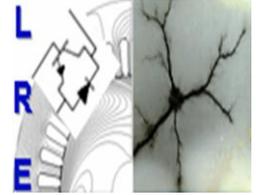


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :
BEN ACHOUR Ali

Intitulé

Modélisation et commande de la SRG en régime saturé

Directeur(s) du mémoire :

SAHRAOUI Houria	Docteur	ENP
MAHMOUDI Mohaned	Professeur	ENP

ENP 2012

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 madame H.SAHRAOUI, docteur à l'Ecole Nationale Polytechnique et à monsieur M.O.MAHMOUDI Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique , de nous avoir confié ce sujet et de la patience et l'aide précieuse qu'ils nous ont toujours apportée jusqu'à l'achèvement de ce travail.

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 surtout dans la réalisation et la concrétisation de ce travail.

Nos vifs remerciements à tous les enseignants d'électrotechnique, ainsi que les électrotechniciens de la promotion 2012.

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

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

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

A mes très chères frères et sœurs à qui je souhaite plein de réussite dans l'avenir.

A MON BINOME Lamine.

A tous les membres de ma famille, mes oncles, mes tentes et tous ceux qui me reconnaîtront.

A mes camarades Hocine, Tarek ECHAWI, Oussama, Hamza, youcef.....

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

ALJ

Table des matières

Introduction générale	1
CHAPITRE I: Etude générale de la SRG	2
I.1 Introduction.....	2
I.2 Structure de la SRM :.....	2
I.3 Principe de fonctionnement	3
I.3.1 Production du couple.....	4
I.3.2 Principe de fonctionnement de la SRM en génératrice	4
I.3.3 Equations générales de la SRM.....	6
I.4 Alimentation de la SRG.....	7
I.4.1 Modes d'excitation de la SRG.....	7
I.4.2 Structure du convertisseur	8
I.4.3 Les stratégies d'alimentation :.....	8
Conclusion :.....	11
CHAPITRE II: Modélisation de la srg en régime saturé	12
Introduction	12
II.1 Modélisation de convertisseur	12
II.2 Modélisation de la SRG 12/8.....	13
II.2.1 Hypothèses	13
II.2.2 Equations de la tension et du couple électromagnétique en régime Saturé.....	13
II.2.3 Caractéristiques de la machine	14
II.2.4 Modèle Simulink	15
II.3 Simulation.....	15
II.3.1 Alimentation plein onde	16
II.3.2 Simulation du fonctionnement par régulation des courants (faibles vitesses)	18
Conclusion.....	20
CHAPITRE III: Etude des performances de la SRG	21
Introduction	21
III.1 Les paramètres qui définissent les performances de la SRG	21
III.2 L'influence de la vitesse.....	22
III.3 Influence de θ_{on} et θ_{off} sur les performances de la SRG.....	23
III.3.1 Influence de θ_{off}	23
III.3.2 L'influence de θ_{on}	24
III.3.3 Influence de θ_{on} et θ_{off} simultanément.....	25
III.4 Tableau de performance.....	30
Conclusion.....	31

CHAPITRE IV: Commande de la SRG en régime saturé	32
Introduction :	32
IV.1 Régulation de la tension du bus continu	32
IV.1.1 Calcul du régulateur PI pour la tension du bus continu.....	33
IV.2 Alimentation d'une charge résistive R par une tension continue (V_{DC})	33
IV.2.1 Simulation.....	33
IV.3 Alimentation d'une charge RL par une tension alternative.....	35
IV.3.1 Modélisation du système	36
IV.4 Analyse harmonique.....	40
IV.4.1 Taux de distorsion (Facteur de distorsion)	42
Conclusion.....	43
Conclusion générale.....	44
Bibliographie :	45

Liste des figures

Figure I.1: Structure de la SRM	2
Figure I.2: Principe de fonctionnement de la SRM.....	3
Figure I.3: Deux fonctionnements de la MRV.....	3
Figure I.4 : Schéma général d'une SRG.....	4
Figure I.5 : Phase de magnétisation.....	5
Figure I.6 : Phase de génération.....	5
Figure I.7 : Valeurs typiques de phase de SRG pendant un cycle de fonctionnement.....	5
Figure I.8: SRG à excitation séparée.....	7
Figure I.9 : Auto excitation mode.....	7
Figure I.10: Convertisseur à demi-pont asymétrique.....	8
Figure I.11: alimentation pleine onde.....	9
Figure I.12 : Alimentation par hystérésis (soft chopping).....	10
Figure I.13 : Alimentation par hystérésis à trois niveaux (hard chopping).....	10
Figure II.1 : Modèle du convertisseur.....	13
Figure II.2: Caractéristique de flux de la machine.....	14
Figure II.3: Caractéristique du couple.....	14
Figure II.4: Bloc Simulink « phase » du courant et FEM.....	15
Figure II.5 : Résultats de Simulation du fonctionnement en pleine onde pour $\Omega=150$ tr/min, $\Omega=173$ tr/min et $\Omega=250$ tr/min , $\theta_{on} = 17.5^\circ$ $\theta_{off} = 28^\circ$ en régime saturée.....	16
Figure II.6 : Résultats de simulation plein onde pour $\Omega=150$ tr/min , $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 28^\circ$ en régime saturé.....	17
Figure II.7: Résultats de simulation plein onde pour $\Omega=250$ tr/min , $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 28^\circ$ en régime saturé.....	17
Figure II.8 : Résultats de simulation technique PWM pour $\Omega=100$ tr/min, $I_{ref}=100A$, $\theta_{on} = 20^\circ$, $\theta_{off} = 38^\circ$ en régime saturé.....	19
Figure II.9: couple total cas PWM pour $\Omega=100$ tr/min. et $\Omega=100$ tr/min, $I_{ref}=100A$	19
Figure III.1 : Influence de la vitesse sur les performances de la SRG, pour $\theta_{on} = 21^\circ$, $\theta_{off} = 30.5^\circ$	22
Figure III.2 : Influence de θ_{off} sur les performances de la SRG, $\theta_{on} = 21.5^\circ$,.....	24
Figure III.3 : Influence de θ_{off} sur les performances de la SRG pour.....	25
Figure III.4 : Influence simultanée de θ_{off} et de θ_{on} sur les performances de la SRG pour la vitesse 150tr/min.....	27
Figure III.5 : Influence simultanée de θ_{off} et de θ_{on} sur les performances de la SRG pour la vitesse 100tr/min régulation par PWM.....	30
Figure IV.1 : Schéma de régulation équivalent.....	32
Figure IV.2 : Modèle d'alimentation d'une charge R avec la tension V_{DC}	33
Figure IV.3 : Résultats de simulation pour $R_{dc} = 2 \Omega$, $k_p=1.03$ et $T_i= 32.62$ s.....	34
Figure IV.4 : Résultats de simulation 2 pour $R_{dc}=2 \Omega$, $K_p=2.51$	34
Figure IV.5 : Résultats de simulation 3 pour $R_{dc}=5 \Omega$	35
Figure IV.6: Alimentation d'une charge RL.....	35
Figure IV.7 : Onduleur triphasé a deux niveaux.....	36
Figure IV.8 : Filtre (LC).....	37
Figure IV.9 : Résultats de simulation 1 pour une charge RL avec $m=21$ et $L=0.01$ H.....	39
Figure V.17: Spectres d'harmoniques de la tension et du courant avant le filtre pour la simulation1 ($m=21$).....	41
Figure IV.11: Spectres d'harmoniques de la tension et du courant après le filtre pour la simulation 1 pour $m=21$	41

INTRODUCTION GENERALE

Après presque deux siècles passés dans l'oubli, la SRM revient en force pour prendre sa place à côté des autres machines. Grâce aux progrès prodigieux accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance et le développement spectaculaire de l'informatique, et de la microélectronique ainsi que les découvertes réalisées sur les matériaux, la machine à reluctance variable est devenue une concurrente des machines à champs tournants dans certaines applications industrielles [1,15].

En effet, la SRG présente un grand intérêt dans les applications caractérisées par de larges zones de fonctionnement dans la caractéristique couple-vitesse (éolienne). Elle présente une structure rotorique simple et robuste ce qui la donne des excellentes performances dans des environnements extrêmes. De plus son prix de fabrication et de maintenance est faible par rapport aux autres machines [13] ce qui la rend une candidate importante pour différentes applications telles que les automobiles, la production de l'énergie électrique et le domaine de l'aérospatial [3].

Ce travail comporte quatre chapitres

Dans le premier chapitre une étude générale de la SRG est effectuée, en présentant sa structure, son alimentation (convertisseurs et stratégies d'alimentation) ainsi que les modes de commande.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la SRG en régime saturé. Une modélisation basée sur le modèle du flux de la machine est proposée. Une simulation utilisant la technique « lookup table » est réalisée. Les fonctionnements à faibles et grandes vitesses sont considérés dans ce modèle.

Dans le troisième chapitre, les performances de la SRG en régime saturé sont présentées après une étude de l'influence des paramètres de commande sur ces performances. Une recherche des paramètres d'alimentation et de commande pour un fonctionnement optimal de la SRG est effectuée.

Au quatrième chapitre, la simulation de la régulation de la tension du bus continu de la machine est réalisée, après un dimensionnement judicieux des régulateurs. La simulation est effectuée pour deux types de charges : une charge R en continu, et une charge RL en alternatif.

CHAPITRE I: ETUDE GENERALE DE LA SRG

I.1 Introduction

Le principe de fonctionnement de la SRM est fondamentalement différent de celui des machines classiques (asynchrones et synchrones). Dans ces dernières, la production du couple électromagnétique est régie principalement par la loi de Laplace, du fait que les conducteurs du rotor sont placés dans le champ électromagnétique créé par le stator. Tandis que celui des SRM, est basé essentiellement sur la variation de l'énergie magnétique associée au déplacement du rotor [1,3].

Dans ce chapitre, nous allons présenter brièvement la SRG, sa structure, ses caractéristiques, son principe de fonctionnement ainsi que son alimentation.

I.2 Structure de la SRM :

Le stator et le rotor sont tous les deux dentés, et sont constitués d'un empilage de tôles ferromagnétiques pour réduire l'apparition des courants de Foucault. Les enroulements constituant les phases de la machines sont logés dans les encoches statoriques. On distingue en général, des structures à 3 et à 4 phases et rarement à 5 phases. Le rotor ne comprend ni bobinage ni aimant permanent.

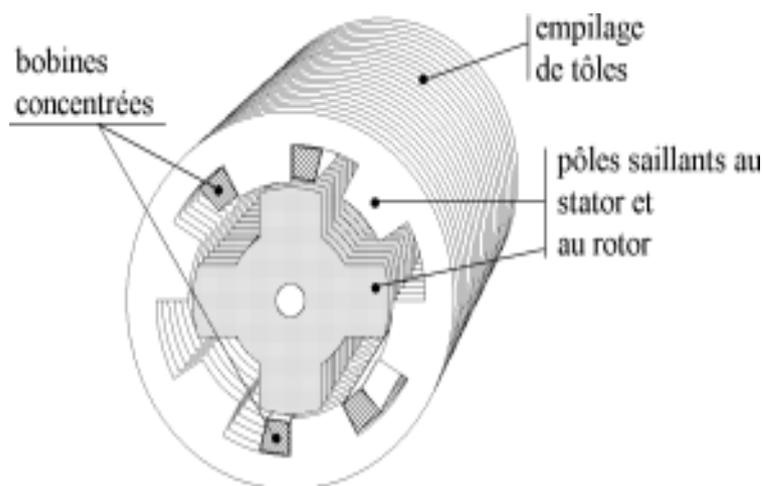


Figure I.1: Structure de la SRM

I.3 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la SRM est similaire à celui des machines à réluctance variables, elle obéisse à la règle de réluctance minimale [3,14].

Le flux de phase oscille entre deux valeurs extrêmes correspondant aux deux positions qui sont la position d'opposition et la position de conjonction.

L'alimentation successive des phases selon la séquence 1, 2, et 3 conduit à un déplacement du rotor dans un sens. Un changement dans l'ordre d'alimentation des phases, par exemple alimentation 1, 3, 2 inversera le sens de rotation du moteur [8].

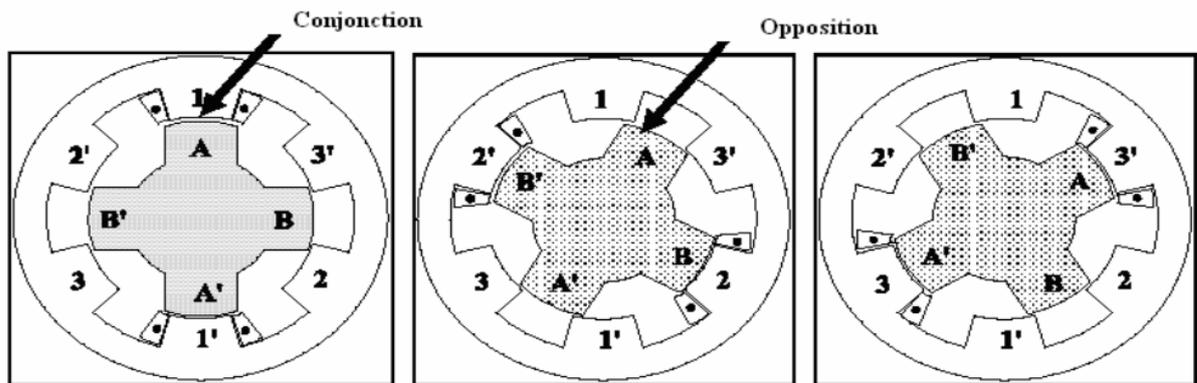


Figure I.2: Principe de fonctionnement de la SRM.

L'alimentation de la machine lors de la phase croissante ou décroissante d'inductance donnera le régime de fonctionnement souhaité [13], (figure I.3):

- moteur ($T_e > 0$) sur la phase croissante de l'inductance $\frac{dL(\theta,i)}{d\theta} > 0$
- générateur ($T_e < 0$) sur la phase décroissante de l'inductance $\frac{dL(\theta,i)}{d\theta} < 0$ [13].

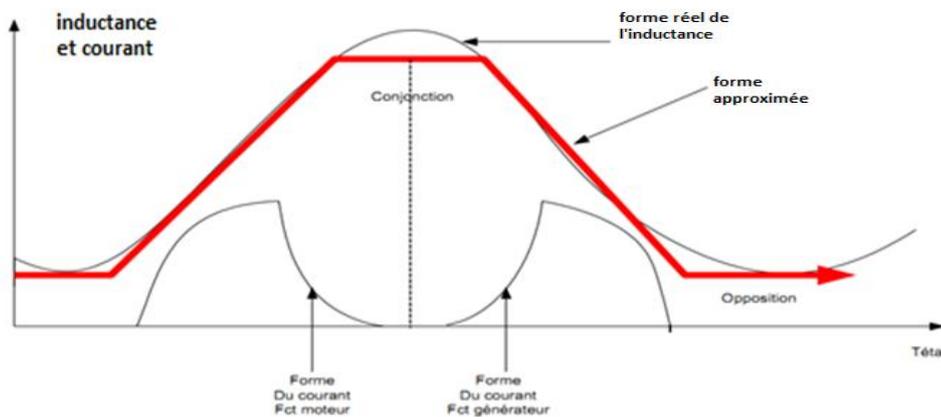


Figure I.3: Deux fonctionnements de la MRV.

I.3.1 Production du couple

Le couple électromagnétique peut être exprimé à partir de la variation de la coénergie magnétique donnée par la relation

$$T_{em} = \frac{\delta w_c}{\delta \theta} \quad (I.1)$$

$$W_c = \int \phi d(NI) = \int \phi Nd(I) = \int L(\theta, i) i di \quad (I.2)$$

Où l'inductance L est une fonction de la position du rotor et du courant et W_c est la coénergie. Si l'inductance varie linéairement avec la position du rotor pour un courant donné, ce qui n'est pas le cas en général, le couple peut s'écrire sous la forme suivante :

$$T_{em} = \frac{dL(\theta)}{d\theta} \cdot \frac{i^2}{2} \quad (I.3)$$

On Remarque que le couple ne dépend pas de la polarité du courant.

I.3.2 Principe de fonctionnement de la SRM en génératrice

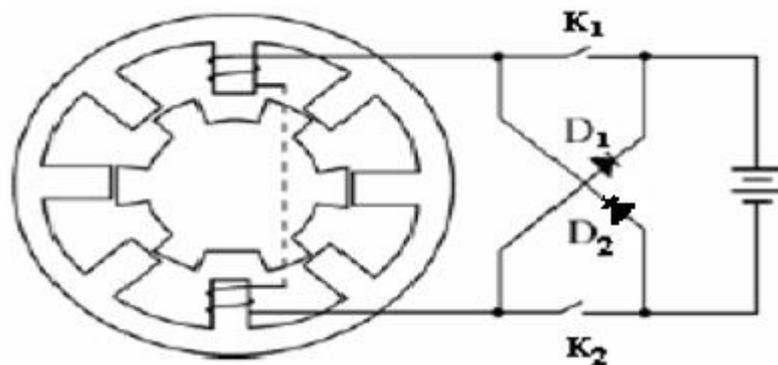


Figure I.4 : Schéma général d'une SRG.

La SRG nécessite une source d'excitation pour produire de l'énergie électrique. Le fonctionnement en génératrice est possible lorsque les phases sont alimentées dans les positions où l'inductance est décroissante. On distingue ainsi deux phases de fonctionnement de la génératrice : la phase de d'excitation ou de magnétisation et la phase de génération.

-Quand les deux interrupteurs K_1 et K_2 sont fermés, l'enroulement statorique est excité ; le système a absorbé l'énergie de la source d'excitation : phase de magnétisation [13].

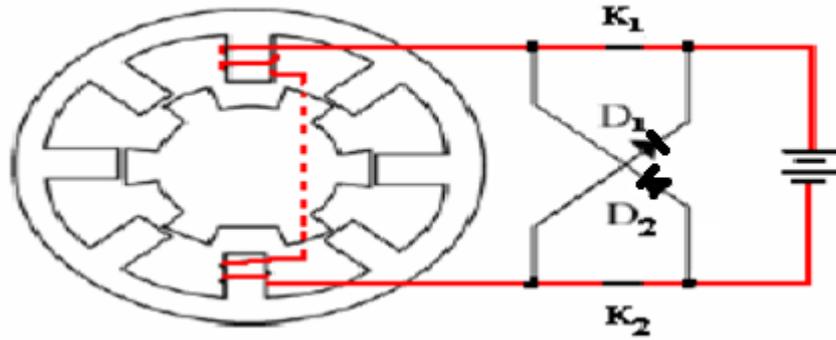


Figure I.5 : Phase de magnétisation.

- Quand K_1 et K_2 sont ouverts, l'enroulement libère l'énergie emmagasinée dans la phase à travers les diodes D_1 et D_2 , le système fournit l'énergie électrique aux charges externes : c'est la phase de génération.

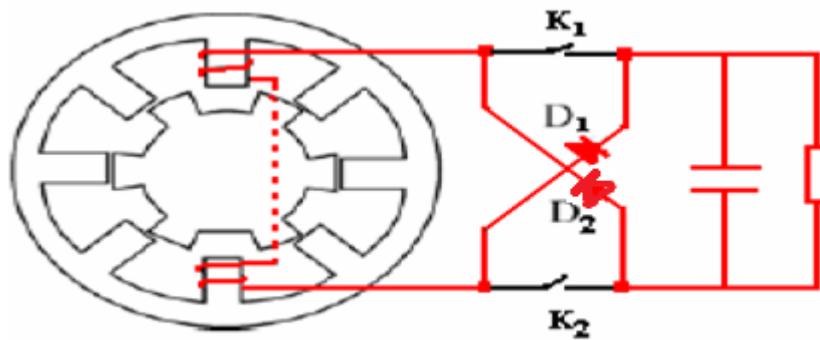


Figure I.6 : Phase de génération.

Les valeurs typiques de courants et angles de commandes sont présentés sur la figure I.7.

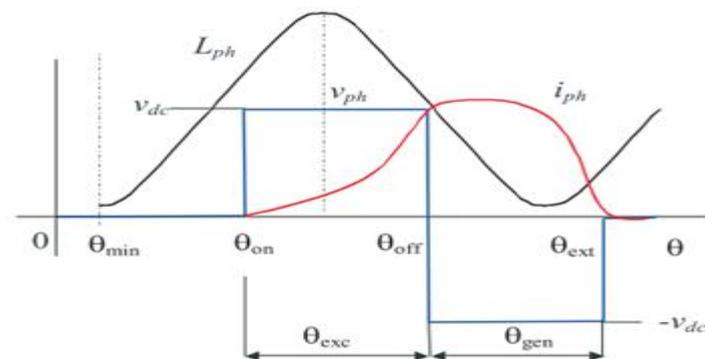


Figure I.7 : Valeurs typiques de phase de SRG pendant un cycle de fonctionnement.

I.3.3 Equations générales de la SRM

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

$$V_j = R_j \cdot i_j(t) + \frac{d\psi_j(t)}{dt} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

$j=1 \dots m$ ou m est le nombre de phase de la machine

V_j : Tension appliquée sur chaque phase.

R_j : la résistance de l'enroulement d'une phase.

$I_j(t)$: Courant dans la phase j .

$\psi_j(t)$: flux produit dans la phase j .

Le flux peut être alors exprimé par:

$$\psi_j(t) = \psi_j(\theta, i) \quad (\text{I.5})$$

Où θ représente l'angle mécanique, il donne la position du rotor par rapport au stator.

$$\frac{d\theta}{dt} = \Omega \quad (\text{I.6})$$

avec Ω la vitesse de rotation de la machine.

Dans le cas non linéaire, le flux dans chaque phase est donné par l'équation:

$$\psi_j(\theta, i) = L(i, \theta) \cdot i \quad (\text{I.7})$$

On peut écrire l'équation de tension sous la forme:

$$V_j = R \cdot i_j + \left(L(\theta, i_j) + \frac{\partial L(\theta, i_j)}{\partial i_j} \cdot i_j \right) \cdot \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial L(\theta, i_j)}{\partial \theta} \cdot \Omega \cdot i_j \quad (\text{I.8})$$

Alors la relation (I.8) peut être réécrite de la manière suivante :

$$V_j = R \cdot i_j + \left(L(\theta, i_j) + \frac{\partial L(\theta, i_j)}{\partial i_j} \cdot i_j \right) \cdot \frac{di_j}{dt} + e_j \quad (\text{I.9})$$

Où le premier terme de cette équation représente les chutes ohmiques dans les conducteurs, le second représente les chutes inductives et le dernier terme symbolise la fém de la machine qui est une fonction de la vitesse, du courant ainsi que de la variation de l'inductance en fonction de la position.

$$e_j = \frac{\partial L(\theta, j)}{\partial \theta} \cdot \Omega \cdot i_j \quad (\text{I.10})$$

I.4 Alimentation de la SRG

I.4.1 Modes d'excitation de la SRG

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

-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 [5].

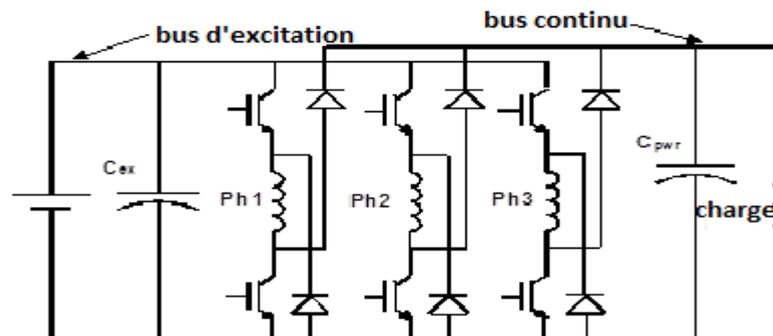


Figure I.8: SRG à excitation séparée

-Dans la SRG auto excitée : l'excitation initiale est fournie par une source extérieure de tension. Quand la tension générée (V_{DC}) atteint sa valeur de régime permanent, la source extérieure est déconnectée. Alors l'excitation sera fournie par la tension produite par la SRG elle-même. Pour ce mode, le volume de système est très réduit et l'efficacité est élevée, parce qu'il n'y a aucune source externe quand la tension est établie. La magnétisation est alors assurée et maintenue par la suite par un condensateur [5].

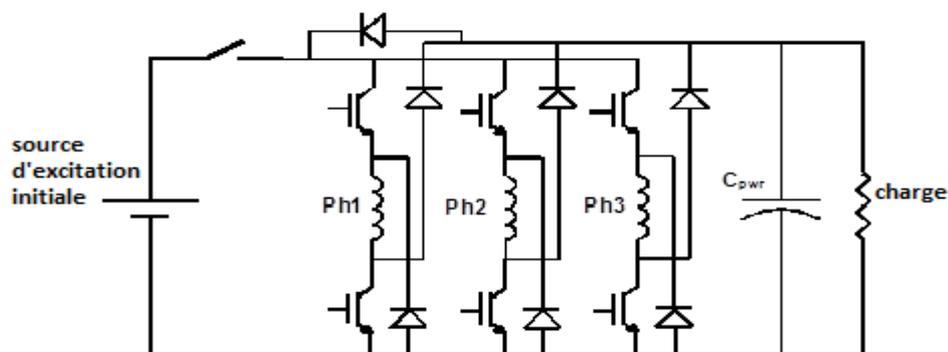


Figure I.9 : Auto excitation mode

I.4.2 Structure du convertisseur

Plusieurs topologies de convertisseurs sont proposées dans la littérature [3,7,9]. La structure la plus utilisée est la demi- pont asymétrique car elle assure une indépendance des phases, ce qui améliore la fiabilité.

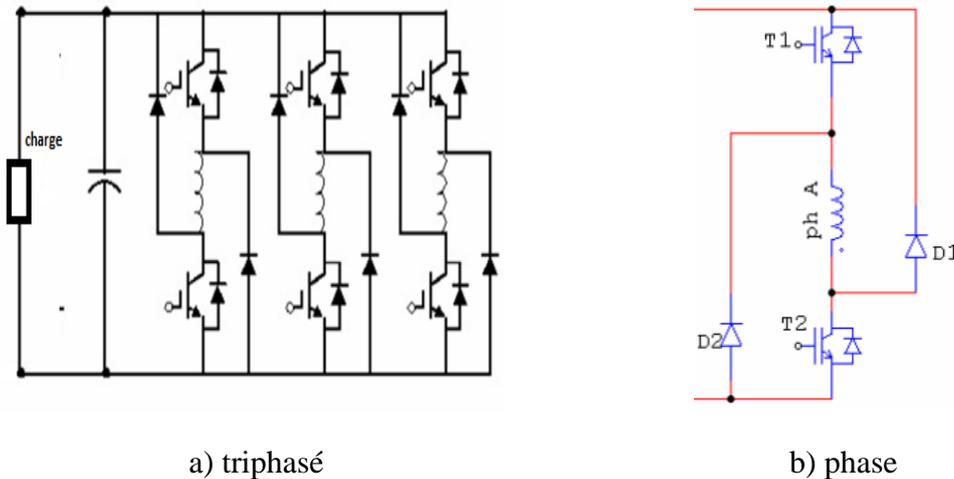


Figure I.10: Convertisseur à demi-pont asymétrique.

Cas	T1	T2	V
1	Bloqué	Bloqué	-V
2	Bloqué	Conducteur	0
3	Conducteur	Bloqué	0
4	Conducteur	Conducteur	+V

Tableau I.1: Etat des interrupteurs et de la tension.

En raison des avantages en conformité avec lesquels AH offre qui lui fait un choix populaire. Il a la capacité de former le courant de phase utilisant les 3 séquences de commutation tel que la tension soit positive, nulle ou négatif [13].

I.4.3 Les stratégies d'alimentation :

La stratégie d'alimentation est régit par la vitesse de rotation.

Si La vitesse est >vitesse de base on utilise la pleine onde. Si non on utilise la régulation du courant

I.4.3.1 Alimentation en plein onde

Dans ce mode d'alimentation chaque phase de la SRG est alimentée périodiquement par des créneaux de tension positive qui commencent et se terminent à des instants bien choisis liés à la forme de l'inductance [11].

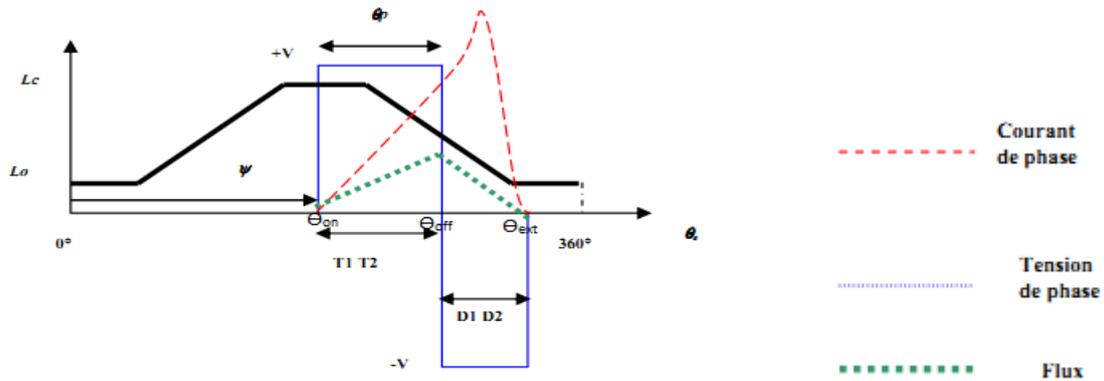


Figure I.11: alimentation pleine onde.

I.4.3.2 Régulation du courant

a) Alimentation par hystérésis :

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

Il faut que la fréquence de commutation des interrupteurs reste compatible avec les possibilités du convertisseur.

On distingue deux techniques d'alimentation par hystérésis :

i. Hystérésis soft chopping

Pour maintenir le courant dans sa bande de hachage, l'interrupteur **T1** fonctionne en hacheur et permet de réguler le courant, tandis que **T2** est utilisé pour la commutation des phases [15].

Pendant la phase de roue libre, il est possible de travailler avec T1 et D1 ou bien avec T2 et D2. On alterne alors entre les deux configurations à fin de limiter les échauffements et les sollicitations des composants. La tension et le courant sont présentés sur la figure I.12

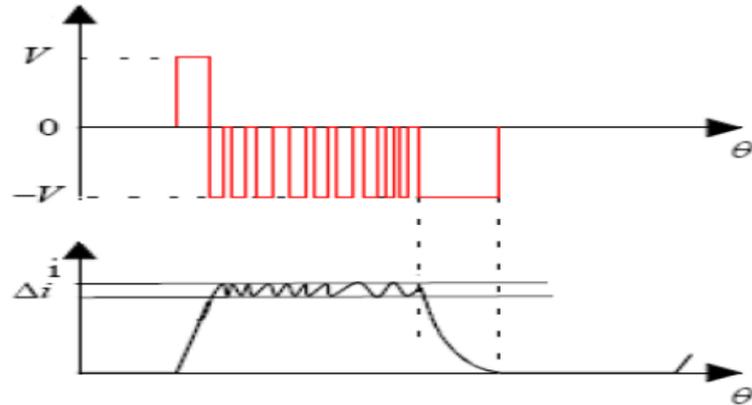


Figure I.12 : Alimentation par hystérésis (soft chopping).

ii. Hystérésis hard chopping

Cette technique utilise les deux IGBTs par phase en même temps pour la régulation du courant, et la commutation des phases. Elle est illustrée par la figure I.13.

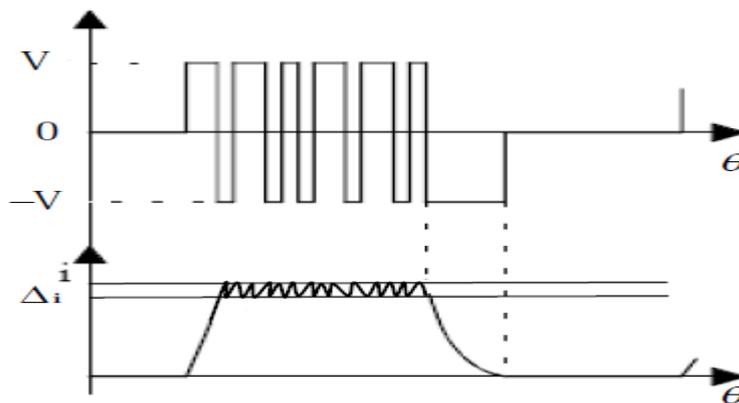


Figure I.13 : Alimentation par hystérésis à trois niveaux (hard chopping).

b) Alimentation par la technique de la PWM

C'est une technique utilisée à basse vitesse (*Pulse Width Modulation*) pour réguler le courant. Elle consiste à commander les IGBTs, de sorte à imposer différents niveaux de tensions avec une fréquence de commutation constante et un rapport cyclique variable qui dépend de l'erreur du courant [12]. Le rapport cyclique se détermine en comparant un signal de référence appelé porteuse à un signal correspondant à l'erreur du courant.

Conclusion :

Les SRGs sont de structure simple et facile à construire. Elles trouvent leurs applications dans plusieurs domaines industrielles et deviennent de plus en plus concurrentes grâce aux avantages qu'elles présentent. En effet, la SRG est actuellement présente dans les éoliennes, et dans les véhicules hybrides.

L'alimentation doit être réalisée à partir d'un convertisseur statique et nécessite un autopilotage qui peut être obtenu par mesure directe (capteur de position) ou indirecte de la position (estimation de la position). Les convertisseurs requis sont unidirectionnels en courant, donc différents de ceux des machines classiques. L'onduleur de base le plus fréquemment utilisé est le demi pont asymétrique, bien que d'autres variantes, ont été proposées pour des applications particulières comme par exemple le C-dump ou R-dump ou le bifilaire.

CHAPITRE II: MODELISATION DE LA SRG EN REGIME SATURE

Introduction

La modélisation de la SRG est complexe à cause des non linéarités introduite par la double saillances de la machine et la saturation [3]. Mais à l'inverse des autres machines, la saturation au niveau des dents statoriques et rotoriques des SRMs est désirable car elle permet une meilleure conversion électromagnétique. Pour cela, la modélisation de la SRM en régime saturé est plus intéressante que le régime non saturé pour l'étude des performances réelles de la machine.

La modélisation de la SRG dans ce régime nécessite la connaissance des caractéristiques de flux ou d'inductance et de la caractéristique du couple électromagnétique en fonction de la position et du courant. Ces caractéristiques peuvent être déterminées en utilisant, soit la méthode des éléments finis, soit des méthodes expérimentales ou une approximation analytique [3].

Dans ce chapitre, on se propose d'établir un modèle non linéaire sous matlab/simulink basé sur le modèle du flux qui nous évite le calcul de dérivées qui est une source d'erreur numérique. Les caractéristiques de flux et le couple électromagnétique en fonction de la position et du courant ont été déterminés par EF dans le cadre d'un autre PFE [15].

II.1 Modélisation de convertisseur

La structure du convertisseur choisie est la structure à pont asymétrique. Cette structure a été choisie pour sa simplicité, sa robustesse et sa fiabilité. Chaque bras du convertisseur comprend deux Transistors IGBTs et deux diodes de récupération.

Dans ce cas on a choisi le mode auto excité. La chute de tension aux bornes des IGBTs est négligée et on a considéré que la capacité Cdc est infinie ce qui rend la tension VDC constante. On n'a pas tenu compte de la période de la première excitation avec la source continue.

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

$$I_{tot}(\theta) = S1.i1(\theta) + S2.i2(\theta) + S3.i3(\theta) \quad (\text{II.1})$$

La tension de phase est donné par $V_j = S_j \cdot V_{DC}$. (II.2)

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

$$S_j = \begin{cases} -1 & \text{si les diodes } D_j \text{ et } D_{j+3} \text{ sont passantes} \\ 0 & \text{si IGBT}_j \text{ et } D_j \text{ ou IGBT}_{j+3} \text{ et } D_{j+3} \text{ sont passants} \\ +1 & \text{si les IGBT sont passants} \end{cases} \quad \text{avec } j=1 : 3 \quad (\text{II.3})$$

La tension du bus continu V_{DC} et le courant traversant la charge I_{dc} sont liés par l'expression

$$\text{suivante :} \quad \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{-(i_{tot} + i_{dc})}{C_{dc}} \quad (\text{II.4})$$

Le modèle du convertisseur est présenté sur la figure II.1.

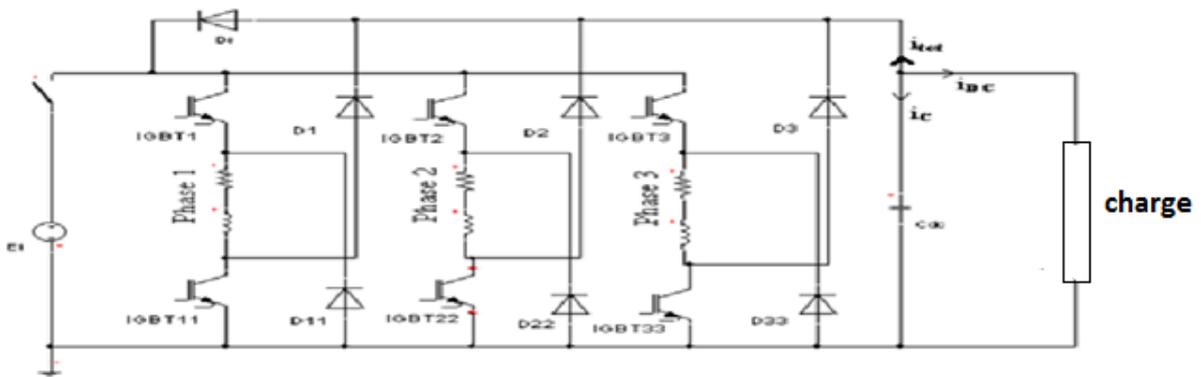


Figure II.1 : Modèle du convertisseur.

II.2 Modélisation de la SRG 12/8

II.2.1 Hypothèses

Pour simplifier la modélisation on a admet les hypothèses suivantes :

- Les paramètres de chaque phase sont identiques.
- Les phases sont découplées magnétiquement.
- les courants induits sont négligés (circuit magnétique feuilleté).
- La résistance est indépendante de la température.

II.2.2 Equations de la tension et du couple électromagnétique en régime Saturé

L'équation électrique peut être exprimée par la relation suivante :

$$V_j = R_j * i_j (t) + \frac{d \Psi_j(t)}{dt} \quad (\text{II.1})$$

Et l'équation du couple électromagnétique :

$$T_{em} = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} \quad (II.2)$$

$$T_{tot} = \sum_{i=1}^3 T_{emj} \quad (II.3)$$

L'équation de la fém est :

$$F_{ém} = \frac{\partial \Psi_j}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (II.4)$$

La puissance électromagnétique : $P_{éle} = T_{tot} \cdot \Omega$ (II.5)

Avec $\Psi_j(t)$ est le flux crée par phase et W_c est la coénergie.

II.2.3 Caractéristiques de la machine

Les caractéristiques de la machine sont présentées sur les figures II.2 et II.3.

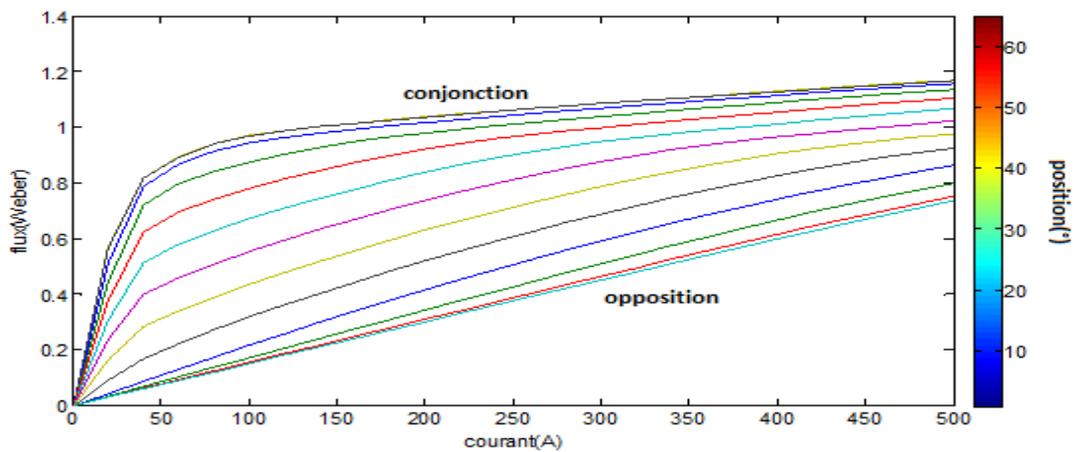


Figure II.2: Caractéristique de flux de la machine.

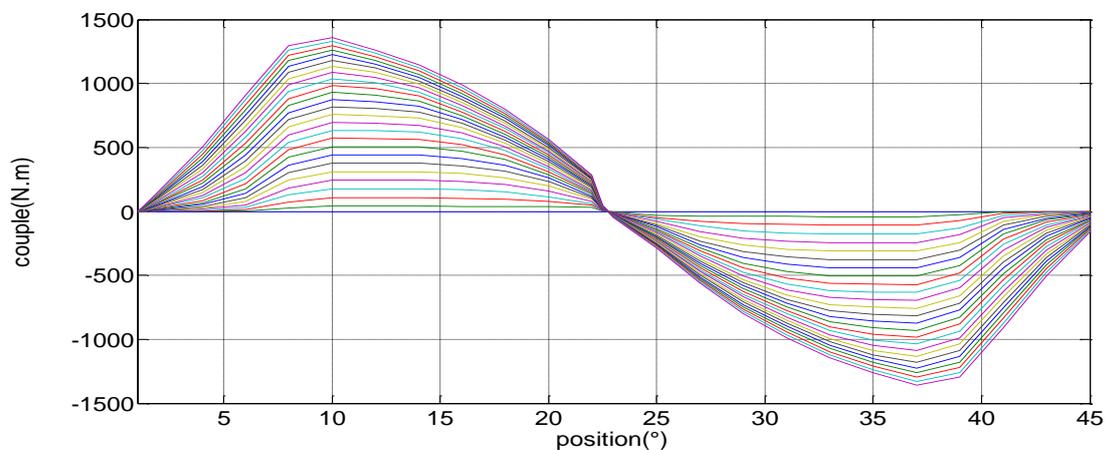


Figure II.3: Caractéristique du couple.

II.2.4 Modèle Simulink

La table de flux en fonction de la position et du courant est utilisée pour déterminer le courant et la fem. La relation $\Psi = \int (V - R * i) dt$ nous permet de calculer le flux à partir du courant et de la tension. Une interpolation cubic-spline est utilisée afin d'améliorer la précision.

Pour le calcul du courant, de la fem et du couple on a utilisé la technique « look up table 2D » qui nous a permis d'approximer les relations du flux/courant/position et couple/courant/position et fem/courant/position par l'utilisation de l'algorithme d'interpolation cubics-spline qui donne une meilleure précision par rapport à l'interpolation linéaire.

Le modèle du courant et de fem est présenté sur la figure II.4.

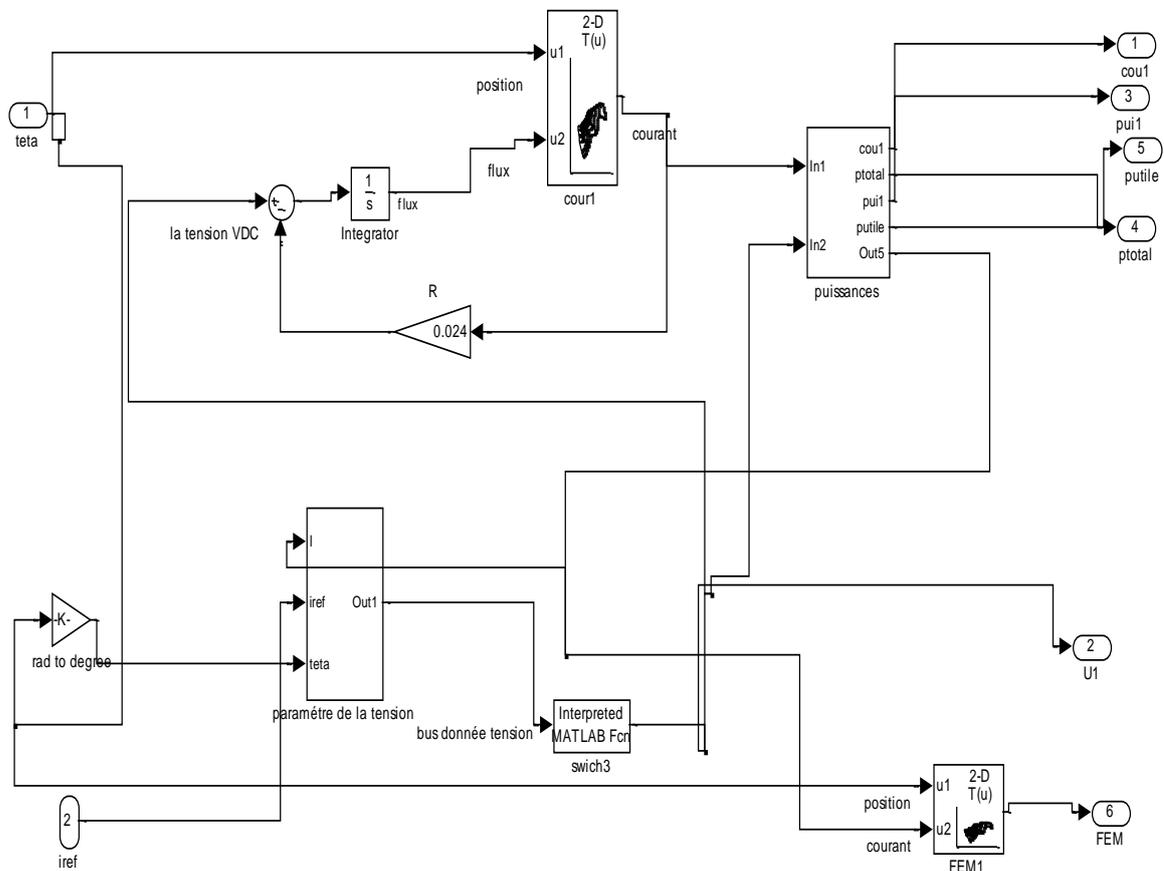


Figure II.4: Bloc Simulink « phase » du courant et FEM.

II.3 Simulation

La simulation du fonctionnement de la SRG en régime permanent saturé pour différentes vitesses d'entraînement est effectuée pour les faibles et grandes vitesses de fonctionnement correspondant respectivement à l'alimentation régulée en courant et l'alimentation pleine onde.

Les caractéristiques nominales de la SRG 12/8 utilisée sont :

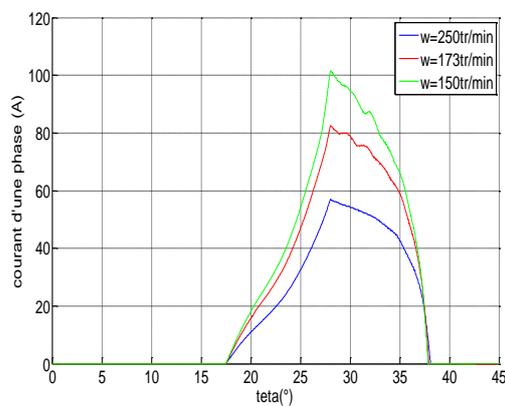
$$P_n=4,5 \text{ kW}, V_n=42 \text{ V}, I_n=107 \text{ A}, \Omega_b=140 \text{ tr/mn} [18].$$

II.3.1 Alimentation plein onde

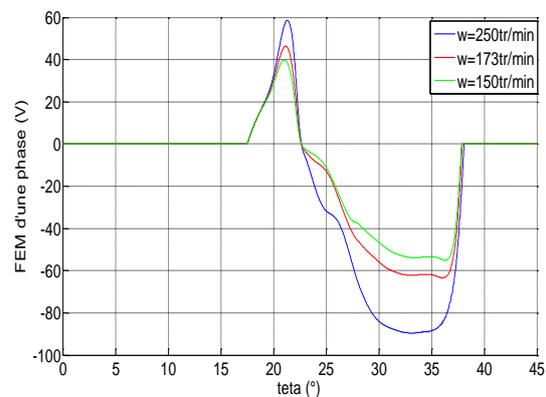
II.3.1.1 Pour une phase

La simulation est effectuée pour trois vitesses de fonctionnement: $\Omega = 250 \text{ tr/min}$, $\Omega = 173 \text{ tr/min}$ et $\Omega = 150 \text{ tr/min}$ et pour $\theta_{on} = 17.5^\circ$ et $\theta_{off} = 28^\circ$.

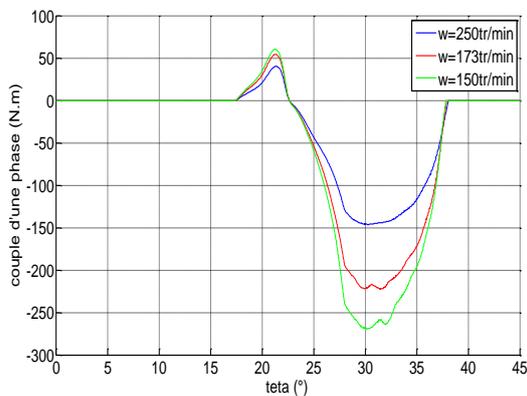
Les résultats de simulation sont présentés sur les figures III.6.



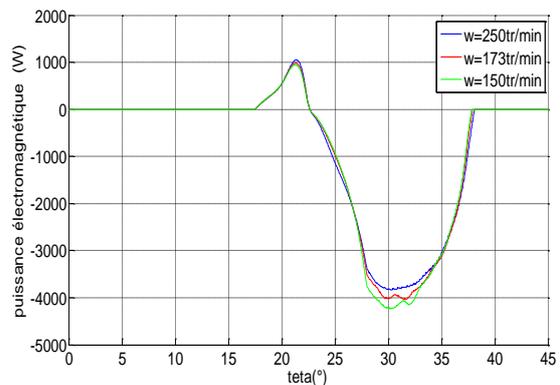
a) Courant de phase



b) Fém de phase



c) Couple de phase



d) Puissance électromagnétique

Figure II.5 : Résultats de Simulation du fonctionnement en pleine onde pour $\Omega= 150 \text{ tr/min}$, $\Omega=173 \text{ tr/min}$ et $\Omega= 250 \text{ tr/min}$, $\theta_{on} = 17.5^\circ$ $\theta_{off} = 28^\circ$ en régime saturé.

II.3.1.2 Pour les trois phases

La simulation est effectuée pour deux vitesses de fonctionnement: $\Omega = 250$ tr/min, et $\Omega = 150$ tr/min et pour $\theta_{on} = 17.5^\circ$ et $\theta_{off} = 28^\circ$.

Les résultats de simulation sont présentés sur les figures III.7.et III.8.

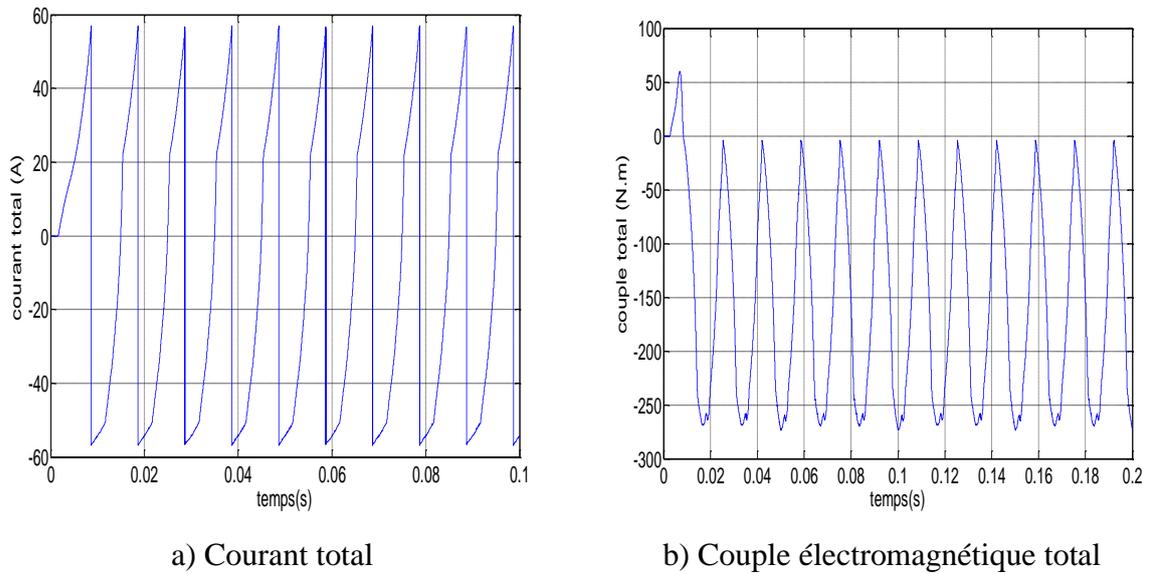


Figure II.6 : Résultats de simulation plein onde pour $\Omega=150$ tr/min , $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 28^\circ$ en régime saturé.

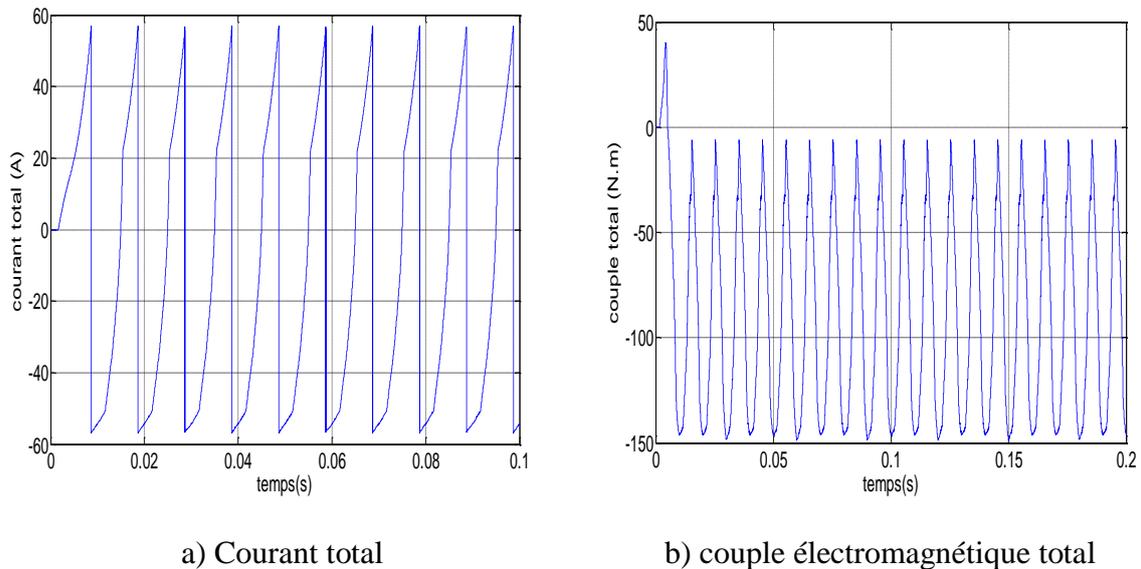


Figure II.7: Résultats de simulation plein onde pour $\Omega=250$ tr/min , $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 28^\circ$ en régime saturé.

Analyse des résultats :

Les courants sont presque identiques à ceux obtenus par le modèle linéaire.

On remarque que le courant, le couple et la puissance électromagnétique diminuent avec l'augmentation de la vitesse. Par contre la fém augmente.

Le couple, la FEM et la puissance électromagnétique ont augmenté considérablement par rapport au cas linéaire. Ceci est dû à une meilleure conversion électromagnétique en régime saturé.

Le couple électromagnétique total obtenu dans ce cas est très ondulé.

II.3.2 Simulation du fonctionnement par régulation des courants (faibles vitesses)

La simulation du fonctionnement de la machine en alimentation courant est réalisée pour les deux modes hystérésis, le « hard chopping » et le « soft chopping » et la PWM pour deux vitesses 70 et 100 tr/min et deux courants de références I_{ref} 100A et 60A.

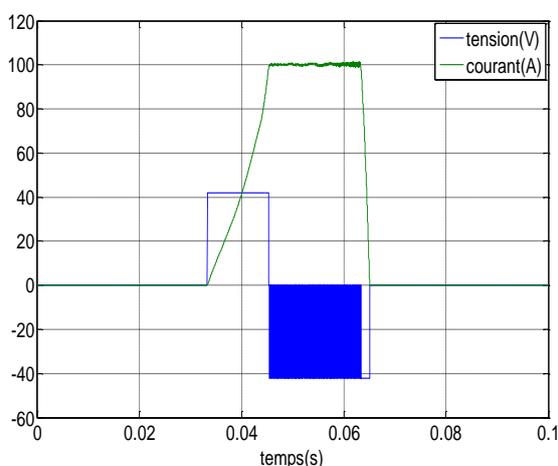
Les trois techniques donnent des résultats similaires Pour cela on va présenter la PWM.

Un signal triangulaire de 5 kHz est utilisé comme modulant et le signal de référence est l'erreur ($I-I_{ref}$).

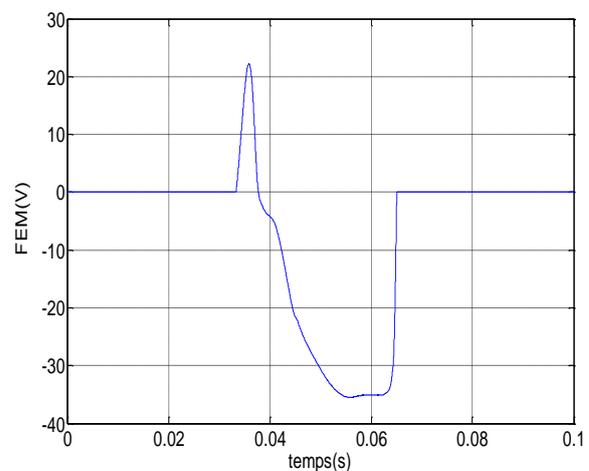
La simulation est réalisée pour deux vitesses dans les conditions suivantes :

$$\theta_{on} = 20^\circ, \theta_{off} = 38^\circ, I_{ref}=100A, \Delta I_{ref} = 2A.$$

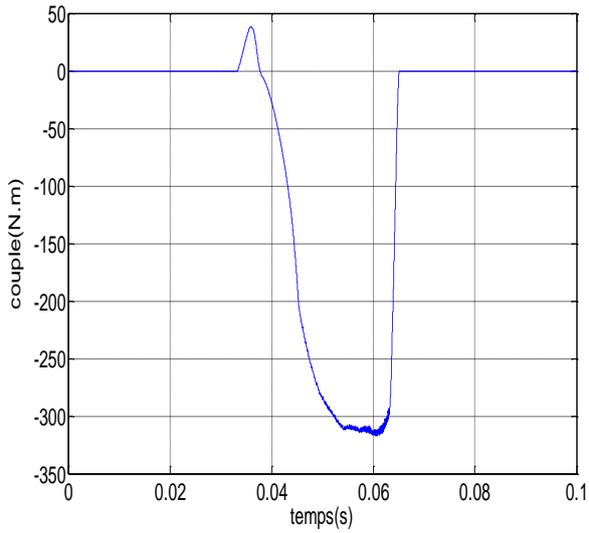
Les résultats de simulations dans le cas $\Omega=100$ tr/min pour une phase sont représentés sur les figures II.8 et II.9.



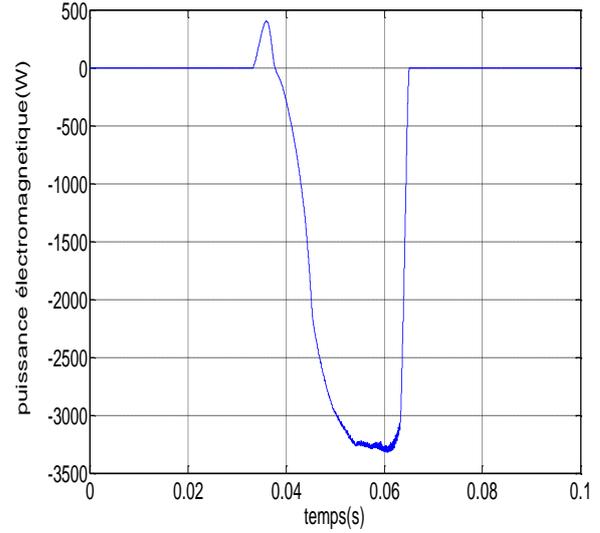
a) Tension et courant



b) Fém de phase

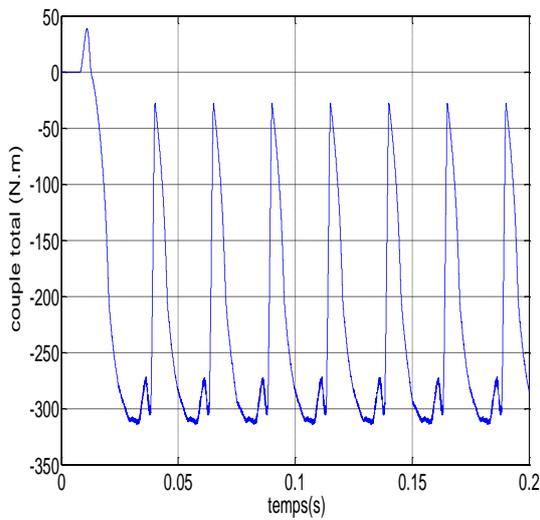


c) Couple électromagnétique

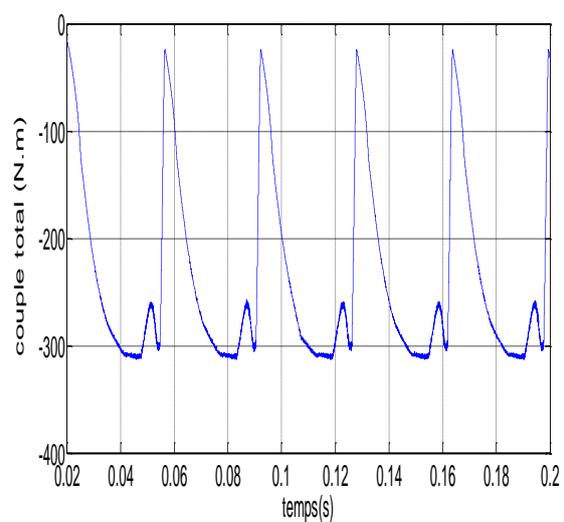


d) Puissance électromagnétique

Figure II.8 : Résultats de simulation technique PWM pour $\Omega=100$ tr/min, $I_{ref}=100A$, $\theta_{on} = 20^\circ$, $\theta_{off} = 38^\circ$ en régime saturé.



a) pour $\Omega=100$ tr/min



b) pour $\Omega=70$ tr/min

Figure II.9: couple total cas PWM pour $\Omega=100$ tr/min. et $\Omega=100$ tr/min, $I_{ref}=100A$

Analyse des résultats

Les trois types de régulation testés conduisent à des résultats similaires.

Les deux techniques de régulation de courant permettent de maintenir le courant constant ainsi que le couple électromagnétique et la puissance électromagnétique.

Le couple électromagnétique est plus important que dans le cas linéaire.

La puissance et le couple dépendent de I_{ref} , ils augmentent avec l'augmentation de I_{ref} .

Les résultats de simulation nous a montré que la régulation du courant par hystérésis est intéressante pour imposer un courant constant .mais la PWM est plus intéressante pour le contrôle de la fréquence de commutation.

Conclusion

La simulation de fonctionnement en régime saturé nous a montré que qualitativement les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus par le modèle linéaire. Mais il apparait une grande différence pour le couple, la fém et la puissance électromagnétique qui sont beaucoup plus importants dans le cas saturé. Ce qui était prévisible puisque la saturation améliore la conversion électromagnétique.

Ce modèle sera utilisé pour étudier les performances de la machine en fonction des paramètres de commande.

CHAPITRE III: ETUDE DES PERFORMANCES DE LA SRG

Introduction

Dans ce chapitre nous allons simuler et optimiser les performances de la SRG. L'objectif de cette optimisation est d'obtenir la puissance nominale, minimiser les ondulations du couple électromagnétique, minimiser la pénalité et augmenter le rendement. Pour cela une étude de l'influence des paramètres de commande sur les performances de la machine est effectuée.

La simulation pour différents point de fonctionnement (vitesse de rotation de la SRG) avec plusieurs combinaisons des angles de commande sur une plage déterminée est réalisée.

Un choix adéquat de la meilleure combinaison des angles de commande est fait en fonction des critères de performances fixés.

III.1 Les paramètres qui définissent les performances de la SRG

Dans cette partie, une étude de l'influence de la vitesse, θ_{on} et de θ_{off} sur les performances de la SRG est effectuée. Les paramètres qui peuvent définir les performances de la SRG sont :

-Le rendement de la SRG : $\eta = \frac{\text{puissance absorbée par la charge}}{\text{puissance mécanique reçue}}$ (III.1)

-La pénalité : c'est un des paramètres particuliers à la SRG. Elle est définie comme le rapport entre la puissance d'excitation des phases et la puissance totale générée :

$$\varepsilon = \frac{W_{exc}}{W_{gen}}$$

Ce facteur doit être le plus faible possible (<50%) [16].

Dans le cas de la pleine onde les puissances d'excitation et de génération sont données par les relations suivantes:

$$W_{exc} = \frac{n}{\theta_0} \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} V_{dc} \cdot i_{tot} d\theta \quad (III.2)$$

$$W_{gen} = \frac{n}{\theta_0} \int_{\theta_{off}}^{\theta_{ex}} V_{dc} \cdot i_{tot} d\theta \quad (III.3)$$

Où n est le nombre de phase et θ_0 est la période électrique. [16]

-La puissance absorbée par la charge : $W_{genc} = W_{gen} - W_{exc}$ (III.4)

-Le taux d'ondulation du couple [2] : $ond = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{moy}} \cdot 100\%$ (III.5)

III.2 L'influence de la vitesse

Dans cette partie les angles θ_{on} et θ_{off} sont fixés en variant la vitesse dans le cas de la pleine onde. La simulation est effectuée pour $V=42V$, $\theta_{on} = 21^\circ$, $\theta_{off} = 30.5^\circ$.

Les résultats de simulation sont présentés sur les figures III.1.

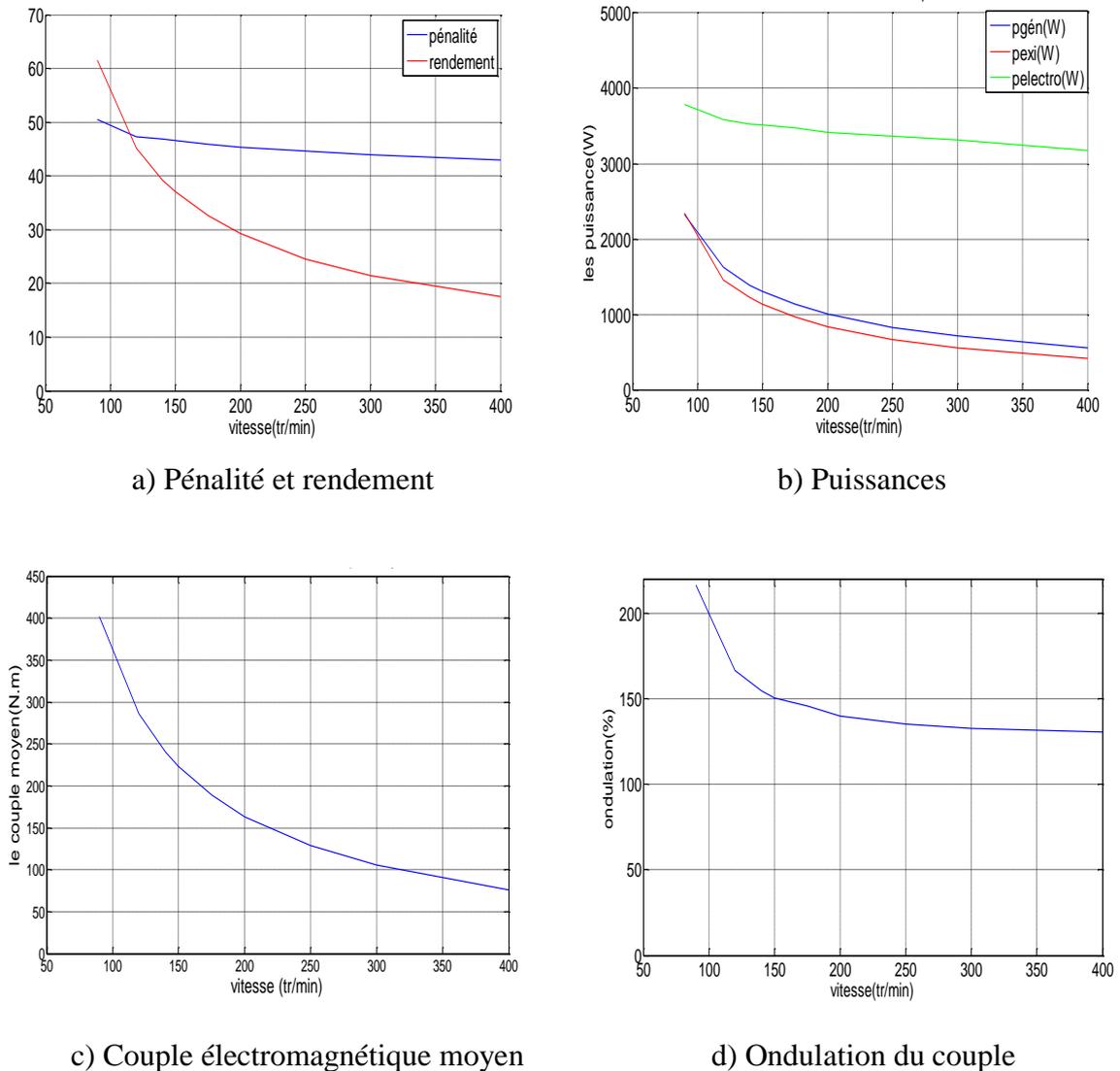


Figure III.1 : Influence de la vitesse sur les performances de la SRG, pour $\theta_{on} = 21^\circ$, $\theta_{off} = 30.5^\circ$.

a) Analyse des résultats :

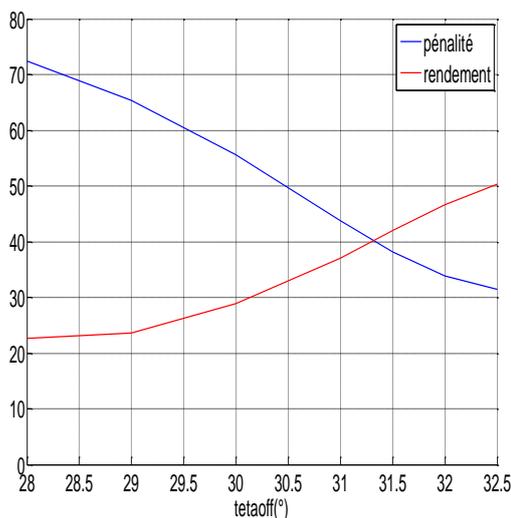
- Nous remarquons que la puissance générée et la puissance d'excitation diminue avec l'augmentation de la vitesse. Par ailleurs, nous constatons que le rendement diminue considérablement avec la vitesse ce qui nous amène à confirmer que la SRG n'est pas intéressante à grandes vitesses.
- D'après la figure III.3.a on remarque que l'augmentation de la vitesse n'as pas une grande influence sur le facteur de pénalité .il diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse mais il est toujours au voisinage de 45% (<50% valeur limite tolérée pour les SRG) [16].
- D'après la figure III.3.c et la figure III.3.d on remarque que le couple diminue avec l'augmentation de la vitesse mais présente moins d'ondulations.

III.3 Influence de θ_{on} et θ_{off} sur les performances de la SRG

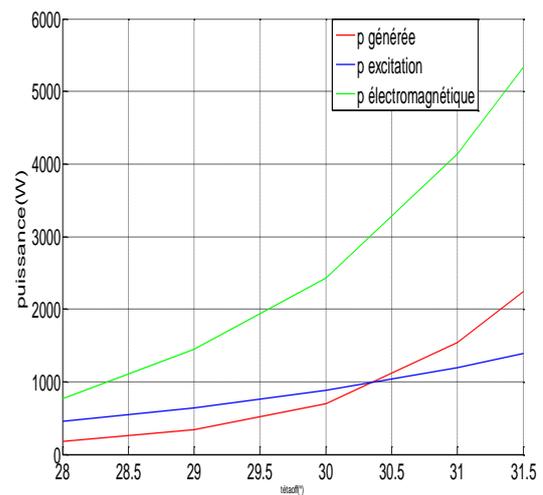
III.3.1 Influence de θ_{off}

La vitesse et θ_{on} sont fixés en variant θ_{off} .la simulation est effectuée pour $V=42V$, $\theta_{on} = 21.5^\circ$, $\Omega = 150$ tr/min.

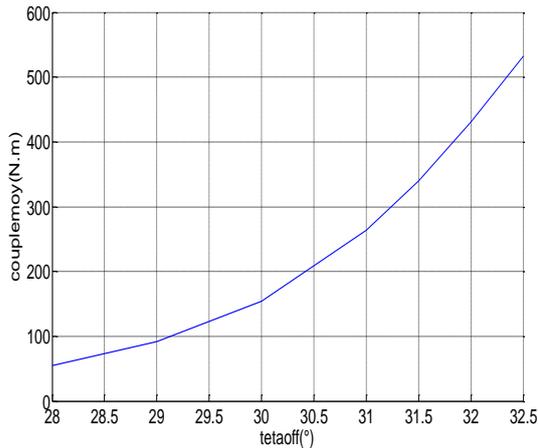
Les résultats de simulation sont représentés sur les figures III.2.



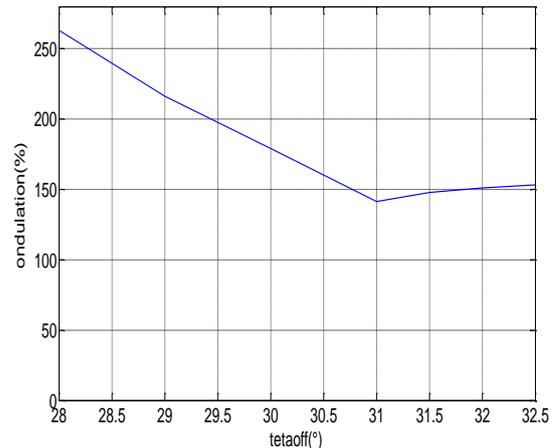
a) Pénalité et rendement



b) Puissances



c) Couple électromagnétique moyen



d) Ondulation du couple

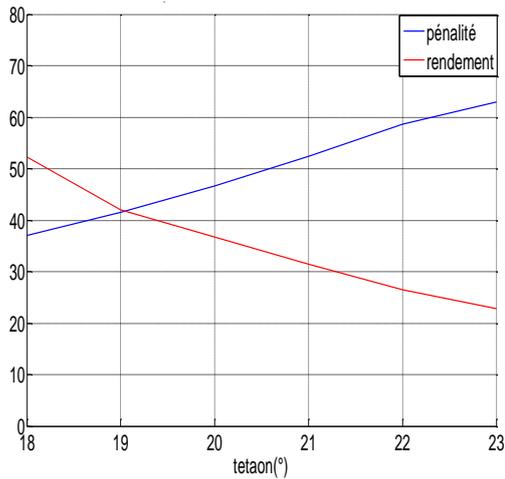
Figure III.2 : Influence de θ_{off} sur les performances de la SRG, $\theta_{on} = 21.5^\circ$, $\Omega = 150$ tr/min.**a) Analyse des résultats**

- on remarque que la pénalité diminue avec l'augmentation de θ_{off} alors que le rendement augmente.
- D'après la figure III.4.b on remarque que la pénalité diminue avec l'augmentation de θ_{off} alors que le rendement augmente.
- D'après la figure III.4.c et la figure III.4.d on remarque que le couple augmente considérablement avec θ_{off} alors le taux d'ondulation diminue sensiblement avec θ_{off} et atteint son minimum pour $\theta_{off} = 31^\circ$. En effet, l'augmentation de θ_{off} conduit à l'augmentation de la durée d'excitation ce qui entraîne un empiètement des couples de phases. Ceci permet de réduire l'écart entre le couple max et le couple min. Le minimum d'ondulation obtenu est très important ce qui est naturel pour cette machine qui nécessite des techniques de commande avec minimisation d'ondulation. Ce θ_{off} correspond au point de fonctionnement nominal à cette vitesse.

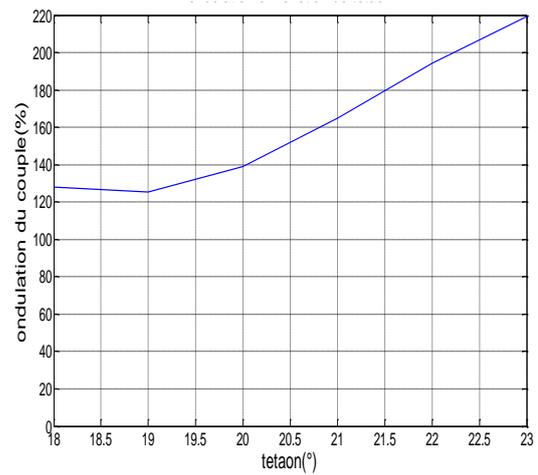
III.3.2 L'influence de θ_{on}

La vitesse et θ_{off} sont fixés en variant θ_{on} . la simulation est effectuée pour $V=42V$, $\theta_{off} = 30^\circ$, $\Omega = 150$ tr/min.

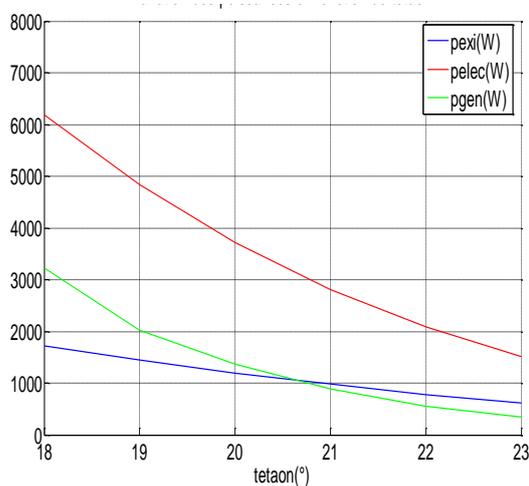
Les résultats de simulation sont représentés sur les figures III.3.



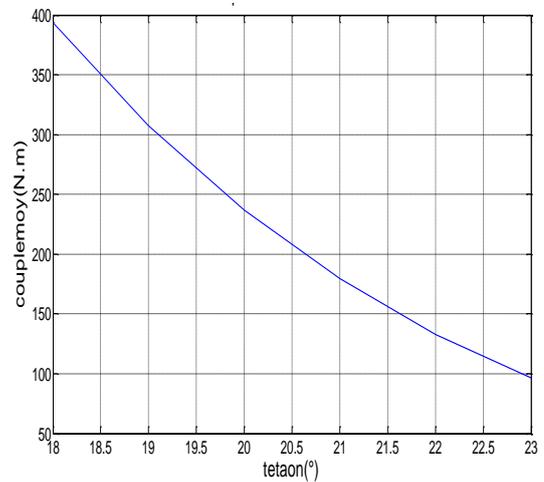
a) Pénalité et rendement



b) Ondulation du couple



c) Puissances



d) Couple électromagnétique moyen

Figure III.3 : Influence de θ_{off} sur les performances de la SRG pour

$$\theta_{on} = 30^\circ, \Omega = 150 \text{ tr/min.}$$

a) Analyse des résultats :

- Les phénomènes observés dans ce cas sont inverse à ceux obtenus précédemment car dans ce cas l'augmentation de θ_{on} entraîne la réduction de la durée d'excitation.
- Nous constatons que Les meilleurs performances sont autour de $\theta_{on} = 19^\circ$.

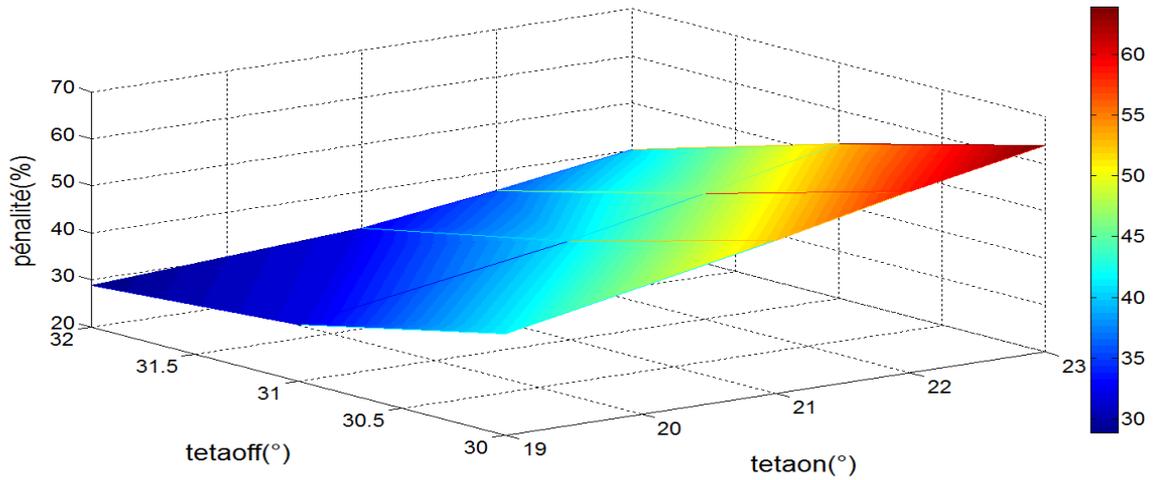
III.3.3 Influence de θ_{on} et θ_{off} simultanément

Dans cette partie on va étudier l'influence simultanément des angles θ_{on} et θ_{off} sur les performances de la machine pour les trois stratégies : pleine onde, hystérésis et PWM.

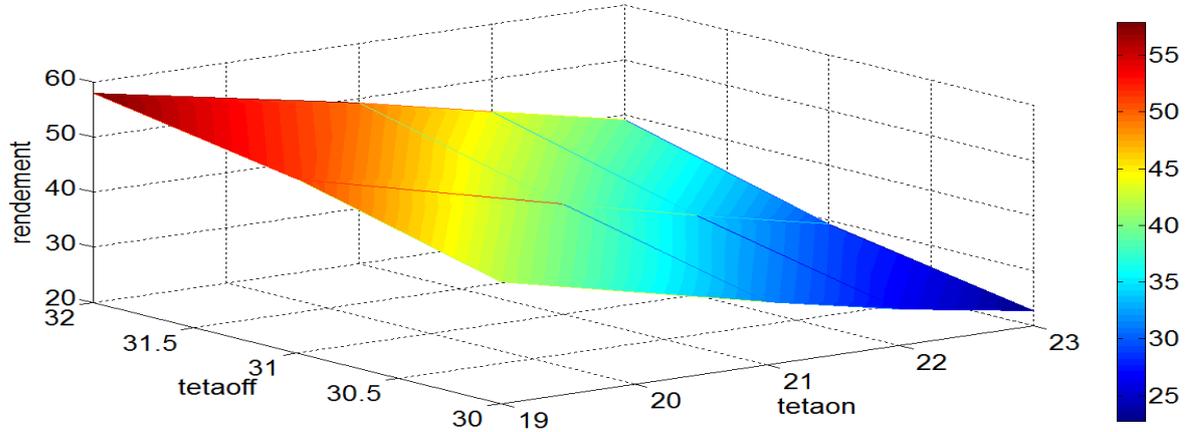
III.3.3.1 Cas de pleine onde

La simulation est effectuée pour deux vitesses $\Omega = 150 \text{ tr/min}$ et 200 tr/min en variant simultanément θ_{on} et θ_{off} , avec $V=42\text{V}$.

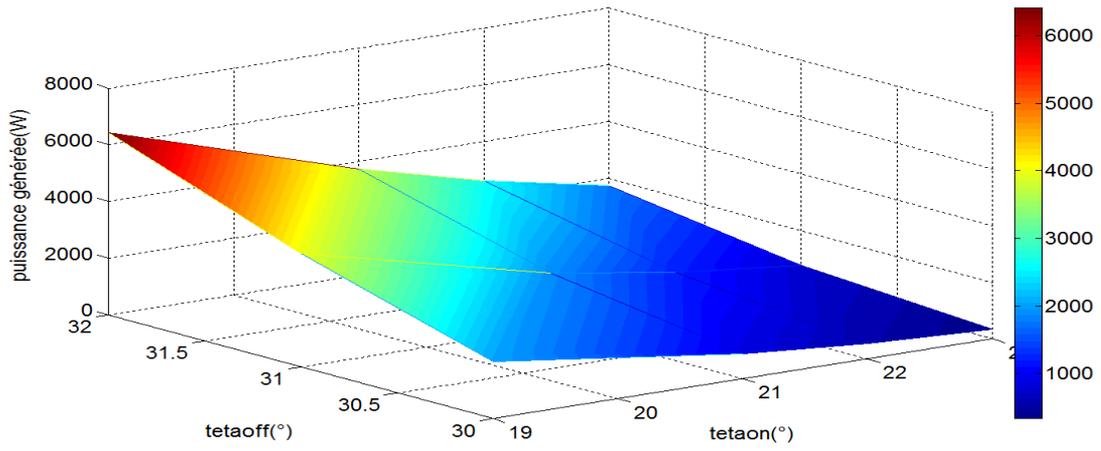
Les résultats de simulation sont représentés sur les figures III.4



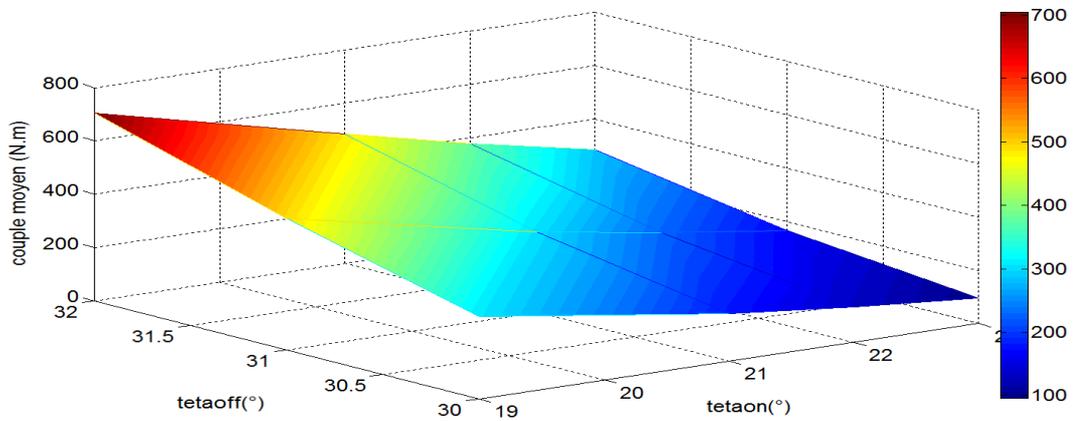
a) Pénalité



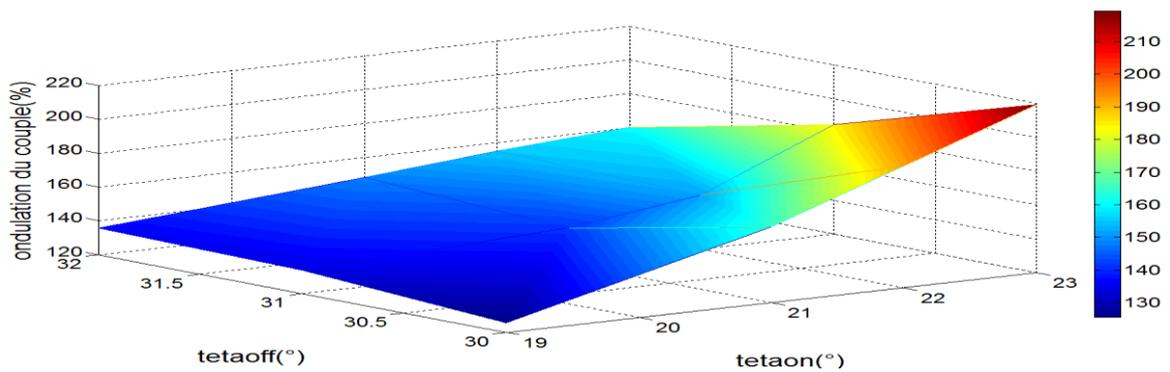
b) Rendement



c) Puissance générée



d) Couple électromagnétique moyen



e) Ondulation du couple

Figure III.4 : Influence simultanée de θ_{off} et de θ_{on} sur les performances de la SRG pour la vitesse 150tr/min.

a) Analyse des résultats :

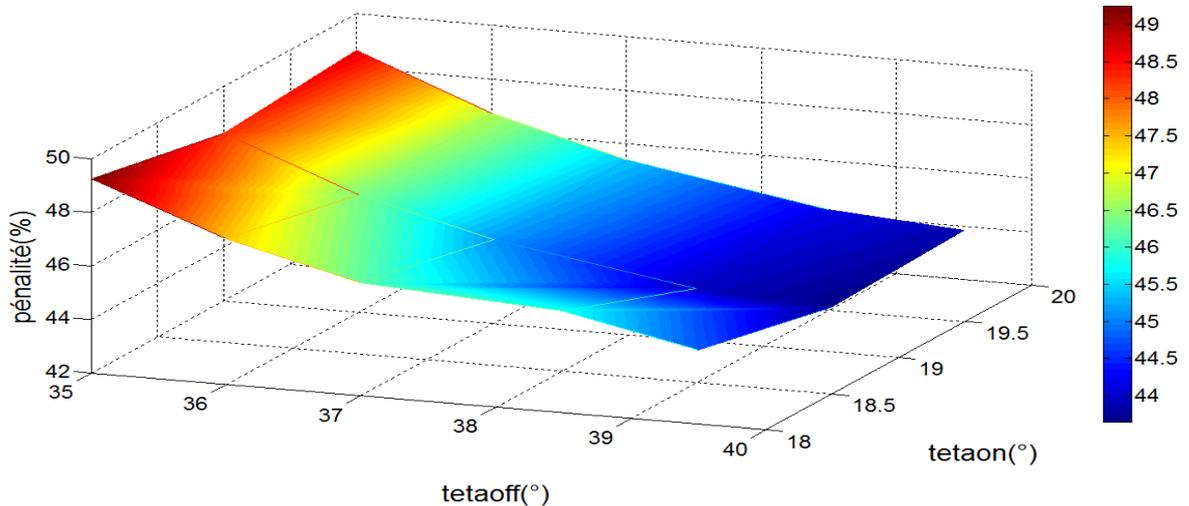
- D'après la figure III.4.a on peut confirmer que la pénalité dépend essentiellement de θ_{on} et θ_{off} . les valeurs de θ_{on} et θ_{off} acceptées sont sur la zone bleu.
- D'après la figure III.4.b on constate que le rendement dépend de ces trois paramètres, de plus et vue les caractéristiques du couple moyen qui est proportionnelle au courant et à la puissance électromagnétique qui ne doivent pas dépasser les valeurs nominales on peut déduire que le rendement optimal est entre 35 et 40% pour la vitesse $\Omega = 150 \text{tr/min}$.
- L'ondulation du couple minimale se trouve dans la zone bleu foncé (figures III.4.e) pour $\Omega = 150 \text{tr/min}$ qui correspond à une plage entre 19° et 20° pour θ_{on} et 30° et 31.5° pour θ_{off} .
- Après cette étude on peut définir les θ_{on} et θ_{off} optimaux pour ces deux vitesses on prend $\theta_{on} = 19.5^\circ$ et $\theta_{off} = 30.5^\circ$ pour $\Omega = 150 \text{tr/min}$.

III.3.3.2 Cas de régulation par PWM

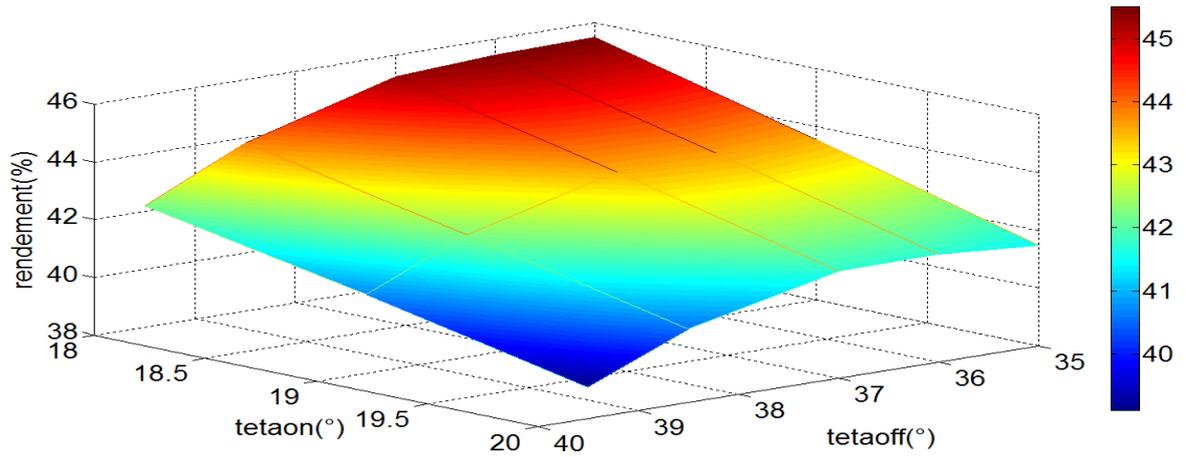
Un signal triangulaire de 5 kHz est utilisé comme modulant et le signal de référence est l'erreur ($I - I_{ref}$).

La simulation est effectuée pour $\Omega = 100 \text{tr/min}$, $V = 42V$ en variant θ_{on} et θ_{off} .

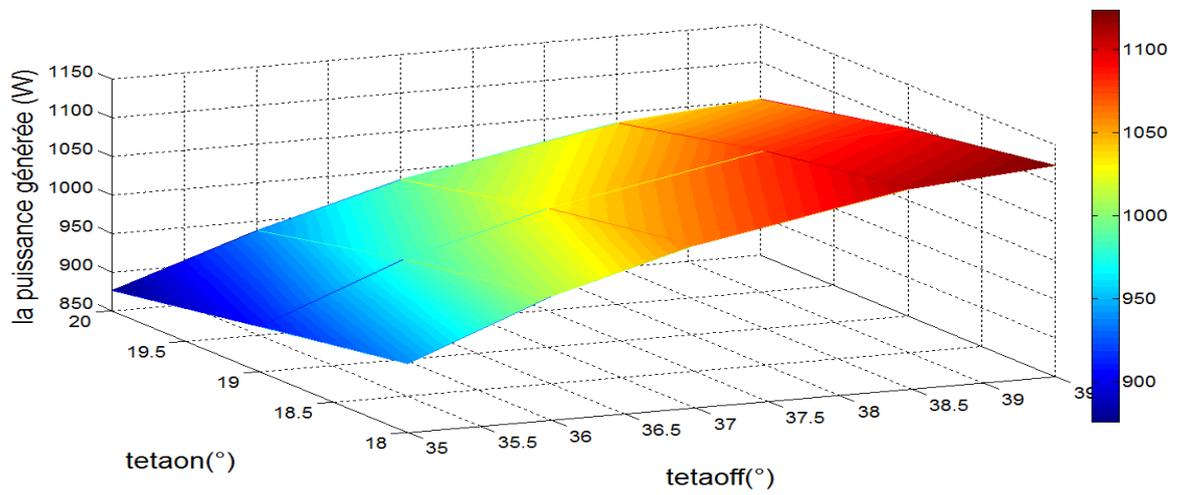
Les résultats de simulation sont présentés sur les figures III.5.



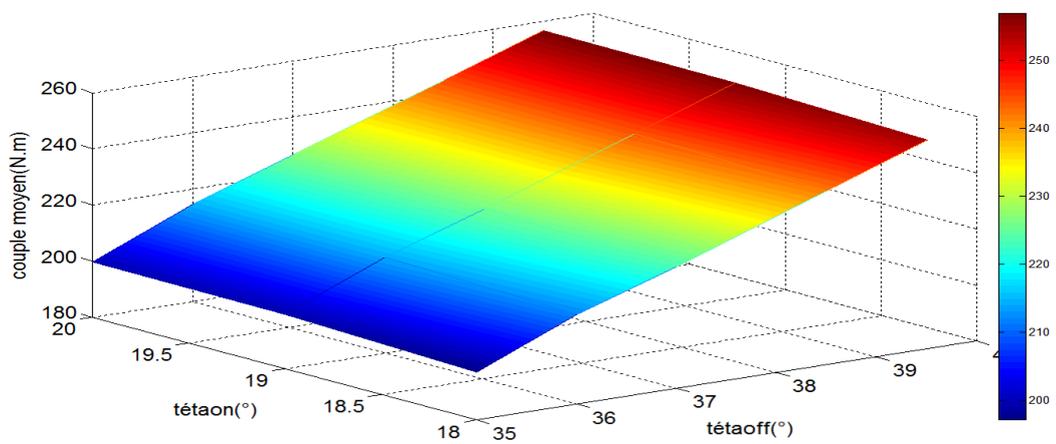
e) Pénalité



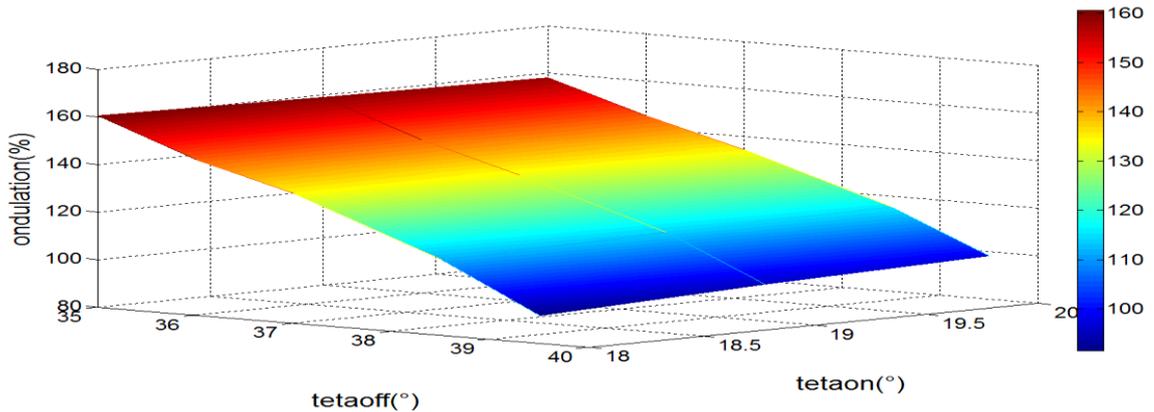
b) Rendement



c) Puissance générée



d) Couple électromagnétique moyen



e) Ondulation du couple

Figure III.5 : Influence simultanée de θ_{off} et de θ_{on} sur les performances de la SRG pour la vitesse 100tr/min régulation par PWM.

a) Analyse des résultats :

- La pénalité dépend de θ_{on} et de θ_{off} elle est dans ce cas considérablement inférieure à celles obtenues avec la régulation par hystérésis hard chopping. Elle est très intéressante dans la zone bleue. Ces résultats sont dus à la stratégie PWM. En effet, avec cette stratégie, la magnétisation se fait seulement entre θ_{on} et θ qui correspond à I_{ref} , par contre, dans le hard chopping, la magnétisation et la démagnétisation se font successivement selon l'erreur du courant. Ceci peut expliquer la diminution de la pénalité.
- Le rendement, le couple électromagnétique et l'ondulation du couple sont très proches des résultats obtenus dans le cas hystérésis.
- On peut déduire que les valeurs de θ_{on} et de θ_{off} qui nous amènent à des performances optimales sont $\theta_{on} = 18^\circ$ et de $\theta_{off} = 39^\circ$.

III.4 Tableau de performance

L'analyse des courbes présentées précédemment nous a permis de déduire approximativement les valeurs de θ_{on} et θ_{off} qui ont conduit aux performances optimales. Les résultats sont présentés sur le tableau suivant :

Vitesses (tr/min)	70 (avec régulation)	100(avec régulation)	150	175	200
θ_{on}	18	18	19.5	19	19
θ_{off}	39	39	30.5	30	31

Tableau III.1: angles d'allumage optimaux

Conclusion

Dans ce chapitre une recherche des paramètres de commande permettant les meilleures performances de la SRG a été réalisée. Ce qui nous a amené à l'étude de l'influence de ces paramètres sur ses performances

En effet les performances de la SRG dépendent énormément des angles de commande et l'alimentation pleine onde produit une forte ondulation de couple alors que la régulation a pour effet de minimiser l'ondulation.

Les paramètres de commande optimisés sont choisis à partir d'un compromis entre les différents critères de performance définis dans ce chapitre.

CHAPITRE IV: COMMANDE DE LA SRG EN REGIME SATURE

Introduction :

Grace à l'évolution de l'électronique de puissance et à la micro-informatique, de nouvelles techniques de commande à vitesse variable de la SRM ont été élaborées ce qui a permis l'amélioration du fonctionnement en régime dynamique et non linéaire.

La commande de la SRG utilise les angles d'amorçage pour imposer le fonctionnement souhaité. Dans ce qui précède, on a étudié le fonctionnement de la machine en régime linéaire et saturé puis on a établi ses performances en adoptant l'hypothèse d'une tension de bus continu constante afin de simplifier les calculs. Ce qui n'est pas le cas sans une régulation de tension.

Dans ce chapitre on étudiera la régulation de la tension du bus continu dans le cas d'une charge R alimentée en continu puis dans le cas d'une charge RL alimentée en alternatif. Une analyse harmonique des grandeurs de sortie sera aussi traitée.

IV.1 Régulation de la tension du bus continu

La tension du bus continu varie en fonction du point de fonctionnement de la SRG et de la valeur de la résistance de charge R_{dc} . On se propose ici de réguler la tension du bus continu pour une résistance de charge R_{dc} donnée. Réguler la tension du bus revient à imposer la puissance absorbée par la charge.

La figure VI.1 montre le schéma de principe de la régulation de la tension du bus continu avec le régulateur de tension qui impose une valeur du courant i_{ref} puis on l'injecte dans notre régulateur de courant qui commande les IGBTs.

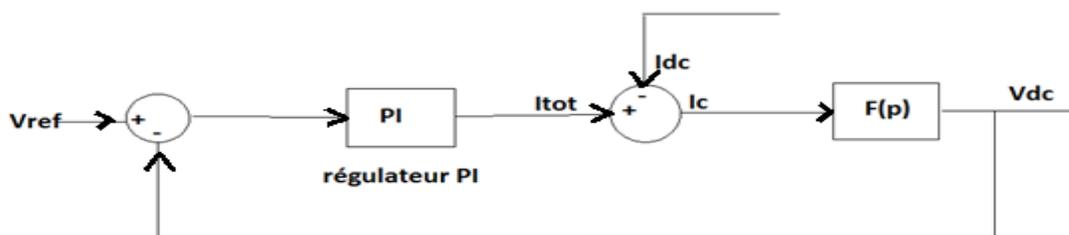


Figure IV.1 : Schéma de régulation équivalent.

IV.1.1 Calcul du régulateur PI pour la tension du bus continu

Il s'agit de régler la tension de bus avec un régulateur PI modélisé par la fonction de transfert $C(p)$.

Avec :

$$\begin{cases} C(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) \\ F(p) = \frac{1}{C_{dc} p} \end{cases} \quad (IV.1)$$

Avec un condensateur de bus continu C_{dc} de $50mf$

Les paramètres du correcteur PI calculés sont :

$$\begin{cases} K_p = 1.03 \\ T_i = 32.62 \text{ ms} \end{cases}$$

IV.2 Alimentation d'une charge résistive R par une tension continue (V_{DC})

Le système global est représenté sur la figure IV.2. Pour tester le bon fonctionnement du régulateur de tension, une charge résistive a été utilisée.

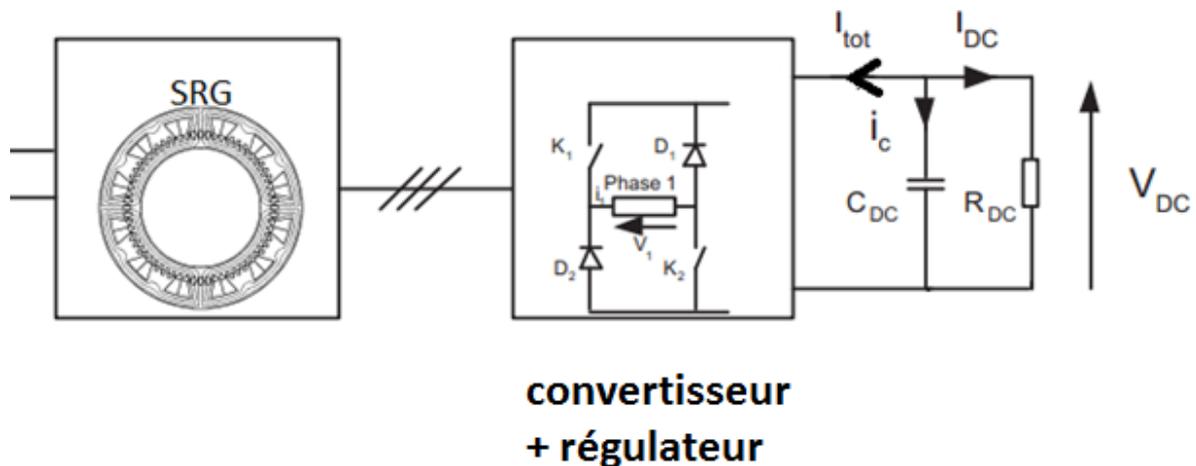
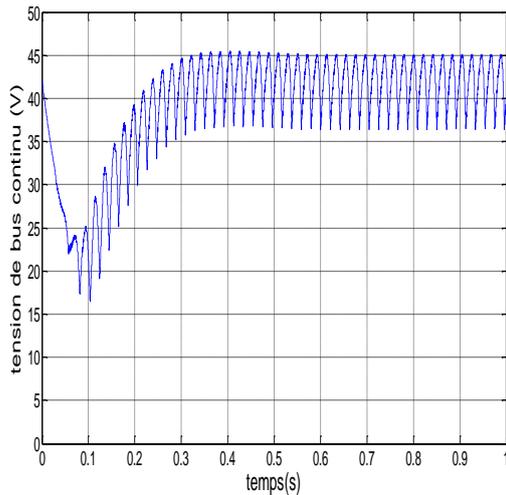


Figure IV.2 : Modèle d'alimentation d'une charge R avec la tension V_{DC} .

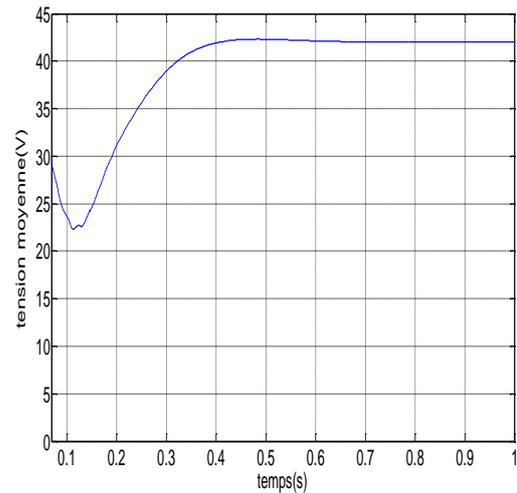
IV.2.1 Simulation

On a simulé notre modèle pour $\theta_{on} = 22$ et $\theta_{off} = 32$ et $\Omega = 120 \text{tr/min}$ et pour les paramètres du régulateur PI calculés précédemment et on a choisi $C_{dc} = 50mf$ et pour $R_{dc} = 2\Omega$ avec $V_{dc \text{ ref}} = 42V$.

Les résultats de simulation sont présentés sur les figures IV.3.



a) Tension V_{DC}



b) Valeur moyenne de V_{DC}

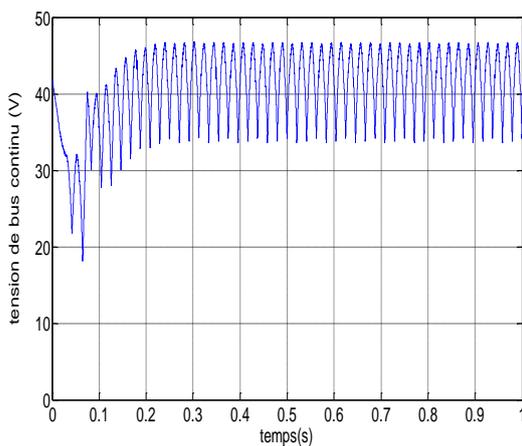
Figure IV.3 : Résultats de simulation pour $R_{dc} = 2 \Omega$, $k_p=1.03$ et $T_i= 32.62$ s.

La tension V_{DC} se stabilise autour de V_{ref} après un temps de 0.4 s qui est un peu lent, ce temps est dû aux paramètres du régulateur choisis et ainsi aux paramètres du système (C_{dc} , R_{dc}).

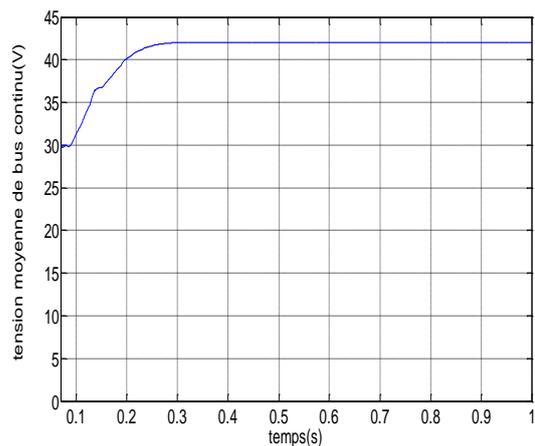
La tension V_{DC} est ondulée, cette ondulation est due au fort courant I_{tot} qui induit une décharge rapide du condensateur.

Pour parer à ses problèmes nous avons ajusté les paramètres du régulateur tel que $K_p = 2.51$.

Les résultats de simulation sont présentés sur les figures IV.4.



a) Tension V_{DC}



b) Valeur moyenne de V_{DC}

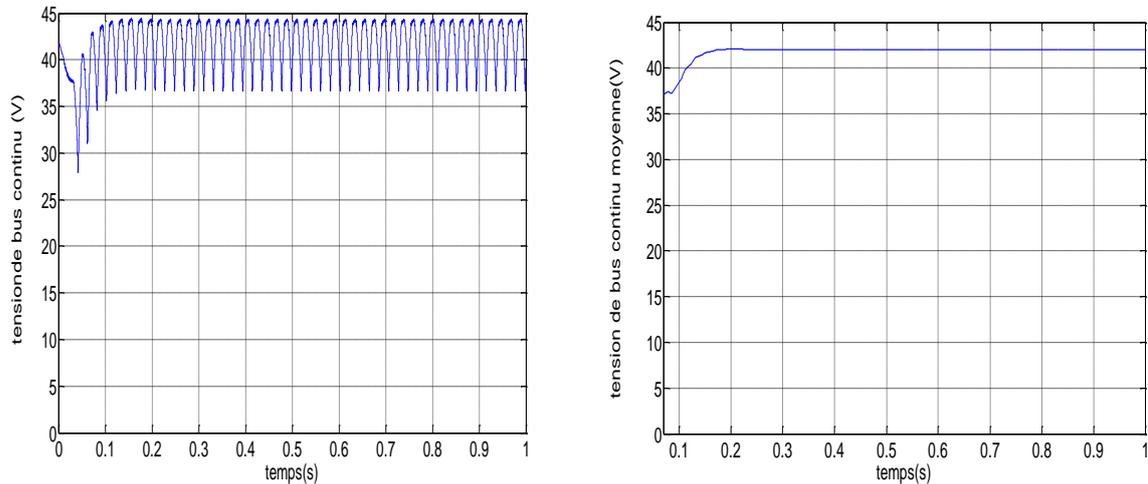
Figure IV.4 : Résultats de simulation 2 pour $R_{dc}=2 \Omega$, $K_p=2.51$.

On peut confirmer que la variation du K_p n'a pas un effet sur la valeur moyenne de la tension, la puissance générée, la puissance électromagnétique et le rendement.

Le temps de réponse a diminué avec la nouvelle valeur de K_p qui donne des performances meilleures pour la régulation de la tension V_{DC} . Mais reste le problème de l'ondulation de la tension.

Pour cela en a essayé de diminuer la charge tel que $R_{dc}=5 \Omega$.

Les résultats de simulation sont présentés sur les figures IV.5.



a) Tension de bus V_{DC}

b) Valeur moyenne de V_{DC}

Figure IV.5 : Résultats de simulation 3 pour $R_{dc}=5 \Omega$.

On remarque que l'ondulation de la tension V_{DC} et le temps de réponse ont diminué et ceci est dû à la diminution du courant I_{dc} .

IV.3 Alimentation d'une charge RL par une tension alternative

Dans ce qui suit, une étude avec une alimentation d'une charge RL en alternatif à travers un onduleur à deux niveaux et un filtre passe bas a été effectuée.

Le schéma de montage est présenté sur la figure V.7.

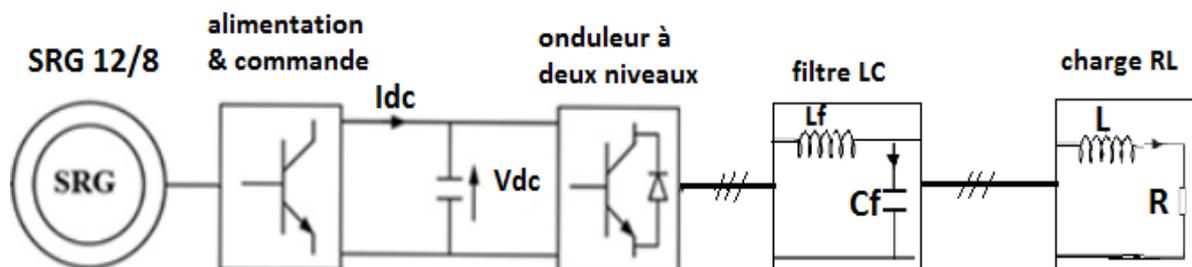


Figure IV.6: Alimentation d'une charge RL.

IV.3.1 Modélisation du système

IV.3.1.1 Onduleur triphasé à deux niveaux

Dans le cas de notre travail nous présentons une structure de l'onduleur à deux niveaux comme l'indique la figure IV.7.

Ce type d'onduleur se compose de trois bras symétriques constitués chacun de deux interrupteurs en série, Chaque interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode montée en tête bêche une commande MLI triangulo-sinusoidale est utilisée .

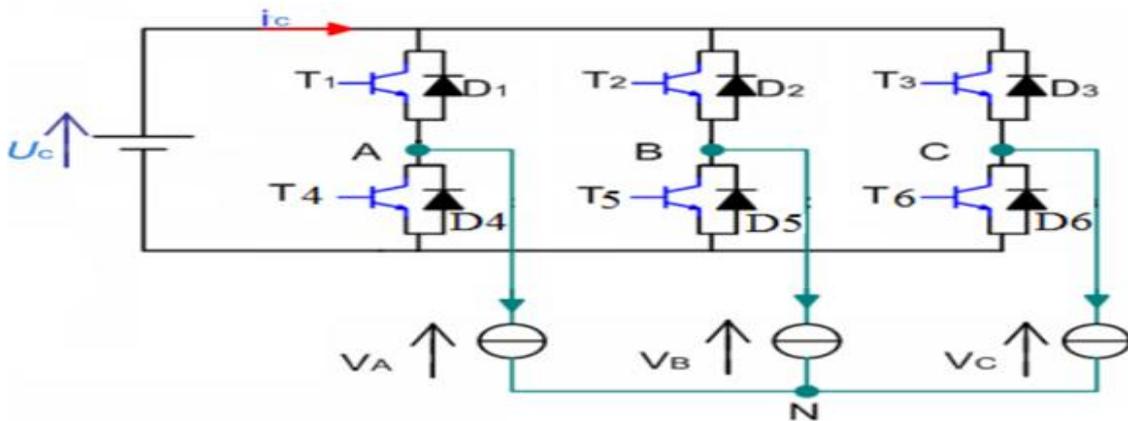


Figure IV.7 : Onduleur triphasé a deux niveaux.

Soit Sm_1 , Sm_2 et Sm_3 l'état des commutateurs des trois bras du convertisseur :

$$\text{Branche 1 : } \begin{cases} Sm_1 = 0 & \text{Si } S_1 \text{ off et } S_4 \text{ on} \\ Sm_1 = 1 & \text{Si } S_1 \text{ on et } S_4 \text{ off} \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

$$\text{Branche 2 : } \begin{cases} Sm_2 = 0 & \text{Si } S_2 \text{ off et } S_5 \text{ on} \\ Sm_2 = 1 & \text{Si } S_2 \text{ on et } S_5 \text{ off} \end{cases} \quad (\text{IV.3})$$

$$\text{Branche 3 : } \begin{cases} Sm_3 = 0 & \text{Si } S_3 \text{ off et } S_6 \text{ on} \\ Sm_3 = 1 & \text{Si } S_3 \text{ on et } S_6 \text{ off} \end{cases} \quad (\text{IV.4})$$

A la sortie de l'onduleur, nous avons les tensions composées qui sont exprimées en fonction des états des interrupteurs et de la tension continue, elles sont données par la relation :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{DC} \cdot (Sm_1 - Sm_2) \\ V_{bc} = V_{DC} \cdot (Sm_2 - Sm_3) \\ V_{ca} = V_{DC} \cdot (Sm_3 - Sm_1) \end{cases} \quad (\text{V.5})$$

On peut l'exprimer sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Sm_1 \\ Sm_2 \\ Sm_3 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.6})$$

Le courant sera obtenu à l'aide de la relation suivante :

$$I_{DC} = [Sm_1 \quad Sm_2 \quad Sm_3] \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (IV.7)$$

IV.3.1.2 Modèle du filtre :

Le signal obtenu à la sortie de l'onduleur ayant pleine des harmonique pour cela il faut mettre un filtre entre l'onduleur et la charge pour les minimiser.

Dans notre étude on a choisi un filtre LC qui est schématisé par la figure suivante :

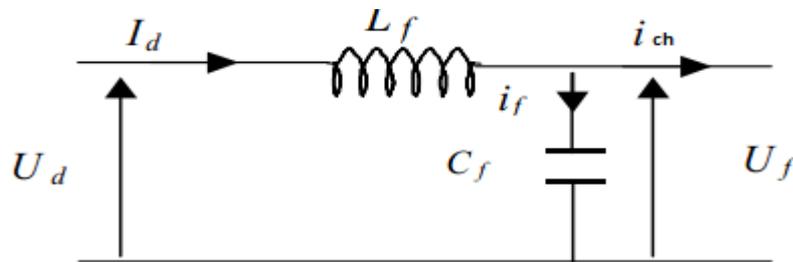


Figure IV.8 : Filtre (LC).

Modélisation du filtre

L'équation de transfert du filtre est donnée par

$$U_f = \frac{U_d - L_f S I_{ch}}{(L_f C S^2 + 1)} = \frac{U_d}{(L_f C S^2 + 1)} - \frac{L_f S I_{ch}}{(L_f C S^2 + 1)} \quad (IV.8)$$

C'est un filtre de deuxième ordre avec une fréquence de coupure égale à :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \quad (IV.9)$$

Le choix des valeurs de la self et de la capacité, peut être obtenu en posant la condition simple qui consiste à éliminer les harmoniques d'ordre supérieur,

$f_c < mf$ (pour la technique MLI triangulo-sinusoidale).

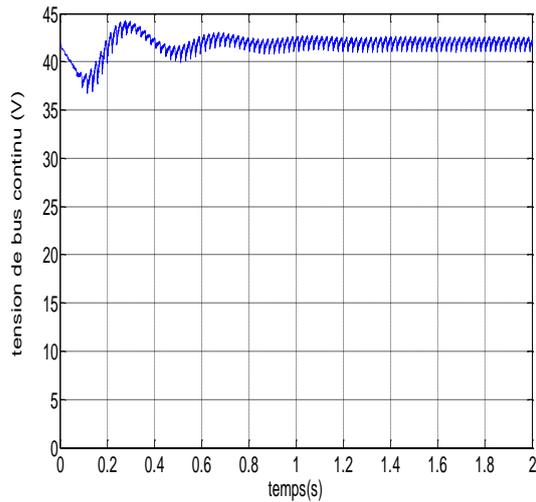
Pour $m=21$ avec une fréquence $f=50 \text{ Hz}$ et pour $L=1 \text{ mH}$. on trouve $C_f > 0.907 \text{ mF}$.

IV.3.1.3 Simulation1 :

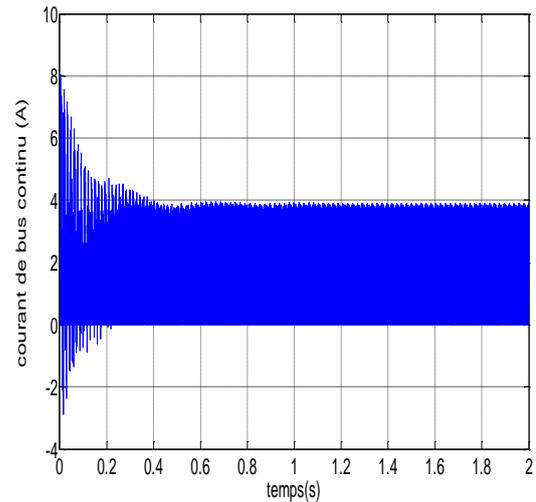
Dans cette simulation les paramètres suivants sont utilisés :

Paramètre de simulation	θ_{on}	θ_{off}	Ω (tr/min)	M	Paramètre du régulateur	parametre du filtre	Charge (R,L)
Simulation 1	19°	39°	120	21	$Kp = 2.53$ $Ti = 0.034s$	$Lf = 1\text{ mH}$ $Cf = 2\text{ mF}$	R=2 Ω L=0.01 H

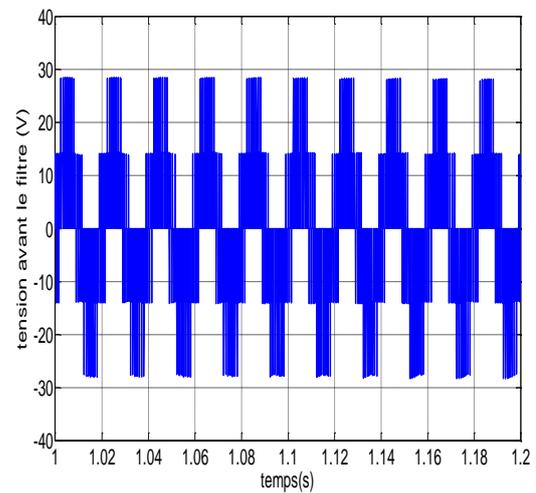
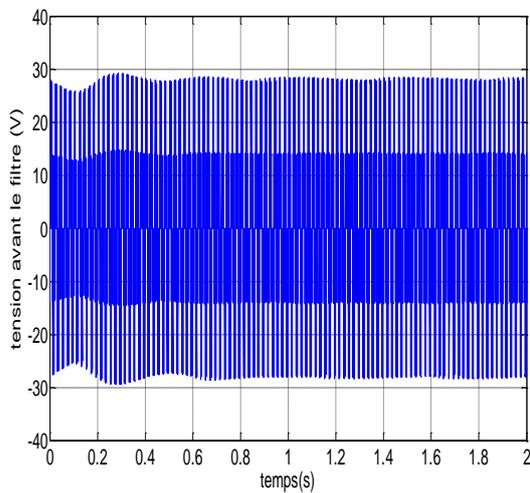
Les résultats de simulation sont présentés sur les figures IV.9.



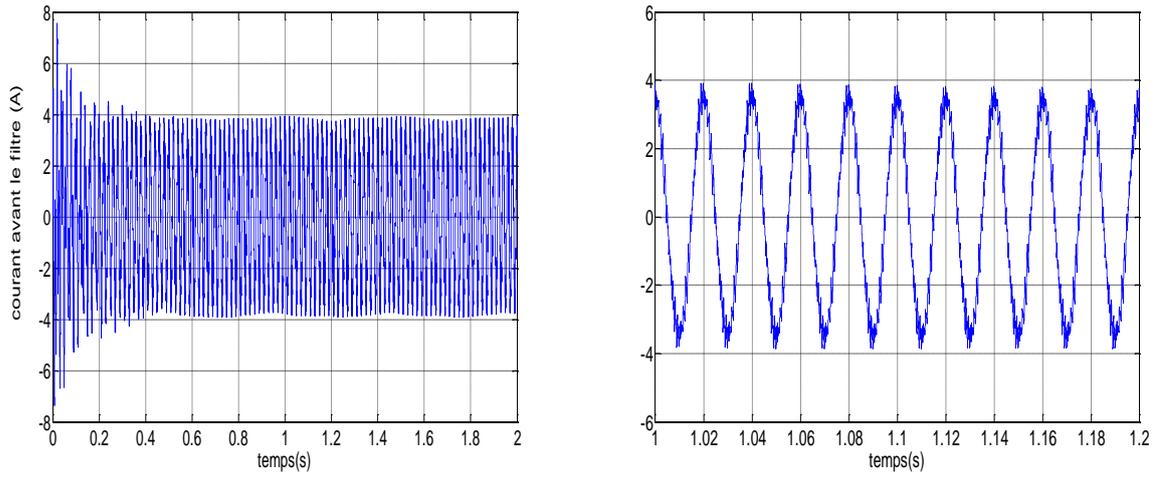
a) Tension de bus continu



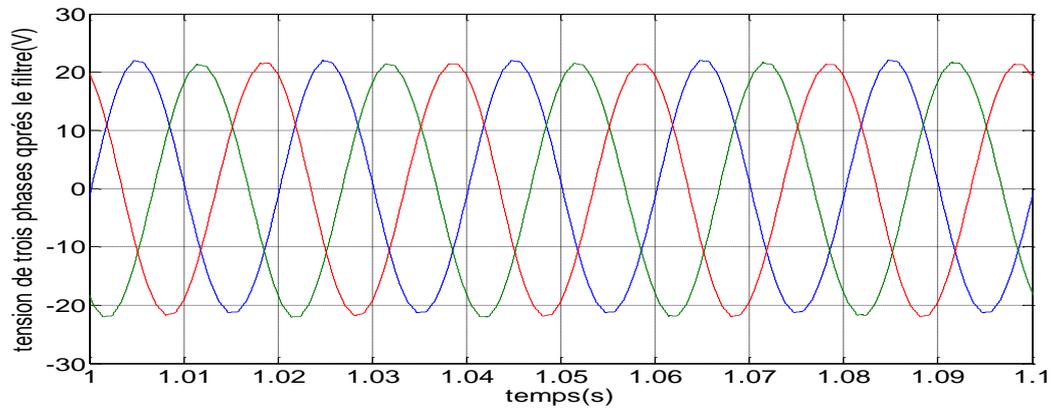
b) Courant de bus continu



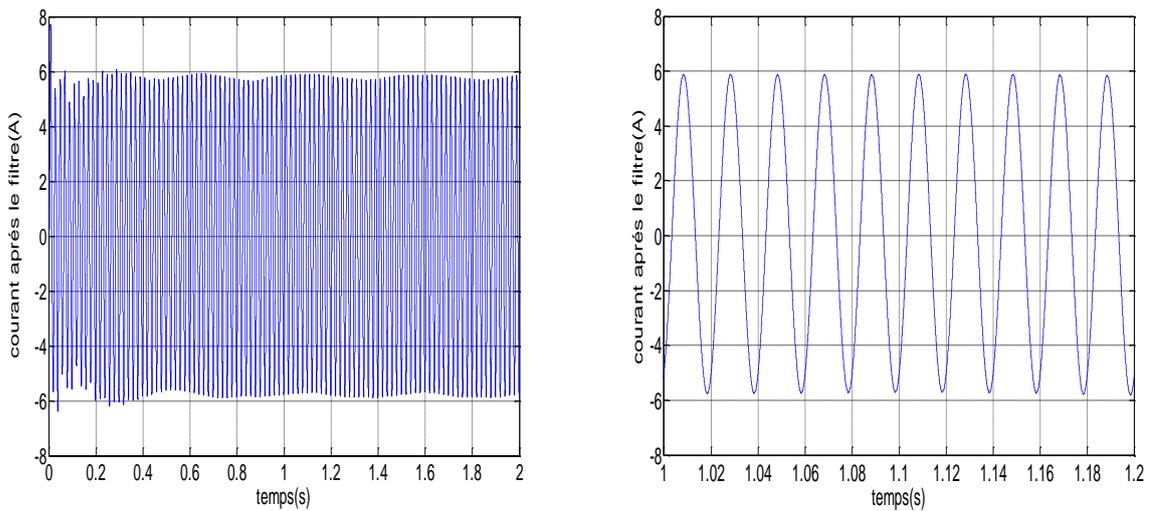
c) Tension avant le filtre



d) Courant avant le filtre



f) Tensions après le filtre



g) Courant après le filtre

Figure IV.9 : Résultats de simulation 1 pour une charge RL avec $m=21$ et $L=0.01$ H.

a) Analyse des résultats

La tension V_{DC} se stabilise autour de la tension de référence V_{ref} et le courant du bus continu I_{dc} est très ondulé et ça est dû à l'utilisation de l'onduleur à deux niveaux

Les paramètres de commande de l'onduleur choisis ont imposé aux courants de charge une forme très proche d'une sinusoïde.

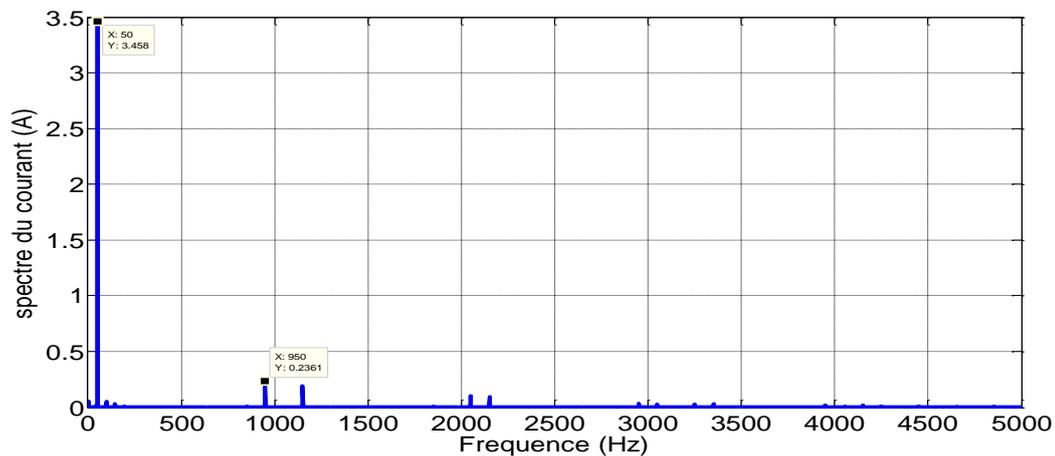
Les tensions après le filtre sont sinusoïdales donc les harmoniques sont atténués et ceci est dû au choix approprié du filtre passe bas utilisé. Ceci témoigne du bon dimensionnement de ce dernier.

On remarque que l'amplitude de la tension après le filtre est inférieure à celle avant le filtre et ça est dû à l'atténuation des harmoniques par ce filtre.

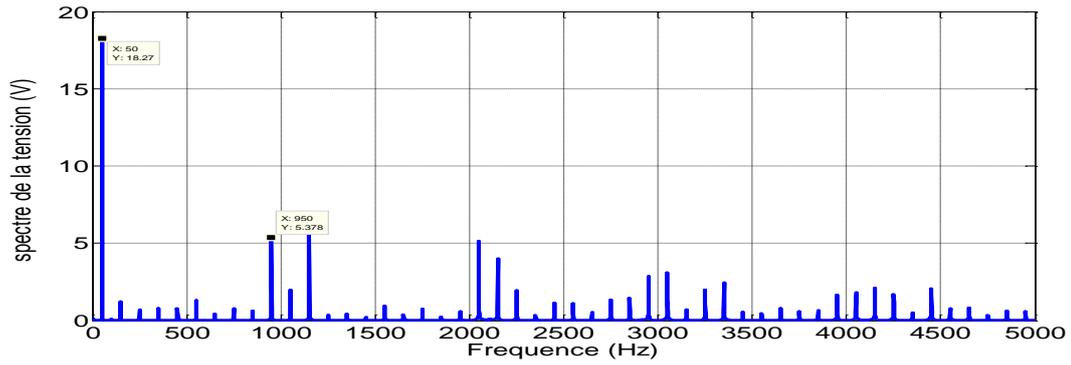
IV.4 Analyse harmonique

Dans ce qui suit on propose d'étudier les spectres d'harmoniques du courant et de la tension avant et après le filtre.

Avant le filtre : les spectres d'harmoniques sont présentés sur les figures V.17.



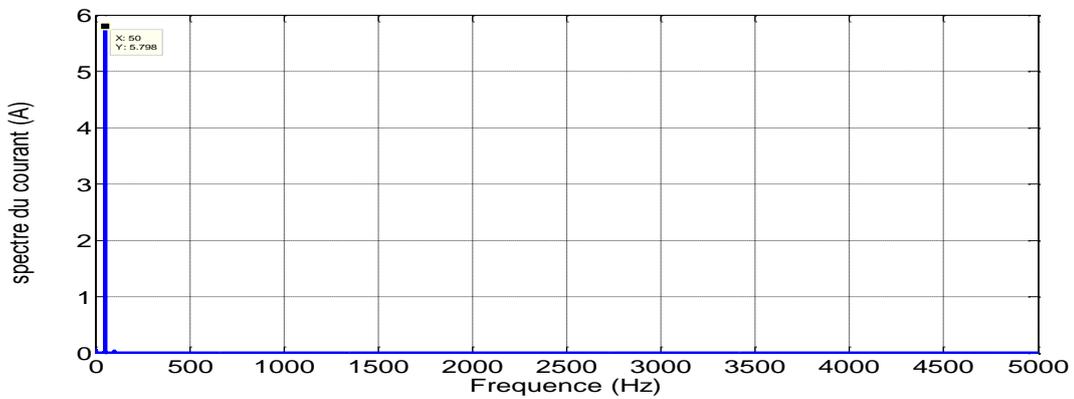
a) Spectre du courant



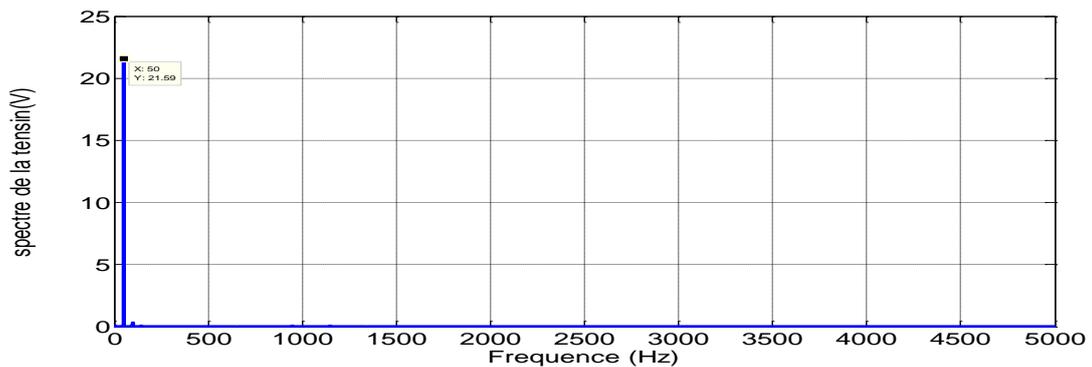
b) Spectre de tension

Figure IV.10: Spectres d'harmoniques de la tension et du courant avant le filtre pour la simulation1 ($m=21$)

Après le filtre : les spectres d'harmoniques sont présentés sur les figures V.18.



a) Spectre du courant



b) Spectre de tension

Figure IV.11: Spectres d'harmoniques de la tension et du courant après le filtre pour la simulation 1 pour $m=21$

Analyse des résultats

D'après La figure (V.17) qui illustre le spectre d'harmoniques du courant et de la tension de phase avant le filtre, l'amplitude du fondamental est de 3.45 A pour le courant et de 18.27 V

pour la tension. On constate que les harmoniques d'amplitude plus élevée sont centrées autour de $m=21$ (1050 Hz) qui sont d'ordre 19 et 23. Les autres harmoniques sont repoussés vers des fréquences élevées, ils sont donc filtrés par la self de la charge.

Après le filtre, on constate que les harmoniques de tension et du courant sont atténués par le filtre passe bas choisi qui est bien dimensionné.

D'après cette simulation et d'autre simulation on peut conclure que que la MLI repousse les harmonique vers des ordres très élevés à $[(n - 1)m \mp 1]$.

IV.4.1 Taux de distorsion (Facteur de distorsion)

Dans ce qui suit, on étudie le taux d'harmoniques pour les trois simulations avant et après le filtre afin de voir la qualité de l'énergie.

Le tableau IV.1 représente du taux de distorsion obtenu, pour la simulation 1, pour $m=21$. pour charge $R=2\Omega$ et $L=10\text{mH}$ avant et après le filtrage du signal de courant et de la tension pour les différentes phases.

Calcule la THD(%) simulation 1	Avant le filtre		Après filtre	
	Tension	Courant	Tension	Courant
Phase 1	63.098	10.42	1.947	1.618
Phase2	54.83	10.23	1.953	1.587
Phase3	62.51	10.39	1.91	1.574

Tableau IV.1: Taux de distorsion obtenus pour la simulation1

On remarque que le taux de distorsion pour la tension avant le filtre est élevée ceci est dû à la commutation des interrupteur de l'onduleur. Par contre le courant est pauvre en harmoniques à cause de la self qui le lisse.

Après le filtre on remarque que les harmoniques du courant et de la tension sont atténués donc le filtre est bien dimensionné et on a un signale au norme $\text{thd} < 5\%$.

Conclusion

Actuellement la SRG est utilisée en fonctionnement autonome (isolé) pour l'alimentation des zones isolées. Ainsi, dans ce dernier chapitre une étude a été proposée afin de réguler la tension du bus continu pour réguler la puissance de sortie de la SRG.

On a étudié deux types d'alimentation, l'alimentation d'une charge R en continu afin de tester notre régulateur (c'est le cas critique), puis l'alimentation d'une charge RL qui est la charge typique dans ces zones à l'aide d'un onduleur à deux niveaux et un filtre basse bande puis on a effectué une étude sur l'analyse harmonique afin de vérifier le bon fonctionnement et la qualité des signaux (tension et courant) transférés vers la charge.

CONCLUSION GENERALE

Le travail effectué dans ce projet avait comme objectif la modélisation et l'analyse des performances d'une SRG 12/8 en régime saturé utilisée pour la production de l'énergie électrique, ainsi que l'étude de régulation de la tension de sortie de cette machine.

Un modèle tenant compte de la saturation et de la double saillance est proposé celui-ci repose sur la connaissance des caractéristiques électromagnétiques de la machines.

Ce modèle a conduit à des résultats plus réels que ceux obtenus par le modèle non saturé. Ceci est dû à la saturation qui améliore, dans ce cas, la conversion électromagnétique.

L'étude de l'influence des paramètres de commande sur les performances de la SRG nous a permis de choisir des paramètres en faisant un compromis entre les différents critères de performances. Nous avons noté de bonnes performances autour de la vitesse de base.

Enfin, une régulation de la tension de bus continue a été effectuée afin de réguler la puissance de sortie de la machine. Deux types d'alimentation ont été considérées : alimentation continue sur une charge R et une alimentation alternative à travers un onduleur sur une charge RL. Une étude harmonique nous a permis de tester cette régulation la première a été en continu, la seconde d'analyser la qualité de l'énergie transférée.

En perspective, nous proposons :

Améliorer la simulation du modèle non linéaire en associant à la technique look up table la méthode d'interpolation par réseaux de neurones GRNN.

Les ondulations du couple restent importantes malgré le bon choix des angles de commande, il est nécessaire de les minimiser par d'autres méthodes en agissant par exemple sur la conception de la machine elle-même.

Le couplage au réseau utilisant un modèle global qui tient compte de la turbine éolienne et de son MPPT «Maximum power point tracking» et ainsi que du synchronisateur. Et la commande serait une commande de la vitesse ou de la puissance générée.

Enfin ce travail peut être amélioré en tenant compte de toutes les pertes de la machine dans le calcul des performances en combinant ceci avec un algorithme d'optimisation comme les algorithmes génétiques pour avoir les paramètres de commande optimum les plus précis.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] B. MULLTON, « Historique des machines électromagnétiques et plus particulièrement des machine a reluctance variable », un extrait du rapport d'habilitation, École Normale Supérieure de Cachan, 17 mai 1994, pp5-6-7.
- [2] L.MOREAU, « Modélisation, conception et commande de génératrices a reluctance variable basse vitesse», Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2005.
- [3] M.CHAKIR, « Conception et optimisation de la performance d'une génératrice a reluctance variable », Mémoire (M.Se.) Présenté à la Faculté des études Supérieures de l'Université Laval, 2010.
- [4] M.LIPTAK, V.HRABOVCOVA, P.RAJAJDUS, « Equivalent circuit of switched reluctance generator based on DC series generator », Journal of Electrical Engineering, vol. 59, No 1, 2008, pp 23–28.
- [5] A. RADUN,« Switched reluctance generators and their control», University of Kentucky.
- [6] E. ECHENIQUEE, J.DIXON, R.CARDENAS, R.PENA, « Sensorless control for a switched reluctance wind generator, based on current slopes and neural networks», IEEE VOL. 56, NO. 2009 pp 820.821.
- [7] E.S.ELWAKIL, M.K.DARWISH, « Critical review of converter topologies for switched reluctance motor drives », international review of electrical engineering (I.R.E.E), vol.2, N.1, January-February 2007.
- [8] J. MOUCHOUX , « Etude et réalisation de l'alimentation électronique d'un moteur à reluctance variable pour véhicule électrique- Expérimentation du moteur», Mémoire d'ingénieur CNAM, 18 Oct. 1994.
- [9] 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.
- [10] D.SUSITRA, E.ANNIE, E. JEBASEELI , S.PARAMASIVAMP, « Switched reluctance generator - modeling, design, simulation, analysis and control A comprehensive review» International Journal of Computer Applications, 2010, pp13.
- [11] A.ARIFIN, I.AL-BAHADLYA, « Switched reluctance generator for variable speed wind energy applications» School of Engineering and Advanced Technology, Massey University, Palmerston North, New Zealand, 2010,pp 30,31.

- [12] T.J.E. MILLER, « Electronic control of switched reluctance machines» by SPEED Laboratory, University of Glasgow 1994.
- [13] F.MESSAI, « Contribution à l'Etude d'une génératrice à réluctance variable » Mémoire magister en Electrotechnique Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [14] S. MOUELLEF, « Contribution A l'étude d'une machine a reluctance variable : conception, modélisation & simulation d'une MRVDS 6-4» Mémoire magister en Electrotechnique Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [15] S.DJEBARRI, O.DAHMANI, « Analyse des performances et commande d'une SRM utilisée en Alterno-Démarreur pour véhicules » , projet de fin d'études, ENP, 2009.
- [16] I . BOLDEA « variable speed generator -switched reluctance generator and their control» par Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- [17] Z.P.PAN , Y. JIN , H.ZHANG, « Study on switched reluctance generator »College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China 2003; PP 594-602.
- [18] 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.
- [19] M.TAKARLI, Y.NESSAB , « Modélisation et commande par mode glissement d'une MRV utilisée en alterno-démarreur pour véhicule » projet de fin d'études, ENP, 2011.
- [20] R.REDJEM, « Modélisation et optimisation d'une structure de machine à réluctance variable dédiée aux énergies renouvelables », Thèse de Doctorat en sciences en électrotechnique, Université Mentouri de Constantine 2010 .
- [21] 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, ENP, 2007.
- [22] S.GHENNA, D.HADBI, « Qualité de l'Energie Electrique Etude de Cas » projet de fin d'études, ENP, 2011.

Résumé:

L'objectif de ce travail consiste à étudier et commander la génératrice à réluctance variable (SRG) en régime saturé. Pour cela, un modèle numérique tient compte de la saturation magnétique et se base sur les caractéristiques de la machine a été proposé. La modélisation et la simulation sont réalisées dans un environnement Matlab/Simulink pour sa flexibilité et ses performances particulières. Différentes techniques d'alimentation de la machine sont considérées. Ensuite une étude des performances de la SRG est effectuée afin de définir les paramètres de commande optimum. Enfin une régulation de la tension de sortie de la SRG est développée pour l'alimentation de deux types de charges .R et RL.

Mots clés : MRV, SRG, modélisation, Simulink, régime saturé, performance, régulation, harmonique.

Abstract.....

The objective of this work consists to study the Switched reluctance generator SRG. To study the behavior of this machine a model which takes accounts the magnetic saturation and which based on the characteristics of the machine was proposed. The software Matlab/Simulink is selected for simulation because of its particular performances and its simplicity. Several techniques of power supply of the machine are brought to focus. Then a study of the performances of the SRG is carried out in order to define the optimum control parameters. Finally a regulation of the output voltage of the SRG is developed and used for the supply of two types of loads.

Key words: SRM, SRG, modeling, saturated mode, performance, regulation, harmonic.

ملخص

يهدف هذا العمل الى دراسة المولد ذو المقاومة المغناطيسية المتغيرة و التحكم فيه. لمحاكاة عمل هذا المولد اقترحنا نموذج يراعي التشبع المغناطيسي و مبني على خصائص الالة المغناطيسية . استعملنا لذلك برنامج ماتلاب\سيميلينك و ذلك لخصائصه المميزة و لسهولة استعماله. وضحنا عدة تقنيات لتغذية الالة. ثم قمنا بدراسة مختلف خصائص الالة للحصول على زوايا التحكم الامثل. اخيرا قمنا بتعديل التوتر الخارج من الالة واستعملناه في تغذية نوعين من الدارات.

كلمات مفتاحية: المولد ذو المقاومة المغناطيسية المتغيرة, نمذجة, التشبع المغناطيسي, خصائص الالة, تعديل, تذبذب.