et la f.é.m. est nulle, et la conversion de l'énergie s'achève.

III.3.3 Modèle analytique

Pour confirmer les résultats obtenus par simulation sous SIMPLORER, un modèle analytique est proposé et simulé sous MATLAB.

A partir de l'équation électrique de la SRG :

$$U = R \cdot i + L(\theta) \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL(\theta)}{d\theta} \cdot \omega$$

Les variations du courant en régime permanent ($\omega = 250 \text{ tr/mn}$) est obtenue en résolvant l'équation différentielle suivante :

$$\frac{di_i}{dt} = \frac{1}{L_i} \left[V_{dc} - \left(R + \frac{dL_i}{d\theta} \omega \right) \cdot i_i \right] \quad (\text{III.18})$$

Avec $(i=1,2,3)$

Afin de simplifier les calculs, la résistance du bobinage de la phase est négligée, et la solution de l'équation différentielle précédente est donnée par [17] :

$$I = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 \leq \theta < \theta_{on} \\ \frac{U.(\theta - \theta_{on})}{\omega. \left(L_{min} + \frac{dL1}{d\theta} (\theta - \theta_1) \right)} & \text{si } \theta_{on} < \theta < \theta_2 \\ \frac{U.(\theta - \theta_{on})}{\omega. L_{max}} & \text{si } \theta_2 < \theta < \theta_3 \\ \frac{U.(\theta - \theta_{on})}{\omega. \left(L_{max} + \frac{dL1}{d\theta} (\theta - \theta_3) \right)} & \text{si } \theta_3 < \theta < \theta_{off} \\ \frac{(U.(\theta - \theta_{on}) - V_{dc}.(\theta - \theta_{on}))}{\omega. \left(L_{max} + \frac{dL1}{d\theta} (\theta - \theta_3) \right)} & \text{si } \theta_{off} < \theta < \theta_4 \\ \frac{(U.(\theta - \theta_{on}) - V_{dc}.(\theta - \theta_{on}))}{\omega. L_{min}} & \text{si } \theta_4 < \theta < \theta_{ext} \end{cases}$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dL1}{d\theta} ; \text{ est la dérivée de l'inductance par rapport à l'angle pour la phase 1.} \\ \theta_{ext} ; \text{ est l'angle d'extinction.} \end{array} \right.$$

La simulation est effectuée dans les mêmes conditions que précédemment. La forme du courant obtenue est représentée sur la figure III.7 avec celui obtenu numériquement (par SIMPLORER).

Le couple électromagnétique est calculé à partir de la relation (III.3). Il est représenté sur la figure III.8 en même temps que celui obtenu par SIMPLORER.

Nous constatons une bonne concordance des courbes de courant et de couple. A défaut d'une validation par des essais expérimentaux, le résultat obtenu sous MATLAB nous permet de valider en quelque sorte le modèle numérique proposé.

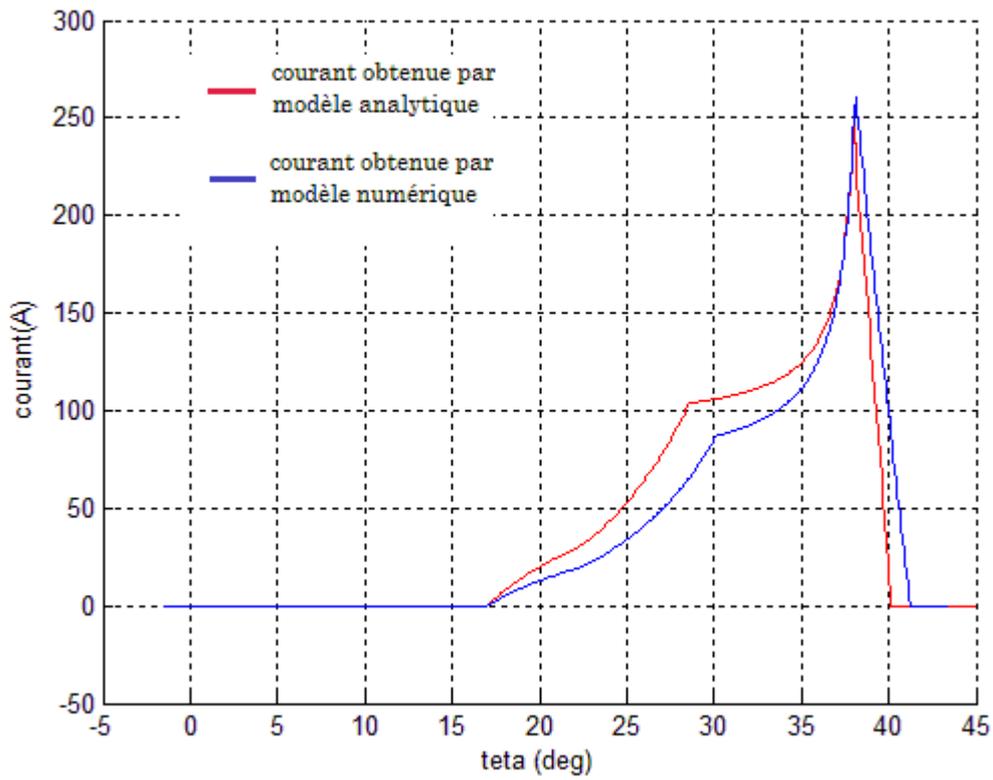


Fig. III.7 : Courant phase obtenu par le modèle analytique et numérique.

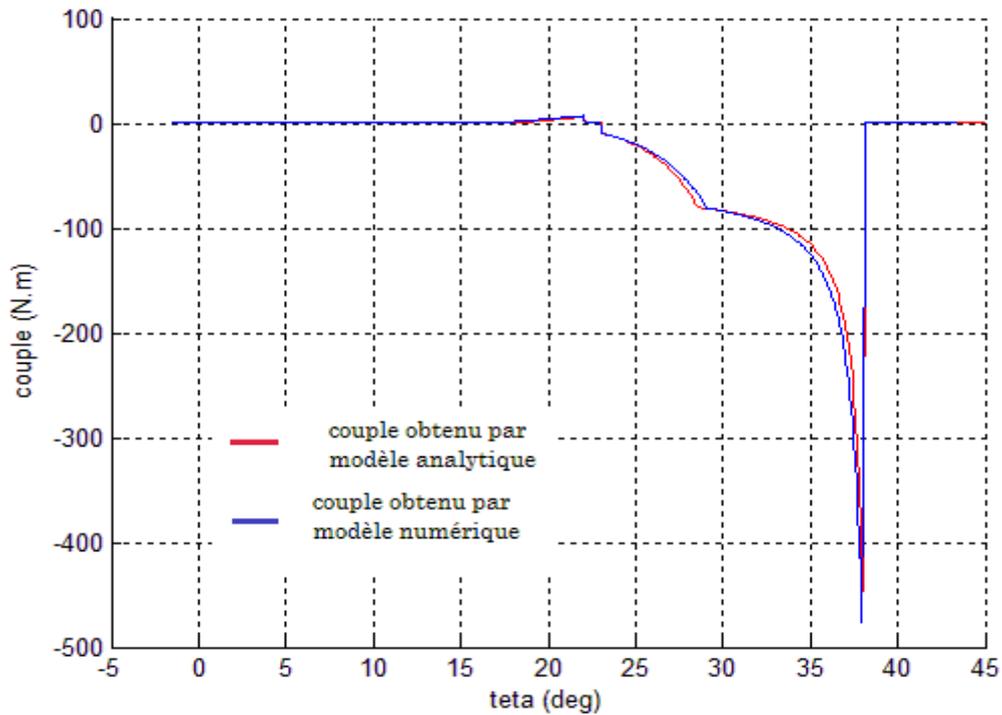


Fig. III.8 Couple de phase obtenu par le modèle analytique et numérique.

III.4 Simulation à faibles vitesses

A faibles vitesses, la simulation est effectuée en régime permanent pour une alimentation régulée en courant. Deux techniques de régulation sont testées : l'hystérésis et la MLI. Pour la technique hystérésis deux modes de commutation ont été considérés : le soft chopping et le hard chopping.

III.4.1 Alimentation par hystérésis hard chopping

Les angles de commande ont été fixés comme suit : $\theta_{on} = 17\text{deg}$, $\theta_{extinction} = 38\text{deg}$, pour un courant de référence $I_{ref} = 100\text{ A}$ avec $\Delta I = 4\text{A}$ et une vitesse $\omega = 100\text{ tr/mn}$.

La figure III.5.b montre que le courant présente des ondulations dues à l'hystérésis, mais reste plus ou moins constant durant la période de conduction.

Le couple électromagnétique totale présente des ondulations due essentiellement aux commutations des phases. La régulation de courant n'a pas d'impact sur le taux d'ondulation du couple totale.

La puissance générée est plus faible comparée à celle obtenu en alimentation pleine onde.

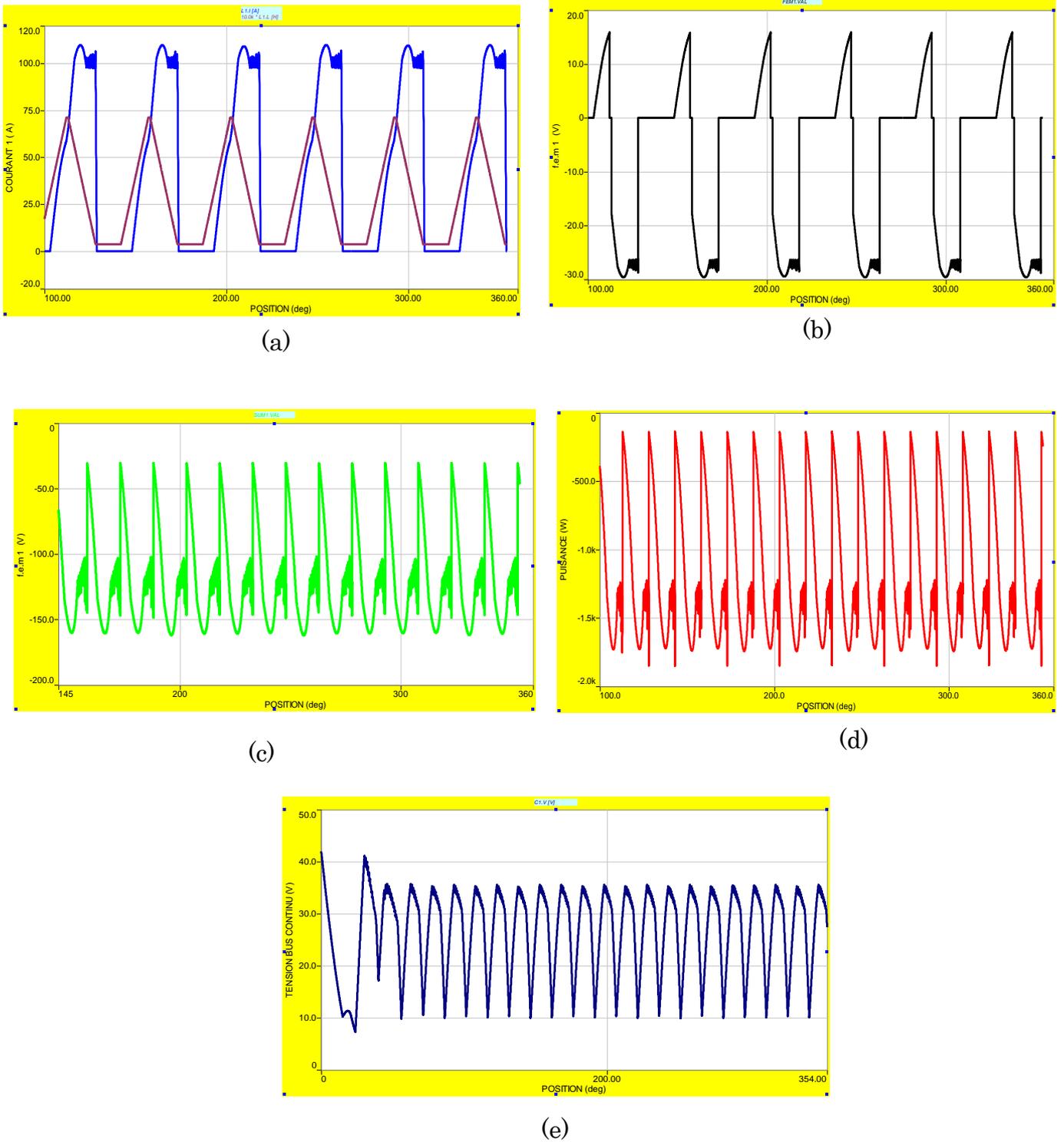


Fig. III.9 Alimentation par hystérésis hard.

(a) Courant et inductance de phase, (b) f.é.m. de phase, (d) Puissance électromagnétique totale générée, (c) Couple électromagnétique de phase, (e) Tension de bus continu.

Les résultats de simulation pour les deux modes de régulation (hard et soft) sont similaires. La différence réside dans la forme du courant ou le soft chopping introduit moins d'ondulation sur le couple de phase.

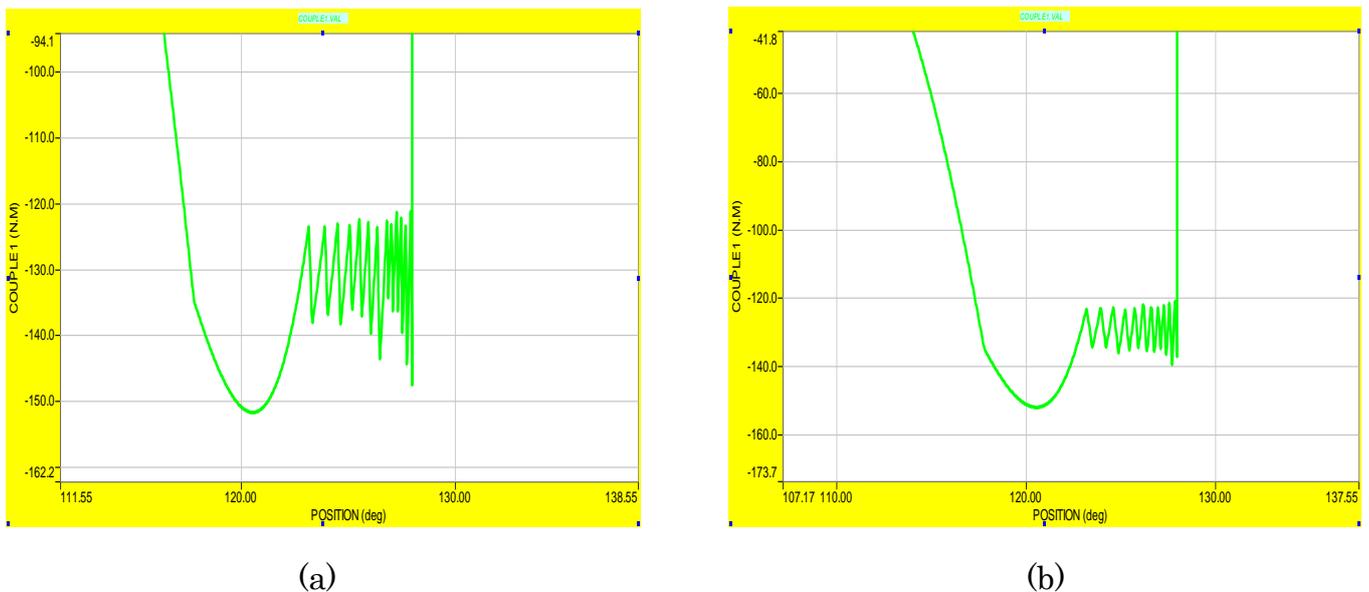
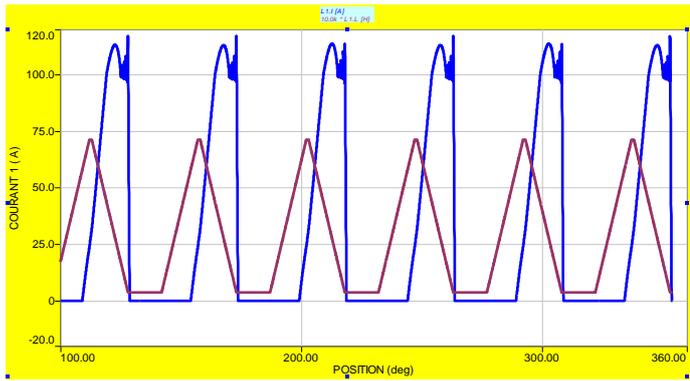


Fig. III.10 Zoom sur le couple.

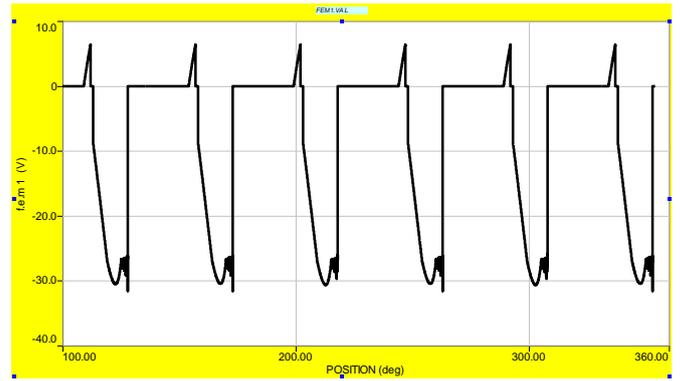
(a) Technique hard chopping, (b) technique soft chopping.

III.4.2. Alimentation par MLI

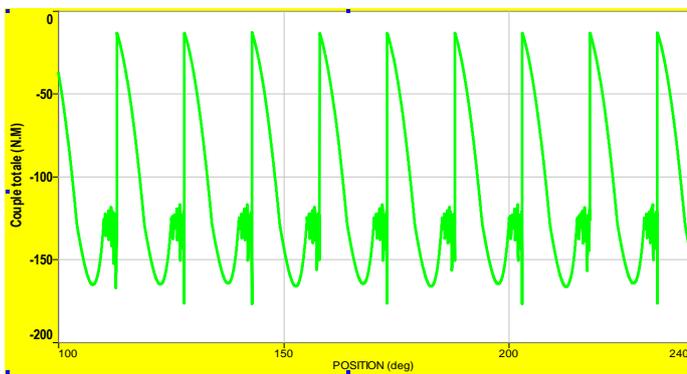
Pour les mêmes angles de commande et la même vitesse d'entraînement, nous avons obtenu les résultats suivants :



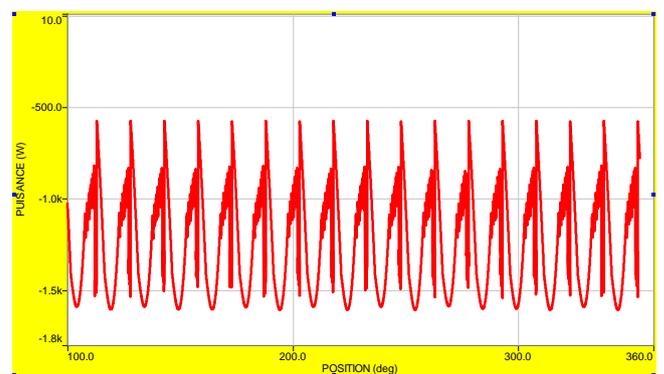
(a)



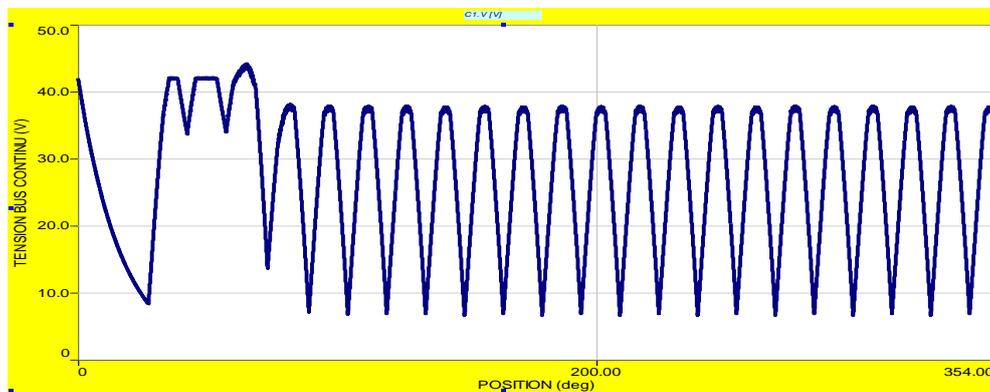
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. III.11 Alimentation par la PWM.

(a) Courant et inductance de phase, (b) f.é.m. de phase, (c) Couple électromagnétique totale, (d) Puissance électromagnétique totale générée, (e) Tension de bus continu.

L'analyse des résultats obtenus, montre que le courant de phase ne suit pas le courant de référence comme dans le cas d'alimentation par Hystérésis (soft et hard), en effet plus l'inductance diminue plus le courant de phase généré augmente et s'éloigne de courant de référence.

Par ailleurs la technique PWM permet de contrôler totalement la fréquence de commutation des IGBT contrairement à la technique d'alimentation par hystérésis.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé un modèle SIMPLORER d'une SRG auto-excité commandé par un convertisseur à demi-pont asymétrique alimentant une charge RL.

La simulation du fonctionnement de la génératrice en régime permanent est effectuée pour les grandes et faibles vitesses. Pour les grandes vitesses la simulation est réalisée pour une alimentation en pleine onde. Pour les faibles vitesses, la simulation est effectuée pour une alimentation régulée en courant. Deux techniques de régulation ont été testées : la technique Hystérésis ou deux modes de hachages ont été prévu, le hard et le soft. La deuxième technique de régulation testée est la MLI.

Les résultats de simulation ont montré que le modèle proposé est correct car les caractéristiques de la SRG obtenus concordent avec ceux obtenus par d'autres auteurs. Par ailleurs, nous avons montré que le mode de régulation présente un impact sur les ondulations de courant mais pas sur les ondulations du couple total. Cependant le hard chopping conduit à un meilleur rendement car il permet la récupération d'énergie durant la régulation de courant. D'autre part, nous avons montré que la MLI n'assure pas un courant constant, mais elle permet de maîtriser la fréquence de commutation.

Chapitre IV

Analyse des performances de la SRG.

Introduction

Dans ce présent chapitre nous examinons l'influence des paramètres de la commande sur le fonctionnement en mode génératrice. Une recherche des paramètres optimums pour une exploitation maximale de la puissance est réalisée pour les faibles et les grandes vitesses de fonctionnement. Cette recherche est effectuée sous Simplorer. Les paramètres obtenus seront appliqué au modèle de la machine afin vérifier leur impacts mutuels sur les performances de la génératrice.

IV.1 Présentation des méthodes d'analyse utilisées par SIMPLORER

➤ Analyse de Monte Carlo :

Cette analyse est effectuée en faisant varier aléatoirement un ou plusieurs paramètres de modèle de simulation. Selon une distribution spécifique. On peut observer les effets de la variation des paramètres sur le modèle de simulation par des mesures d'exécution définies par l'utilisateur.

➤ Approximation successive :

Cette analyse emploie la méthode des approximations successives et une mesure d'exécution choisie pour optimiser un paramètre de simulation donné.

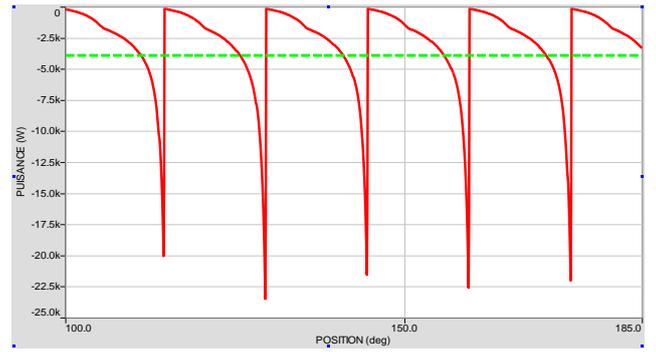
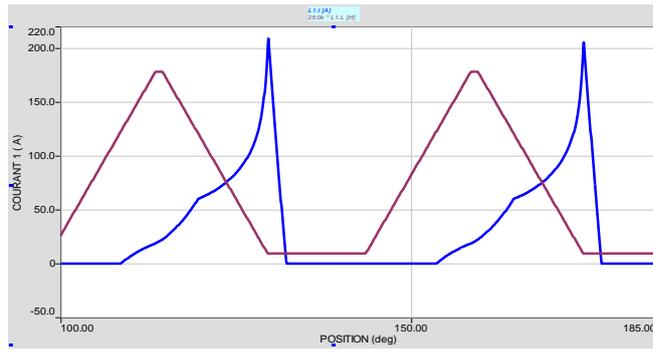
Ces deux analyses peuvent être utilisées pour l'étude de l'effet de variation d'un seul paramètre ou deux paramètres simultanément.

IV.2 Influence de la vitesse sur les performances de la machine

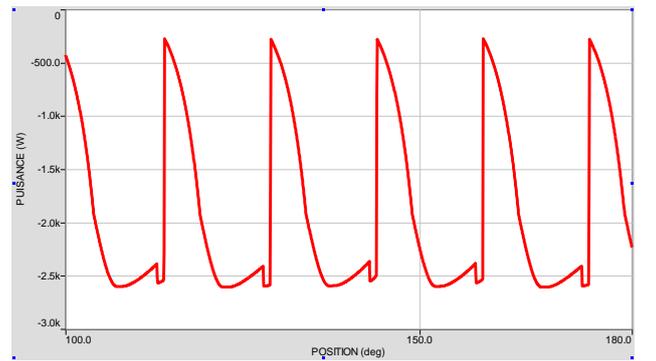
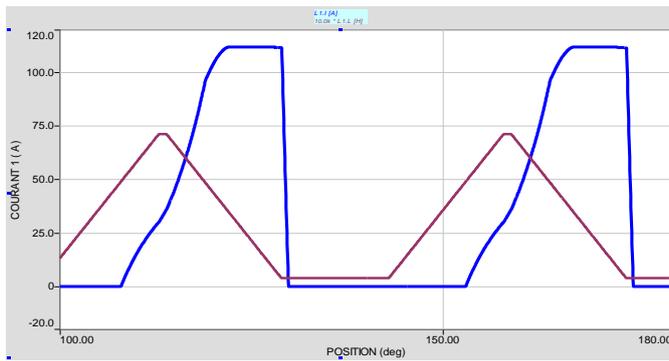
Dans cette partie l'influence de la vitesse de rotation du rotor pour l'alimentation en pleine onde, sur le courant de phase et la puissance électromagnétique générée. Trois vitesses sont, alors, choisies respectant les paramètres nominale de la machine.

On choisit $\omega = 250$ tr/mn, $\omega = 155$ tr/mn et $\omega = 100$ tr/mn, $\theta_{on} = 17$ deg et $\theta_{off} = 28$ deg.

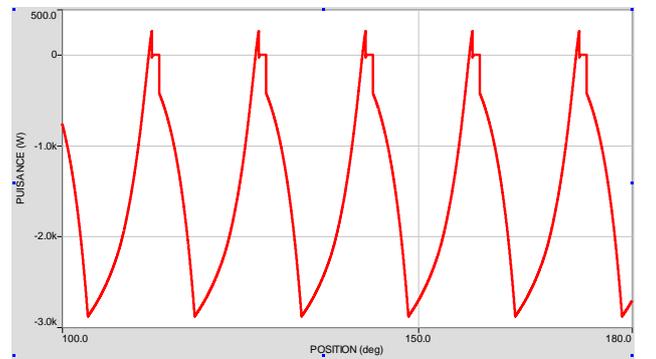
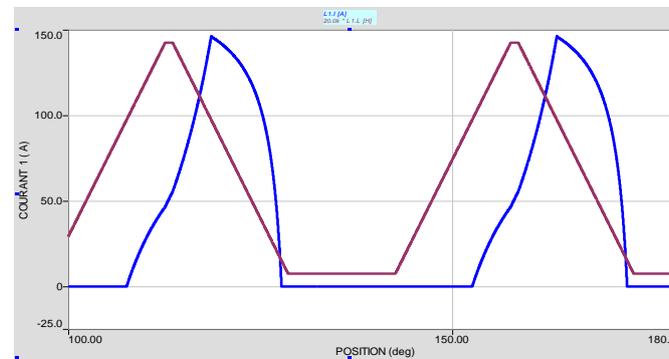
Les résultats de simulation obtenus sont représentés sur les figures ci-dessous :



(a)



(b)



(c)

Fig. IV.1 Influences de la vitesse sur le courant et la puissance générée. (a) à 250 tr/mn, (b) à 155 tr/mn, (c) à 100 tr/mn.

D'après ces figures, on constate que, plus la vitesse de rotation du rotor augmente plus le courant de phase est important, et il en est de même pour la puissance électromagnétique générée. La forme du courant de phase ainsi obtenu est différente pour les trois vitesses, en effet quand :

- $\omega = 250$ tr/mn

Le courant croît lentement durant la phase d'excitation. À $\theta = \theta_{\text{off}}$, le courant augmente rapidement sous forme d'exponentiel et atteint le pic quand l'inductance atteint son minimum, et s'annule à $\theta_{\text{extinction}}$.

Pour cette vitesse la f.é.m. générée est supérieure à la tension de bus continue après θ_{off} , ce qui maintient la croissance du courant de phase.

- $\omega=155$ tr/mn

À cette vitesse qui correspond à la vitesse de base, le courant croît jusqu'à θ_{off} et demeure constant durant toute la période de génération. Dans ces conditions la f.é.m. générée est égale à la tension V_{dc} (42V).

- $\omega=100$ tr/mn

Durant la phase d'excitation le courant augmente dans les phases de la machine. À $\theta=\theta_{\text{off}}$ le courant décroît. Ceci est dû à la décroissance de la f.é.m. durant cette étape (phase de génération)

IV.3 influence de θ_{on} et de θ_{off} à grande vitesse

Une analyse de l'influence séparée des angles de commande est effectuée, en premier lieu. L'influence simultanée des angles de commande est ensuite analysée en utilisant les techniques précédemment présentées.

IV.3.1 Influence séparée des angles de commande

L'influence de θ_{on} est réalisée dans l'intervalle de variation [10 deg, 20 deg] Avec un pas de 1 deg pour $\theta_{\text{off}} = 29$ deg. L'influence de θ_{off} est réalisée dans l'intervalle de variation [22 deg, 30 deg, 1 deg] pour $\theta_{\text{on}} = 17$ deg.

Les résultats sont présentés sur les figures suivantes :

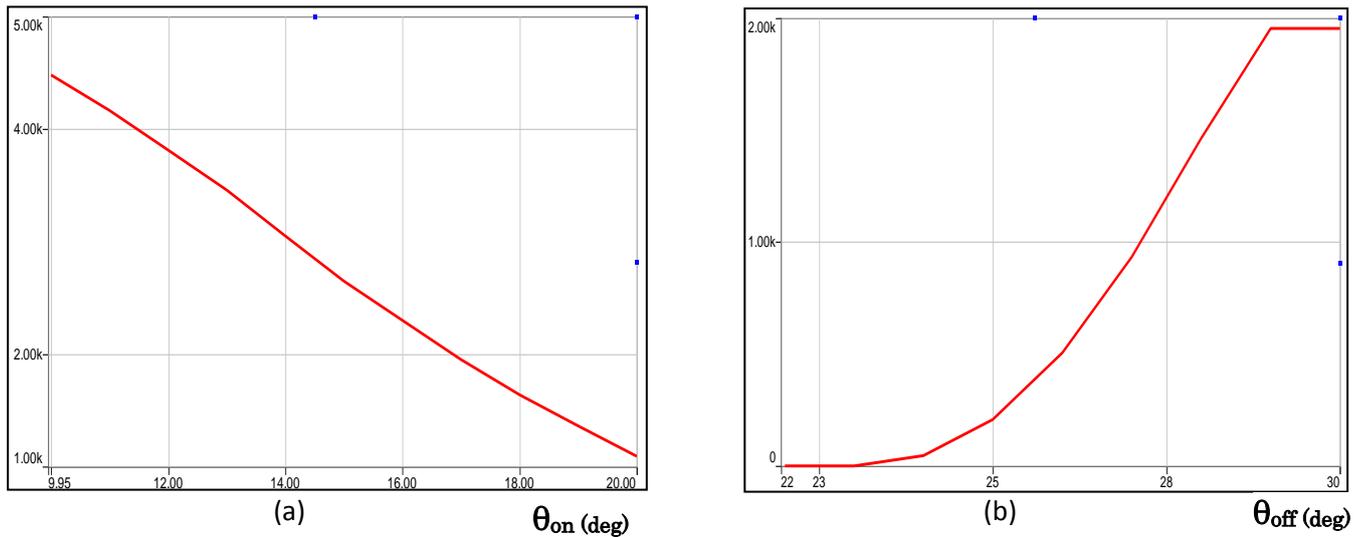


Fig. IV. 2 Influence des paramètres de commande sur la puissance générée (a) Influence de θ_{on} . (b) Influence de θ_{off} .

Nous constatons que la puissance générée croit avec l'augmentation de θ_{off} , et avec la diminution de θ_{on} . L'augmentation séparée de θ_{on} et la diminution de θ_{off} correspond en fait, à une augmentation de la durée d'excitation qui conduit à l'augmentation de la puissance générée.

IV.3.2 Influence simultanée

Deux essais sont effectués. Dans le premier essai, on fixe la vitesse à $\omega=200$ tr/mn et on fait varier les angles de commande dans les plages suivantes $24 \text{ deg} < \theta_{off} < 34 \text{ deg}$ et $10 \text{ deg} < \theta_{on} < 20 \text{ deg}$.

Un deuxième essai est effectué en gardant un angle de désexcitation constant ($\theta_{off} = 29 \text{ deg}$) et on fait varier la vitesse dans une plage; $160 \text{ tr/mn} < \omega < 200 \text{ tr/mn}$. Les résultats de simulation sont donnés sur les figures suivantes :

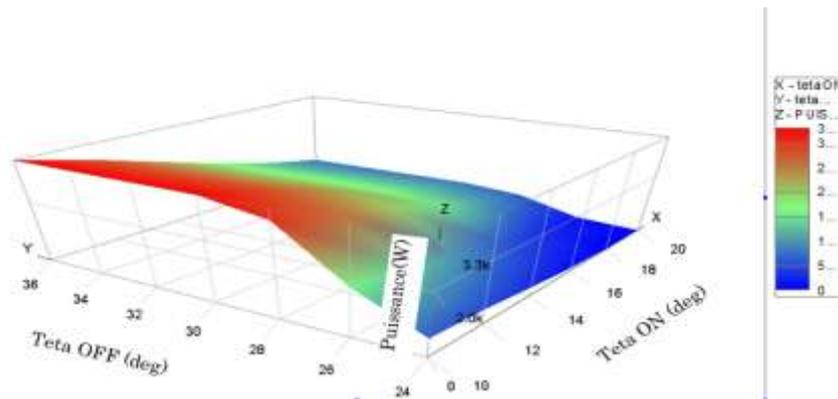


Fig. IV.3 Influence de θ_{on} et de θ_{off} sur la puissance générée.

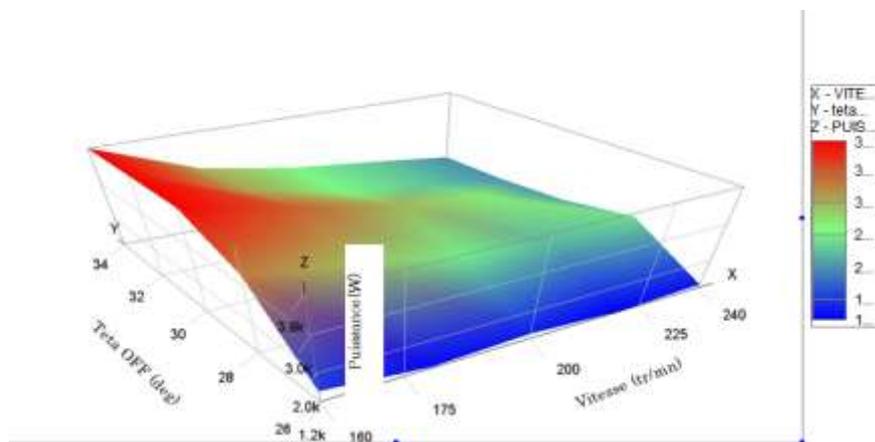


Fig. IV.4 Influence de θ_{off} et de la vitesse sur la puissance générée.

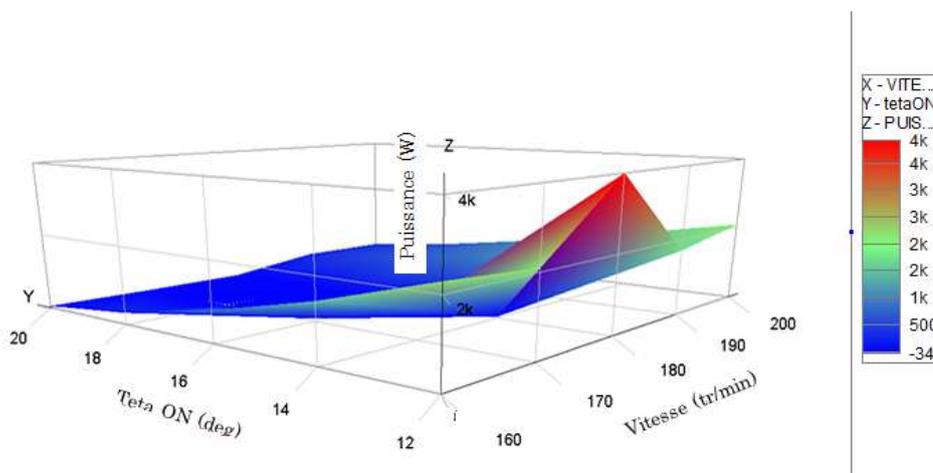


Fig. IV.5 Influence de θ_{on} et de la vitesse sur la puissance générée.

Sur la figure.IV.3, il apparait que la puissance générée augmente avec l'augmentation de l'écart entre θ_{on} et θ_{off} (angle de conduction) dans l'intervalle de variation de θ_{off} [24 deg, 29 deg]. A partir de $\theta_{off} = 29$ deg la puissance devient constante. En effet, l'augmentation de l'angle de conduction qui correspond à la période de magnétisation entraine une augmentation de la puissance générée.

L'analyse de la figure. IV.5 montre que la puissance générée augmente avec l'augmentation de la vitesse et la diminution de θ_{on} . En effet, la diminution de θ_{on} entraine l'augmentation de la période d'excitation donc de la puissance générée. Par ailleurs l'augmentation de la vitesse conduit à l'augmentation de la f.é.m. et donc de la puissance générée. Néanmoins, l'augmentation de la puissance est limitée à une certaine vitesse (dans ce cas =180 tr/mn). Au-delà de cette vitesse la puissance diminue. Cette limite de vitesse est liée à θ_{off} . Comme le montre la figure IV.4 pour une vitesse donnée la puissance augmente avec l'augmentation de θ_{off} .

De cette analyse, on peut déduire, les paramètres optimums :

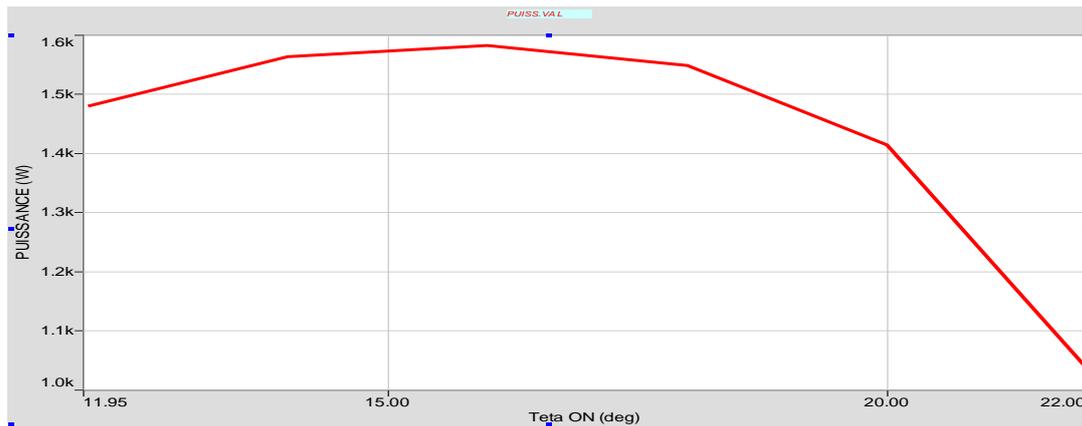
$$\left\{ \begin{array}{l} \omega = 180 \text{ tr/mn} \\ \theta_{on} = 16 \text{ deg} \\ \theta_{off} = 29 \text{ deg} \end{array} \right.$$

IV.4 Influence de θ_{on} , θ_{off} et I_{ref} à faibles vitesses

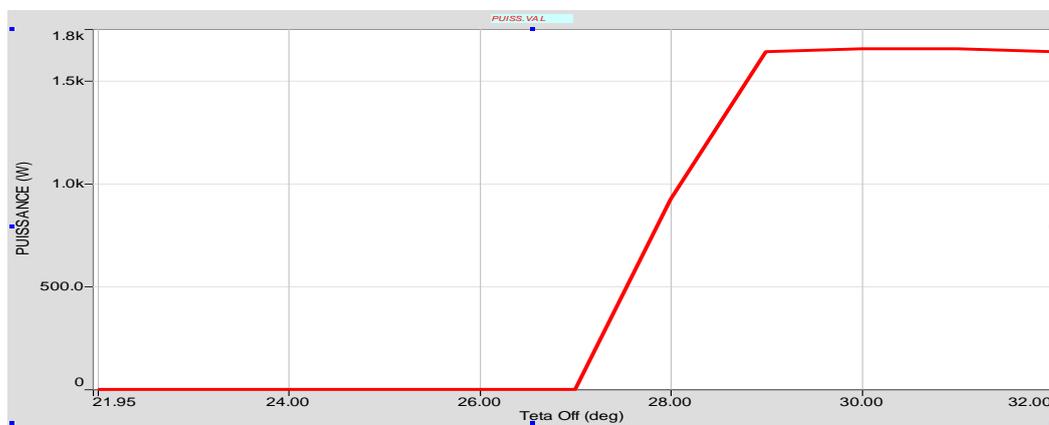
Dans cette partie nous effectuons plusieurs essais sous les deux stratégies d'alimentation hystérésis (soft chopping) et la MLI pour des vitesses inférieures à la vitesse de base.

IV.4.1 Alimentation par MLI

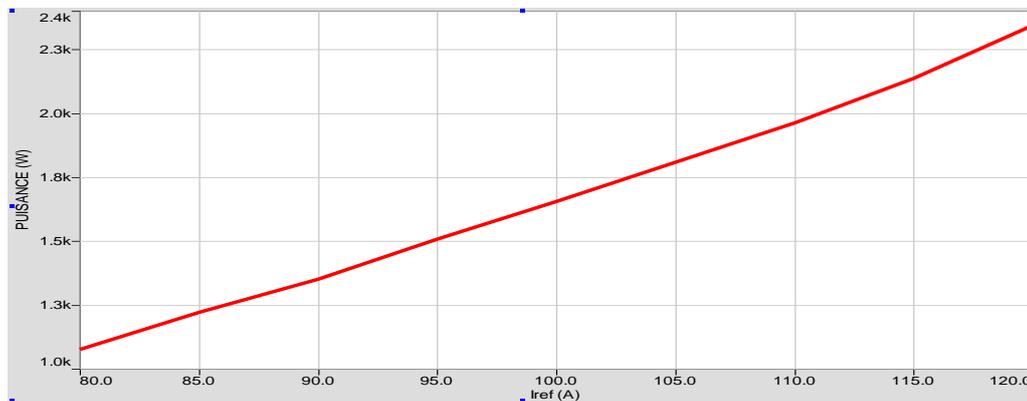
Pour une vitesse de 100 tr/mn nous avons effectués 3 simulations pour les paramètres suivants : $\theta_{on} = 16$ deg, $\theta_{off} = 29$ deg et $I_{ref} = 100$ A



(a)



(b)



(c)

Fig.IV.6 Puissance électromagnétique générée par la technique MLI. (a)Influence de θ_{on} , (b) influence de θ_{off} , (c) influence de I_{ref} .

Sur la figure IV.6.a on remarque que la puissance générée demeure maximale et constante pour des angles d'excitations θ_{on} compris entre 14 deg et 18 deg. En d'hors de cette plage la puissance diminue.

Pour ce qu'est de l'influence de θ_{off} , la puissance atteint son maximum à un angle égal à 29 deg et reste inchangée.

La figure IV.5.c montre l'effet de la variation du courant de référence sur la puissance générée par la machine. On constate alors que la puissance augmente avec l'augmentation du courant de référence puisque celle-ci est directement liée au courant de phase.

Deux autres simulation ont été effectués afin d'analyser l'effet de la variation simultanée de deux paramètres de commande. La première concerne l'influence simultanée de θ_{on} et I_{ref} , pour θ_{on} variant dans la plage [12 deg, 22 deg, 1 deg] et I_{ref} variant dans la plage de [80A, 120A] pour $\theta_{off} = 29$ deg et une vitesse de 100 tr/mn. La deuxième sur l'influence de la vitesse comprise entre [80 tr/mn, 120 tr/mn] pour le même θ_{off} et la même plage de variation de θ_{on} avec $I_{ref} = 100A$.

Les résultats de simulation sont représentés sur le plan 3D, et sont données sur les figures suivantes.

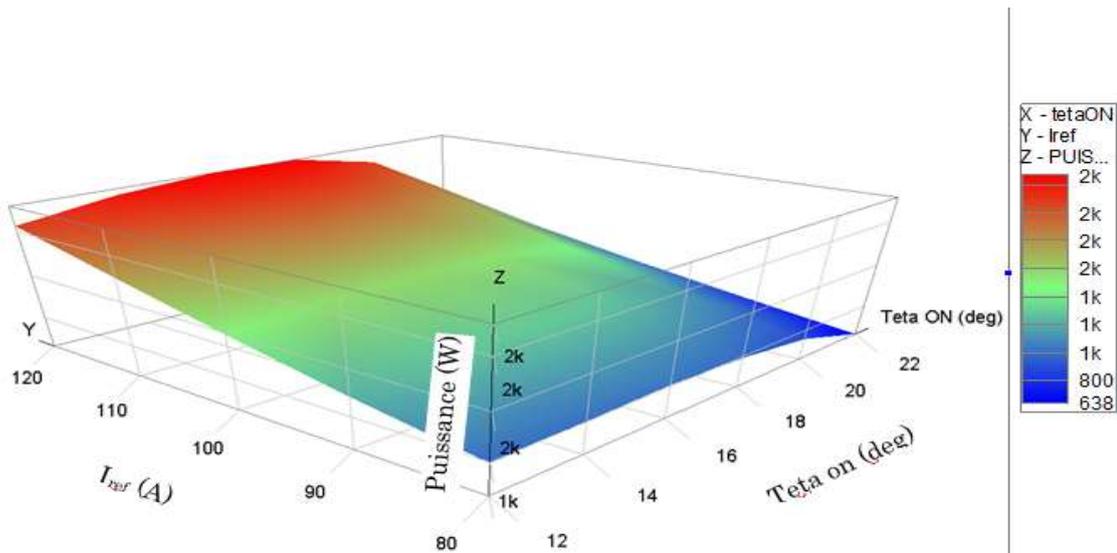


Fig.IV.7 Influence de θ_{on} et du courant de référence sur la puissance générée.

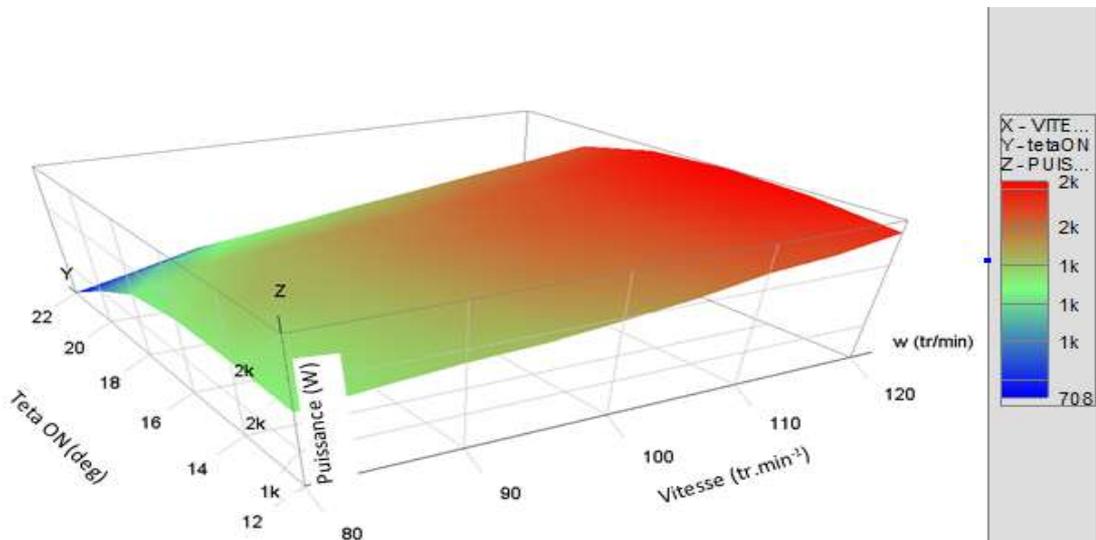


Fig.IV.8 Influence de θ_{on} et de la vitesse sur la puissance générée.

On constate d'après la figure. IV.9 que Lorsque le courant de référence augmente la puissance augmente. En variant θ_{on} dans le sens croissant, nous constatons que la puissance générée atteint sa valeur maximale pour une valeur de θ_{on} d'environ 14 deg.

La figure IV.8 confirme les résultats obtenus sur la figure IV.6 concernant θ_{on} . Il en va de même lorsque la vitesse augmente. A l'instar des résultats obtenus pour les grandes vitesses, la puissance croit proportionnellement avec la vitesse.

VI.4.2 Alimentation par hystérésis (soft chopping)

Deux simulations ont été effectuées en faisant varier simultanément deux paramètres en maintenant le troisième constant. Les résultats sont représentés en 3D ci-dessous.

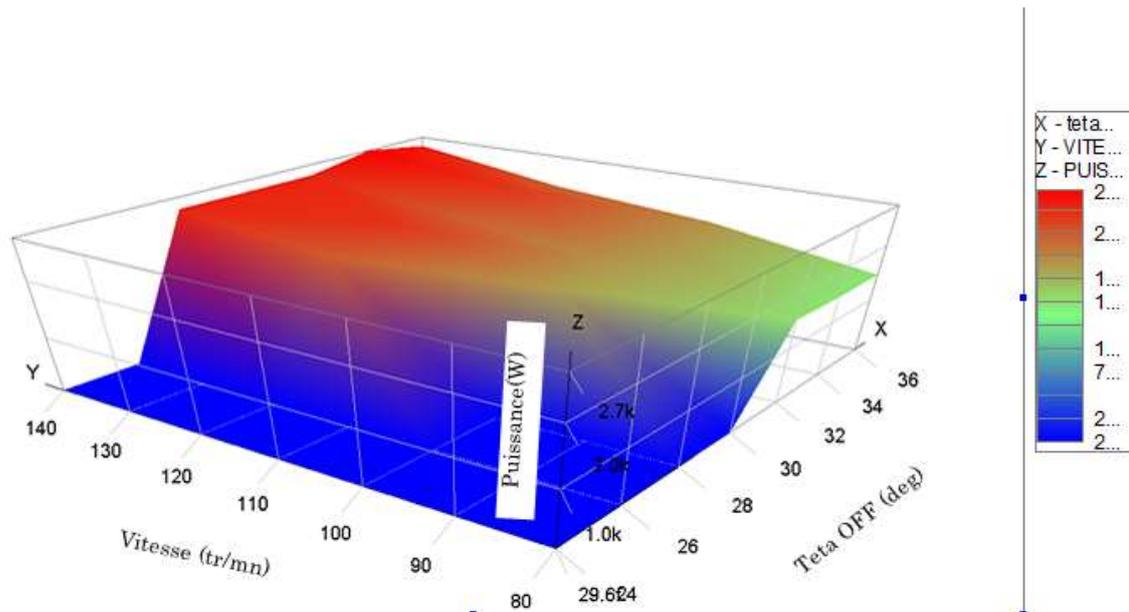


Fig.IV.9 Influence de θ_{off} et de la vitesse sur la puissance générée,
 $\theta_{on} = 17$ deg, $I_{ref} = 100$ A

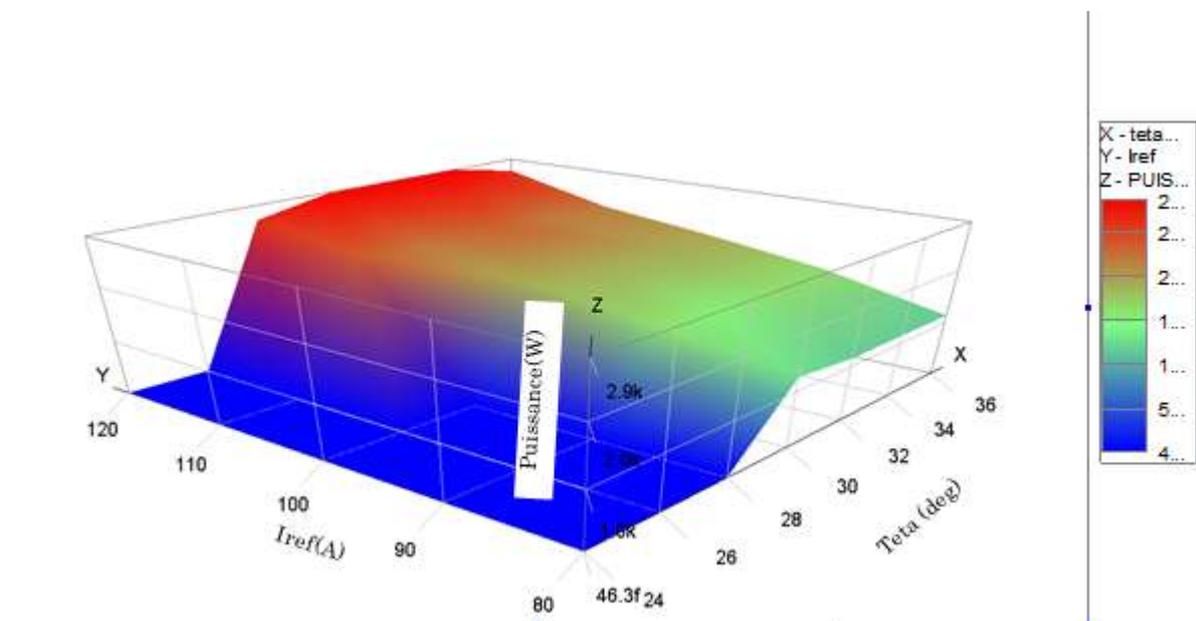


Fig.IV.10 Influence de θ_{off} et du courant de référence sur la puissance générée.
 $\theta_{on} = 17$ deg, $\omega = 100$ tr/mn.

La figure IV.9 montre que la puissance générée est limitée par θ_{off} . Cependant en augmentant la vitesse la puissance maximale atteinte varie avec θ_{off} .

On constate d'après la figure. IV.10 que Lorsque le courant de référence augmente la puissance augmente. En variant θ_{off} dans le sens croissant, la puissance augmente jusqu'à un maximum puis elle demeure constante.

A faibles vitesses les paramètres optimums obtenus sont :

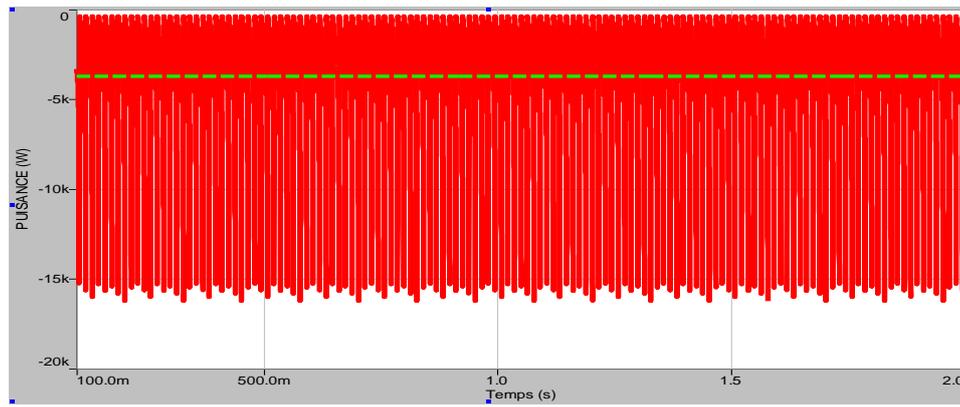
$$\left\{ \begin{array}{l} \omega = 120 \text{ tr/mn} \\ I_{ref} = 95 \text{ A} \\ \theta_{on} = 15 \text{ deg} \\ \theta_{off} = 31 \text{ deg} \end{array} \right.$$

VI.5 Application des paramètres optimums

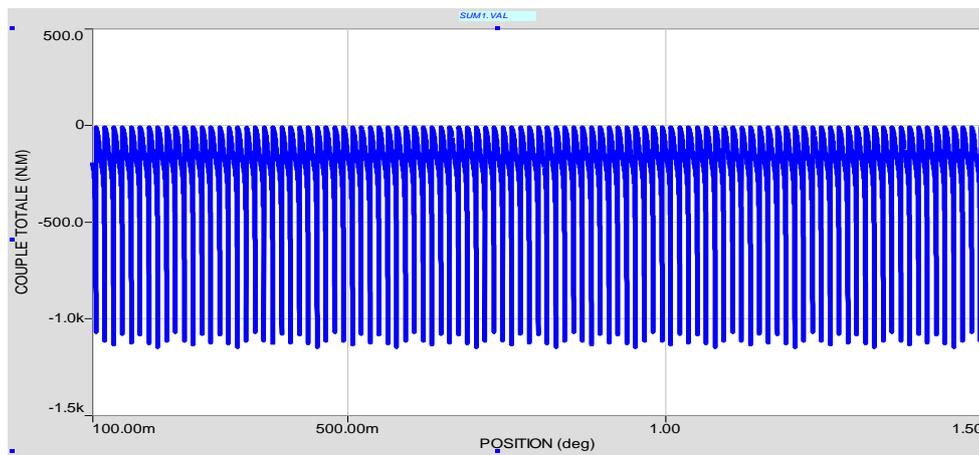
Afin de déterminer les performances de la SRG pour les paramètres de commande optimums obtenus, la simulation a été refaite pour les faibles et grandes vitesses en considérant les angles optimums.

IV.5.1 A grande vitesse

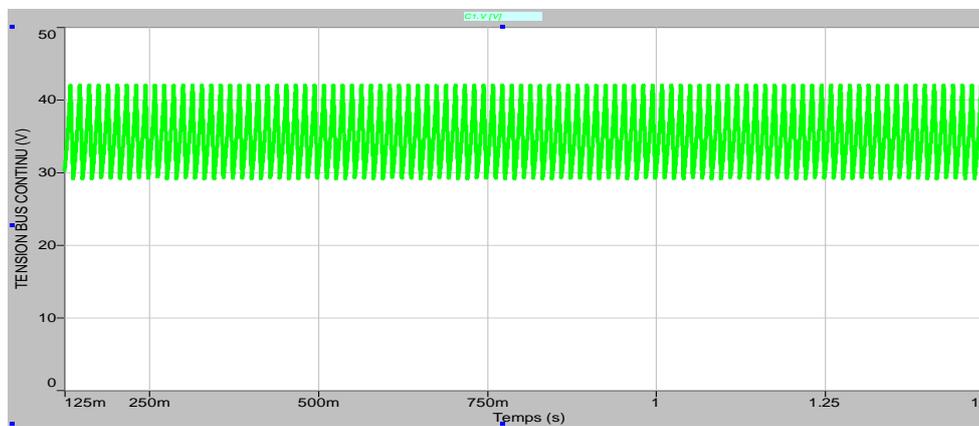
La puissance électromagnétique totale générée par la machine et la tension de bus continu sont représentés dans les figures suivantes :



(a)



(b)



(c)

Fig.IV.11 Résultats de simulation à grande vitesse pour les paramètres optimums.

(a) Puissance générée. (b) Couple électromagnétique. (c) tension de bus continu.

Pour les grandes vitesses de fonctionnement, la puissance électromagnétique générée est plus importante puisque la f.é.m. est plus importante. De même pour le couple électromagnétique qui présente des ondulations car le courant n'est pas régulé. Par contre la variation de la tension de bus continu est faible.

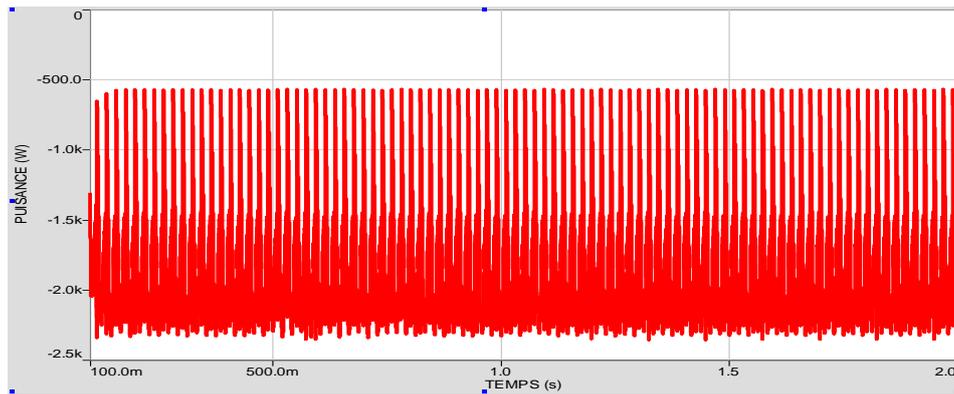
IV.5.2. A faible vitesse

Les résultats de simulation pour les paramètres optimaux, à faible vitesse sont représentés sur les figures ci-dessous.

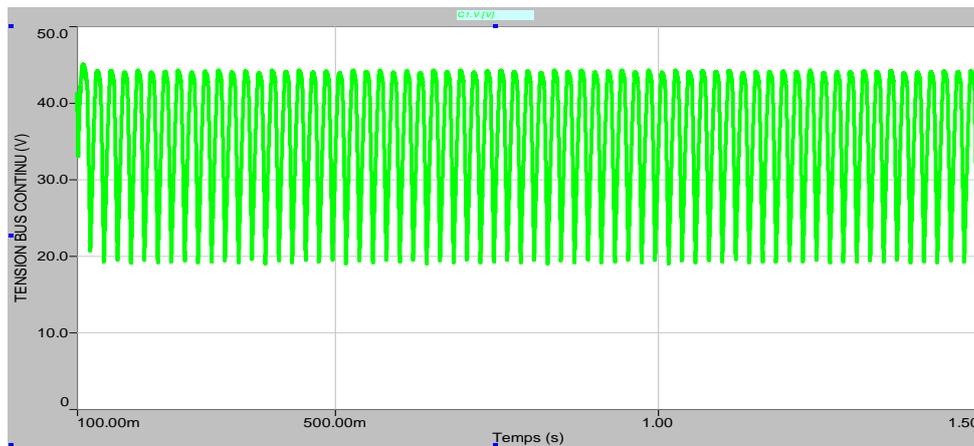
D'après les figures les performances obtenues sont intéressantes, la puissance maximale obtenue est inférieure à celle fixée initialement puisque le fonctionnement est à faible vitesse. Le couple électromagnétique est moins faible et présente des ondulations minimales comparées à celui obtenu à grande vitesse.

La variation de la tension est plus importante comparée à celle obtenue à grande vitesse. Puisque la période d'excitation est plus importante.

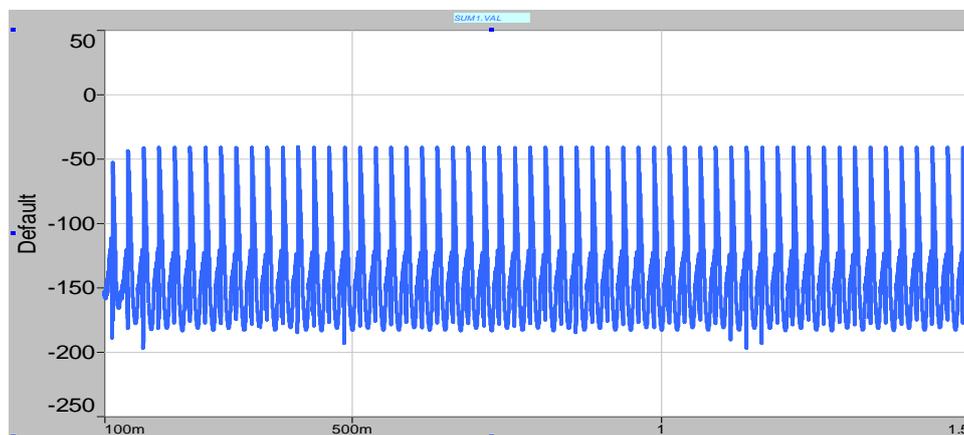
Ces performances ne sont pas suffisantes, car le couple est fortement ondulateur à cause de la commutation des phases, il nécessite alors une minimisation d'ondulation, de plus la tension produite n'est pas lisse ce qui nécessite une régulation.



(a)



(b)



(c)

Fig.IV.12 Résultats de simulation à faible vitesse pour les paramètres optimums.
 (a) Puissance générée. (b) Couple électromagnétique. (c) tension de bus continu.

Conclusion

Dans ce chapitre, une analyse de l'influence des paramètres de commande sur les performances de la génératrice à été effectuée. Ceci pour les faibles vitesses et les grandes vitesses de fonctionnement. Cette analyse nous a permis de trouver les paramètres qui conduisent aux meilleures performances de la génératrice : Puissance maximale générée. Ces paramètres sont ensuite introduits dans le modèle SIMPLORER, et des simulations ont été refaites dans le but de confirmer l'amélioration des performances. La puissance générée à grande vitesse avoisine la puissance nominale de la machine. A faible vitesse la puissance augmente avec l'augmentation de la vitesse est atteint la puissance nominale a la vitesse de base.

Chapitre V
Couplage au réseau.

Introduction :

L'énergie électrique produite par les systèmes éoliens est, soit stockée dans des systèmes de stockage, soit injectée dans les réseaux de distribution. Ce qui nécessite le couplage de la génératrice au réseau électrique. Ce couplage exige des conditions sur la forme du courant et une adaptation de la tension. Un onduleur correctement conçu, un transformateur, et un circuit de filtrage sont alors nécessaires.

Dans ce chapitre nous allons étudier le couplage d'une éolienne qui utilise une SRG comme générateur au réseau électrique, et pour cela nous utilisons un onduleur à trois niveaux de type NPC afin d'assurer un courant sinusoïdal.

Dans la première partie, un modèle SIMPLORER de liaison au réseau électrique est d'abord développé. Ensuite, la structure de l'onduleur à trois niveaux et son dispositif de commande en MLI triangulo-sinusoïdale est présentée et modélisée. La simulation, nous permet d'effectuer une analyse harmonique afin de dimensionner le circuit de filtrage.

Dans la dernière partie, nous nous intéressons à l'étude des puissances transitées au réseau. En premier lieu nous effectuerons des simulations sans contrôle de puissance. Un contrôle de Puissance est, ensuite, réalisée en utilisant la méthode en mode glissant.

V.1 Principe de couplage

Pour réaliser la connexion avec le réseau électrique, nous considérons l'utilisation d'un onduleur à trois niveaux de type NPC commandé par MLI, un filtre RL qui a pour objectif d'éliminer les fréquences harmoniques issues du fonctionnement en commutation du convertisseur électronique est adapté. Un transformateur est nécessaire pour assurer la liaison vu la valeur de la tension de bus continu qu'est de 42 V [19].

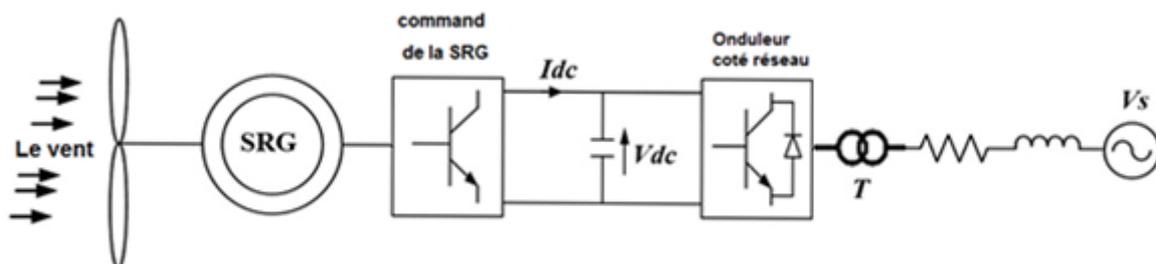


Fig. V.1 : Structure générale de la connexion du générateur éolien avec le réseau.

V.2 Modélisation du système de couplage

V.2.1 L'onduleur triphasé à trois niveaux

L'onduleur triphasé à neutre clampé est une structure d'onduleur qui est capable de transformer l'énergie d'une source à tension continue en une énergie à tension alternative avec une grande amélioration sur la qualité des tensions de sorties.

Ce type d'onduleur se compose de trois bras symétriques constitués chacun de quatre interrupteurs en série, plus deux diodes permettant l'obtention du zéro de la tension V_{KM} notées DD_{K0} et DD_{K1} . Chaque interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode montée en tête bêche.

Le point milieu de chaque bras est relié à une alimentation continue de force électromotrice ($U_{c1}+U_{c2}$). Ces deux générateurs ainsi que les diodes DD_{K0} et DD_{K1} se trouvent connectés entre eux en un point fictif noté « M ».

La représentation schématique de cet onduleur est donnée par la figure V.2.

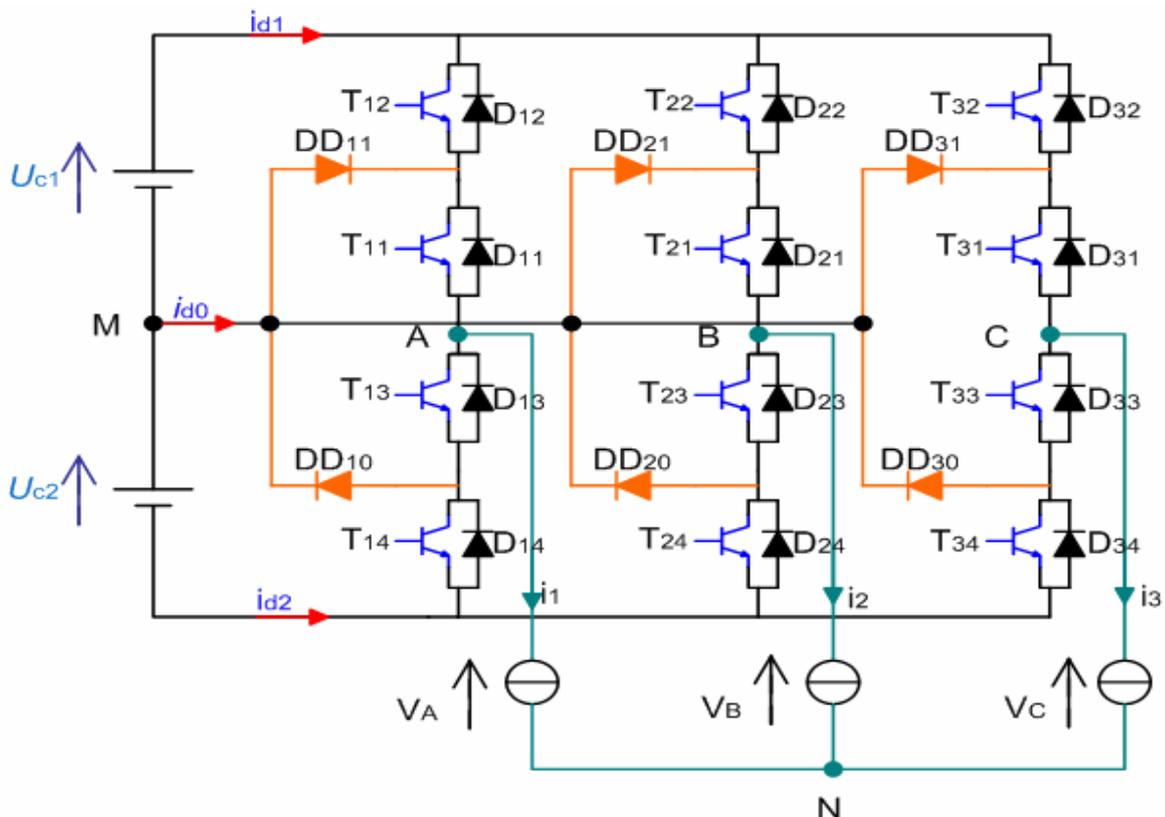


Fig. V.2 : Onduleur triphasé à trois niveaux.

V.2.1.1 Fonctionnement d'un bras de l'onduleur

La symétrie des onduleurs à trois niveaux permet leur modélisation par bras.

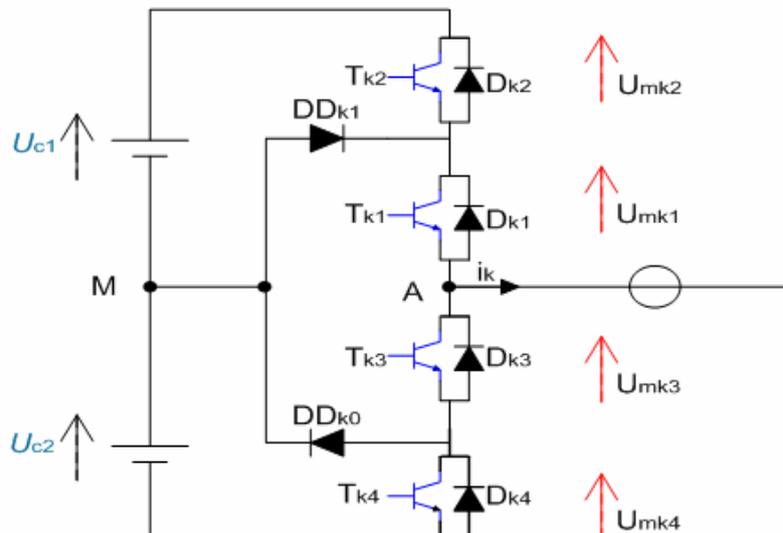


Fig. V.3 : Structure d'un bras de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC.

Pour simplifier la complexité de la structure de l'onduleur multiniveaux, on présente chaque paire transistor-diode par un seul interrupteur bidirectionnel TD_{ks} , et vu la symétrie de sa structure, le raisonnement se fait sur un seul bras.

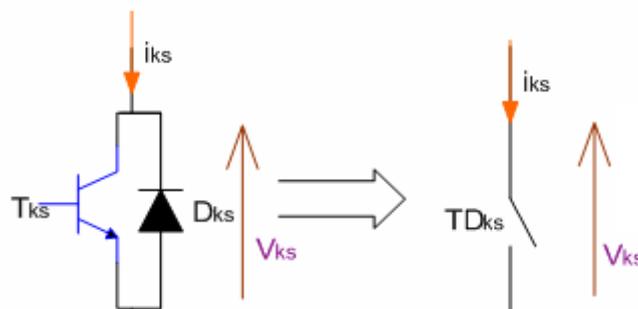


Fig. V.4 : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire transistor-diode.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépendent de :

- La commande externe (l'ordre d'amorçage ou de blocage des semi-conducteurs bicommandables T_{ks}).
- Une commande interne définie par les signes des courants du bras et des tensions aux bornes des semi-conducteurs.

V.2.1.2 Différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux

Un bras d'onduleur définit cinq configurations possibles. Ces différentes configurations sont représentées par la figure V.5. Le tableau (V.1) donne les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations (avec « M » origine des potentiels et V_{KM} la différence de potentiel entre le bras K et le point fictif M)

La configuration	La grandeur électrique qui la caractérise
E_0	$I_k=0$
E_1	$V_k=U_{c1}$
E_2	$V_k=0$
E_3	$V_k = -U_{c2}$
E_4	$V_k = 0$

Tab V.1 : Grandeurs électrique caractérisant chaque configuration possible d'un bras

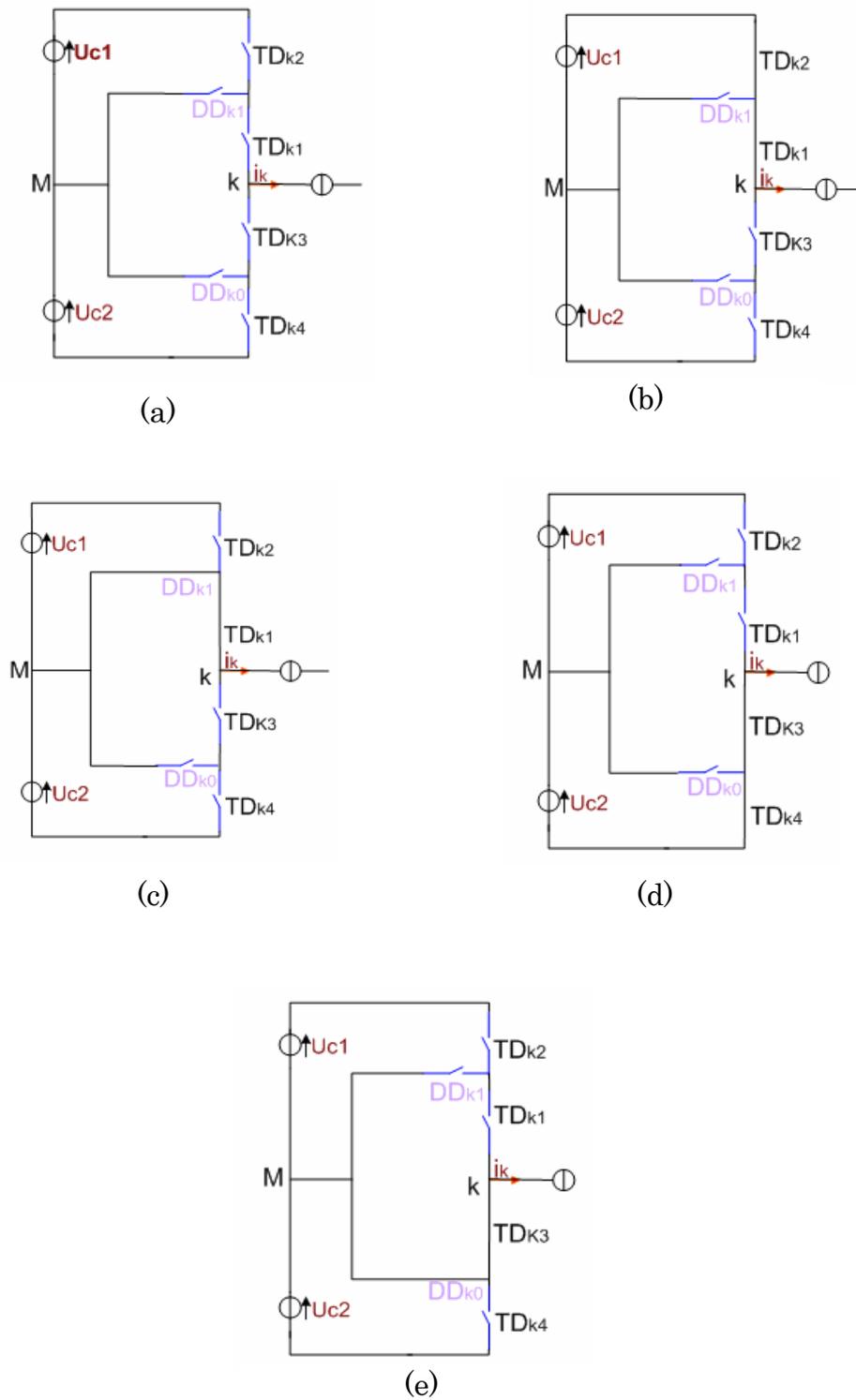


Fig. V.5 : Les cinq configurations possibles d'un bras d'onduleur à trois niveaux.
 (a) Configuration E_0 , (b) Configuration E_1 , (c) Configuration E_2 , (d) Configuration E_3 ,
 (e) Configuration E_4

Chaque bras est équivalent à un interrupteur à trois positions permettant d'obtenir en sortie trois niveaux de tension U_{c1} , 0 et $-U_{c2}$. La structure de cet onduleur de tension consiste à créer un point sur l'étage de tension continue tel que $U_{c1}+U_{c2}=E$, permettant de générer des créneaux d'amplitudes $-E/2$, 0 et $E/2$ dont la combinaison de ces niveaux permet d'avoir un fondamental plus proche de la sinusoïde qu'avec la structure classique à deux niveaux.

V.2.1.3 Commande MLI triangulo-sinusoïdale

Le principe de cette stratégie consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante (qui est l'image de l'onde de sortie qu'on veut obtenir) généralement sinusoïdale avec deux porteuses triangulaires bipolaires.

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- L'indice de modulation "m" qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de porteuse f_p à la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{V.1})$$

- Taux de modulation "r" qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_m) et celle de la porteuse (U_{pm}):

$$r = \frac{V_m}{U_{pm}} \quad (\text{V.2})$$

Les deux porteuses sont identiques et déphasées d'une demi-période de hachage $\frac{1}{2f_p}$ l'une de l'autre.

La porteuse choisie est celle en dents de scie bipolaire. Elle permet une réduction du taux d'harmoniques. Ces harmoniques sont centrés autour des fréquences multiples de $2.m.f$ [22].

L'algorithme de commande

L'algorithme de la commande de la stratégie triangulo-sinusoïdale à deux porteuses pour l'onduleur à trois niveaux pour un bras K, peut être résumé en deux étapes [22] :

Etape 1 : la détermination des signaux intermédiaires V_{k1} et V_{k2}

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{\text{ref}k} \geq U_{p1} \rightarrow V_{k1} = U_{c1} \\ V_{\text{ref}k} < U_{p1} \rightarrow V_{k1} = U_{c1} \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{\text{ref}k} \geq U_{p2} \rightarrow V_{k0} = 0 \\ V_{\text{ref}k} < U_{p1} \rightarrow V_{k0} = -U_{c2} \end{array} \right. \quad (\text{V.3})$$

$$\text{Avec : } U_{c1} = U_{c2} = U_c = \frac{E}{2}$$

Etape 2 : détermination du signal V_{k2} et des ordres de commande B_{ks} des interrupteurs :

$$V_{k2} = \left\{ \begin{array}{l} V_{k2} = U_{c1} \rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 1 \\ -U_{c2} \rightarrow B_{k1} = 0, B_{k2} = 0 \\ V_{k2} = 0 \rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{V.4})$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{k2} = V_{k1} + V_{k0} \\ B_{k3} = \overline{B_{k2}} \\ \overline{B_{k4}} = \overline{B_{k1}} \end{array} \right.$$

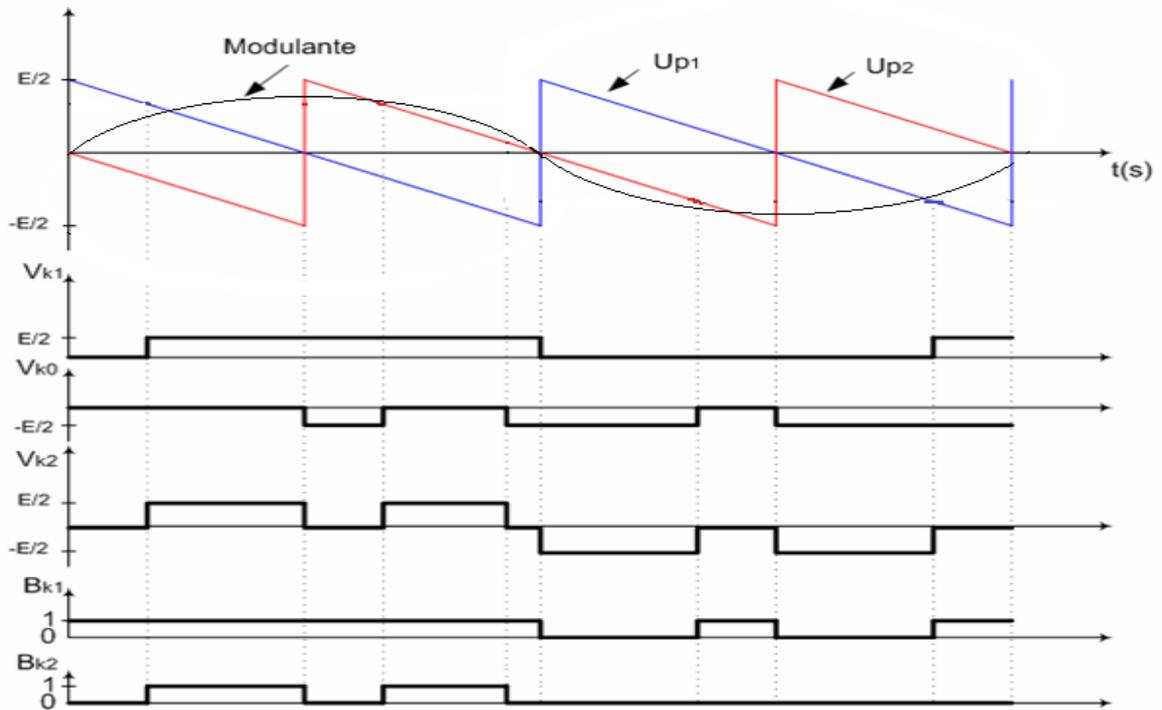


Fig. V.6 : Principe de la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses bipolaires.

La figure (V.8) représente le modèle de la commande MLI établi sous Simplorer. L'indice de modulation m et le taux de modulation r peuvent être réglés en ajustant les fréquences et les amplitudes des signaux sinusoidaux et triangulaires.

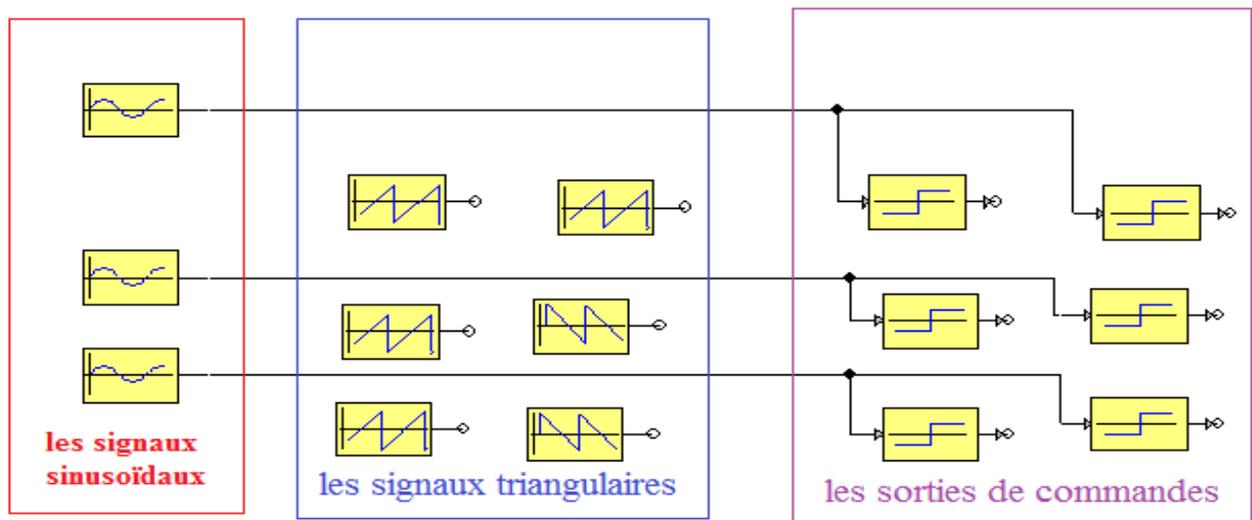


Fig. V.7 : Commande MLI triangulo-sinusoidale à double porteuse sous Simplorer.

V.2.1.4 Résultats de simulation

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus on connectant une charge RL à la sortie de l'onduleur à fin de vérifier le bon fonctionnement de l'onduleur et de la commande MLI.

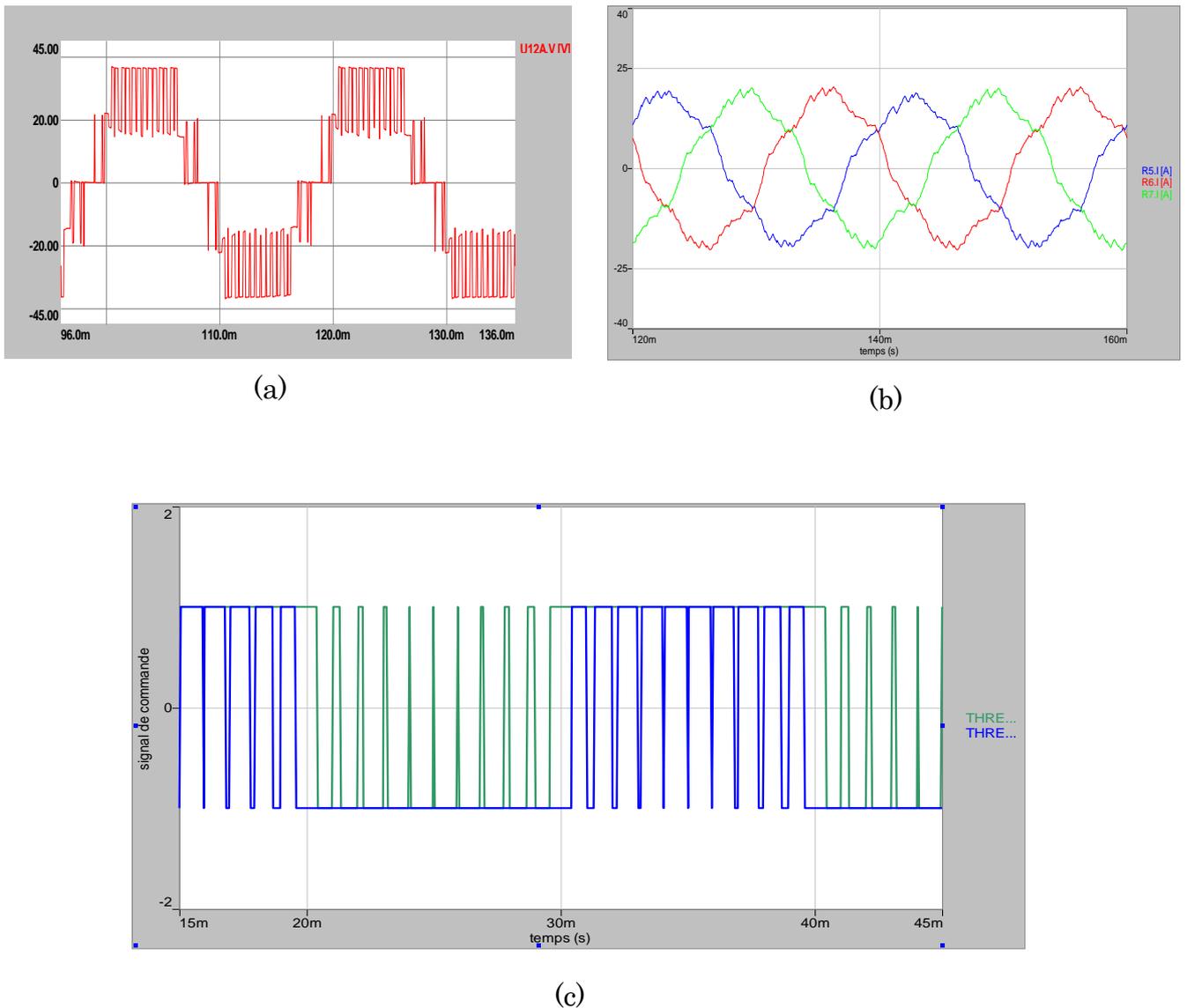
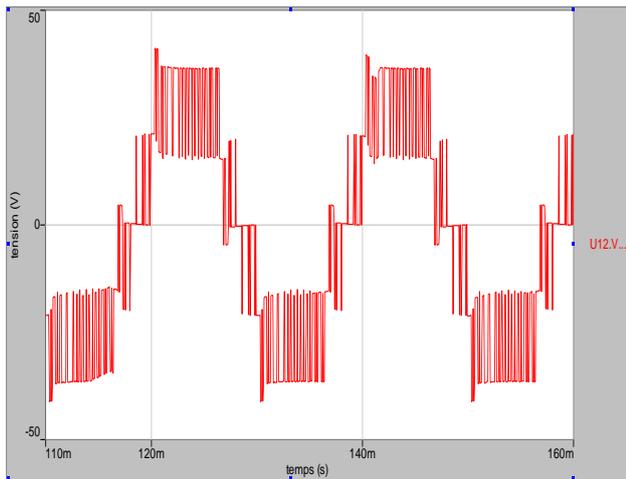
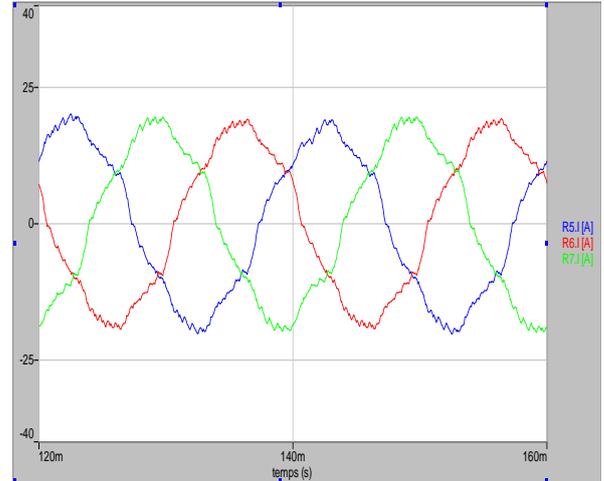


Fig. V.8 Résultats de simulation pour $m = 21$.

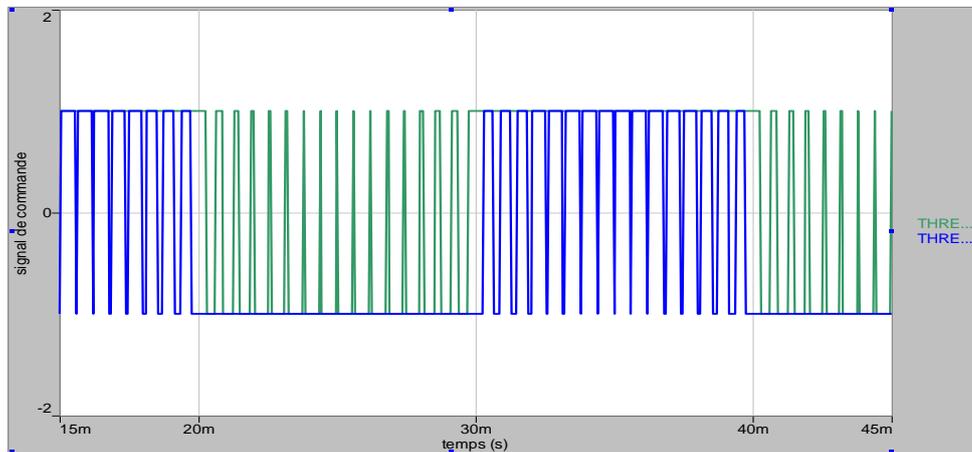
(a) Tension composée de phase, (b) Courants des trois phases, (c) Signal de commande d'un demi bras.



(a)



(b)



(c)

Fig. V.9 Résultats de simulation pour $m = 33$.

(a) Tension composée de phase, (b) Courants des trois phases, (c) Signal de commande d'un demi bras.

On constate sur la figure V.8.a que la tension de sortie se compose de trois niveaux $\frac{U_c}{2}$ et U_c et le 0, dues au diviseur capacitif à l'entrée de l'onduleur.

La figure V.9.b montre les courants dans les trois phases, on remarque que ces derniers sont composés d'harmoniques.

Le signal de commande MLI d'un demi bras est représenté sur la figure V.9.b, il est clair que les deux signaux sont complémentaires et décalés d'une demi période.

En comparant les résultats de simulation pour $m=21$ et $m=33$ on déduit que l'augmentation de l'indice de modulation "m" permet de pousser les harmoniques vers des fréquences élevées.

V.2.2 Modèle du transformateur

Afin d'assurer l'adaptation et l'isolation des tensions entre l'onduleur et le réseau, un transformateur de rapport de transformation k est adapté.

Le transformateur est considéré idéal, les mutuelles inductances entre les phases sont négligées, ainsi que les résistances des bobines (n'induit pas des pertes).

Le rapport de transformation K est choisi d'une manière, à avoir la valeur efficace de la tension à la sortie de l'onduleur égale à la tension simple du réseau qu'est de 220 V.

V.2.3 Modèle du filtre

La liaison au réseau électrique est réalisée via un filtre RL figure (V.10). Ce filtre a pour objectif d'éliminer les fréquences harmoniques issues du fonctionnement en commutation du convertisseur [19].

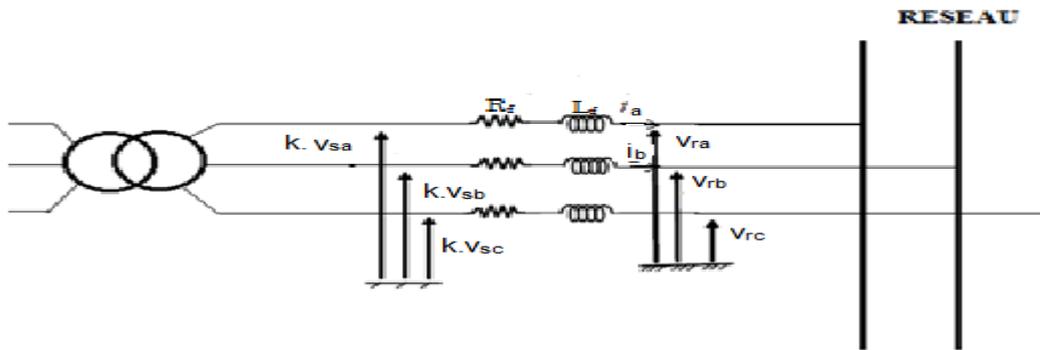


Fig.V.10 Modèle du filtre.

Les courants transités entre le convertisseur et le réseau sont imposés par les bobines et obtenus par intégration des tensions aux bornes de celles-ci.

Les équations donnant le modèle du filtre sont :

$$\begin{aligned}
 k \cdot v_{sa} &= R_f \cdot i_a + L_f \cdot \frac{di_a}{dt} + v_{ra} \\
 k \cdot v_{sb} &= R_f \cdot i_b + L_f \cdot \frac{di_b}{dt} + v_{rb} \\
 k \cdot v_{sc} &= R_f \cdot i_c + L_f \cdot \frac{di_c}{dt} + v_{rc}
 \end{aligned}
 \tag{V.5}$$

Ce système peut se mettre sous la forme

$$k \cdot \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = R_f \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_f \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix}
 \tag{V.6}$$

Avec $\begin{cases} k = \text{Rapport du transformateur.} \\ v_{sabc} = \text{Tensions simple à la sortie de transformateur.} \\ v_{rabc} = \text{Tensions simple du réseau.} \end{cases}$

V.3 Modèle de liaison au réseau

Le modèle de la liaison au réseau présenté auparavant, est introduit dans Simplorer. Après avoir introduit le transformateur et le filtre RL, un modèle du réseau est construit avec trois sources de tension contrôlées par trois sinusoïdes, afin de pouvoir débiter dans celui-ci. Car les modèles des réseaux qui se trouvent dans la bibliothèque de Simplorer sont considérés comme des réseaux infinis, et la puissance ne peut être débitée dans ce cas.

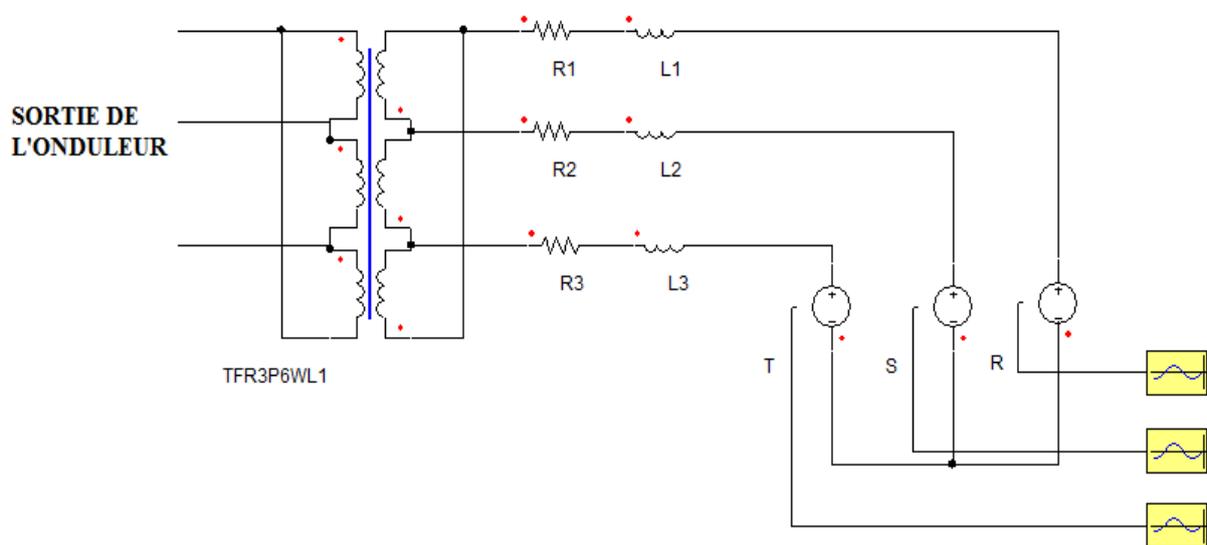


Fig. V.11 : Modèle de liaison au réseau sous SIMPLORER.

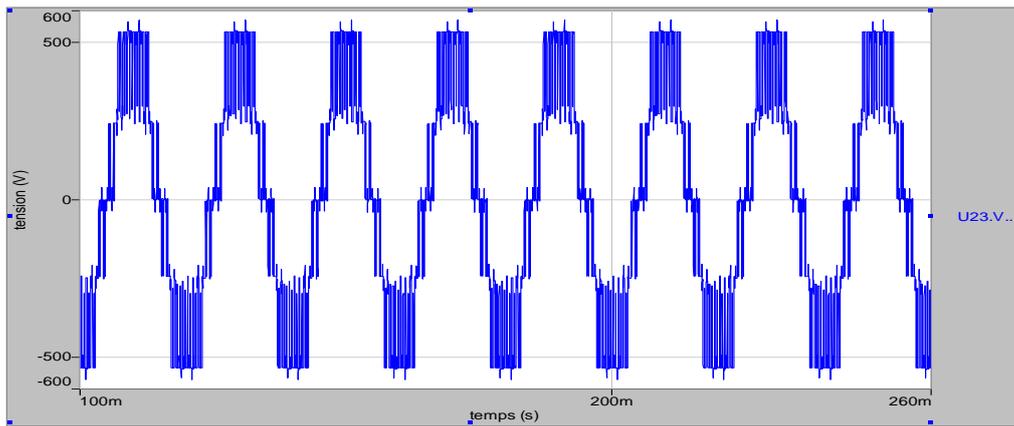


Fig.V.12 Tension à la sortie de l'onduleur avant le couplage.



Fig.V.13 Tension composée de sortie de l'onduleur et de réseau après couplage.

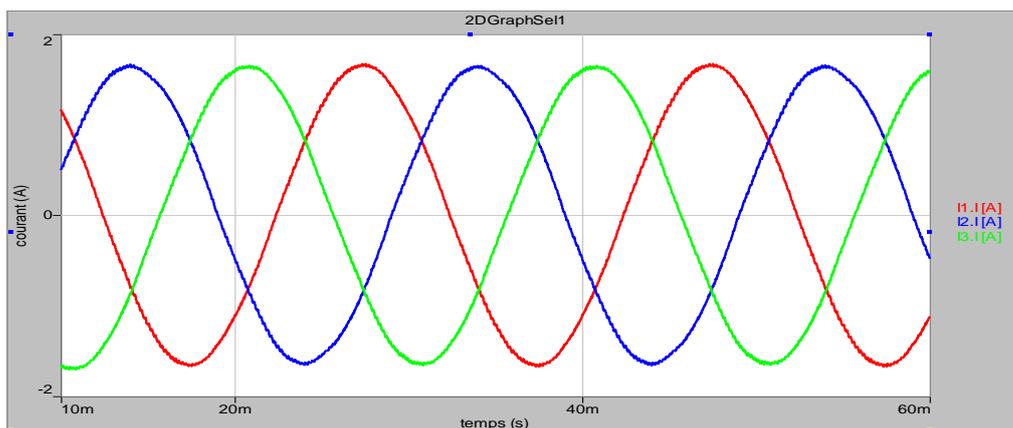


Fig. V.14 : Courant des phases après couplage.

La figure V.12 montre la tension composée à la sortie du transformateur, sa valeur efficace est de 380 Volts, on voit toujours trois niveaux de tension. Les deux autres tensions ont la même forme et décalées de $\frac{2\pi}{3}$.

La figure V.13 représente la tension du réseau et la tension à la sortie du transformateur, on remarque que cette dernière est imposée par le réseau (même amplitude et même fréquence).

On constate d'après la figure V.14 que le courant de phase est plus lisse que celui obtenu dans les figures V.8.b et V.9.b, ceci est dû au filtre RL ajouté en série de chaque phase. Plus on augmente la valeur de l'inductance L_f plus le courant devient lisse, cependant l'énergie réactive augmente, ce qui affecte le facteur de puissance.

V.4 Etudes d'harmonique et filtrage

La puissance électrique à la sortie de l'onduleur ne peut être injectée directement au réseau électrique, car elle présente des harmoniques de tension et de courant. Pour étudier l'effet des harmoniques il est nécessaire de faire un rappel sur les grandeurs électriques en présence d'harmoniques, et des éléments qui les y caractérisent.

- **Taux de distorsion (Taux d'harmoniques)**

Ce paramètre, appelé aussi distorsion harmonique ou facteur de distorsion, représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques ($n \geq 2$) à celle de la grandeur alternative :

$$THD\% = DF\% = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} Y_n^2}} \quad (V.7)$$

- **Taux global de distorsion**

Ce paramètre représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental seul :

$$D\% = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{Y_1} \quad (V.8)$$

- **Taux individuel d'harmoniques**

Ce paramètre représente le rapport de la valeur efficace d'une harmonique de rang n à celle de la grandeur alternative

$$H_n \% = 100 \frac{Y_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} Y_n^2}} \quad (\text{V.9})$$

Avec :

Y_n : valeur efficace de l'harmonique du rang n.

Nous avons utilisé ces paramètres pour caractériser les harmoniques de courant et de tension avant et après le filtrage.

L'analyse du spectre des signaux et les calculs des caractéristiques précédemment définie sont effectués par Matlab, les résultats obtenus sont représentés ci-dessous.

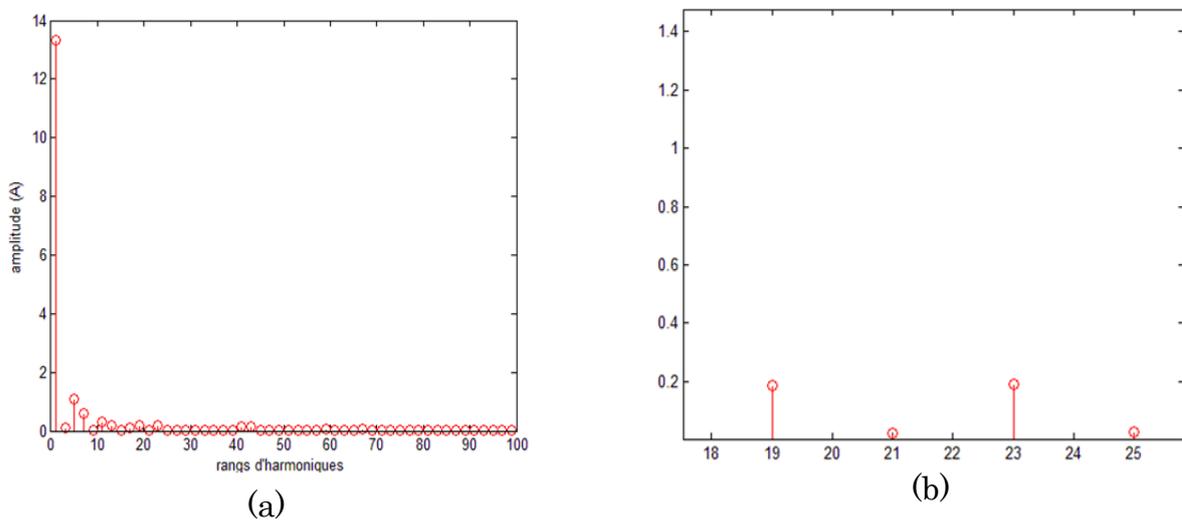


Fig. V.15 Spectre d'harmonique du courant de phases avant filtrage pour $m=21$.
(a) spectre complet. (b) Zoom au voisinage de m .

La figure (V.15) illustre le spectre d'harmonique du courant de phase, l'amplitude du fondamentale et de l'ordre de 21 Ampère. Il est clair que les harmoniques d'ordre multiple de trois sont nulles ceci est due au système triphasé équilibré qui élimine les harmoniques d'ordre trois.

n : Rang de l'harmonique	1 (fondamentale)	5	7	11	13	17	19	21	23
Valeur efficace de la composante I_n en A	13.33	1.11	0.70	0.53	0.2	0.12	0.19	0.02	0.19
Taux individuel de distorsion H_n en %	100	8.26	4.52	2.44	1.45	0.92	1.41	0.17	1.43

Tab V. 2 : Caractéristiques du signal avant filtrage, pour m=21.

Taux global de distorsion $THD = 10.30 \%$

L'analyse d'harmoniques pour $m = 33$ sont présentées ci-dessous.

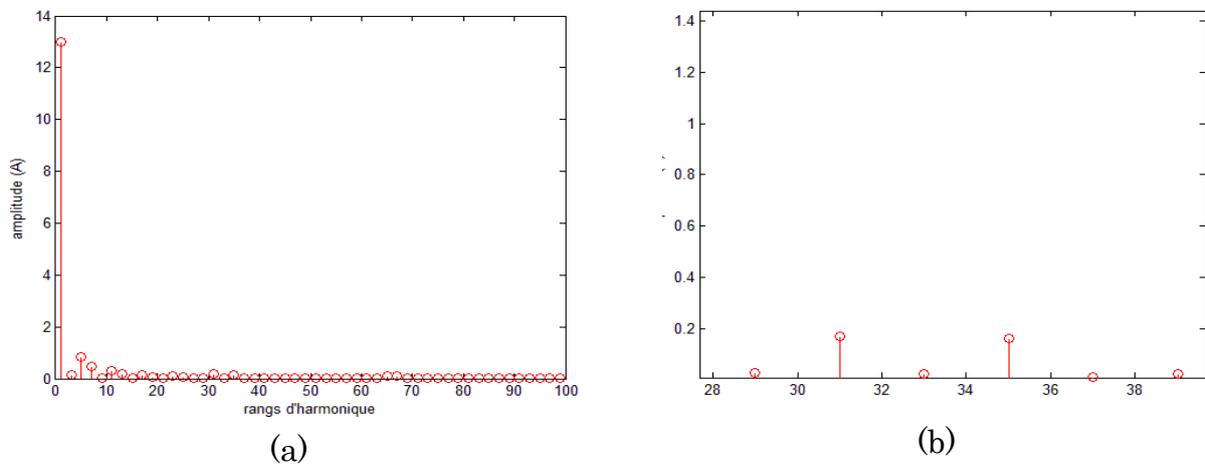


Fig. V.16 Spectre d'harmonique du courant de phases avant filtrage pour m=33. (a) spectre complet. (b) Zoom au voisinage de m.

On constate sur la figure V.16.b que deux harmoniques apparaissent au voisinage de 33 qu'est l'indice de modulation, d'amplitude plus important par rapport aux autres harmoniques du rang élevée.

n : Rang de l'harmonique	1 (fondamentale)	5	7	11	13	17	19	31	33	35
Valeur efficace de la composante I_n en A	13.01	0.86	0.48	0.31	0.18	0.15	0.08	0.16	0.02	0.15
Taux individuel de distorsion H_n en %	100	6.58	3.67	2.37	1.34	1.19	0.63	1.31	0.18	1.28

Tab V. 3 : Caractéristiques du signal avant filtrage, pour m=33.

Taux global de1 distorsion $THD = 8.50\%$

Après le filtrage de courant l'analyse des harmoniques donne les résultats suivants, pour m = 33

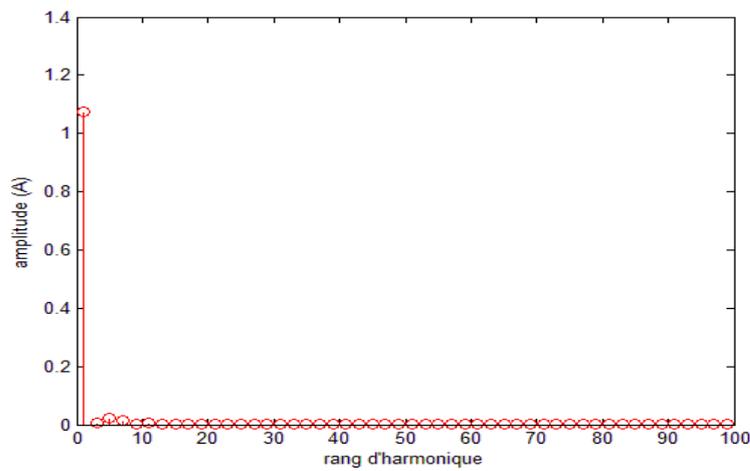


Fig. V.17 : Spectre d'harmonique du courant de phase après filtrage.

La figure (V.17) montre le spectre d'harmonique du courant de phase, l'amplitude du fondamental et de l'ordre de 1.4 A Les harmoniques d'ordre multiple de trois sont toujours nulles, les autres harmoniques (5,7, 11, 13,17 ...) sont remarquablement diminuées grâce au filtrage.

n : Rang de l'harmonique	1 (fondamentale)	5	7	11	31	33	35
Valeur efficace de la composante I_n en A	1.07	0.03	0.02	0.01	0.0035	0	0.0032
Taux individuel de distorsion H_n en %	100	1.98	1.35	0.65	0.32	0	0.30

Tab V. 4 : Caractéristiques du signal après filtrage, pour m = 33.

Taux global de la distorsion

$$THD = 2.7\%$$

Le tableau V.4 représente les amplitudes des harmoniques du courant après filtrage et le taux individuel de distorsion. Les résultats obtenus sont acceptables si on les compare avec les normes donnant le taux maximale d'harmonique tolérer dans le réseau (Tab V.5).

Nous pouvons aller plus loin dans le filtrage des harmoniques en jouant sur le filtre, mais cela influe beaucoup sur l'énergie réactive du système et par suite sur le facteur de puissance, en plus pour une application réelle, l'addition des filtres supplémentaires encombre le système, et coûte très chère.

Harmoniques impairs non multiples de 3			
Rang h	BT	MT	THT
5	6	5	2
7	5	4	2
11	3,5	3	1,5
13	3	2,5	1,5
17	2	1,6	1
19	1,5	1,2	1
23	1,5	1,2	0,7
25	1,5	1,2	0,7
> 25	0,2 + 1,3x(25/h)	0,2 + 0,5x(25/h)	0,2 + 0,5x(25/h)

Sources BT : Niveaux de compatibilité CEI 61000-2-2.

Tab V. 5 : Valeurs maximales des taux d'harmonique acceptables selon la CEI.

V.5 Etude des puissances

V.5.1 Couplage sans contrôle de puissance

Dans cette partie on s'intéresse aux études de puissance dans le cas où la machine est connecté au réseau directement, sans contrôle de puissance active ni réactive, les résultats de simulation de transit de puissance sont représenté ci-dessous.

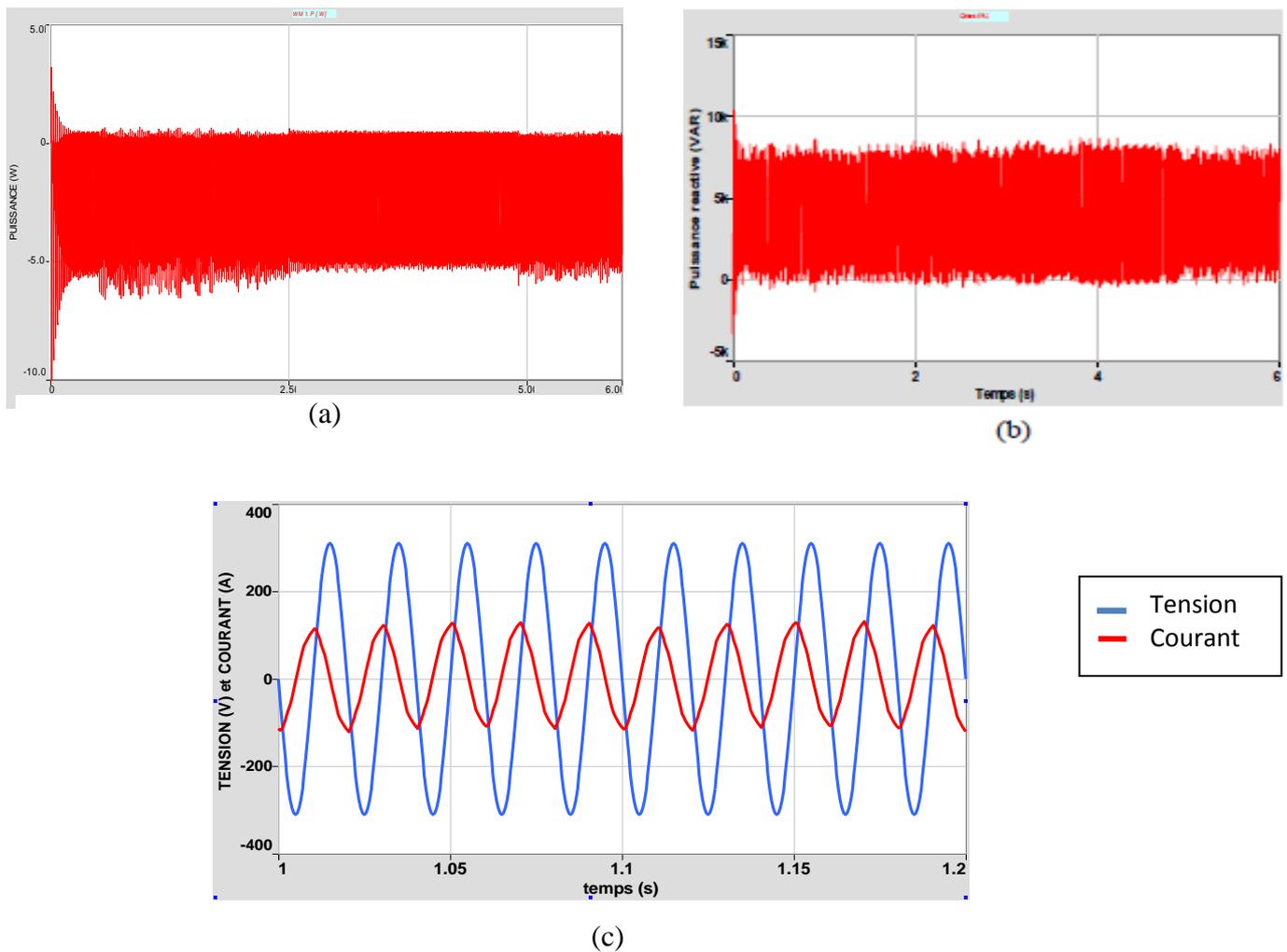


Fig.V.18 Résultats de couplage direct.

(a) Puissance active, (b) Puissance réactive, (c) Tension et courant cote réseau.

On constate sur la figure V.18.a que une puissance de valeur moyenne d'environ 2.5 kW est transitée au réseau et sa pour un régime permanent de la génératrice à faible vitesse.

La figure V.18.b montre que la puissance réactive générée par la machine et qu'est envoyée au réseau est relativement grande devant l'énergie active (valeur moyenne 3 kW) ce qui induit un facteur de puissance médiocre (dans ce cas $F_p=0.6$). Ceci est parmi les inconvénients de la SRG, donc il faut introduire une commande qui permettra de minimisée la puissance réactive générée.

La figure V.18.c montre la tension et le courant cote réseau, on voit bien que là le courant et la tension sont en quadrature.

V.5.2 Couplage avec contrôle de puissance

L'objectif de cette partie est de contrôler les puissances transitée au réseau, pour assurer un meilleur transite et surtout de parvenir au problème de facteur de puissance. Cela à travers une loi de commande de retour que nous établissons à partir du modèle de la liaison.

La commande utiliser est la commande par mode de glissement, le schéma global du dispositif de contrôle des puissances transitées au réseau est représenté ci-dessous.

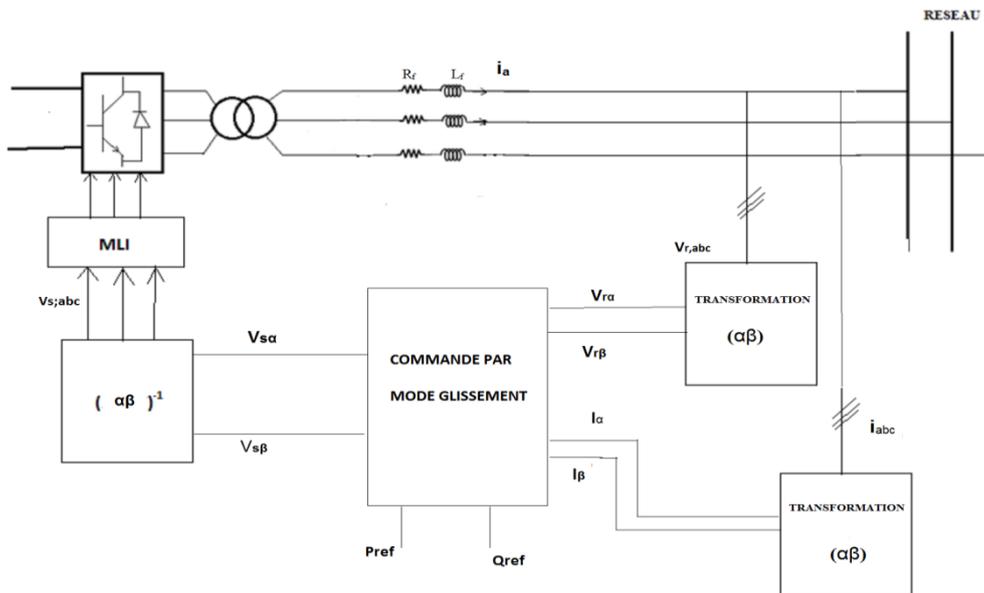


Fig. V.19 Modèle de liaison au réseau avec contrôle de puissance.

V.5.2.1 La commande par mode de glissement

La commande par mode de glissement est une commande robuste. Les avantages de la commande par mode glissant sont importants et multiples : la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité, l'invariance et la robustesse. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour les systèmes ayant un modèle imprécis.

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes principales très dépendantes l'une de l'autre :

- le choix de la surface ;

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre nécessaire ainsi que la forme. Ces deux facteurs sont en fonction de l'application et de l'objectif visé.

Soit le système défini par l'équation d'état suivante :

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x)u \quad (\text{V.10})$$

Il faut choisir m surfaces de glissement pour un vecteur de commande u de dimension m . En ce qui concerne la forme de la surface, plusieurs formes linéaires et non linéaires sont proposées. Parmi les surfaces linéaires, nous citons la surface de proposée par Slotine.

$$S_j(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_j \right)^{r-1} e_j \text{ et } j=(1,m) \quad (\text{V.11})$$

Où :

X est le vecteur d'état ;

e_j est l'erreur de poursuite de la sortie $e_j = y_j - y_{dj}$

λ_j est une constante positive qui interprétera la dynamique de la surface

r est le degré relatif du système.

- l'établissement des conditions d'existence ;

La condition d'existence et de convergence est le critère qui assure aux états du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. Pour assurer le mode de convergence, il faut assurer les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} \dot{S}_j(x) &> 0 \text{ si } S_j(x) < 0 \\ \dot{S}_j(x) &< 0 \text{ si } S_j(x) > 0 \end{aligned} \quad (\text{V.12})$$

- la détermination de la loi de commande.

L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive. De ce fait, si cette commande discontinue est indispensable, il n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée. En effet, la partie continue est amenée à réduire autant que nous voulons l'amplitude de la partie discontinue. En présence d'une perturbation, la partie discontinue a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivité. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties : une concernant la linéarisation exacte (u_{eq}) et l'autre la stabilisation (u_n).

$$u = u_{eq} + u_n = A^{-1}(x)(B(x) + K_s \text{sign}(S) + G_s S) \quad (\text{V.13})$$

$$u_{eq} = A^{-1}(x)B(x) \quad (\text{V.14})$$

$$u_n = A^{-1}(x)(K_s \text{sign}(S) + G_s S) \text{ avec } K_s > 0 \text{ et } G_s > 0 \quad (\text{V.15})$$

Avec :

$$S = [S_1 \quad \dots \quad S_m]^T ;$$

$$A(x) = -\left(\frac{\partial S}{\partial x} g(x)\right) \text{ et } B(x) = \left(\frac{\partial S}{\partial x} f(x)\right) \quad (\text{V.16})$$

La commande u_{eq} , sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $S(x) = 0$. La commande équivalente est déduite en considérant que la surface est invariablement nulle et nous aurons $\dot{S}(x) < 0$. Elle peut être interprétée, autrement, comme étant une valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre les valeurs u_{max} et u_{min} . La commande u_n est déterminée pour vérifier la condition de convergence.

V.5.2.2 Application à la SRG

Dans le cas du réglage de la puissance active et réactive de la SRG on propose deux surfaces de glissement :

$$\begin{aligned} S_1 &= P - P_{ref} \\ S_2 &= Q - Q_{ref} \end{aligned} \quad (\text{V.17})$$

En appliquant la transformation $\alpha\beta$ sur le système (V.5)

$$p(\xi) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\xi) & \cos(\xi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\xi - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\xi) & -\sin(\xi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\xi - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (V.18)$$

On trouve

$$\begin{cases} k.V_{s\alpha} = R_f.i_\alpha + L_f.\frac{di_\alpha}{dt} + V_{r\alpha} \\ k.V_{s\beta} = R_f.i_\beta + L_f.\frac{di_\beta}{dt} + V_{r\beta} \end{cases} \quad (V.19)$$

Ainsi la puissance active et réactive s'exprime dans le repère $\alpha\beta$

$$\begin{cases} P = V_{r\alpha}.i_\alpha + V_{r\beta}.i_\beta \\ Q = V_{r\alpha}.i_\beta - V_{r\beta}.i_\alpha \end{cases} \quad (V.20)$$

On choisit un référentiel d'axe α, β tel que $V_{r\alpha}=0$,

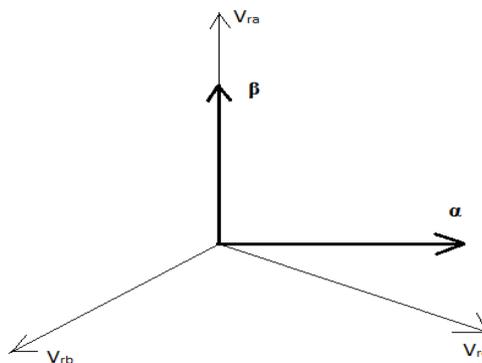


Fig. V.20 Choix du référentiel.

La puissance active et réactive s'exprime par :

$$\begin{cases} P = V_{r\beta}.i_\beta \\ Q = -V_{r\beta}.i_\alpha \end{cases} \quad (V.21)$$

Et leurs dérivées par

$$\left(\begin{array}{l} \frac{dP}{dt} = \dot{P} = V_{r\beta} \cdot \frac{di_\beta}{dt} \\ \frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = -V_{r\beta} \cdot \frac{di_\alpha}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{V.22})$$

En remplaçant (V.19) dans (V.22) respectivement et en tenant compte de la condition de convergence, les commandes sont alors exprimées par :

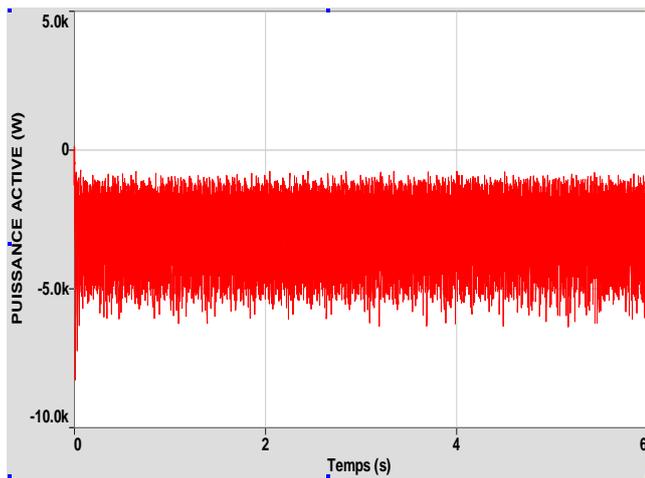
$$V_{s\alpha} = \frac{1}{k} \cdot (V_{r\alpha} - R_f \cdot i_\alpha - \frac{L}{V_{r\beta}} \cdot k_2 \cdot \text{sign}(s_2)) \quad (\text{V.23})$$

$$V_{s\beta} = \frac{1}{k} \cdot (V_{r\beta} - R_f \cdot i_\beta + \frac{L}{V_{r\beta}} \cdot k_1 \cdot \text{sign}(s_1)) \quad (\text{V.24})$$

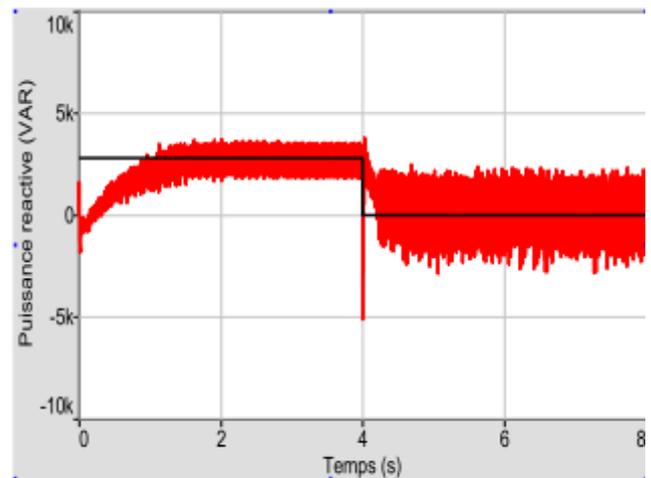
V.5.2.3 Résultats de simulation

Les essais sont effectués dans les conditions suivantes :

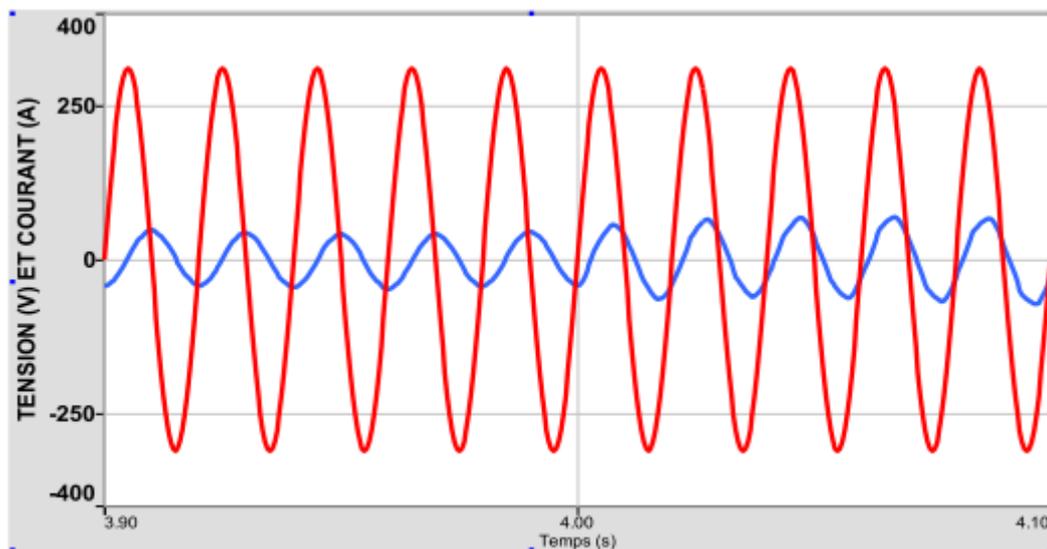
- Le réseau est équilibré.
- L'onduleur et le transformateur n'induisent pas des pertes.
- la référence de la puissance active et celle de la puissance réactive sont imposées par des valeurs fixes.



(a)



(b)



(c)

Fig. V.21 Résultat de simulation en boucle fermée

(a) Puissance active transitée au réseau, (b) Puissance réactive transitée au réseau, (c) Tension et courant pour $Q_{ref} \neq 0$ et à $t=4s$; $Q_{ref} = 0$.

Les résultats de simulation confirment bien le bon fonctionnement de la liaison au réseau et de la commande.

La puissance réactive suit bien la variation de la référence imposée. Le temps de réponse est très faible, néanmoins les oscillations sont très forte, dues au choix des paramètres k_1 et k_2 .

Pour un $Q_{ref} = 3$ kVAR, la tension et le courant sont presque en quadrature ce qui induit un très mauvais facteur de puissance. En imposant une énergie réactive nulle ($Q_{ref} = 0$ kVAR), le déphasage entre la tension et le courant tend vers 0, ce qui a pour effet de minimiser l'énergie réactive transitée, et par suit d'augmenter le facteur de puissance.

Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle de couplage de la chaîne de production éolienne-SRG au réseau été présenté. Nous avons étudié la structure de l'onduleur à trois niveaux, et la stratégie triangulo-sinusoidale. Les résultats ont montré l'intérêt de cet onduleur de monter en tension et en puissance et de la stratégie MLI dans le filtrage des harmoniques en jouant sur l'indice de modulation m .

L'analyse des harmoniques nous a permis de déterminer les seuils tolérance donnés par les normes de la CEI afin de réaliser un couplage licite.

Le couplage direct de la génératrice avec le réseau engendre un mauvais facteur de puissance, ce qui intolérable par le réseau. Ceci conduit à la nécessité d'un contrôle de l'énergie. Pour cela nous avons utilisé la commande par mode de glissement qui est une commande robuste. Celle-ci nous a permis d'imposer une puissance réactive désirée et d'assurer un transfert de puissance optimale, et donc satisfaire les conditions normales d'un couplage au réseau.

Conclusion Générale.

Le travail effectué dans ce projet avait comme objectif la modélisation et l'analyse des performances d'une SRG 12/8 utilisée pour la production de l'énergie éolienne, ainsi que l'étude du couplage au réseau électrique.

A cet effet, nous avons proposé un modèle de la machine en utilisant le Logiciel SIMPLORER® qui s'est avéré très pratique et très intéressant pour la modélisation des systèmes électriques. La modélisation de la génératrice a été effectuée en ne tenant pas compte de la saturation de la machine, et en se basant sur un modèle linéaire de l'inductance. Ce modèle simplifié peut être amélioré en proposant un modèle plus réel mais plus complexe en tenant compte de la saturation et de la forme réelle des caractéristiques magnétiques de la machine. Celles-ci peuvent être calculées par EF ou déterminées expérimentalement.

Par ailleurs, la simulation du fonctionnement de la SRG pour les faibles et grandes vitesses nous a permis d'analyser les caractéristiques d'une SRG et d'effectuer une étude de l'influence des paramètres de commande sur les performances du système pour différents régimes de vitesse. Cette étude, nous a, ainsi, permis de déterminer les paramètres de commande optimum de la génératrice.

Dans la dernière partie de ce travail, un modèle de couplage au réseau a été proposé, en premier lieu. Nous avons, alors, proposé un modèle de l'onduleur à trois niveaux de type NPC et sa commande en MLI triangulo-sinusoidale. Nous avons, ensuite, effectué une analyse d'harmonique qui nous a permis de dimensionner un filtrage permettant d'améliorer la qualité d'énergie électrique à fournir au réseau. En fin, après l'étude des échanges directs des puissances avec le réseau électrique, nous avons proposé une commande en mode de glissement pour le contrôle de la puissance réactive fournie au réseau dans le but d'améliorer le facteur de puissance.

En perspectives, ce travail peut être amélioré en proposant un modèle qui tiendrait compte de la saturation afin de mieux représenter le fonctionnement réel de la génératrice. Concernant la commande, il serait judicieux de prendre en considération la régulation de la tension de bus continue dans la commande de puissance pour mieux maîtriser les échanges de puissance et diminuer les harmoniques.

Annexe

Chapitre I

Statistiques détaillées de la production éolienne mondiale en 2010 [5] :

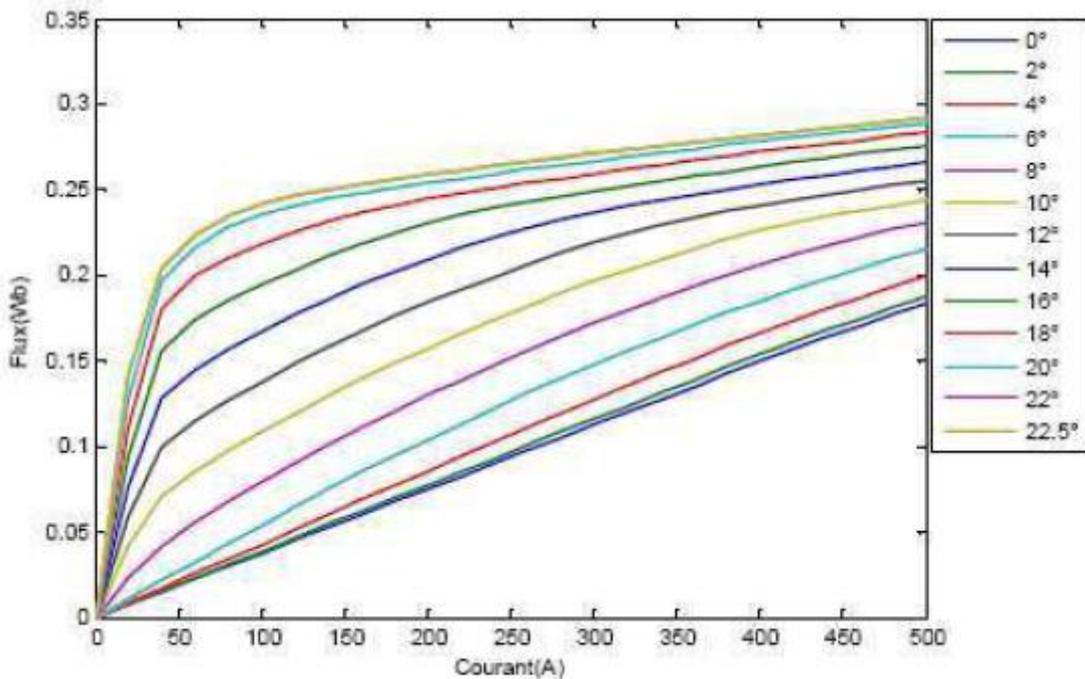
Position 2010	Country / Region	Total capacity end 2010 [MW]	Added capacity 2010 [MW]	Growth rate 2010 [%]	Position 2009	Total capacity end 2009 [MW]	Total Capacity end 2008 [MW]	Total Capacity end 2007 [MW]	Total Capacity end 2006 [MW]
1	China	44.733,0	18.928,0	73,3	2	25.810,0	12.210,0	5.912,0	2.599,0
2	USA	40.180,0	5.600,0	15,9	1	35.159,0	25.237,0	16.823,0	11.575,0
3	Germany	27.215,0	1.551,0	6,0	3	25.777,0	23.897,0	22.247,4	20.622,0
4	Spain	20.676,0	1.527,2	8,0	4	19.149,0	16.689,0	15.145,1	11.630,0
5	India	13.065,8	1.258,8	10,7	5	11.807,0	9.587,0	7.850,0	6.270,0
6	Italy	5.797,0	950,0	19,6	6	4.850,0	3.736,0	2.726,1	2.123,4
7	France	5.660,0	1.086,0	23,7	7	4.574,0	3.404,0	2.455,0	1.567,0
8	United Kingdom	5.203,8	1.111,8	27,2	8	4.092,0	3.195,0	2.389,0	1.962,9
9	Canada	4.008,0	690,0	20,8	11	3.319,0	2.369,0	1.846,0	1.460,0
10	Denmark	3.734,0	309,0	8,9	10	3.465,0	3.163,0	3.125,0	3.136,0
11	Portugal	3.702,0	345,0	10,3	9	3.357,0	2.862,0	2.130,0	1.716,0
12	Japan	2.304,0	211,0	10,1	13	2.083,0	1.880,0	1.528,0	1.309,0
13	The Netherlands	2.237,0	15,0	0,7	12	2.223,0	2.235,0	1.747,0	1.559,0
14	Sweden	2.052,0	603,8	41,7	15	1.448,2	1.066,9	831,0	571,2
15	Australia	1.880,0	3,0	0,2	14	1.877,0	1.494,0	817,3	817,3
16	Ireland	1.428,0	118,0	9,0	16	1.310,0	1.027,0	805,0	746,0
17	Turkey	1.274,0	477,5	59,9	19	796,5	333,4	206,8	64,6
18	Greece	1.208,0	123,0	11,3	17	1.086,0	989,7	873,3	757,6
19	Poland	1.107,0	382,0	52,7	20	725,0	472,0	276,0	153,0
20	Austria	1.010,6	16,0	1,6	18	995,0	994,9	981,5	964,5
21	Brazil	920,0	320,0	53,3	21	600,0	338,5	247,1	236,9
22	Belgium	886,0	340,0	62,0	22	548,0	383,6	286,9	194,3
23	Romania	591,0	577,0	4.121,4	55	14,0	7,0	7,8	2,8
24	Egypt	550,0	120,0	27,6	26	435,0	390,0	310,0	230,0
25	Mexico	521,0	104,5	25,1	27	416,8	85,0	85,0	84,0
26	Chinese Taipeh	518,7	82,6	18,9	24	436,0	358,2	279,9	187,7
27	New Zealand	506,0	8,8	1,8	23	497,0	325,3	321,8	171,0
28	Norway	434,6	18,4	4,3	25	431,0	429,0	333,0	325,0
29	Korea (South)	379,3	48,9	14,0	28	348,4	278,0	192,1	176,3
30	Bulgaria	374,5	198,0	112,2	30	176,5	157,5	56,9	36,0
31	Hungary	295,0	94,0	46,8	31	201,0	127,0	65,0	60,9
32	Morocco	286,0	33,0	13,0	29	253,0	124,0	125,2	64,0
33	Czech Republic	215,0	24,0	12,6	32	191,0	150,0	116,0	56,5
34	Finland	197,0	52,0	35,4	33	147,0	143,0	110,0	86,0
35	Chile	170,0	2,6	1,5	39	167,6	20,1	20,1	2,0
36	Lithuania	154,0	63,0	69,2	36	91,0	54,4	52,3	55,0
37	Estonia	149,0	6,9	4,8	34	142,3	78,3	58,6	33,0
38	Costa Rica	123,0	0,0	0,0	35	123,0	74,0	74,0	74,0
39	Iran	100,0	18,0	22,0	38	82,0	82,0	66,5	47,4
40	Ukraine	87,4	0,6	0,7	37	90,0	90,0	89,0	85,6
41	Cyprus	82,0	82,0	∞	0	0,00	0,0	0,0	0,0
42	Croatia	69,8	43,0	161,0	46	26,7	18,2	17,2	17,2
43	Argentina	54,0	25,3	88,2	43	28,7	29,8	29,8	27,8
44	Tunisia	54,0	0,0	0,0	44	29,7	20,7	20,7	20,7

Position 2010	Country / Region	Total capacity end 2010 [MW]	Added capacity 2010 [MW]	Growth rate 2010 [%]	Position 2009	Total capacity end 2009 [MW]	Total Capacity end 2008 [MW]	Total Capacity end 2007 [MW]	Total Capacity end 2006 [MW]
45	Luxembourg	42,0	7,0	19,8	41	35,3	35,3	35,3	35,3
46	Switzerland	42,0	24,4	138,6	53	17,6	13,8	11,6	11,6
47	Nicaragua	40,0	0,0	0,0	40	40,0	0,0	0,0	0,0
48	Philippines	33,0	0,0	0,0	42	33,0	25,2	25,2	25,2
49	Latvia	31,0	2,0	7,0	45	28,5	26,9	27,4	27,4
50	Vietnam	31,0	22,3	254,3	57	8,8	1,3	0,0	0,0
51	Uruguay	30,5	10,0	48,8	50	20,5	20,5	0,6	0,2
52	Jamaica	29,7	0,0	0,0	52	54,0	20,0	20,0	20,0
53	Netherlands Antilles	24,3	0,0	0,0	47	24,3	12,3	12,3	12,0
54	Guadeloupe	20,5	0,0	0,0	49	20,5	20,5	20,5	20,5
55	Colombia	20,0	0,0	0,0	51	20,0	19,5	19,5	19,5
56	Russia	15,4	1,2	8,6	54	14,0	16,5	16,5	15,5
57	Guyana	13,5	0,0	0,0	56	13,5	13,5	13,5	13,5
58	Cuba	11,7	4,5	62,5	58	7,2	7,2	2,1	0,5
59	South Africa	10,0	2,0	25,0	48	8,0	21,8	16,6	16,6
60	Israel	6,0	0,0	0,0	59	6,0	6,0	6,0	7,0
61	Slovakia	6,0	0,0	0,0	60	6,0	6,0	5,0	5,0
62	Pakistan	6,0	0,0	0,0	61	6,0	6,0	0,0	0,0
63	Faroe Islands	4,0	0,0	0,0	62	4,0	4,1	4,1	4,1
64	Cape Verde	2,8	0,0	0,0	63	2,8	2,8	2,8	2,8
65	Ecuador	2,5	0,0	0,0	64	2,5	4,0	3,1	0,0
66	Nigeria	2,2	0,0	0,0	66	2,2	2,2	2,2	2,2
67	Belarus	1,9	0,0	0,0	67	1,9	1,1	1,1	1,1
68	Antarctica	1,6	0,0	0,0	68	1,6	0,6	0,0	0,0
69	Jordan	1,5	0,0	0,0	69	1,5	1,5	1,5	1,5
70	Indonesia	1,4	0,0	0,0	70	1,4	1,2	1,0	0,8
71	Mongolia	1,3	0,0	0,0	65	1,3	2,4	0,0	0,0
72	Martinique	1,1	0,0	0,0	71	1,1	1,1	1,1	1,1
73	Falkland Islands	1,0	0,0	0,0	72	1,0	1,0	1,0	1,0
74	Eritrea	0,8	0,0	0,0	73	0,8	0,8	0,8	0,8
75	Peru	0,7	0,0	0,0	74	0,7	0,7	0,7	0,7
76	Kazakhstan	0,5	0,0	0,0	75	0,5	0,5	0,5	0,5
77	Syria	0,4	0,0	0,0	77	0,4	0,4	0,3	0,3
78	Namibia	0,2	0,0	0,0	76	0,5	0,5	0,5	0,3
79	Dominican Republic	0,2	0,0	0,0	78	0,2	0,2	0,0	0,0
80	Dominica	0,2	0,0	0,0	79	0,2	0,2	0,0	0,0
81	North Korea	0,2	0,0	0,0	80	0,2	0,2	0,0	0,0
82	Algeria	0,1	0,0	0,0	81	0,1	0,1	0,0	0,0
83	Bolivia	0,01	0,0	0,0	82	0,01	0,01	0,01	0,01
Total	World	196.629,7	37.642,0	23,56		159.766,4	120.903,0	93.926,8	74.122,0

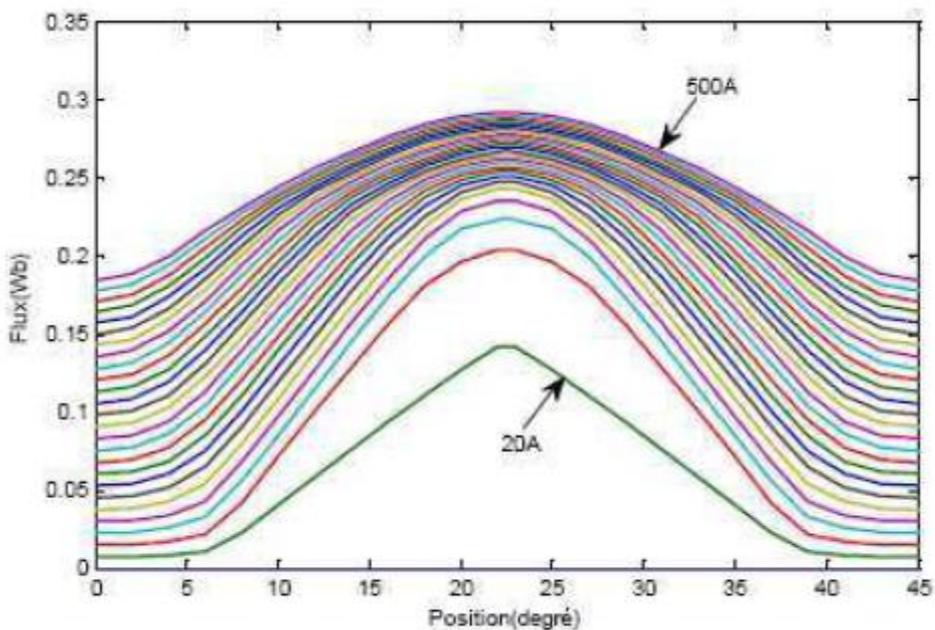
Chapitre II

Caractéristiques statiques du flux magnétique $\phi(\theta, i)$

Les caractéristiques de la variation du flux en fonction du courant pour différentes valeurs de la position angulaire, et en fonction de la position angulaire pour différents courants sont représentées sur les figures suivantes [13].



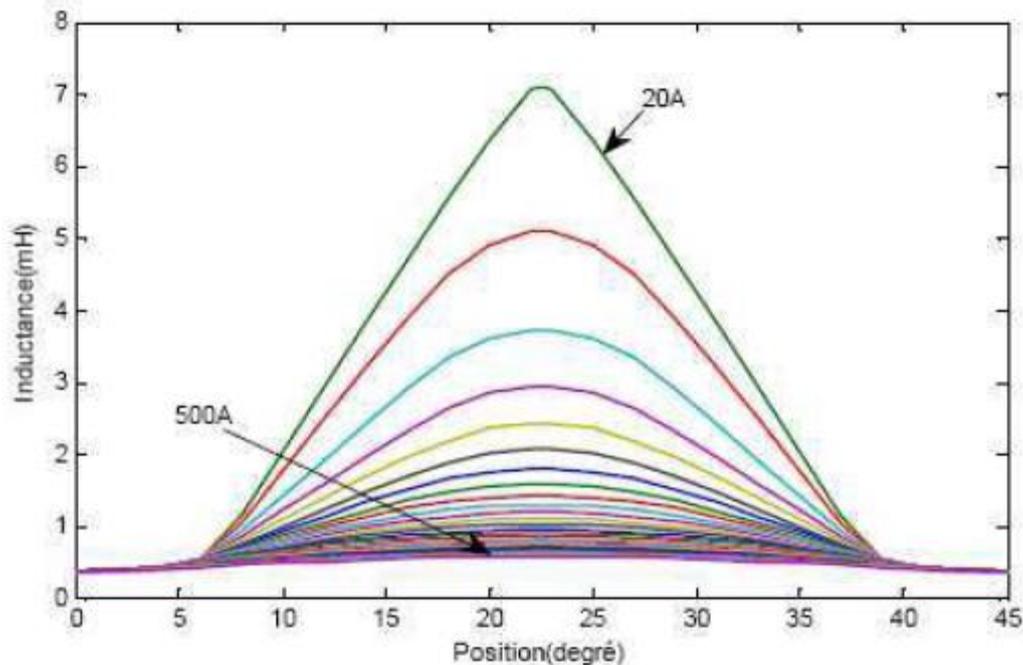
Variation du flux pour chaque position en fonction du courant[13]



Variation du flux pour chaque valeur de courant en fonction de la position.

Caractéristiques statiques de l'inductance

Différentes caractéristiques statiques de l'inductance d'une phase pour chaque valeur de courant en fonction de la position angulaire sont représentées sur la figure suivante [13].



Caractéristiques de l'inductance en fonction de la position pour différents courants

Chapitre V

Matrice de Concordia pour $\xi = \frac{2\pi}{3}$.

$$p\left(\frac{2\pi}{3}\right) = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Valeurs de k_1 et k_2

$$k_1 = 2.5 \cdot 10^6$$

$$k_2 = 3.3 \cdot 10^3$$

Valeurs de R_f et L_f

$$R_f = 1 \text{ ohm}$$

$$L_f = 8.5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Bibliographie

- [1] F. POITIER, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de doctorat, Université de Nantes, décembre 2003.
- [2] Z. GOUICHICHE, Y. LAOUBI "Commande d'une génératrice à réluctance variable utilisée dans une application pour une éolienne autonome" projet de fin d'études, ENP, 2010.
- [3] F. MESSAI "Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réluctance Variable" Mémoire de magistère Université MENTOURI de CONSTANTINE 2009
- [4] "La Chine désormais première puissance éolienne du monde" article par Fabrice Nodé-Langlois du journal LE FIGARO le 03/02/2011.
- [5] World Wind Energy Report 2010, a publication of World Wind Energy association April 2011
- [6] L. HAMANE. "Les ressources éoliennes de l'Algérie", Bulletin des Energies Renouvelables - N°3 Juin 2003, pp 10, 11
- [7] N. KASBADJI MERZOUK. " Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ? " Publication du centre de développement d'énergie renouvelable N°14 Décembre 2008 pp 6, 7
- [8] A. MOUSSA SIDDOU, I. SOUMANA NOUHOU, "Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne", projet de fin d'études, ENSP, 2007.
- [9] S. EL AIMANI, "Modélisation De Différentes Technologies D'éoliennes Intégrées Dans Un Réseau De Moyenne Tension", Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille ,2005
- [10] H. SAHRAOUI, "Contribution à la modélisation et à l'optimisation d'un système de commande d'un Moteur à Reluctance Variable à Double Denture (SRM)", Thèse de Doctorat, ENP, Décembre 2007.
- [11] S. DJEBARRI, O. DAHMANI, "Analyse des performances et commande d'une SRM utilisée en alerno-démarreur pour véhicules", Projet de Fin d'Etudes, ENP, juin 2008.
- [12] J.C. MOUCHOUX, " Etude et réalisation de l'alimentation électronique d'un moteur à réluctance variable pour véhicule électrique –

Expérimentation du moteur”, PFE, Conservatoire National des arts et métiers de Paris, Octobre 1994.

- [13] J. FAIZ, K. MOAYED-ZADEH, “Design of switched reluctance machine for starter/generator of hybrid electric vehicle”, Electric Power Systems, Science Direct, June 2005, pp.153-160.
- [14] Z. PAN, Y. JIN, H. ZHANG “Study on switched reluctance generator”. Journal of Zhejiang University SCIENCE
ISSN 1009-3095. pp 9
- [15] “simulation system SIMPLORER® 6.0 Getting Started“. English edition
pp 86
- [16] H.Chen, "Implementation of a Three-Phase Switched Reluctance Generator System for Wind Power Applications", China.
- [17] Ç. GÜNDOĞAN TÜRKER, F. ERFAN KUYUMCU “The Modelling and The Simulation of The Switched Reluctance Generator“, IEEE Xplore pp 1421 978-1-4244-1766-7/08 July 2008
- [18] O. BOUHALI, “contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d’origine éolienne sur un réseau électrique“. Thèse de Doctorat, ENP, Ecole Centrale de Lille. Avril 2007
- [19] J N. Fiorina “Onduleurs et harmoniques“. cahier technique, Schneider électrique juin 1992 pp 20
- [20] A. DJOUDI “Commandes Non Linéaires d’une Eolienne à Base d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation Pilotée Par un Convertisseur Matriciel“. Mémoire de Magister .ENP 2011
- [21] M. MECHENTEL, M. ABBAS "Modélisation et Commande d’une MADA Alimentée Par une Cascade à Trois Niveaux Application à l’Energie Eolienne" projet de fin d’études, ENP, 2006.