



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة الشهيد العربي التبسي - تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des mines
قسم الإلكتروميكانيك
Département d'électromécanique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master académique

Filière : Electromécanique

Option : Electromécanique

THEME

Usage des convertisseurs statiques dans les systèmes de chauffage par induction

Présenté et soutenu par :

- Nebba Imene
- Rais Roumaïssa

Devant le jury:

Président :	Daoudi Rabah	MCB	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
Encadreur :	Zaamouche Fares	MCA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
Examineurs :	Houam Ala	MCB	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa

Promotion : 2022-2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative floral element consisting of a central flower with several petals and leaves, positioned to the left of the calligraphic text.



Année universitaire : 2022-2023

Tébessa le : 06/06/2023

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1. NEBBA Imene
2. RAIS Roumaïssa
3. /

Niveau : Master (02) Option : Electromécanique

Thème : Usage des convertisseurs statique dans les systèmes de chauffage par induction

Nom et prénom de l'encadreur : Dr. ZAMOUCHÉ Fary

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Introduction générale	
Chapitre (01)	
Chapitre (02)	
Chapitre (03)	
Chapitre (04)	
conclusion générale	

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) نبسة إيمان الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : هالسية

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 107871723 و الصادرة بتاريخ 2017

المسجل بمعهد المناجم قسم الإلكترونيات
و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

Usages des convertisseurs statiques dans les systèmes de chauffage par induction

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 08 جوان 2023

إمضاء المعني (ة)

الموافق عليه
الموافق عليه
الموافق عليه

عن رئيس المجلس الشعبي البلدي
و يتقو بيمين منه
إمضاء: فندي فرديد
معلق إداري رئيسي إقليمي

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) رابيس ر. ميساء الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالبة

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم 03.640.45.78604 و 1.1.99.9 و الصادرة بتاريخ 20.22/06/13

المسجل بمعهد الهناج قسم الالكترو ميكانيك

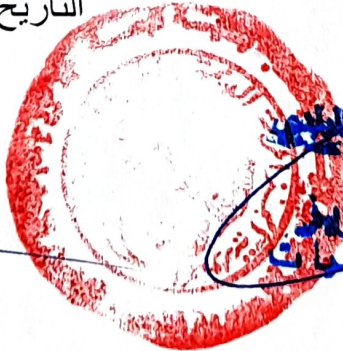
و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

Usage des convertisseurs statiques dans les systemes de chauffage par induction

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 20.23/06/08

إمضاء المعني (ة)



من رئيس المجلس العلمي
ويخو يرض منه
إمضاء رابيس ر. ميساء
مكلف بتسيير مكتب المصوبات

Résumé :

Le chauffage par induction dépend de plusieurs paramètres indépendants, tels que l'énergie fournie et la durée du chauffage, ainsi que de la fréquence d'alimentation électrique. La fréquence d'alimentation a un impact direct sur la puissance, qui dépend du carré du courant induit dans la charge et de la fréquence elle-même. Ainsi, l'utilisation de convertisseurs à résonance LLC à haute fréquence est nécessaire pour alimenter efficacement le chauffage par induction, car ils offrent une solution efficace. Dans cette étude, nous avons d'abord présenté une modélisation mathématique du système d'alimentation du chauffage par induction, comprenant l'inducteur et la charge à chauffer. Ensuite, nous avons proposé un schéma d'onduleur HT, qui prend en compte la résonance en utilisant un condensateur en série avec la charge. Par la suite, nous avons effectué des simulations pour optimiser la conception du système et réduire la dépendance aux essais empiriques. La topologie de l'onduleur NPC à résonant en pont amélioré LLC utilisée dans cette étude présente une forme d'onde de courant stable avec une fluctuation minimale, ce qui améliore les performances du chauffage par induction à haute fréquence. Cette étude vise à améliorer la compréhension des systèmes de chauffage par induction et à optimiser leur efficacité énergétique.

Mots clés : Chauffage par induction, Onduleur à résonance type NPC, Circuit LLC, Redresseur, Onduleur NPC, Courant Foucault.

الملخص :

يعتمد التسخين التعريفي على العديد من المعلمات المستقلة، مثل الطاقة الموفرة ومدة التسخين، بالإضافة إلى تواتر مصدر الطاقة. تردد الإمداد له تأثير مباشر على الطاقة، والتي تعتمد على مربع التيار المستحث في الحمل والتردد نفسه. وبالتالي، فإن استخدام محولات الرنين LLC عالية التردد ضروري لتوليد الطاقة بشكل فعال للتدفئة التعريفي، لأنها توفر حلاً فعالاً. في هذه الدراسة، قدمنا أولاً نموذجاً رياضياً لنظام طاقة التسخين بالحث، بما في ذلك المحث والحمل المراد تسخينه. بعد ذلك، اقترحنا مخطط عاكس عالي تردد، والذي يأخذ في الاعتبار الرنين باستخدام مكثف متسلسل مع الحمل. بعد ذلك، أجرينا عمليات محاكاة لتحسين تصميم النظام وتقليل الاعتماد على الاختبار التجريبي. تُظهر NPC الرنانة للجسر المحسن من شركة LLC وهي طوبولوجيا عاكس مستخدمة في هذه الدراسة شكل موجة تيار مستقر مع الحد الأدنى من التقلبات، مما يحسن أداء التسخين بالحث عالي التردد. تهدف هذه الدراسة إلى تحسين فهم أنظمة التدفئة التعريفي وتحسين كفاءتها في استخدام الطاقة.

كلمات مفتاحية : التسخين بالحث، عاكس الرنين من نوع NPC، دائرة LLC، المموم، العاكس NPC، التيار الدوامة.

Abstract

Induction heating depends on several independent parameters, such as the energy supplied and the duration of heating, as well as the frequency of the power supply. The supply frequency has a direct impact on the power, which depends on the square of the current induced in the load and the frequency itself. Thus, the use of high-frequency LLC resonance converters is necessary to effectively power induction heating, as they provide an efficient solution. In this study, we first presented a mathematical modeling of the induction heating power system, including the inductor and the load to be heated. Then, we proposed a HV inverter scheme, which takes into account the resonance by using a capacitor in series with the load. Subsequently, we performed simulations to optimize the system design and reduce reliance on empirical testing. The LLC-enhanced bridge resonant NPC a inverter topology used in this study exhibits a stable current waveform with minimal fluctuation, which improves the performance of high-frequency induction heating. This study aims to improve the understanding of induction heating systems and to optimize their energy efficiency.

Key words: Induction heating, NPC-type resonant inverter, LLC circuit, Rectifier, NPC inverter, Eddy current

Remerciements

Au terme de ce travail, nous devons nos remerciements tout d'abord à ALLAH qui nous a donné la force et le courage de suivre nos études et d'arriver à ce stade et à nos parents qui nous ont beaucoup soutenus pendant tout au long de notre parcours.

Nous ne trouvons pas les mots pour exprimer notre gratitude envers le Dr **Zaamouche Fares** notre encadreur, Ses excellents conseils et ses encouragements ont permis à ce travail d'aboutir. Ses capacités scientifiques, Son soutien, sa clairvoyance et ses compétences dans le domaine étaient notre grand support. Faire notre projet sous sa direction était pour nous un grand honneur et un immense bonheur.

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury le Dr **Daouadi Rabah** et Dr **Houam Ala** qui nous ont fait honneur d'examiner ce travail.

Enfin, nous renouvelons nos remerciements à ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour réaliser ce travail.



Dédicaces

Du profond cœur je remercie notre grand seigneur Allah de m'avoir donné la force, la santé, la persévérance et d'avoir illuminé mon chemin malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ensuite mon travail :

A ma mère qui la lumière de mes yeux et qui me comble d'amour.

A mon père qui m'a toujours épaulé, soutenu financièrement et moralement et donné Son amour et son respect.

Je souhaite également exprimer ma gratitude à ma jumelle, Rim, ma sœur Ikram et mon frère Adlen, pour avoir toujours été à mes côtés et être la raison de ma vie, et leurs soutiens qu'ils m'ont apportés.

Une mention spéciale à Monsieur Zaamouch Farès pour son encadrement, ses conseils, son optimisme, ses encouragements et sa disponibilité. C'est grâce à vous que ce succès est mérité. Je tiens également à remercier tous mes professeurs au cours des 5 dernières années pour leur enseignement précieux.

Un grand merci à mon binôme, Jmen, qui me donne de l'amour et de la vivacité. À tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, je vous souhaite encore plus de succès. Vous avez partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers toute personne ayant contribué, ne serait-ce qu'un peu, à ma réussite, que ce soit moralement ou physiquement.

ROUMAJSSA





Dédicaces

Je dédie ce travail ;

*En signe de respect et de reconnaissance aux Personnes les plus
chères dans ma vie Mon père et Ma mère.*

À toute la famille N.E.B.A.

À tous mes amis Roumaïssa, Chaima, Ferial et Chaima .

*À tous mes secrete AYÀ, IBRAHIM, MALIK ET
FERIAL*

À mon frere SAD ED.

*À mon binôme, ROUMASSA, qui me donne de l'amour
et de la vivacité*

*À toute personne ayant contribué, ne serait-ce qu'un peu, à ma
réussite, que ce soit moralement ou physiquement*

MÈRE



Sommaire

Titre	Page
Remerciement	
Dédicaces	
Résumé	
Sommaire	
Liste des figures	
Introduction général	1
Chapitre II : Etat de l'art de chauffage électrique.	
I.1.Introduction	4
I.2. Les méthodes de chauffage électrique	4
I.2.1. Chauffage par résistance	4
I.2.2. Chauffage par arc	4
I.2.3. Chauffage par rayonnement infrarouge	5
I.2.4. Chauffage par hystérésis diélectrique	5
I.2.5. Chauffage par bombardement électronique	5
I.2.6. Chauffage par induction électromagnétique	5
I.2.7. Principe de chauffage par induction	6
I.2.7.1. La loi d'induction électromagnétique	6
I.2.7.2. Effet Joule	7
I.3. Propriété de chauffage par induction	8
I.3.1. Transmis de puissance	8
I.3.2. Rendement électrique	9
I.3.3. Facteur de puissance	9
I.4. Caractéristiques électriques du chauffage par induction	9
I.4.1. L'effet de peau	9
I.4.2. Puissance transmis à charge	10
I.4.2.1. Cas d'un système physiquement linéaire	10
I.4.2.2. Influence des paramètres du matériau	10
I.4.2.3. Influence de la fréquence	11
I.4.2.4. Cas général	11
I.5. Application industrielle	11
I.5.1. Fusion de métal par induction dans les fours à creuset	11
I.5.2. Le brassage	12
I.5.3. Durcissement de l'acier par induction	12
I.6. Base électrique du chauffage par induction	13
I.7. Installation industrielle	13
I.7.1. Equipement de chauffage par induction	132
I.7.2. Source d'alimentation	14
I.7.3. Inducteur	14
I.8. Schème de principe de compensation	14
I.9. Conclusion	15
Chapitre II : Les convertisseurs statiques	
II.1. Introduction	17

II.2. Les semi-conducteurs	17
II.2.1. Diode	17
II.2.2. Transistor de puissance	18
II.2.3. Thyristor	18
II.3. Redresseur non commandé	19
II.3.1. Redresseur simple alternance monophasé	19
II.3.2. Redresseur monophasé double alternance	20
II.3.3. Redresseur triphasé simple alternance	21
II.3.4. Redresseur triphasé double alternance triphasée	21
II.4. Redresseur triphasé commandé	22
II.5. Les onduleurs	23
II.5.1 Les onduleur de tension	24
II.5.2. Les onduleurs de courant	24
II.6. Les onduleurs à résonant	25
II.6.1. Onduler résonant série	25
II.6.2. Onduleur a résonant parallèle	26
II.7. Les différentes stratégies de commande des convertisseurs statique	28
II.7.1. Onduleurs à MLI	28
II.8. Principe de la technique MLI	28
II.8. Conclusion	29
Chapitre III: Modélisation de system d'alimentation de chauffage par induction.	
III.1. Introduction	31
III.2. Description du système	31
III.3. Modélisations du système	32
III.3.1. Modélisation du redresseur	32
III.3.2. Modélisation du filtre	33
III.3.2.1. Calcul de la valeur minimale de la capacité	34
III.3.2.2. Calcul de la valeur de l'inductance	35
III.3.3. Modélisation de l'Onduleur	35
III.3.4. Modélisation de la charge	39
III.4. Conclusion	40
Chapitre IV: Présentation des résultats et discussions	
IV.1. Introduction	42
IV.2. Description de système	42
IV.2.1. Schéma de principe	42
IV.3. Partie A	43
IV.3.1. Model de simulation	43
IV.3.1.1. Cas de $f_s = f_r$	43
IV.3.1.2. Resultats et discussion	44
IV.3.1.3. Cas de $f_s < f_r$	48
IV.3.1.4. Résultats et discussion	49
IV.3.1.5. Cas $f_s > f_r$	52
IV.3.1.6. Résultats et discussions	53
IV.4. PARTIE B	56
IV.4.1. Model de simulation	57
IV.4.2. Résultats et discussions	58
IV.5. Partie C	60

IV.5.1. Model du simulation	61
IV.5.2. Résultats et discussion	62
IV.6.Conclusion	64
conclusion générales	66
Bibliographie	
Annexe	

Liste de figure

Titre	Page
Chapitre II :	
Figure I.1. Chauffage par résistance	4
Figure I.2. Chauffage par arc	4
Figure I.3. Chauffage par rayonnement infrarouge	5
Figure I.4. Chauffage par induction.	5
Figure I.5. Principe de chauffage par induction	6
Figure I.6. Loi de Faraday	7
Figure I.7. Courants de Foucault induits	7
Figure I.8. Fusion de métal par induction dans les fours à creuse.	12
Figure I.9. Brasage	12
Figure I.10. Inducteur pour durcissement.	13
Figure I.11. L'installation de chauffage par induction.	13
Figure I.12. Schème de principe de compensation de chauffage par induction.	15
Chapitre II :	
Figure.II.1. La diode	17
Figure II.2. Représente de caractéristiques ($v - i$) d'un transistor	18
Figure II.3. Les symboles utilisés pour représenter les différents types de transistors.	18
Figure II4. Représentation schématique d'un thyristor.	19
Figure II.5. Montage de redresseur monophasé simple alternance.	19
Figure II.6. Les ondes des redresseur	20
Figure II.7. Montage de redresseur monophasé double alternance.	20
Figure II.8. Les ondes du redresseur.	20
Figure II.9. Montage de redresseur triphasé simple alternance.	21
Figure II.10. Les ondes du redresseur.	21
Figure II.11. Montage d'un redresseur triphasé double alternance	22
Figure II .12. Les ondes du redresseur.	22
Figure II.13. : redresseur triphasé commandé à base des thyristors.	23
Figure II.14. Les ondes du redresseur.	23
Figure II.15. Schéma de principe de l'onduleur.	24
Figure II.16. Onduleur de tension.	24
Figure II.17. Onduleur de courant.	24
Figure II.18. Onduleur à résonant série.	25
Figure II.19. L'amplitude de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de Q (RLC série).	26

Figure II.20. La phase de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de Q (RLC série).	26
Figure II.21. Onduleur à résonant parallèle.	26
Figure II.22. L'amplitude de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de Q (RLC parallèle).	27
Figure II.23. La phase de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de Q (RLC parallèle).	27
Figure II.24. Exemple de la technique de commande MLI.	28
Chapitre III:	
Figure.III.1. Forme d'onde des tensions du réseau.	31
Figure.III.2. Schéma de principe du système de chauffage par induction.	32
Figure.III.3. Redresseur triphasé tout diodes.	32
Figure.III.4. Tension de sortie du redresseur.	33
Figure.III.5. Représentation de filtre passe-bas.	34
Figure.III.6. Tension filtrée.	34
Figure.III.7. Principe de l'alimentation par onduleur en tension.	35
Figure.III.8. Schéma équivalent de l'onduleur.	36
Figure.III.9. Modèle d'onduleur triphasé a MLI sous Simulink/MATLAB.	38
Figure.III.10. Schéma de la charge pour le chauffage par induction.	39
Figure.III.11. La variation de courant en fonction de ω .	40
Chapitre IV:	
Figure.IV.1. Schéma de convertisseur à résonance en pont H.	42
Figure.IV.2. Modèle simulation du convertisseur a résonance en pont H.	44
Figure.IV.3. Générateur d'impulsions (fréquence a interrupteur variable).	44
Figure.IV.4. Tension et courant de MOSFET on haut de convertisseur .	45
Figure.IV.5. Forme d'onde de tension à la sortie de l'onduleur.	45
Figure.IV.6. Courants dans la circuit de résonance .	46
Figure.IV.7. Les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la diode D1.	47
Figure.IV.8. Les formes d'onde de tension et de courant au n4eau de la diode D1.	48
Figure.IV.9. Modèle simulation du convertisseur a résonance en pont H.	48
Figure.IV.10. Tension et courent de MOSFET on haut de convertisseur.	49
Figure.IV.11. Courants dans le circuit de résonance.	50
Figure.IV.12. Forme d'onde de tension à la sortie de l'onduleur.	51
Figure.IV.13. Les formes d'onde de tension et de courant au n4eau de la diode D1.	51
Figure.IV.14. Les formes d'onde de tension et de courant au n4eau de la charge .	52
Figure.IV.15. Modèle simulation du convertisseur à résonance en pont H.	53
Figure.IV.16. Tension et courant de MOSFET on haut de convertisseur	54
Figure.IV.17. Courants dans la circuit de résonance .	55
Figure.IV.18. Forme d'onde de tension à la sortie de l'onduleur.	55
Figure.IV.19. Les formes d'onde de tension et de courant au n4eau de la diode D1.	56
Figure.IV.20.les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la charge.	56
Figure.IV.21. Modèle simulation du convertisseur à résonance.	57
Figure.IV.22. Générateur d'impulsions (commande MLI).	57
Figure.IV.23. Les formes d'onde de tension et de courant au n4eau de l'interrupteur 1 situé en haut d'onduleur.	58
Figure.IV.24. Les formes les courants de circuit de résonance.	59
Figure.IV.25. Les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la diode.	60
Figure.IV.26. La forme de tension et de courant de la charge.	61
Figure.IV.27. Schéma bloc du convertisseur statique à résonance de l'entreprise.	61

Figure.IV.28. Stratégie de commande.	62
Figure.IV.29. La tension à la sortie du redresseur.	63
Figure.IV.30. La tension à la sortie d'onduleur.	63
Figure.IV.31. La tension de charge.	63
Figure.IV.32. Le courant de charge.	64

Liste de tableaux

Titre	Page
Chapitre I:	
Tableau I.1. Comparaison entre différentes structures de compensation.	15
Chapitre III:	
Tableaux.III.1. Tensions de sortie d'un redresseur PD3.	33
Tableau.III.2. Mode de fonctionnement de l'onduleur.	38
Chapitre IV:	
Tableau.IV.1. Les paramètre du convertisseur résonnant LLC.	43
Tableau.IV.2. Les paramètre du simulation.	62

Liste Des Symboles

ω_r : La pulsation. En radian sur seconde [rad/s].

R_{ch} : La résistance de charge. En Ohm [Ω].

L_{ch} : L'inductance de charge. En Henri [H].

C_{ch} : La capacité de compensation en série. En Farad [F].

L_f : L'inductance du filtre de sortie de redresseur, [H].

C_f : La capacité du filtre de sortie de redresseur, [F].

U_{max} : La tension maximum de source, en [V].

$V_{1,2,3}$: Les tensions simples de source triphasée, en [V].

q : La charge instantanée du condensateur, en [C].

Q' : Le facteur de qualité.

ΔV_{fmax} : L'ondulation de la tension, en [v].

U_{dc} : Tension filtrée. [V].

U_d : Tension redressée. [V].

i_d : Courant redressée [A].

$H(s)$: Fonction de transfert.

E : tension induit [V].

\emptyset : Flux magnétique [Wb].

t : temps [s].

P : puissance [W]

I : courant électrique [A]

R : résistance [Ω]

d : Diamètre du cylindre [m].

h : Hauteur du cylindre [m].

H : Intensité du flux magnétique [A/m].

ρ : Résistivité [$\Omega \cdot m$].

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide.

μ_r : Perméabilité relative.

f : Fréquence [Hz].

k_C : Facteur de couplage.

k_F : Facteur de transmission de puissance.

P : puissance transmise à la charge.

P_i : Puissance dissipée dans l'inducteur.

δ : Epaisseur de peau [m].

σ : Conductivité électrique qui varie en fonction de la température [S/m].

μ_0 : Perméabilité magnétique absolue du vide.

μ_r : Perméabilité relative du matériau.

f : Fréquence du fonctionnement [Hz].

H_S : La valeur efficace du champ magnétique à la surface (S) du conducteur.

J : est la densité instantanée des courants induits.

dV : est l'élément de volume.

A : Anode d'une diode.

k: cathode d'un diode.

B : La base d'un transistor bipolaire.

C : collecteur d'un transistor bipolaire.

D1,2,4 : diode de redressement.

f : Fréquence [Hz].

f_r : fréquence de résonance [Hz].

G : la grille d'un MOSFET.

I_1 : le courant dans l'inducteur [A].

I_2 : le courant dans la charge induit [A].

i_c : le courant dans la capacité [A].

i_a : le courant absorbé par l'onduleur [A].

i_s : le courant dans l'inducteur [A].

L_f : inductance de lissage [H].

L_p : l'inducteur [H].

L : l'inductance [H].

R_{eq} : La résistance rapporté de la pièce [Ω].

R_S : La résistance série équivalent R_{eq} [Ω].

M : L'indice de modulation.

Introduction Générale

Auparavant, le chauffage des objets était principalement réalisé à l'aide de sources de chaleur naturelles comme le bois ou le charbon. Toutefois, avec les avancées scientifiques, l'accent est désormais mis sur la recherche de solutions pour relever les défis posés par les nouvelles applications commerciales, notamment dans le contexte économique actuel. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance et des sciences des matériaux magnétiques, le traitement thermique a connu une avancée significative. Le traitement thermique par induction, largement utilisé dans l'industrie, présente de nombreux avantages par rapport aux méthodes traditionnelles. Il permet de renforcer et de modifier efficacement et en toute sécurité les caractéristiques des pièces métalliques, sans recourir à une flamme directe. L'énergie est transférée sans contact physique entre la pièce et l'élément électromagnétique, préservant ainsi l'intégrité de la pièce et assurant une efficacité énergétique optimale.[1]

Différentes méthodes de chauffage présentent des variations en termes de vitesse de chauffage et de profondeur de pénétration de la chaleur. Le chauffage à la flamme est le procédé le plus lent, tandis que le chauffage par induction dépend principalement de la fréquence du courant alternatif utilisé, de la conception de l'inducteur et de la qualité du couplage magnétique. La fréquence du courant détermine la profondeur de pénétration de la chaleur, et la température d'austénitisation peut généralement être atteinte en quelques secondes lors du chauffage par induction.[2]

Le chauffage par induction implique trois étapes successives de phénomènes physiques [3] :

- le transfert d'énergie de l'inducteur vers l'objet à chauffer par le biais de l'induction électromagnétique,
- la conversion de cette énergie en chaleur dans l'objet par l'effet Joule (où l'énergie électromagnétique se transforme en chaleur en raison du passage du courant),
- la transmission de la chaleur à travers l'objet par conduction, convection et rayonnement thermique, permettant ainsi sa propagation et son transfert à d'autres éléments environnants.

Le chauffage par induction est largement utilisé dans les forges industrielles, en particulier dans l'industrie automobile. Au fil du temps, de nouvelles technologies ont été développées, ce qui a conduit à une multiplication des applications du chauffage par induction, telles que le traitement thermique, le brasage, le soudage de tubes, la fusion et la forge.

Les caractéristiques essentielles du chauffage par induction sont les suivantes, [3] :

- la création de chaleur à l'intérieur même du matériau à chauffer,
- une faible inertie thermique par rapport aux méthodes de chauffage traditionnelles comme les fours électriques,
- une densité de puissance élevée permettant un chauffage rapide.

Les convertisseurs à résonance LLC, tels que les onduleurs, offrent une solution très efficace pour le chauffage par induction. Ce sont des circuits électroniques qui exploitent la résonance dans des configurations série ou parallèle afin de réduire les contraintes électriques et thermiques sur les interrupteurs, de minimiser les harmoniques et de limiter les pertes de commutation. En utilisant le principe de la résonance LLC, ces convertisseurs permettent de réaliser des alimentations de haute performance dans différents domaines. Grâce à une commutation en douceur des interrupteurs, ils facilitent

Introduction Générale

le fonctionnement à des fréquences moyennes et élevées. Ainsi, les convertisseurs à résonance ont acquis une importance considérable par rapport aux convertisseurs classiques à découpage dans de nombreuses applications industrielles. Cependant, ils présentent des structures complexes et leur mise en œuvre nécessite une parfaite compréhension de la structure et du mécanisme de commutation des interrupteurs.

Dans le domaine du chauffage par induction, les onduleurs de puissance basés sur des thyristors, des MOSFETs ou des IGBTs sont largement utilisés. Une attention particulière a été accordée au développement d'onduleurs capables de générer de grandes puissances pour le chauffage par induction à des fréquences comprises entre 10 et 200 kHz.[4]

Pour concevoir ces systèmes avec les caractéristiques souhaitées, il est essentiel de prendre en compte les propriétés de la charge ainsi que le fonctionnement des interrupteurs. Des circuits ont été conçus pour permettre une commutation naturelle en blocage, en exploitant la nature inductive de la charge. Les alimentations à résonance LLC ont émergé en tirant parti de ces caractéristiques et en ajoutant un condensateur à la charge. Ce condensateur permet d'obtenir un circuit résonant dont la fréquence propre correspond à la fréquence de traitement thermique désirée. [5]

Dans ce travail, le but de cette étude est d'analyser l'alimentation des systèmes de chauffage par induction en utilisant des convertisseurs à résonance. Pour atteindre cet objectif, un plan de travail en quatre chapitres a été adopté, structuré de la manière suivante :

- Le premier chapitre présente les différentes méthodes de production de chaleur électrique, notamment l'effet Joule (conduction, induction, arc électrique), le chauffage par rayonnement (laser) et le chauffage par frottement
- Dans le deuxième chapitre, nous allons étudier de manière approfondie les divers types de convertisseurs statiques requis et les semi-conducteurs utilisés pour garantir le bon fonctionnement du système de chauffage par induction.
- Le troisième chapitre explore la modélisation des systèmes, un domaine de recherche étudié par diverses communautés scientifiques. Les spécialistes de l'automatique accordent une attention particulière à la modélisation des systèmes pour créer un modèle complet qui englobe tous les modes de fonctionnement.
- Enfin, le quatrième chapitre aborde la simulation du chauffage par induction, qui permet d'étudier et de modéliser le fonctionnement d'un système de chauffage avant sa mise en pratique. Cette simulation reproduit virtuellement les conditions réelles et évalue l'efficacité ainsi que le comportement thermique du système.

Chapitre I :

Etat de l'art sur le chauffage électrique

Chapitre I : Etat de l'art sur le chauffage électrique

I.1. Introduction

Il existe plusieurs méthodes pour utiliser l'électricité pour produire de la chaleur. Les méthodes basées sur l'effet Joule, comme le chauffage par conduction directe ou indirecte, le chauffage par induction et le chauffage par arc électrique, impliquent le passage de courant à travers un matériau conducteur pour générer de la chaleur par effet Joule. Les méthodes basées sur le rayonnement, telles que le chauffage par laser, impliquent l'émission d'un rayonnement électromagnétique à haute densité de puissance. Enfin, les techniques liées aux frottements utilisent un champ électrique pour polariser et déformer les molécules d'un matériau, générant de la chaleur par frottement lorsqu'elles se frottent les unes contre les autres.

I.2. Les méthodes de chauffage électrique

I.2.1. Chauffage par résistance

Le chauffage par résistance utilise des résistances qui produisent de la chaleur par l'effet Joule lorsqu'elles sont connectées directement à une source d'énergie. On peut distinguer le chauffage direct, où le courant électrique traverse directement la pièce à chauffer, et le chauffage indirect, où ce n'est pas le cas. [6]

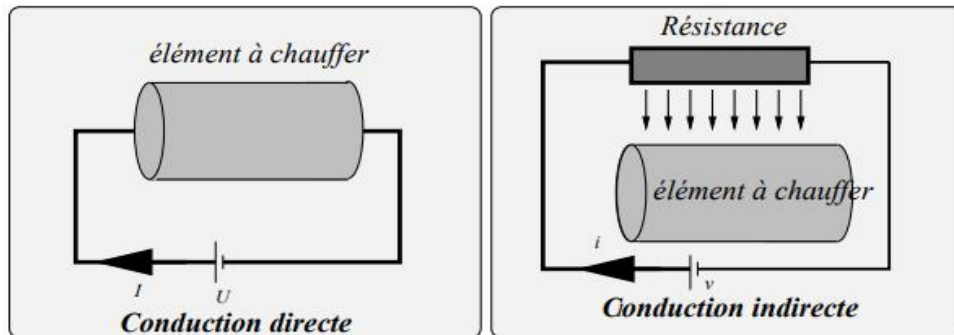


Figure I.1. Chauffage par résistance. [7]

I.2.2. Chauffage par arc

Le chauffage par arc génère de la chaleur à partir d'un arc électrique créé lors du passage du courant entre deux électrodes. Cette méthode permet d'utiliser des puissances élevées pour atteindre des températures très élevées, pouvant aller jusqu'à environ 300 °C. [6]

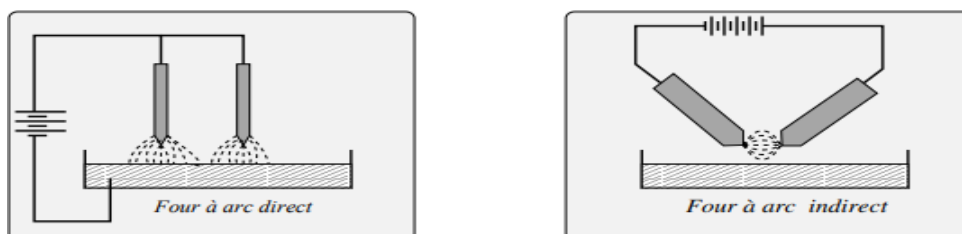


Figure I.2. Chauffage par arc. [7]

Chapitre I : Etat de l'art sur le chauffage électrique

1.2.3. Chauffage par rayonnement infrarouge

Ce type de chauffage se sert du rayonnement infrarouge pour transférer de l'énergie à un objet qui peut absorber les radiations émises par des sources situées dans le spectre compris entre la limite du visible et celle des ondes hertziennes. Il est souvent utilisé pour les traitements à basse température, tels que le séchage de peintures et vernis. [6]



Figure I.3. Chauffage par rayonnement infrarouge. [7]

1.2.4. Chauffage par hystérésis diélectrique

La génération de chaleur est principalement due aux mouvements des charges électriques à l'échelle atomique ou moléculaire, qui sont induits par un champ électrique à haute fréquence. [6]

1.2.5. Chauffage par bombardement électronique

La chaleur nécessaire est fournie par un faisceau d'électrons à haute énergie. Ils sont accélérés par un champ électrique de haute intensité, puis focalisés par un champ magnétique ou électrique, et projetés sur la charge à fondre sous la forme d'un faisceau concentré. Leur énergie cinétique est convertie en énergie thermique avec peu de perte. La puissance spécifique peut être ajustée à volonté en ajustant la concentration d'électrons. Jusqu'à 8MW/cm^2 . [7]

1.2.6. Chauffage par induction électromagnétique

Est un système de chauffage dans laquelle un champ électromagnétique est utilisé pour produire de la chaleur dans un matériau conducteur. Ce processus se produit lorsque le champ électromagnétique provoque des courants électriques dans une substance conductrice ce qui crée de la chaleur par effet joule. [6]

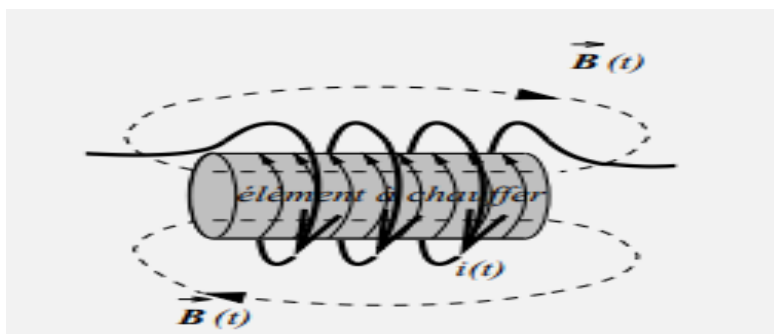


Figure I.4. Chauffage par induction. [7]

Chapitre I : Etat de l'art sur le chauffage électrique

I.2.7. Principe de chauffage par induction

Lorsqu'un courant électrique (continu ou alternatif) est transmis à travers un inducteur (bobine) un champ électromagnétique est généré autour de celui-ci. Lorsque ce champ est utilisé pour chauffer un matériau conducteur, des courants électriques appelés courants de Foucault sont créés à l'intérieur de celui-ci. Ceux-ci produisent de la chaleur par effet joule, qui est la production de chaleur en raison de la résistance de substance à l'écoulement des courants électriques. Le principe du chauffage par induction électromagnétique est basé sur deux phénomènes physiques :

- L'induction électromagnétique.
- L'effet joule. [8] [9].

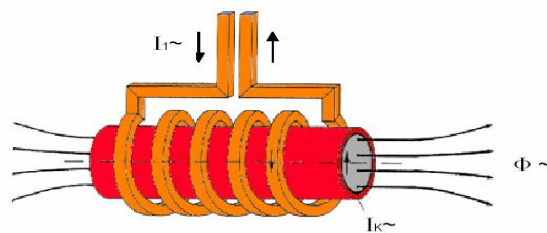


Figure I.5. Principe de chauffage par induction. [10]

I.2.7.1. La loi d'induction électromagnétique

L'induction électromagnétique est le vecteur de transfert de chaleur depuis la source vers l'objet à chauffer. Le transfert de l'énergie vers l'objet à chauffer est généré par induction électromagnétique. Quand une boucle d'une substance conductrice (voir la figure I.6 (a)) est plongée dans un champ magnétique, on voit apparaître aux bords de la boucle une tension induite. C'est formulé de la manière suivante, [8]:

$$E = \frac{d\phi}{dt} \quad (I.1)$$

E : tension induit [V].

Ø: Flux magnétique [Wb].

t : temps [s].

Lorsque la boucle est mise en court-circuit, la tension induite E va entraîner l'apparition d'un courant de court-circuit circulant dans le sens opposé au phénomène qui le crée comme le stipule la loi de Faraday-Lenz (voir la figure I.6(b)).

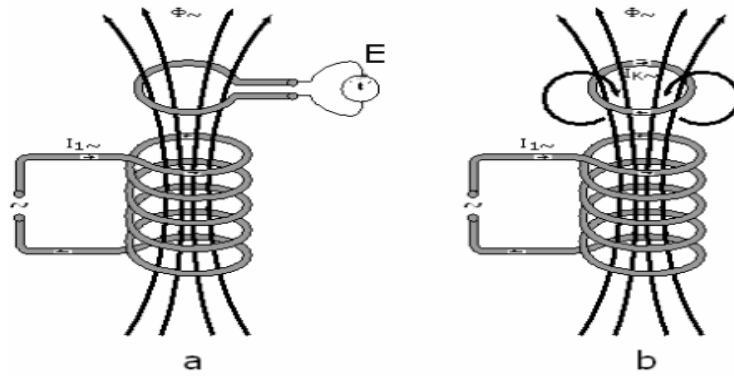


Figure I.6. Loi de Faraday. [8]

Lorsqu'un conducteur plein par exemple un cylindre, est soumis à une variation de flux magnétique, on voit apparaître, comme dans le cas de la boucle fermée, des courants induits. Ces courants sont dits courants de Foucault et circulent de façon non homogène dans le cylindre (voir figure I.7). Les courants de Foucault, via la résistance électrique interne du cylindre, viennent chauffer le conducteur conformément à la loi de Joule. [8]

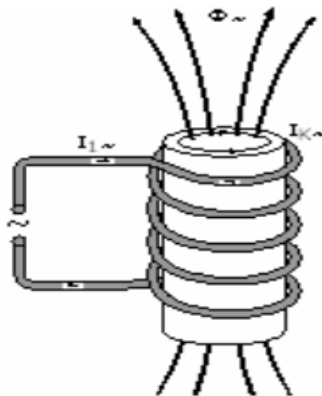


Figure I.7. Courants de Foucault induits. [8]

I.2.7.2. Effet Joule

Lorsqu'un courant I [A] traverse un conducteur électrique de résistance R [Ω], la puissance dissipée dans le conducteur est de type, [8] :

$$P = I^2 R \quad (I.2)$$

P: puissance [W]

I : courant électrique [A]

R: résistance [Ω]

Chapitre I : Etat de l'art sur le chauffage électrique

I.3. Propriété de chauffage par induction

I.3.1. Transmis de puissance

L'effet Joule est responsable de l'augmentation de la température de l'objet à chauffer dans le processus de chauffage par induction, mais la formulation simple de la puissance :

$P = I^2R$ Ne peut pas être utilisée en raison de la non-uniformité de la distribution des courants de Foucault dans le conducteur. La puissance déposée peut être décrite comme, [11] :

$$P = \pi dhH^2(\sqrt{\pi\rho\mu_0\mu_r f})k_C k_F \quad (I.3)$$

d : Diamètre du cylindre [m].

h : Hauteur du cylindre [m].

H : Intensité du flux magnétique [A/m].

ρ : Résistivité [$\Omega.m$].

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide.

μ_r : Perméabilité relative.

f : Fréquence [Hz].

k_C : Facteur de couplage.

k_F : Facteur de transmission de puissance.

Les facteurs de correction, k_F (facteur de transmission de puissance) et k_C (facteur de couplage), sont utilisés pour compléter les calculs en prenant en compte la relation entre la profondeur de pénétration et les dimensions externes de la charge ainsi que les différences entre les dimensions de la charge et de l'inducteur. Le facteur de transmission de puissance dépend de la géométrie de la charge tandis que le facteur de couplage corrige les différences de dimensions entre la charge et l'inducteur. Cette correction diminue avec la longueur de l'inducteur et l'écart entre l'inducteur et la charge. La puissance de l'induction peut être augmentée en augmentant l'intensité du flux magnétique, ce qui se fait en augmentant le nombre d'ampères-tours de l'inducteur. Cependant, une forte augmentation de la fréquence ne produit qu'une petite augmentation de la puissance, et plus la fréquence augmente, plus les pertes dans l'alimentation sont importantes et plus la profondeur de pénétration diminue. Les caractéristiques mécaniques de la charge, telles que la densité (ρ) et la constante diélectrique relative (μ_r), jouent un rôle important. Pour les matériaux ferromagnétiques, la puissance déposée diminue fortement au-delà de la température de Curie, où ($\mu_r = 1$ si $T > T_{Curie}$). [12]

Chapitre I : Etat de l'art sur le chauffage électrique

1.3.2. Rendement électrique

Le rendement électrique est défini comme su :

$$\eta = \frac{P}{P_i + P} \quad (\text{I.4})$$

P : puissance transmise à la charge.

P_i : Puissance dissipée dans l'inducteur.

Le ratio diamètre/profondeur de pénétration (dans le cas d'une charge cylindrique) ainsi que la conception de l'inducteur ont une forte influence sur le rendement électrique. Pour optimiser le rendement, il convient de respecter certaines règles de base, telles que :

- En général, pour l'inducteur, il est recommandé d'utiliser un matériau de faible résistance, tel que le cuivre électrolytique.
- Réduire au maximum la distance entre les enroulements
- Générer une bonne connexion entre l'inducteur et la charge en limitant l'entrefer et en veillant à ce que la taille de l'inducteur soit suffisamment longue. [12]

1.3.3. Facteur de puissance

On peut considérer l'inducteur et la charge comme une charge globalement inductive qui consomme une grande quantité d'énergie réactive. Cette inductance est causée à la fois par la présence de l'entrefer entre l'inducteur et la charge, et par le comportement inductif de la charge elle-même, (dans le cas d'un cylindre). Le facteur de puissance de l'inducteur et de la charge se situe généralement entre 0,05 et 0,6. Dans tous les cas, il est nécessaire d'augmenter le facteur de déplacement à l'aide de condensateurs. [12]

I.4. Caractéristiques électriques du chauffage par induction

En industrie, l'efficacité du chauffage par induction est évaluée par deux mesures: son efficacité thermique et son efficacité énergétique :

- L'effet de peau décrit comment les courants induits dans une pièce se répartissent. Le champ magnétique alternatif qui entre dans le matériau diminue rapidement et disparaît, entraînant avec lui les courants induits.
- La puissance dissipée dans la pièce est une caractéristique du phénomène électrique. [13]

I.4.1. L'effet de peau

L'effet de peau décrit la distribution des courants induits dans une substance conductrice soumise à un champ magnétique variable. Cette distribution des courants décroît à partir de la surface de la substance, créant des non-uniformités qui sont traduites par l'épaisseur de peau ou la profondeur de pénétration du champ magnétique. [13]

Chapitre I : Etat de l'art sur le chauffage électrique

Dans le cas d'un conducteur plan, cette épaisseur de peau peut être calculée par la formule, [13] [12] [14] :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (\text{I.5})$$

Où :

δ : Epaisseur de peau [m].

σ : Conductivité électrique qui varie en fonction de la température [S/m].

μ_0 : Perméabilité magnétique absolue du vide.

μ_r : Perméabilité relative du matériau.

f : Fréquence du fonctionnement [Hz].

La profondeur de pénétration des courants induits dépend de plusieurs facteurs, notamment la fréquence du champ magnétique, la conductivité électrique et la perméabilité magnétique du matériau à chauffer, ainsi que la température de la pièce à chauffer. Selon l'équation (I.4), cette profondeur diminue lorsque la fréquence ou l'une des propriétés physiques du matériau (conductivité électrique ou perméabilité magnétique) augmente. [13]

I.4.2. Puissance transmis à charge

I.4.2.1. Cas d'un système physiquement linéaire

La puissance de chauffage induite, dans un conducteur plan, a pour expression :

$$P_s = \rho \frac{H_s^2}{\delta} S \quad (\text{I.6})$$

H_s : La valeur efficace du champ magnétique à la surface (S) du conducteur.

Si on remplace δ par son expression, on trouve

$$P_c = \rho H_s \sqrt{\pi f \mu_r \mu_0} S \quad (\text{I.7})$$

La formule indique que la puissance dépend du carré du champ magnétique, qui est proportionnel au carré de l'intensité du courant électrique générant ce champ. La fréquence du courant alternatif, la perméabilité magnétique du matériau de la bobine d'induction et la conductivité électrique du milieu à chauffer. [15]

I.4.2.2. Influence des paramètres du matériau

La formule précédente montre que cette puissance augmente avec la résistivité ρ la perméabilité ($\mu = \mu_r \mu_0$) et de la fréquence f .

Chapitre I : Etat de l'art sur le chauffage électrique

I.4.2.3. Influence de la fréquence

La fréquence f joue un rôle crucial d'autant plus que c'est un paramètre à la disposition de l'utilisateur. Nous pouvons ainsi, en choisissant bien la valeur de la fréquence entre 50 Hz et 10 MHz, faire varier la profondeur de pénétration. Nous comprenons donc que le choix de la fréquence est essentiel avant toute opération de chauffage inductif. En augmentant la fréquence du courant alternatif, on peut augmenter la puissance transmise à la charge dans le processus de chauffage par induction. Toutefois, il est important de se rappeler que cette augmentation de fréquence entraîne également une diminution de la profondeur de pénétration du champ magnétique, ce qui peut conduire à un chauffage trop intense dans une épaisseur trop faible. Cette propriété est souvent utilisée pour des traitements thermiques superficiels qui nécessitent un chauffage rapide. En somme, l'optimisation de la fréquence est un compromis entre l'augmentation de la puissance transmise et la profondeur de pénétration appropriée pour obtenir les résultats souhaités. [15]

I.4.2.4. Cas général

En général, la densité volumique de la puissance instantanée dissipée par effet Joule peut être calculée à partir de la densité des courants induits en utilisant l'expression suivante. [15]

$$p(t) = \frac{1}{\sigma} |J(t)|^2 \quad (\text{I.8})$$

J : est la densité instantanée des courants induits.

Ainsi, la puissance totale dissipée par effet Joule au niveau de la pièce à chauffer sera :

$$P_{tot} = \iiint_V P(t) dV \quad (\text{I.9})$$

dV : est l'élément de volume.

I.5. Application industrielle

Le chauffage par induction est plus répandu dans l'industrie pour diverses applications telles que la fusion de métaux, le brasage, le soudage et les traitements de surface.

I.5.1. Fusion de métal par induction dans les fours à creuset

Le chauffage par induction est utilisé dans la fusion de métaux, où la surface intérieure du creuset est revêtue d'un matériau réfractaire appelé brasque pour contenir le matériau à fondre. Le creuset est entouré d'une bobine inductrice refroidie par eau et d'un noyau de fer pour améliorer le couplage magnétique. Les applications à moyenne fréquence offrent une plus grande flexibilité de production par rapport aux applications à basse fréquence, qui sont réservées aux applications de grande taille en termes de puissance et de capacité. Les fours à creuset à fréquence moyenne peuvent atteindre des gammes de puissance allant jusqu'à 10 MW pour les applications standards, et jusqu'à 1200 kW/tonne pour les applications spécifiques. Les niveaux de puissance élevés permettent de réduire considérablement les temps de fusion. On

Chapitre I : Etat de l'art sur le chauffage électrique

observe une tendance à remplacer progressivement les applications à basse fréquence (50 Hz) par des applications à fréquence moyenne en raison de leur plus grande flexibilité de production pour des tailles de production plus modestes. [12]

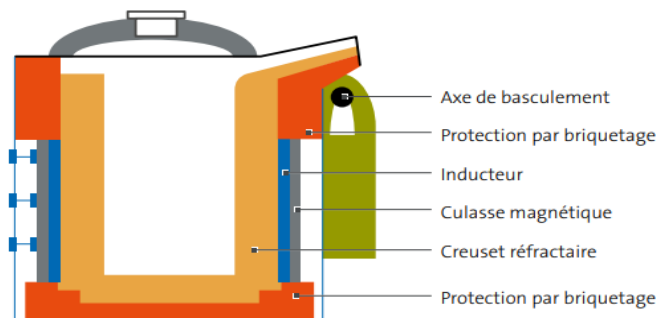


Figure I.8. Fusion de métal par induction dans les fours à creuset. [12]

I.5.2. Le brassage

Le brassage est une méthode d'assemblage de deux pièces en utilisant un matériau porté à la température de fusion pour les joindre. Dans cette technique, les deux pièces à joindre sont chauffées à une température supérieure à la température de fusion du matériau d'apport. L'induction est couramment utilisée pour chauffer les pièces localement, ce qui permet d'augmenter rapidement la température et de mieux contrôler les éventuels problèmes d'oxydation et de changement de structure ou de composition du matériau. Le chauffage par induction convient parfaitement aux vitesses de production élevées sur les lignes de production automatisées. Il est ainsi possible de souder plusieurs pièces en même temps. [12]



Figure I.9. Brasage. [12]

I.5.3. Durcissement de l'acier par induction

Le chauffage à induction est couramment utilisé pour ce type de traitement, car il permet une application précise du traitement localement, sans changer la composition chimique de la couche de surface et en évitant les déformations. De plus, le chauffage à induction offre une efficacité énergétique supérieure à celle des autres techniques de chauffage, grâce à sa précision d'échauffement. Les densités de puissance pour les applications de durcissement par induction sont généralement comprises entre 1,5 et 5 kW/cm², pour un temps de traitement d'environ 2 secondes. Des inducteurs équipés d'un système de pulvérisation permettent de refroidir

Chapitre I : Etat de l'art sur le chauffage électrique

rapidement la pièce juste après l'échauffement. Le durcissement de surface est particulièrement adapté aux processus automatisés à haut volume de production, car le chauffage à induction permet d'obtenir une production constante et de bonne qualité, avec une consommation énergétique et des pertes de production réduites par rapport aux techniques de chauffage conventionnelles. [12]

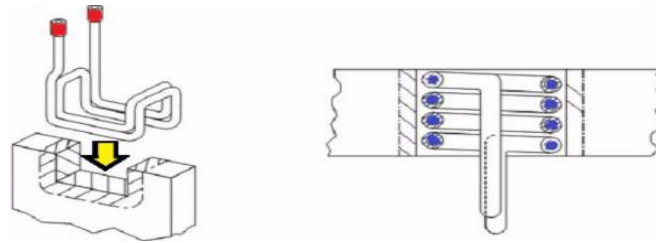


Figure I.10. Inducteur pour durcissement. [12]

I.6. Base électrique du chauffage par induction

Le principe de l'induction, proche du transformateur, consiste à utiliser un « primaire » (inducteur) fonctionnant à haute fréquence (entre 50Hz et 1 MHz) couplé à une pièce conductrice. Le primaire induit un courant dans le secondaire, mais il n'y a ni connexion électrique ni contact entre les deux. [16]

I.7. Installation industrielle

Le schéma de principe d'une installation de chauffage par induction, comme illustré dans la Figure (I.11), implique une source d'énergie qui est généralement de l'énergie électrique triphasée sinusoïdale. Le circuit de chauffage, composé d'un inducteur et d'une pièce à chauffer, est essentiellement inductif. Afin de minimiser la consommation d'énergie réactive dans le circuit, il est nécessaire d'ajouter des condensateurs pour augmenter le facteur de déplacement. [12]

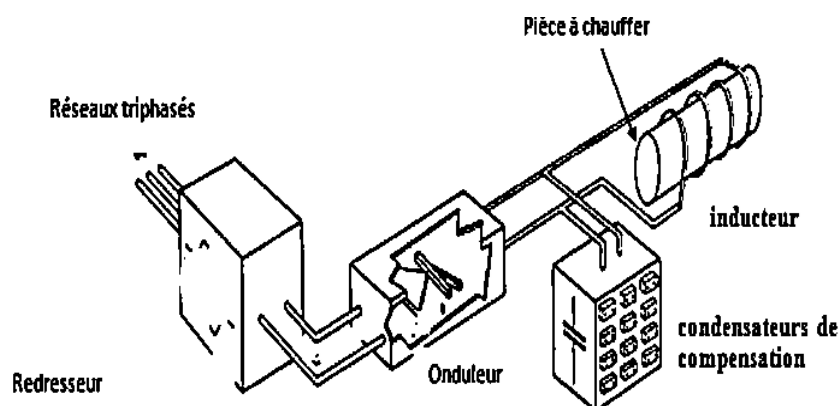


Figure I.11. L'installation de chauffage par induction. [15]

I.7.1. Equipement de chauffage par induction

Un équipement de chauffage par induction est composé de, [15] :

Chapitre I : Etat de l'art sur le chauffage électrique

- Utilisation d'un inducteur unique ou de plusieurs inducteurs (la forme d'une bobine en cuivre) de chauffage.
- Une source à basse ou moyenne fréquence associant un convertisseur de fréquence (générateur ou onduleur).
- Un système de présentation ou de manutention des pièces à chauffer,
- Un ensemble de commande-contrôle de l'installation.

I.7.2. Source d'alimentation

L'alimentation électrique peut être de différente nature selon la fréquence d'alimentation de l'installation. Pour les installations à 50Hz la charge est directement connectée au transformateur. Le transformateur peut être réglé pour ajuster le courant à l'impédance de la charge.

Convertisseur de fréquence à transistors

- Rendement : 90-97%.
- Plage de fréquence : 100Hz-10kHz.
- Plage de puissance : jusqu'à 10MW.

Convertisseur de fréquence à thyristors

- Rendement : 75-90%.
- Plage de fréquence : jusqu'à 500kHz.
- Plage de puissance : jusqu'à 500kW.

Convertisseurs de fréquence avec tube vide

- Rendement : 55-70%.
- Plage de fréquence : ≈ 3000 kHz.
- Plage de puissance : ≈ 1200 kW. [17]

I.7.3. Inducteur

Pour la plupart des applications, l'inducteur est un tube en cuivre creux se présente comme un enroulement venant couvrir l'objet à chauffer. Toutefois, l'inducteur peut être placé de différentes façons selon l'application. L'inducteur est le plus souvent en cuivre, afin de limiter les pertes électriques, il est refroidi par l'eau, dans la plupart des cas. [12]

I.8. Schème de principe de compensation

Compenser un système électrique consiste à installer une source d'énergie réactive de compensation qui permet à l'ensemble de devenir un circuit résonnant. La compensation peut se faire en utilisant des condensateurs C_{ch} avec l'inducteur ; soit en parallèle (la figure I. 12.b) ou en série (la figure I.12.a). [17] Cette dernière compensation est tout autant utilisée dans ce travail. [18]

Chapitre I : Etat de l'art sur le chauffage électrique

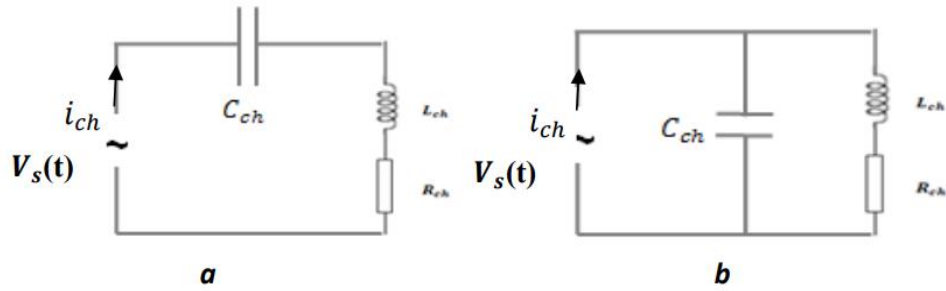


Figure I.12. Schème de principe de compensation de chauffage par induction. [18]

Tableau I.1. Comparaison entre différentes structures de compensation. [18]

Compensation parallèle	Compensation série
$Z = R_{ch} + j(L_{ch}\omega_r - \frac{1}{C_{ch}\omega_r})$ $V_s(t) = R_{ch} i_{ch}(t) + L_{ch} \frac{di_{ch}(t)}{dt} - \frac{1}{C_{ch}} \int_0^t i_{ch}(t) dt$	$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R_{ch} + j(L_{ch}\omega_r + jC_{ch}\omega_r)}$ $V_s = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt = R_{ch} i_L(t) + L_{ch} \frac{di_L(t)}{dt}$

Où :

j : Nombre complexe,

Z : Impédance de la charge.

I.9. Conclusion

Dans le premier chapitre, nous avons examiné le chauffage par induction, ses propriétés et caractéristiques, les structures des générateurs et les applications actuelles. Le choix de la fréquence de fonctionnement du générateur est déterminé par la nature du matériau, les dimensions des pièces à chauffer et les températures de chauffage. Cela entraîne un compromis à trouver entre la puissance à injecter et sa pénétration dans le matériau (profondeur de peau). Les convertisseurs statiques de puissance jouent un rôle important dans la limite supérieure de la fréquence, en fonction de la technologie des composants et de la puissance requise. Enfin, la méthode de contrôle la plus simple pour les onduleurs est la variation de la fréquence. Cependant, il est également possible de contrôler la puissance en agissant sur la source d'entrée.

Chapitre II :

Les convertisseurs statiques

II.1. Introduction

Dans le contexte d'un système de chauffage par induction, il est nécessaire de convertir une alimentation alternative triphasée (220V/380V) à basse fréquence (50 Hz) en une alimentation alternative à haute fréquence (10 KHz) pour alimenter la charge de manière efficace. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des convertisseurs statiques AC / DC pour le redressement et des convertisseurs DC/AC pour varier la fréquence. Les semi-conducteurs tels que les diodes, les thyristors, les transistors IGBT ou MOSFET sont utilisés pour assurer le fonctionnement de ces convertisseurs statiques. Dans ce chapitre, nous allons examiner en détail les différents types de convertisseurs statiques nécessaires et les semi-conducteurs utilisés pour assurer le bon fonctionnement du système de chauffage par induction.

II.2. Les semi-conducteurs

L'électronique de puissance recourt aux semi-conducteurs qui peuvent fonctionner comme des interrupteurs. Ces interrupteurs peuvent être composés d'un unique semi-conducteur ou d'un assemblage de plusieurs semi-conducteurs, disposés en série ou en parallèle. Les semi-conducteurs les plus couramment utilisés en électronique de puissance sont les diodes, les transistors et les thyristors. Ces composants peuvent être combinés de différentes manières pour former des interrupteurs électroniques. [17]

II.2.1. Diode

La diode est un composant électronique à deux électrodes, l'anode A et la cathode K, qui permet de laisser passer le courant électrique dans un seul sens. Elle est donc polarisée, ce qui signifie que sa conductivité dépend de la polarité de la tension appliquée à ses bornes. Lorsque la tension est positive à l'anode et négative à la cathode, la diode est dite directement polarisée, et elle est conductrice ou passante. Dans ce sens de polarisation, la diode présente une faible résistance électrique, appelée résistance dynamique, qui permet le passage du courant électrique dans le circuit. [20]

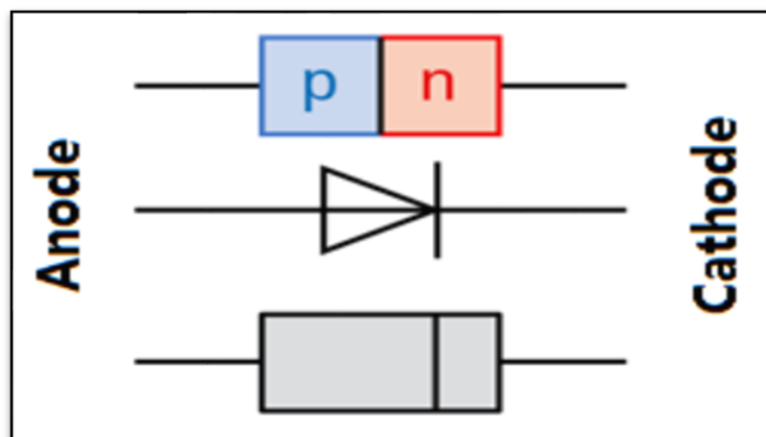


Figure.II.1. La diode. [20]

II.2.2. Transistor de puissance

C'est un interrupteur commandé. Les deux segments de sa caractéristique ne se distinguent plus par un changement de polarité du courant et de la tension. Le segment sur lequel se trouve le point de fonctionnement doit être fixé par un signal de commande via un accès de commande :

- Le signal de commande ON fixe le point de fonctionnement sur la branche OA, l'interrupteur est fermé,
- Le signal de commande OFF fixe le point sur OB, l'interrupteur est ouvert. Un transistor comporte donc trois bornes, deux bornes de puissance entre lesquelles il remplit la fonction interruptrice et une borne auxiliaire qui forme avec une borne de puissance l'accès de commande. [19]

La figure (II.2) représente la caractéristique ($v - i$) d'un transistor. La figure (II.3) montre les symboles utilisés pour représenter les différents types de transistors. Dans le transistor bipolaire classique (figure II.3a) et l'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) (figure II.3c), l'accès de puissance est formé par le collecteur C et l'émetteur E, l'accès de commande par la base B et l'émetteur ou par la grille G et l'émetteur. Dans le transistor MOSFET (Métal Oxyde Semi-conducteur Field Effect Transistor), schématisé figure (II.3b), le circuit de puissance est relié au drain D et à la source S, le circuit de commande est branché entre la grille G et la source. [21]

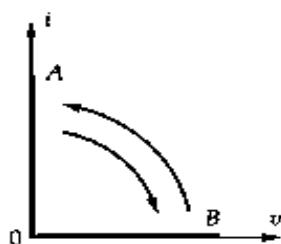


Figure.II.2. Représente la caractéristique ($v - i$) d'un transistor. [21]

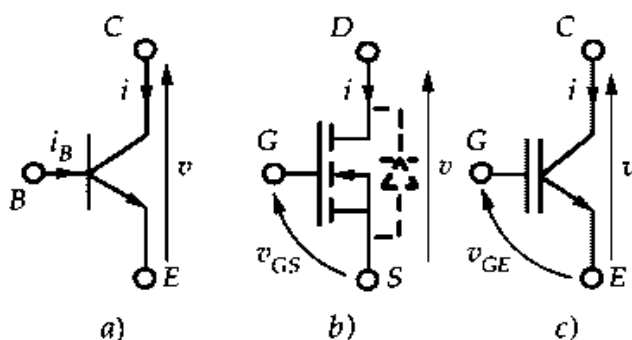


Figure.II.3. Les symboles utilisés pour représenter les différents types de transistors. [21]

II .2.3. Thyristor

Le thyristor (ou "Diode commandée") est un semi-conducteur de structure PNPN (P étant un semiconducteur Positif et N négatif) assimilable à un ensemble de trois jonctions ; il

Chapitre II : Les convertisseurs statiques

constitue un interrupteur unidirectionnel à fermeture commandée. Outre l'anode A et la cathode K, il est muni d'une électrode de déblocage ou gâchette. [22]

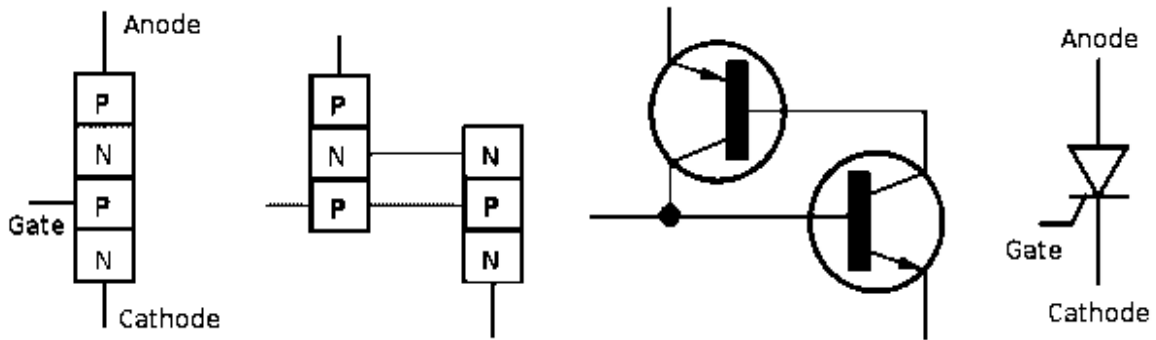


Figure.II.4. Représentation schématique d'un thyristor. [20]

II.3. Redresseur non commandé

Les redresseurs à diodes, également appelés redresseurs non contrôlés, sont les plus simples des convertisseurs de l'électronique de puissance. Ils permettent de convertir une tension alternative en une tension continue, mais ne permettent pas de régler la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée. De plus, leur fonctionnement est irréversible, c'est-à-dire que l'énergie ne peut pas être renvoyée du côté continu vers le côté alternatif. [21]

II.3.1. Redresseur simple alternance monophasé

Le redresseur simple alternance monophasé est un circuit électronique qui permet de convertir une tension alternative sinusoïdale en une tension continue en supprimant les alternances négatives de la tension d'entrée et en conservant les alternances positives. Le redresseur simple alternance monophasé utilise généralement une seule diode pour réaliser cette opération. La tension de sortie du redresseur sera donc la valeur absolue de la tension d'entrée pendant les alternances positives. La fréquence de la tension de sortie du redresseur simple alternance monophasé sera la même que la fréquence de la tension d'entrée, car les alternances positives sont conservées sans être modifiées en fréquence.[21]

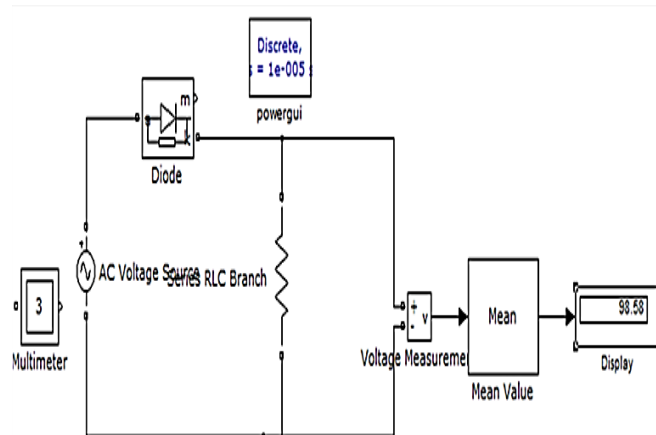


Figure.II.5. Montage du redresseur monophasé simple alternance.

Chapitre II : Les convertisseurs statiques

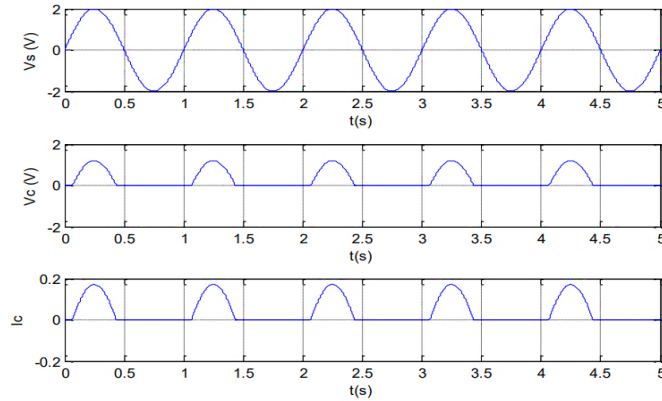


Figure II.6. Les ondes du redresseur.

II.3.2. Redresseur monophasé double alternance

Un redresseur double alternance monophasé est un circuit électronique utilisé pour convertir une tension alternative en une tension continue pulsée. Contrairement à un redresseur simple alternance, qui ne redresse que les alternances positives ou négatives du courant d'entrée, un redresseur double alternance est capable de redresser les deux alternances du courant d'entrée. Le fonctionnement d'un redresseur double alternance est basé sur l'utilisation de deux diodes montées en série, qui permettent de redresser les alternances négatives du courant d'entrée, et de deux autres diodes montées en sens inverse, qui permettent de redresser les alternances positives du courant d'entrée. Le courant de sortie est alors pulsé à une fréquence deux fois supérieure à la fréquence d'entrée, car chaque alternance du courant d'entrée est divisée en deux alternances de même amplitude par les diodes du redresseur. [21]

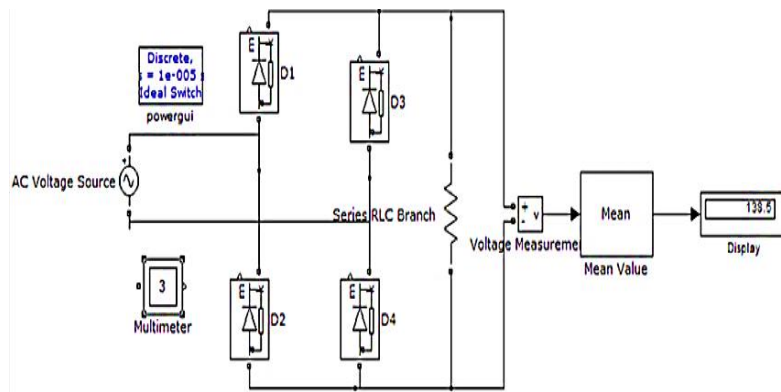


Figure II.7. Montage de redresseur monophasé double alternance.

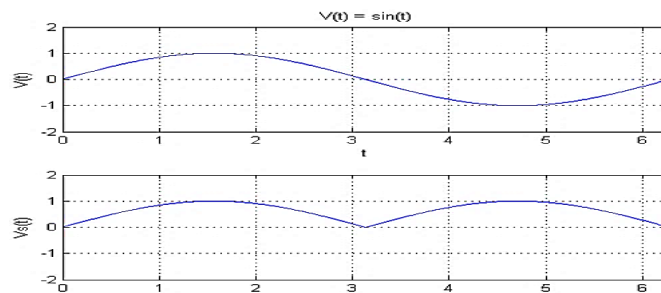


Figure II.8. Les ondes du redresseur.

II.3.3. Redresseur triphasé simple alternance

Un redresseur simple alternance triphasé est un circuit électronique utilisé pour convertir une tension alternative triphasée en une tension continue pulsée. Le fonctionnement d'un redresseur simple alternance triphasé est basé sur l'utilisation de trois diodes, où chaque diode est connectée à une phase de la source triphasée figure (II.9). Toutes les cathodes des diodes sont reliées entre elles et reliées au point commun de la charge. Les anodes des diodes sont connectées à chaque phase de la source triphasée. Dans ce montage, le signal redressé a une fréquence trois fois supérieure à la fréquence de la source triphasée. [23]

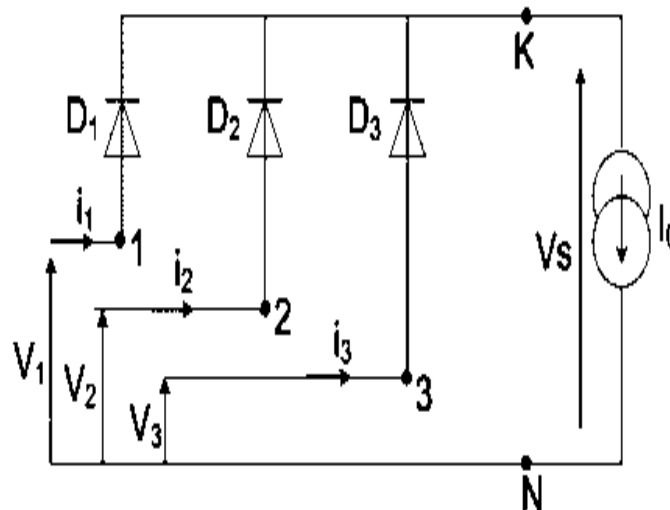


Figure.II.9. Montage de redresseur triphasé simple alternance. [23]

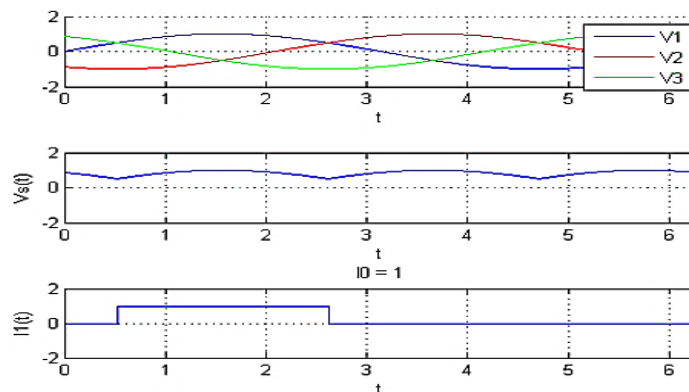


Figure.II.10. Les ondes du redresseur.

II.3.4. Redresseur triphasé double alternance triphasée

Un redresseur double alternance triphasé est un circuit électronique utilisé pour convertir une tension alternative triphasée en une tension continue pulsée. Le fonctionnement d'un redresseur double alternance triphasé est basé sur l'utilisation d'un pont de Graëtz, qui est un assemblage de six diodes, chaque diode est connectée à une phase de la source triphasée, formant ainsi trois branches. Chaque branche contient deux diodes en série, avec leur point de jonction connecté à un point commun, appelé point milieu. Le point milieu est également relié au point commun de la charge. Lorsque la tension d'entrée est positive, les diodes supérieures

Chapitre II : Les convertisseurs statiques

dans chaque branche conduisent, ce qui permet au courant de circuler de la source vers le point milieu et vers la charge. Lorsque la tension d'entrée est négative, les diodes inférieures dans chaque branche conduisent, ce qui permet au courant de circuler dans l'autre direction, toujours de la source vers la charge. Le signal redressé dans un redresseur double alternance triphasé a une fréquence six fois supérieure à la fréquence de la source triphasée. Ces redresseurs sont couramment utilisés dans les applications industrielles pour la commande de moteurs électriques et la régulation de la tension. [21]

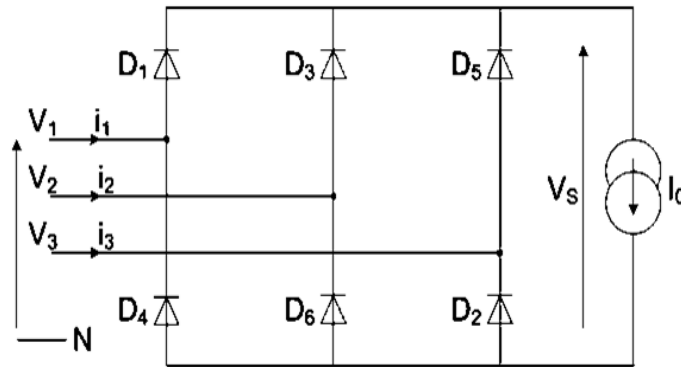


Figure.II.11. Montage d'un redresseur triphasé double alternance. [23]

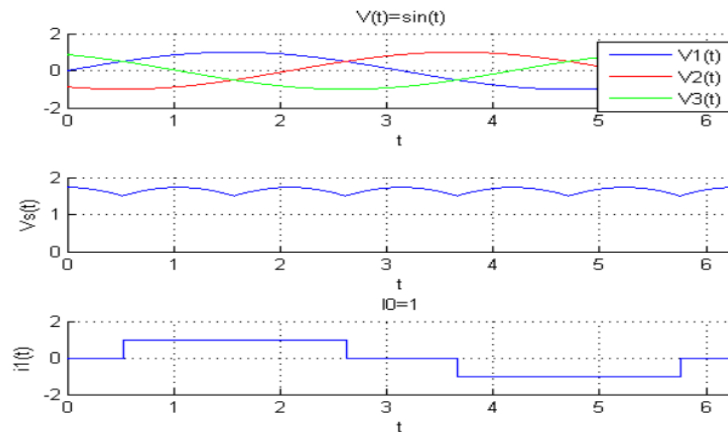


Figure.II.12. Les ondes du redresseur.

II.4. Redresseur triphasé commandé

Le redresseur triphasé commandé utilise des thyristors pour contrôler la quantité d'énergie électrique triphasée qui est convertie en courant continu. Les thyristors sont des dispositifs semi-conducteurs qui peuvent être utilisés pour réguler le courant électrique. Ils peuvent être contrôlés en modifiant la tension appliquée à leur porte, ce qui permet de contrôler le moment où ils sont activés [23].

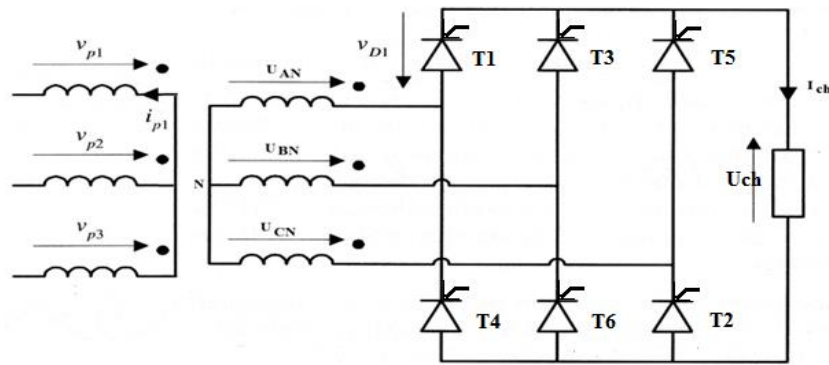


Figure.II.13. : redresseur triphasé commandé à base des thyristors. [32]

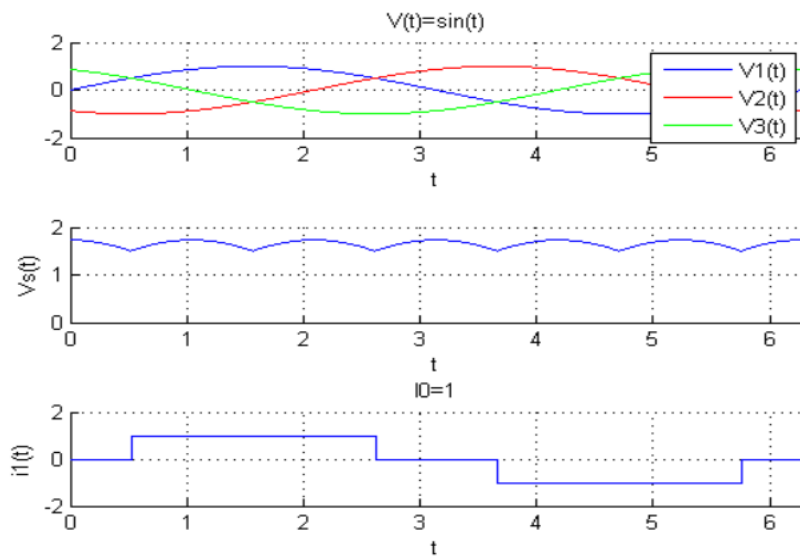


Figure.II.14. Les ondes du redresseur.

II.5. Les onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet de convertir une source de courant continu en une tension ou un courant alternatif de valeur moyenne nulle. Il est utilisé dans de nombreuses applications, telles que les systèmes d'alimentation de secours, les énergies renouvelables, les onduleurs de véhicules électriques. Il existe deux types d'onduleurs :

- Les onduleurs de tension.
- Les onduleurs de courant.

Il existe également des onduleurs de résonance, qui sont des onduleurs de tension ou de courant à un créneau par alternance fonctionnant dans des conditions particulières. La charge doit être un circuit oscillant peu amorti. Les onduleurs de résonance ont une efficacité élevée et sont utilisés dans les applications où l'efficacité énergétique est importante, telles que les alimentations à découpage, les énergies renouvelables. [24]

Chapitre II : Les convertisseurs statiques

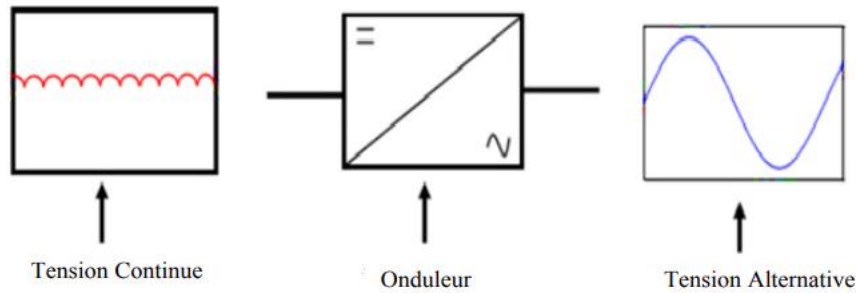


Figure.II.15. Schéma de principe de l'onduleur. [24]

II.5.1 Les onduleur de tension

Les onduleurs de tension sont des convertisseurs statiques qui produisent une tension alternative à la sortie de l'onduleur. Ils fonctionnent en modifiant de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie de l'onduleur pour obtenir une tension sinusoïdale de fréquence et d'amplitude variables. [25]

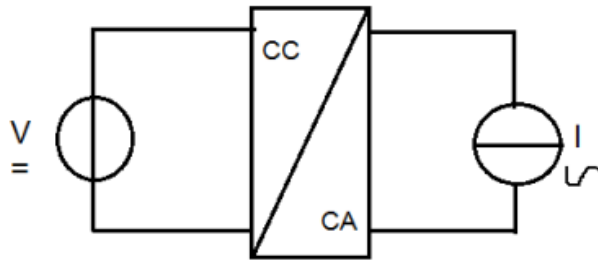


Figure.II.16. Onduleur de tension [26].

II.5.2. Les onduleurs de courant

Ils sont utilisés dans de nombreuses applications, telles que les systèmes de contrôle de moteurs, les alimentations sans interruption (ASI), les systèmes d'énergie solaire. En ce qui concerne l'inductance interne de la source, celle-ci joue un rôle important dans le fonctionnement de l'onduleur. En effet, l'inductance interne de la source assure une certaine stabilité au courant qui la traverse, car elle s'oppose aux variations rapides de la tension aux bornes de la source. Ainsi, lorsque l'onduleur commute rapidement entre des tensions positives et négatives pour produire une tension alternative, l'inductance interne de la source permet de maintenir le courant constant et de minimiser les effets des variations de tension.[26]

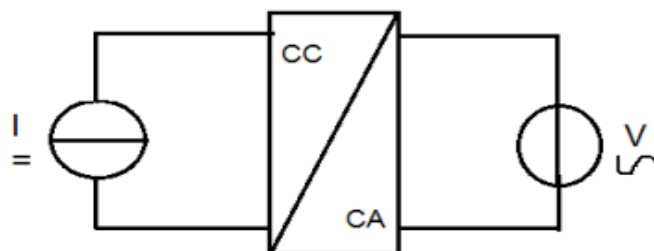


Figure II.17. Onduleur de courant.[19]

II.6. Les onduleurs à résonant

Les onduleurs à résonance sont des types d'onduleurs utilisés pour les charges oscillantes, comme les circuits RLC. Ils utilisent la résonance de la charge pour produire une tension alternative de fréquence spécifique. Contrairement aux onduleurs classiques, les onduleurs à résonance nécessitent une commande à une fréquence très proche de la fréquence de résonance de la charge. Les onduleurs à résonance sont utilisés pour les charges oscillantes et peuvent produire une tension de sortie à une fréquence précise et stable. [27]

Ils se divisent en deux types :

- Onduleur à résonant série.
- Onduleur à résonant parallèle.

II.6.1. Onduler résonant série

L'onduleur résonant série est un type d'onduleur qui utilise une charge RLC en série avec un circuit résonant pour produire une tension alternative. La charge peut également être un moteur électrique ou un transformateur. [28]

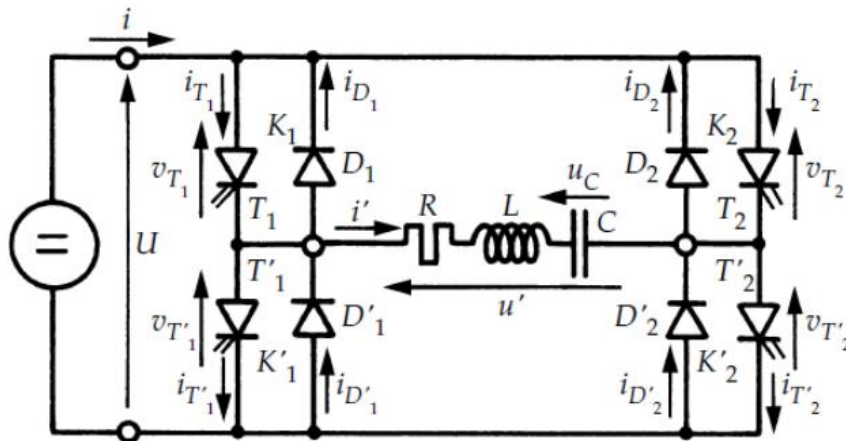


Figure II.18. Onduleur à résonant série. [28]

Pour $0 < t < T/2$, K_1 et K_2' sont fermés, $U' = +U$.

Pour $T/2 < t < T$, K_1' et K_2 sont fermés, $U' = -U$.

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (\text{II.1})$$

La fréquence de résonance de ce circuit est :

$$\omega_r = 2\pi f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{II.2})$$

Le facteur de qualité Q indique à la sensibilité de l'impédance à la variation de fréquence le facteur de qualité de la circuit oscillant série est :

$$Q = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{\omega_r CR} \quad (\text{II.3})$$

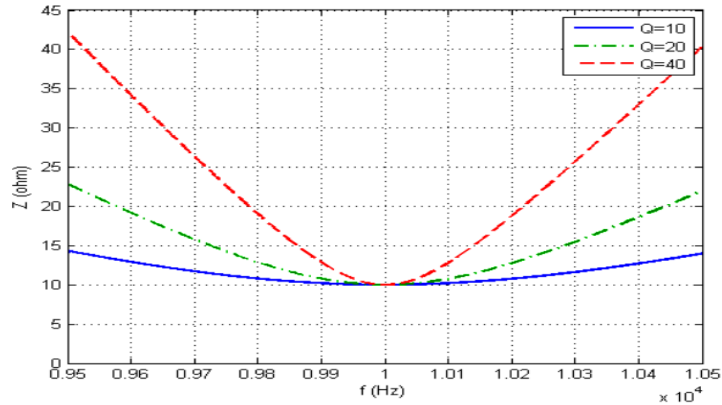


Figure.II.19. L'amplitude de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de Q (RLC série). [23]

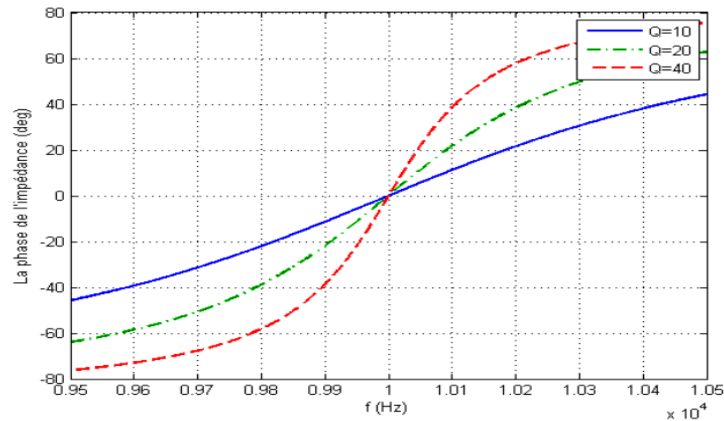


Figure II.20. La phase de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de Q (RLC série). [23]

II.6.2. Onduleur à résonant parallèle

Un onduleur à résonant parallèle est un type d'onduleur qui utilise un circuit résonant parallèle pour convertir une source de tension continue en une tension alternative de fréquence variable. Ce type d'onduleur est couramment utilisé dans les applications de conversion d'énergie à haute fréquence, telles que les alimentations électriques des ordinateurs et des équipements électroniques. [28]

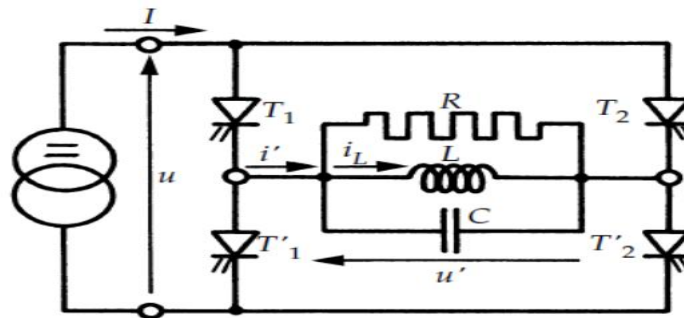


Figure II.21. Onduleur à résonant parallèle. [28]

Chapitre II : Les convertisseurs statiques

Pour $0 < t < T/2$, T1 et T2' sont fermés : $i' = I$, $u = + u'$.

Pour $T/2 < t < T$, T1' et T2 sont fermés : $i' = -I$, $u = - u'$.

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})} \quad (\text{II.4})$$

La fréquence de résonance de ce circuit est :

$$\omega_r = 2\pi f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{II.5})$$

Le facteur de qualité Q du circuit oscillant parallèle est :

$$Q = \frac{R}{\omega_r L} = \omega_r C R \quad (\text{II.6})$$

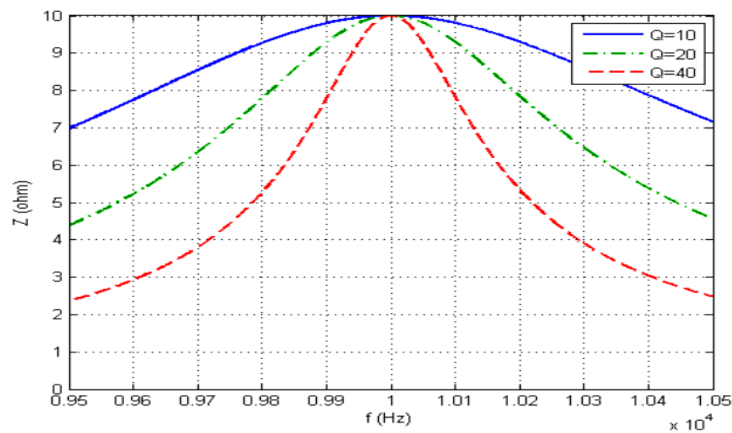


Figure II.22. L'amplitude de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de Q (RLC parallèle). [28]

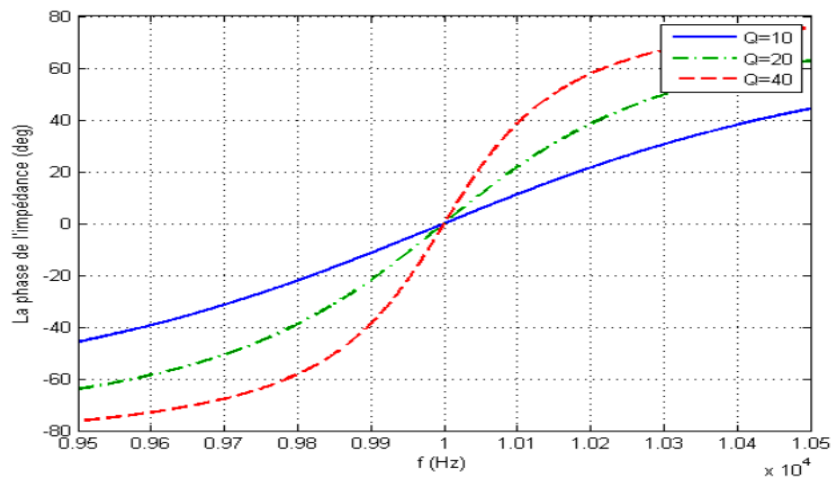


Figure II.23. La phase de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de Q (RLC parallèle). [28]

II.7. Les différentes stratégies de commande des convertisseurs statique

Il y a plusieurs stratégies de commande des convertisseurs statiques :

- Commande à hystérésis.
- Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) sinusoïdale
- MLI vectorielle
- MLI discontinue.... Ect [29].

Dans notre projet la technique utilisée est la technique MLIS (Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale). Elle s'avère être la technique la plus appropriée pour la commande des convertisseurs statiques.

II.7.1. Onduleurs à MLI

Un onduleur à MLI est un dispositif électronique qui permet de convertir une tension continue en une tension alternative triphasée réglable. La modulation de largeur d'impulsion consiste à générer une série d'impulsions de largeur variable en fonction de la tension alternative d'entrée. Ces impulsions sont envoyées à des composants électroniques commandables, qui permettent de filtrer les impulsions pour obtenir une tension continue de sortie [30].

II.8. Principe de la technique MLI

La conversion continue alternative repose sur les commutations des interrupteurs de l'onduleur, qui établissent des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge. Le transfert d'énergie est contrôlé en ajustant le rapport cyclique (rapport entre les intervalles d'ouverture et de fermeture) de chaque interrupteur. Cette régulation est réalisée par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle (MLI), qui implique la comparaison d'un signal de référence, appelé modulatrice d'amplitude (A_r) et de fréquence (f), avec un signal porteur d'amplitude (A_p) et de fréquence très élevée (f_p) [31].

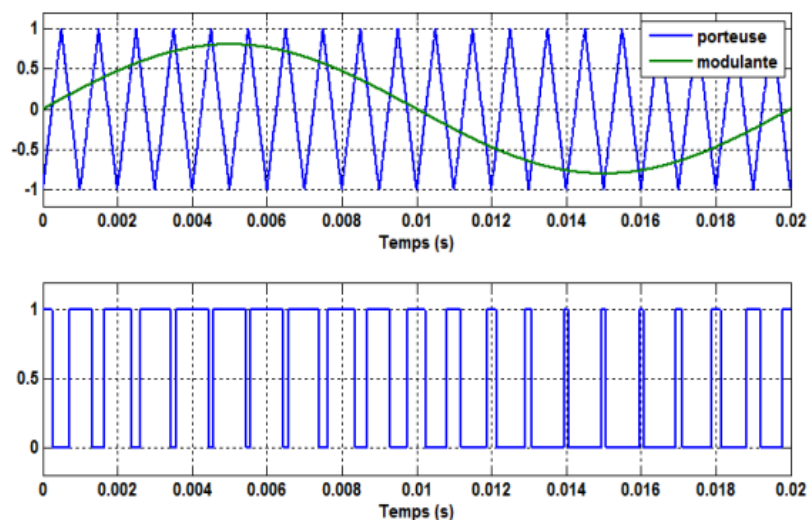


Figure II.24. Exemple de la technique de commande MLI.[31]

Chapitre II : Les convertisseurs statiques

L'indice de modulation :

$$M = \frac{f_p}{f_{ref}} \quad (\text{II.7})$$

Le coefficient de réglage en tension :

$$r = \frac{A_{ref}}{A_p} \quad (\text{II.8})$$

La modulation montre que plus « M » est grand et plus la neutralisation des harmoniques est efficace, d'autre part on cherche à obtenir une valeur de « r » la plus élevée possible [31].

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les diverses structures des convertisseurs. Nous avons examiné les différentes configurations de redressement, à la fois monophasé et triphasé. Ensuite, nous avons présenté les onduleurs en résonance série et parallèle. Nous avons également examiné les divers composants semi-conducteurs largement utilisés dans le domaine du chauffage par induction. De plus, nous avons étudié les propriétés des onduleurs en résonance, et enfin, nous avons discuté de la stratégie de commande utilisée dans la modulation de largeur d'impulsion (MLI).

Chapitre III :

Modélisation de system d'alimentation de chauffage par induction

Chapitre III : Modélisation de system d'alimentation de chauffage par induction

III.1. Introduction

La modélisation des systèmes est un sujet de recherche qui a été étudié par plusieurs communautés scientifiques pour différents domaines. Cependant, les experts en automatique sont particulièrement intéressés par la modélisation de systèmes pour synthétiser un modèle qui inclut tous les modes de fonctionnement du système. [33] Dans notre étude, nous concentrons sur l'alimentation d'une pièce à chauffer à l'aide d'un onduleur qui convertit l'énergie continue en énergie alternative à une fréquence variable. Cette application est très courante dans le domaine de la conversion d'énergie.

III.2. Description du système

Le chauffage par induction est un système constitué d'un inducteur et d'une pièce (R_{ch} , L_{ch}) associés à une capacité pour former un circuit oscillant. Ce circuit est alimenté par un onduleur de tension commandée qui délivre une tension V_s et un courant quasi sinusoïdal de fréquence fondamentale de 50 kHz. La tension alternative est transférée à partir d'une tension de valeur moyenne réglable produite par un filtre passe-bas (L_f C_f), réduisant les ondulations du courant. Pour fonctionner, le système a besoin de tensions simples triphasées fournies par la tension U_f délivrée par la sortie d'un redresseur triphasé à pont de diodes, connecté au réseau triphasé fournit les tensions simples triphasées sous la forme, [34]:

$$\begin{cases} V_1 = U_{\max} \sin \omega t \\ V_2 = U_{\max} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ V_3 = U_{\max} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

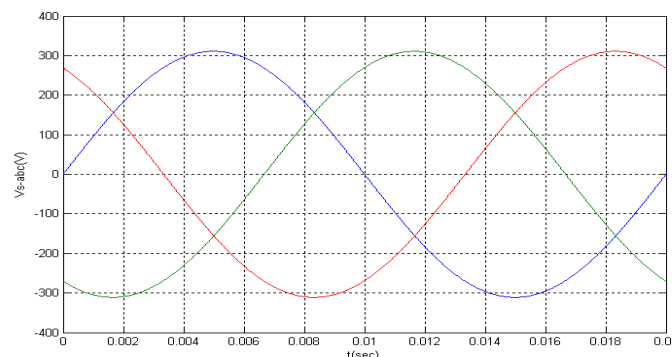


Figure. III.1. Forme d'onde des tensions du réseau.

Chapitre III : Modélisation de system d'alimentation de chauffage par induction

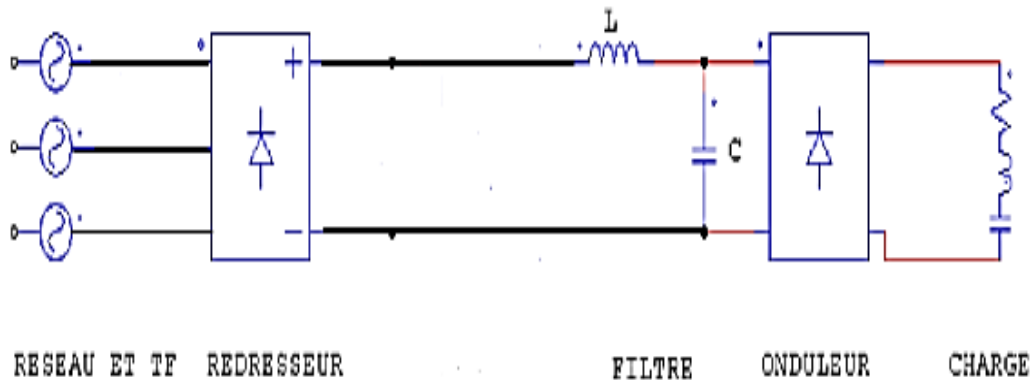


Figure.III.2. Schéma de principe du système de chauffage par induction. [34]

III.3. Modélisations du système

III.3.1. Modélisation du redresseur

Les redresseurs sont des convertisseurs qui assurent la conversion alternative continue (AC/DC). Nous utilisons le pont triphasé toutes diodes alimentées par un système de tension sinusoïdales triphasées, schématisé par la figure (III.3).

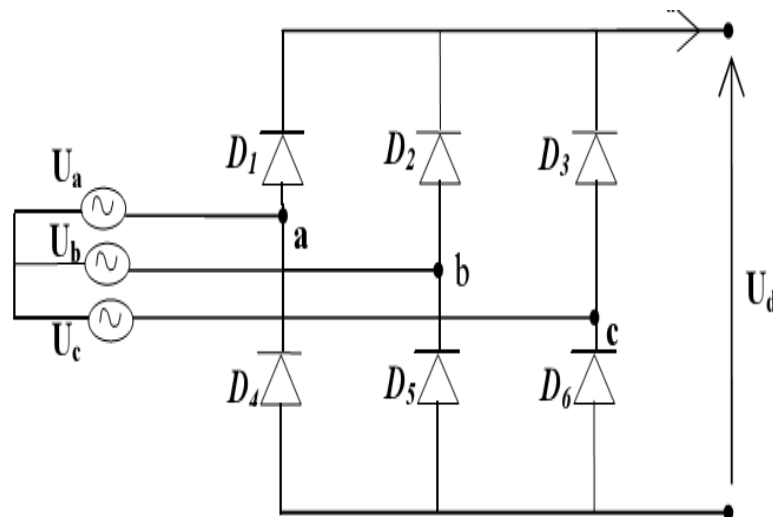


Figure.III.3. Redresseur triphasé tout diodes.

Et si on néglige l'effet d'empîement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme suit, [35]:

$$U_d = \text{Max}[V_1(t), V_2(t), V_3(t)] - \text{Min}(V_1(t), V_2(t), V_3(t)) \quad (\text{III.2})$$

Chapitre III : Modélisation de system d'alimentation de chauffage par induction

Tableaux.III.1. Tensions de sortie d'un redresseur PD3. [36]

Intervalles	Diodes conductrices	Tension U_d
$\frac{\pi}{6} \leq \omega t < \frac{\pi}{2}$	$D_1 D_2$	$U_d = V_1 - V_2$
$\frac{\pi}{2} \leq \omega t < \frac{5\pi}{6}$	$D_1 D_6$	$U_d = V_1 - V_3$
$\frac{5\pi}{6} \leq \omega t < \frac{7\pi}{6}$	$D_2 D_6$	$U_d = V_2 - V_3$
$\frac{7\pi}{6} \leq \omega t < \frac{3\pi}{2}$	$D_1 D_4$	$U_d = V_2 - V_1$
$\frac{3\pi}{2} \leq \omega t < \frac{11\pi}{6}$	$D_3 D_4$	$U_d = V_3 - V_1$
$\frac{11\pi}{6} \leq \omega t < \frac{13\pi}{6}$	$D_3 D_5$	$U_d = V_3 - V_2$

La forme de l'onde de la sortie du redresseur est donnée par la figure (III.4) :

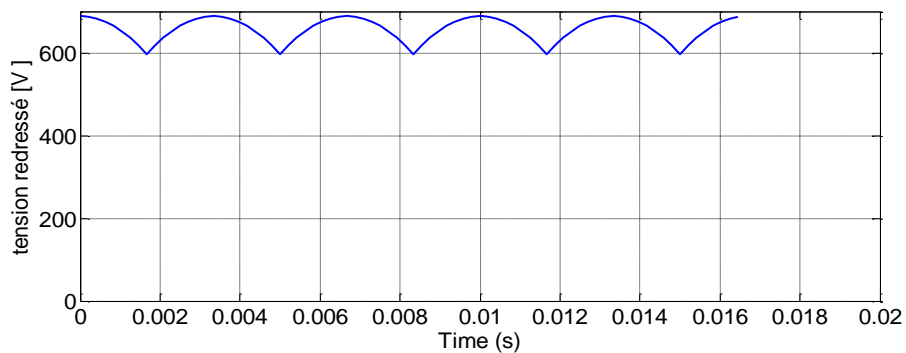


Figure.III.4. Tension de sortie du redresseur.

III.3.2. Modélisation du filtre

Le filtre passe-bas LC est utilisé pour éliminer les hautes fréquences dans un circuit, ce qui aide à réduire l'ondulation de la tension et du courant redressés. Ce filtre est représenté par la figure (III.5). [37]

Chapitre III : Modélisation de system d'alimentation de chauffage par induction

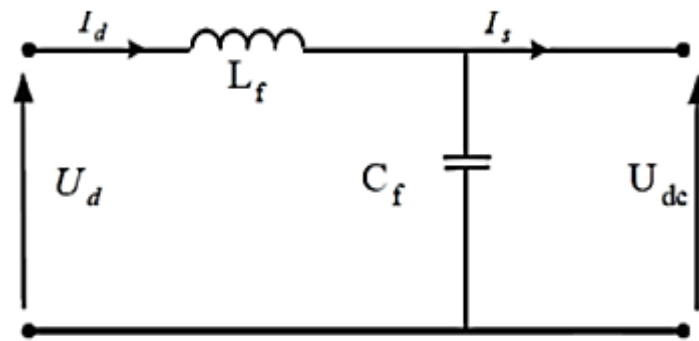


Figure.III.5. Représentation de filtre passe-bas.

Le modèle du filtre est défini par le système d'équations suivantes :

$$\begin{cases} U_{dc} = L_f \frac{di_d}{dt} + U_d \\ \frac{dU_d}{dt} = \frac{1}{C} (i_d - i(t)) \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

La fonction de transfert du filtre est donnée par :

$$H(s) = \frac{U_{dc}}{U_d} = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f s + 1}} \quad (\text{III.4})$$

La tension filtrée est de la forme suivante :

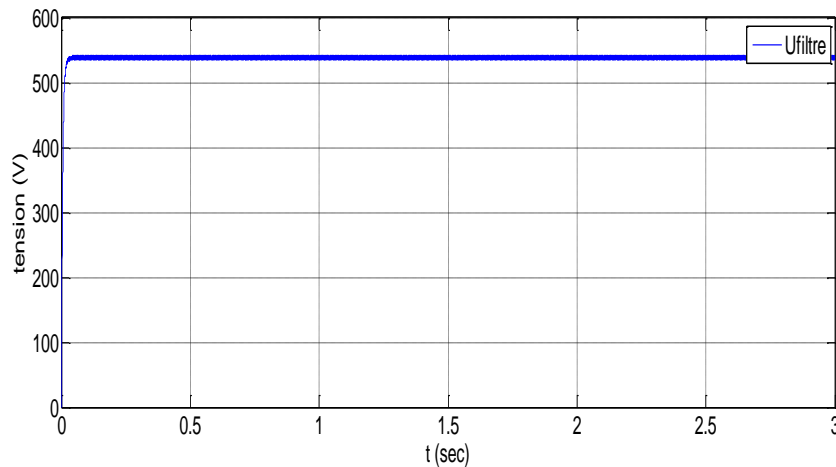


Figure.III.6. Tension filtrée.

III.3.2.1. Calcul de la valeur minimale de la capacité

La valeur de la capacité C_f est obtenue en partant l'ondulation de tension maximale tolérée à la sortie du redresseur (ΔV_{fmax}), On obtient :

Chapitre III : Modélisation de system d'alimentation de chauffage par induction

$$C_f = \frac{i_c}{2\pi f \Delta V_{fmax}} \quad (\text{III.5})$$

Ainsi qu'un courant continu traversant la capacité et une ondulation de tension (ΔV_c) inférieure à 8% de V_c . Pour une fréquence de découpage de 50kHz. [38]

III.3.2.2. Calcul de la valeur de l'inductance

La self L_f permet de rendre le courant i_d pris à la source sensiblement constante. Le filtre est caractérisé par sa pulsation de résonance $L_f C_f \omega^2 > 1$, Où ω^2 est la pulsation d'utilisation de fréquence $f = 50 \text{ HZ}$. L'inductance L_f peut être déterminée par la relation, [39] :

$$L_f > \frac{1}{C_f \omega^2} \quad (\text{III.6})$$

III.3.3. Modélisation de l'Onduleur

L'onduleur triphasé en pont est composé de six interrupteurs montés en pont et d'une source de tension continue, généralement obtenue cette tension continue par un redresseur triphasé à diodes suivi d'un filtre passe-bas. Ce type de convertisseur est largement utilisé dans les applications de modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour alimenter des récepteurs une tension et une fréquence variables. On peut considérer que l'onduleur triphasé en pont est la superposition de trois onduleurs demi ponts monophasés identiques. Chacun des trois bras de l'onduleur de tension triphasé est identique. [40]

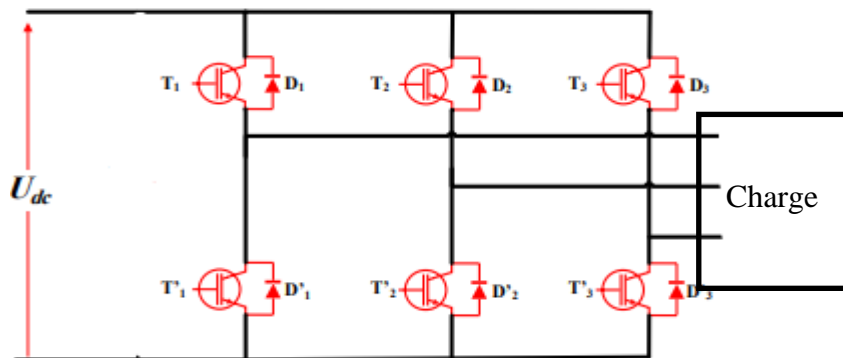


Figure.III.7. Principe de l'alimentation par onduleur en tension. [40]

Chaque semi-conducteur (association Transistor-Diode) de puissance est équivalent à un interrupteur idéal. Alors l'onduleur de tension peut être représenté dans le cas idéal par des interrupteurs. [41]

Chapitre III : Modélisation de system d'alimentation de chauffage par induction

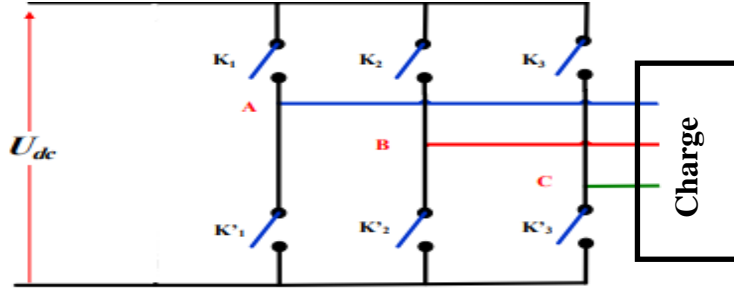


Figure.III.8. Schéma équivalent de l'onduleur. [40]

Les différents interrupteurs sont supposés parfaits qui ne présentent pas de phénomènes dus à la commutation (négligés). Les bras de l'onduleur peuvent être représentés par des interrupteurs à deux positions, dont l'état est décrit par une fonction logique. La valeur de cette fonction est égale à 1 lorsque l'interrupteur est fermé, et 0 lorsque l'interrupteur est ouvert. Cette fonction est définie par, [31]:

$$f_i = \begin{cases} 0 & \text{si } K_{i1} \text{ est fermé et } K_{i0} \text{ est ouvert} \\ 1 & \text{si } K_{i1} \text{ est ouvert et } K_{i0} \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Soit f_{is} , avec $i \in [1, 2, 3]$ et $s \in [0, 2]$ la fonction de connexion d'un interrupteur K_{is} associée au bras i de cet onduleur. Les relations entre ces différentes fonctions s'expriment par, [42]:

$$\begin{cases} F_{11} = 1 - F_{10} \\ F_{21} = 1 - F_{20} \\ F_{31} = 1 - F_{30} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Les potentiels des nœuds A, B, C de l'onduleur par rapport au point N sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{AN} = F_{11} U_{dc} \\ V_{BN} = F_{21} U_{dc} \\ V_{CN} = F_{31} U_{dc} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

En utilisant les fonctions de connexions les tensions composées de l'onduleur sont exprimées comme suit :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} = (F_{11} - F_{21}) U_{dc} \\ V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} = (F_{21} - F_{31}) U_{dc} \\ V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} = (F_{31} - F_{11}) U_{dc} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Chapitre III : Modélisation de system d'alimentation de chauffage par induction

L'expression sous forme matricielle de tensions composées de l'onduleur au moyen des fonctions logiques de connexions est obtenue à partir des équations :

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BA} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = U_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

Nous pouvons exprimer également les tensions simples à partir des tensions composées comme suit

$$\begin{cases} V_{AN} = V_A = \frac{V_{AB}-V_{AC}}{3} \\ V_{BN} = V_B = \frac{V_{BC}-V_{AC}}{3} \\ V_{CN} = V_C = \frac{V_{AC}-V_{BC}}{3} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

L'expression sous forme matricielle des tensions simples de l'onduleur au moyen des fonctions logiques de connexions est obtenue à partir des équations :

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} U_{dc} \quad (\text{III.13})$$

On peut déduire le courant i coté continu des courants i_A, i_B et i_C Coté alternatif :

$$I = i_{K1} + i_{K2} + i_{K3} \quad (\text{III.14})$$

Avec :

$i_{K1} = i_A$ Quand K_1 conduit

$i_{K2} = i_B$ Quand K_2 conduit

$i_{K3} = i_C$ Quand K_3 conduit

Sachant que :

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (\text{III.15})$$

Le tableau (III.2) montre les huit configurations que peut prendre le montage par l'état fermé (F) ou ouvert (O) des trois interrupteurs :

Chapitre III : Modélisation de system d'alimentation de chauffage par induction

Tableau.III.2. Mode de fonctionnement de l'onduleur. [43]

K_1	K_2	K_3	$V_{AN} - V_{BN}$	$V_{BN} - V_{CN}$	$V_{CN} - V_{AN}$	V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}	i_{K1}	i_{K2}	i_{K3}	I
F	F	F	0	0	0	0	0	0	i_A	i_B	i_C	0
F	O	F	U	-U	0	$\frac{U}{3}$	$-\frac{2U}{3}$	$\frac{U}{3}$	i_A	0	i_C	i_C
F	F	O	0	U	-U	$\frac{U}{3}$	$\frac{U}{3}$	$-\frac{2U}{3}$	i_A	i_B	0	i_C
F	O	O	U	0	-U	$\frac{2U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	i_A	0	0	i_A
O	F	F	-U	0	U	$-\frac{2U}{3}$	$\frac{U}{3}$	$\frac{U}{3}$	0	i_B	i_C	$-i_A$
O	O	F	-U	-U	U	$-\frac{U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	$\frac{2U}{3}$	0	0	i_C	i_C
O	F	O	U	U	0	$-\frac{U}{3}$	$\frac{2U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	0	i_B	0	i_C
O	O	O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

- Les tensions simples de sortie V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} .
- Les courants dans les interrupteurs i_{K1} , i_{K2} , i_{K3} Et le courant i .

Le schéma synoptique correspondant à la génération des impulsions par MLI est donné par la figure qui consiste à comparer un signal triangulaire (porteuse) avec un signal sinusoïdal (référence). [36]

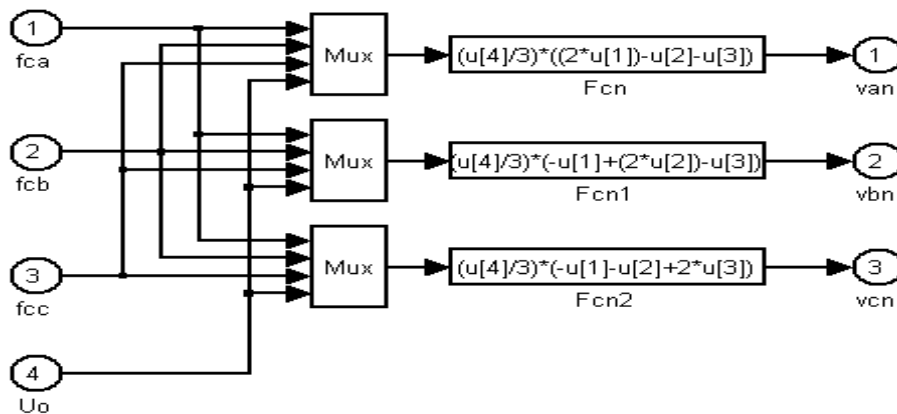


Figure.III.9. Modèle d'onduleur triphasé a MLI sous Simulink/MATLAB.

Chapitre III : Modélisation de system d'alimentation de chauffage par induction

III.3.4. Modélisation de la charge

Le circuit de charge pour le chauffage par induction est composé d'un inducteur ou d'une bobine d'induction, d'un ensemble de condensateurs de compensation et de conducteurs pour le courant. Dans le chapitre 2, nous avons expliqué que cette charge peut être équivalente à un circuit comprenant une résistance (R_{ch}) et une inductance (L_{ch}), compensée soit en série, soit en parallèle par un condensateur (C_{ch}). La figure.III.10 représente la configuration du système, [44] :

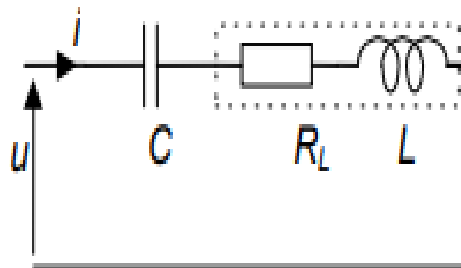


Figure.III.10. Schéma de la charge pour le chauffage par induction. [44]

Nous pouvons écrire la tension aux bornes du générateur $V(t)$ en fonction du courant $i_{ch}(t)$ qui circule en série dans le circuit et aux bornes des trois dipôles, [45] [46] :

$$V(t) = R_{ch}i_{ch}(t) + L_{ch} \frac{di_{ch}}{dt} + \frac{q(t)}{C_{ch}} \quad (\text{III.16})$$

Avec :

$$i_{ch} = \frac{dq(t)}{dt} \quad (\text{III.17})$$

$q(t)$ étant la charge instantanée du condensateur.

Le module de l'impédance de la charge Z peut être noté :

$$Z = \sqrt{R_{ch}^2 + \left(L_{ch}\omega - \frac{1}{C_{ch}}\right)^2} \quad (\text{III.18})$$

D'autre part, pour déterminer le déphasage de l'intensité par rapport à la source de tension, nous avons, [45] :

$$\cos \varphi = \frac{R_{ch}}{Z} \quad (\text{III.19})$$

Chapitre III : Modélisation de system d'alimentation de chauffage par induction

Ou :

$$\tan \varphi = \frac{L_{ch}\omega - \frac{1}{C_{ch}\omega}}{R_{ch}} \quad (\text{III.20})$$

L'impédance du circuit varie avec la pulsation. Elle est minimale pour la pulsation propre du circuit :

Pour : $Z_{min} = R_{ch}$

$$L_{ch}\omega_r - \frac{1}{C_{ch}\omega_r} = 0 \quad (\text{III.21})$$

Donc :

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_{ch}C_{ch}}} \quad (\text{III.22})$$

En ce cas $\varphi=0$, le courant est alors en phase avec la source de tension. La variation de l'amplitude de l'intensité en fonction de la pulsation ω_r est représentée dans la figure (III.15) :

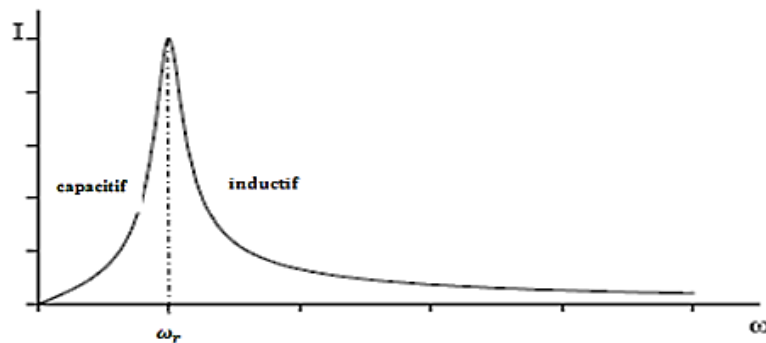


Figure.III.11. La variation de courant en fonction de ω . [45]

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exploré la modélisation d'onduleur en analysant leurs différents éléments constitutifs, tels que le redresseur, le filtre et la charge. Nous avons compris l'importance de modéliser ces composants afin de comprendre le fonctionnement global de l'onduleur et d'optimiser ses performances.

Chapitre IV :

Présentation des résultats et discussion

IV.1. Introduction

La simulation du chauffage par induction permet d'étudier et de modéliser le fonctionnement d'un système de chauffage avant sa mise en pratique. En reproduisant virtuellement les conditions réelles, cette simulation évalue l'efficacité et le comportement thermique du système. Elle utilise un modèle mathématique et physique qui intègre des composants tels que l'onduleur, la charge à résonance LLC, le transformateur redresseur et la charge en courant continu. L'interaction de ces composants génère un champ électromagnétique qui induit la chaleur par induction. Les paramètres clés, tels que la fréquence de l'onduleur, l'intensité du courant et la géométrie de la charge, sont analysés afin d'optimiser l'efficacité énergétique et d'assurer une répartition uniforme de la chaleur.

IV.2. Description de système

IV.2.1. Schéma de principe

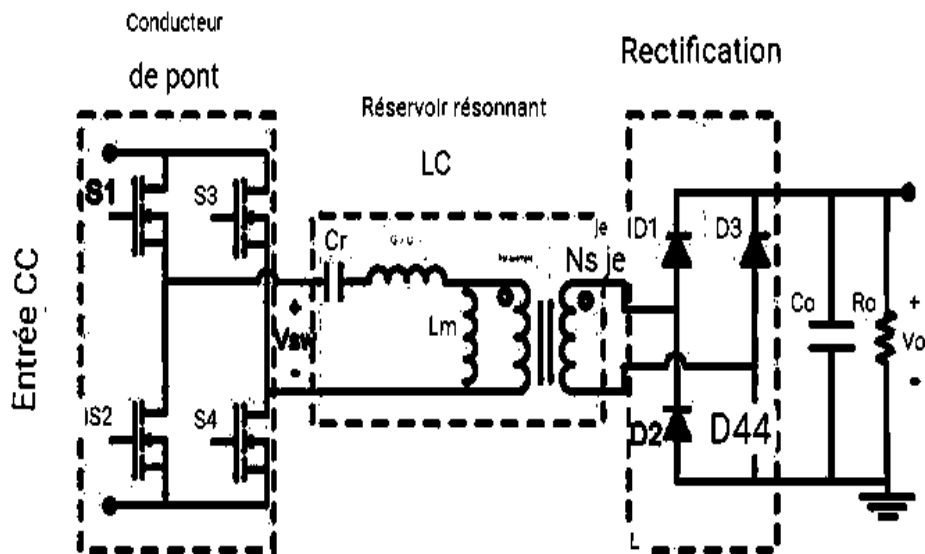


Figure IV.1. Schéma de convertisseur à résonance en pont H. [46]

Nous avons utilisé les différents paramètres représentés dans le tableau suivant :

Chapitre 04 : Présentation des résultats et discussion

Tableau IV.1. Les paramètres du convertisseur résonnant LLC.

Elément	Symbole	Valeur
Source de tension continue	E	400V
Condensateur de résonance	C_r	0.08×10^{-6} F
Inducteur de résonance	L_r	126.6×10^{-6} H
Inducteur magnétisant	L_m	80×10^{-6} H
Résistance équivalente (Avec pièce)	R_{eq}	26Ω
Inducteur équivalente	L_{eq}	1.2 H
Fréquence de résonance	f_r	40 KHz
Les Fréquences d'interrupteur		
Cas 1	f_s	40 KHz
Cas2	f_s	10 KHz
Cas 3	f_s	160KHz

IV.3. Partie A

Dans notre étude on va fixer la fréquence de résonance et on va variée la fréquence de modulation des interrupteurs.

IV.3.1. Model de simulation

IV.3.1.1. Cas de $f_s = f_r$

Nous avons créé l'assemblage de la figure (IV.2) , qui représente le schéma bloc du convertisseur résonant LLC en pont H , puis nous avons créé un circuit de commande pour obtenir le signal de commande (S1 et S2) afin de contrôler les MOSFETS (M1,M3 etM4,M2), comme illustré dans la figure (IV.2) :

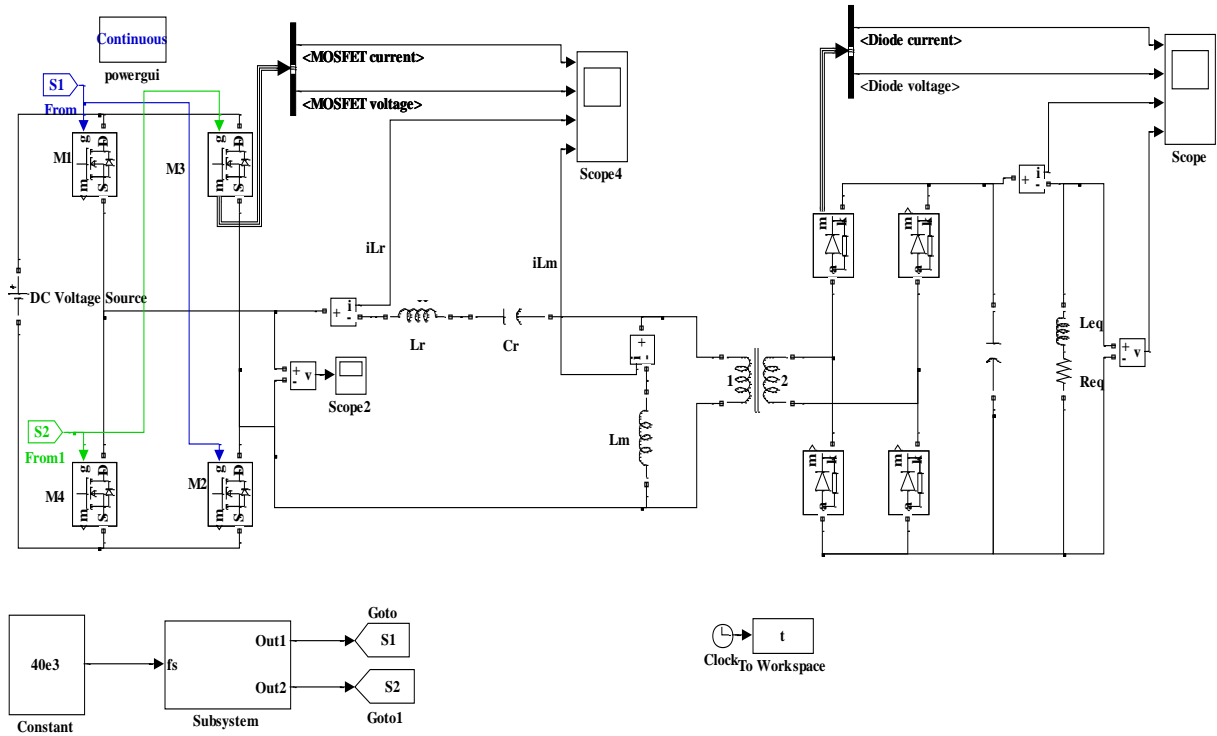


Figure.IV.2. Modèle simulation du convertisseur a résonance en pont H.

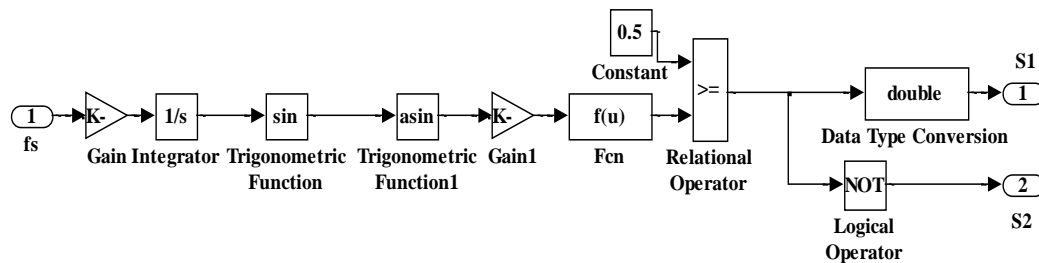
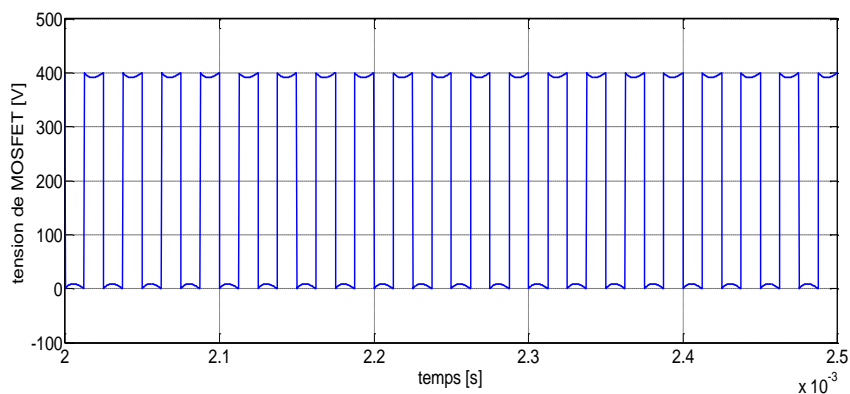


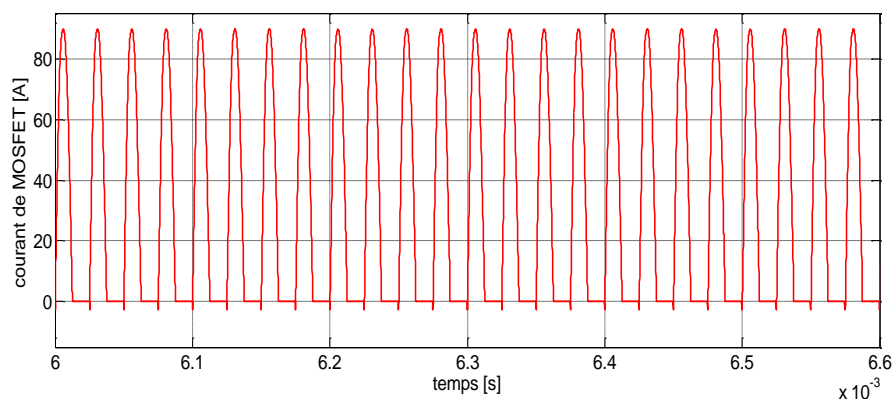
Figure.IV.3. Générateur d'impulsions (fréquence a interrupteur variable).

IV.3.1.2. Resultats et discussion

Le figure (IV.4) montre les formes d'onde de tension et de courant au niveau de l'interrupteur 1 situé en haut du convertisseur. Lorsque l'interrupteur est en position bloquée, la tension prend la valeur de la source DC à 400 volts ; sinon, elle prend la valeur de zéro volt, et le courant atteint environ 90 ampères. L'apparition de la partie négative du courant résulte du changement d'état de l'interrupteur.



-a-



-b-

Figure.IV.4. Tension et courant de MOSFET on haut de convertisseur .

La figure (IV.5) montre les formes d'onde de tension à la sortie de l'onduleur. Nous pouvons observer qu'il s'agit d'une tension alternative non sinusoïdale. Il est ondulé entre $[-400,400]$ volt.

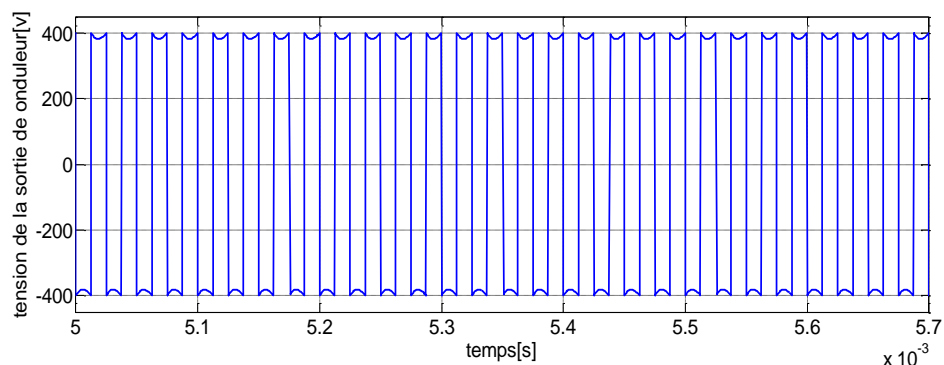
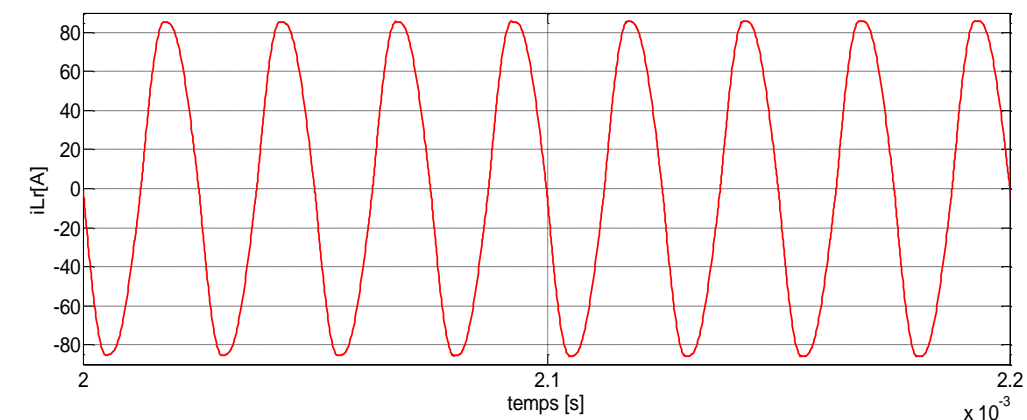


Figure.IV.5. Forme d'onde de tension à la sortie de l'onduleur.

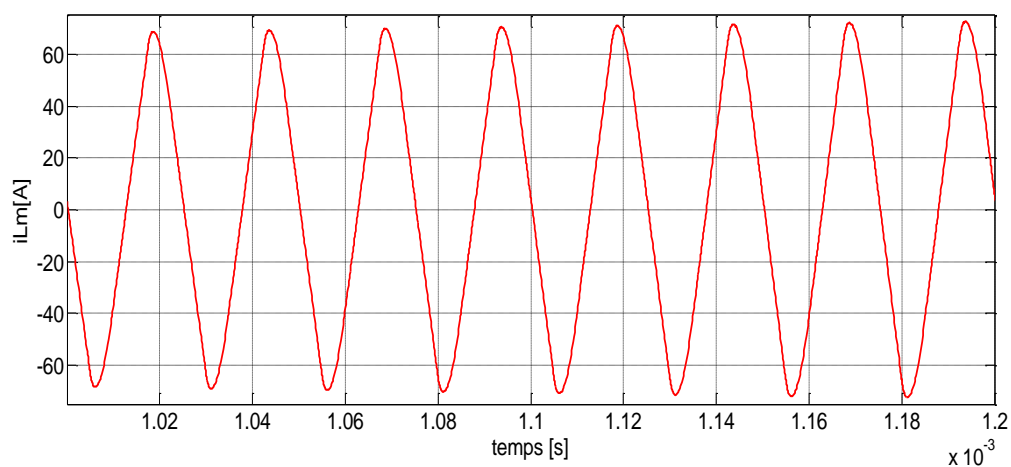
La figure (IV.6) montre l'enveloppe du courant dans le circuit résonance. La figure (IV.6)(a) montre le courant à la sortie de l'onduleur en pont et traversant l'inductance L_r . Nous constatons qu'il s'agit d'un courant alternatif proche de la sinusoïde, en raison de l'existence

Chapitre 04 : Présentation des résultats et discussion

d'harmoniques. Il est ondulé entre $[-85, +85]$ ampères. Le courant traversant l'inductance de magnétisation L_m est présenté par la figure (IV.6) (b) Nous observons que c'est également un courant alternatif avec moins d'harmoniques et filtré par une valeur de $80 \mu\text{H}$, il est maintenant ondulé entre $[-65, +65]$ ampères. De plus, la valeur de la fréquence de résonance est calculée à 40 kHz à partir de la valeur de la période de la courbe. Dans ce cas, la fréquence de commutation des MOSFETS est égale à la fréquence de résonance.



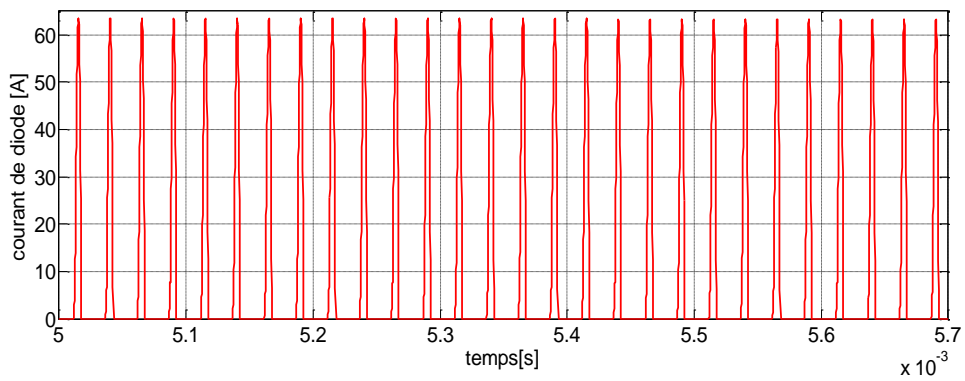
-a-



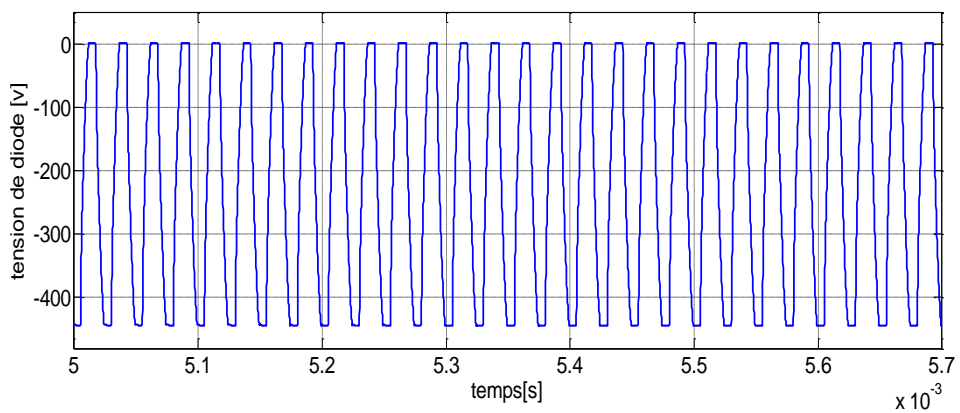
-b-

Figure.IV.6. Courants dans la circuit de resonance .

La figure (IV.7) présente les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la diode D1, dans le coin supérieur à gauche du convertisseur redresseur. Lorsque la diode est en position bloquée, la tension est mesurée à une valeur de -450 volts ; sinon, elle prend la valeur de zéro volt, et le courant atteint environ 65 ampères .



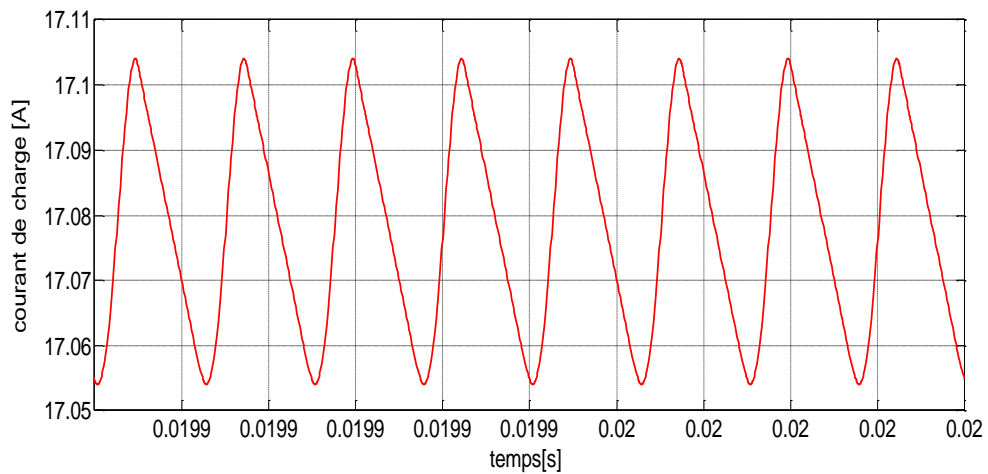
-a-



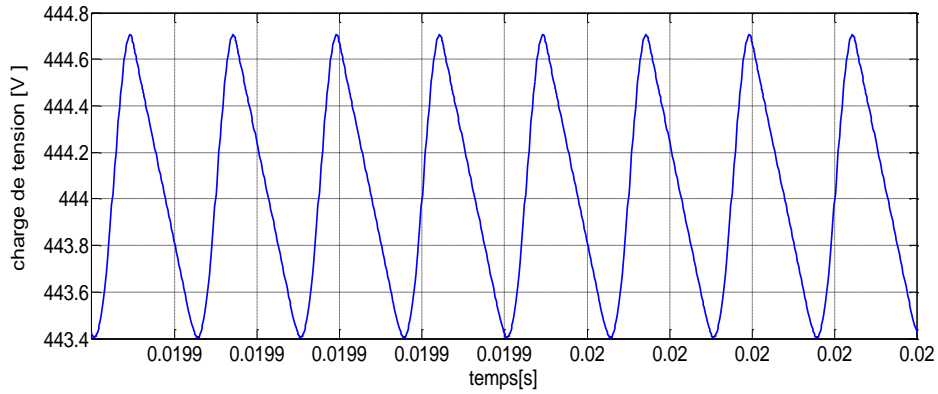
-b-

Figure.IV.7. Les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la diode D1.

La figure (IV.8) montre les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la charge (R_{eq} et L_{eq}). La tension redressée est mesurée autour de la valeur de 444,7 volts, et le courant atteint environ 17.105 ampères.).



-a-



-b-

Figure.IV.8. Les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la diode D1.

IV.3.1.3. Cas de $f_s < f_r$

Nous avons créé l'assemblage de la Figure(IV.9) , qui représente le schéma bloc du convertisseur résonant LLC en pont H , puis nous avons créé un circuit de commande pour obtenir le signal de commande (S1 et S2) afin de contrôler les MOSFETS (M1,M3 et M4, M2).

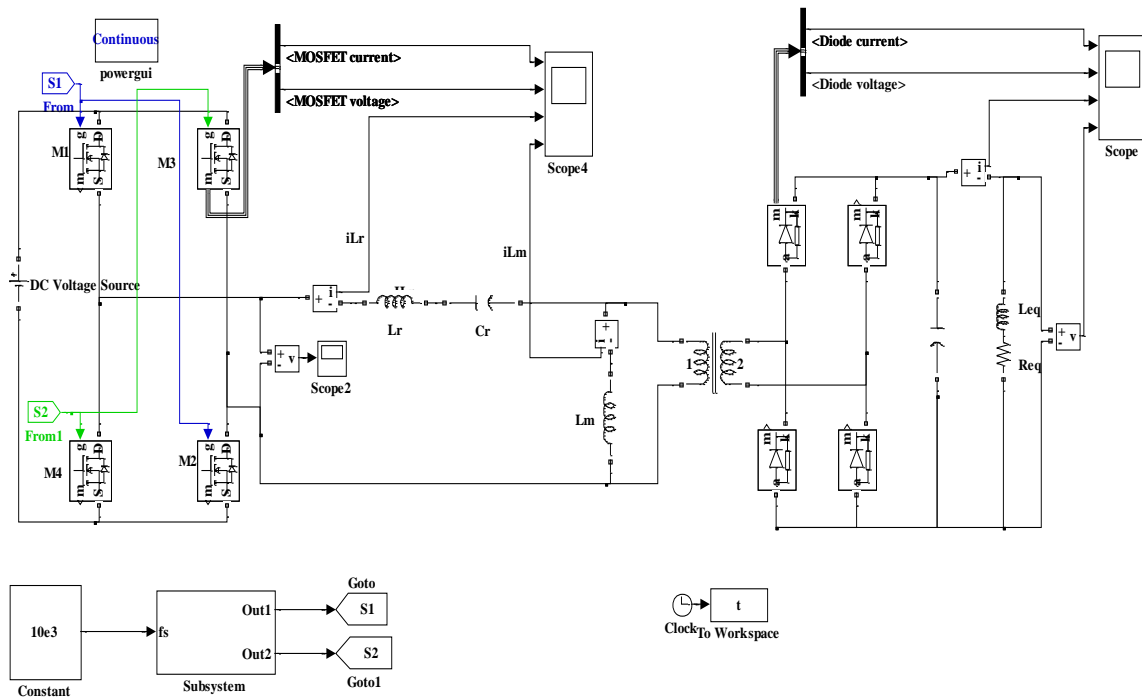


Figure.IV.9. Modèle simulation du convertisseur a résonance en pont H.

IV.3.1.4. Résultats et discussion

Les formes d'onde de tension et de courant au niveau de l'interrupteur 1 du convertisseur sont illustrées dans la figure (IV.10). Lorsque l'interrupteur est en position bloquée, la tension est égale à la source DC à 400 volts. En revanche, lorsque l'interrupteur change d'état, la tension chute à zéro volt et le courant atteint environ 10 ampères. La partie négative du courant apparaît à ce moment-là en raison du changement d'état de l'interrupteur.

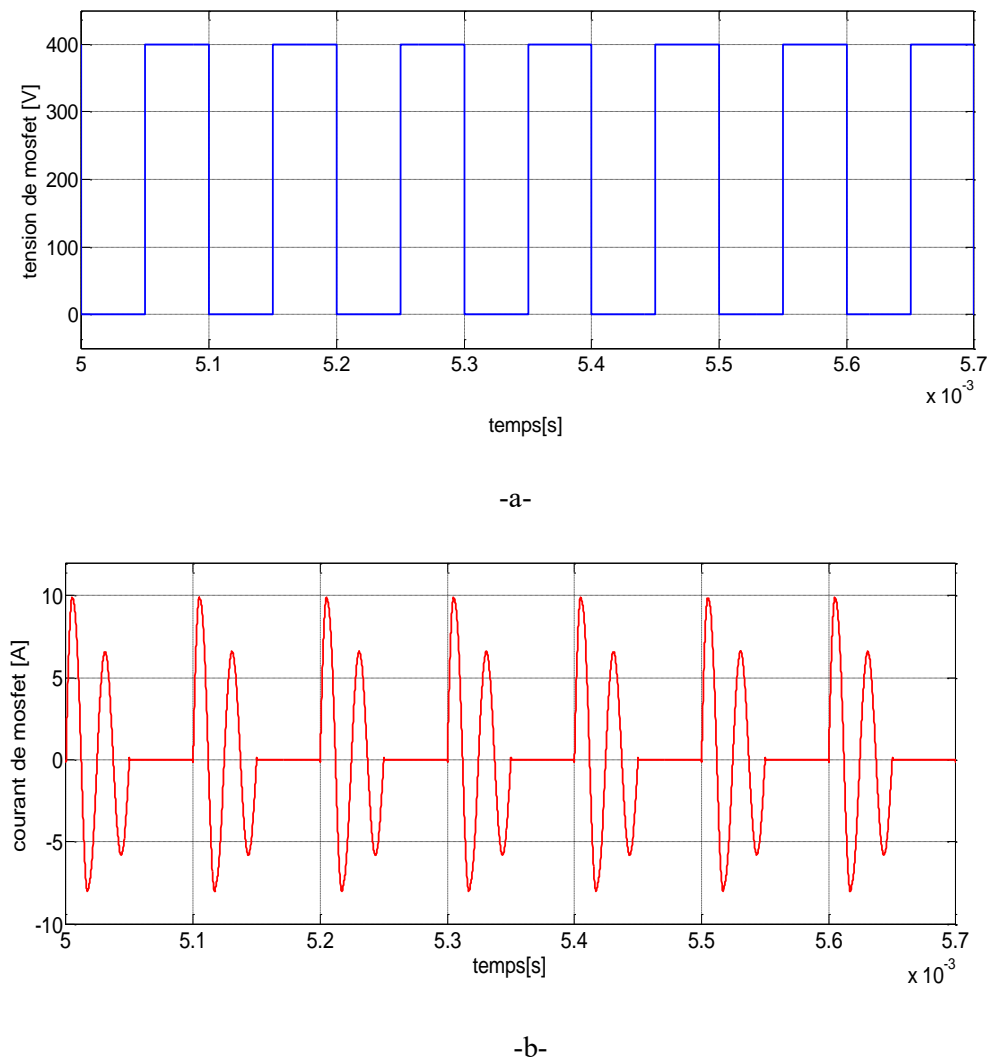
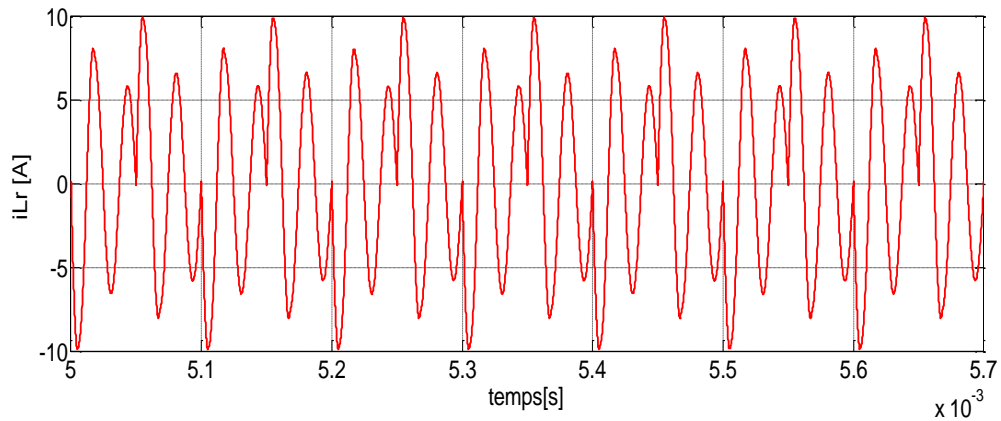


Figure.IV.10. Tension et courant de MOSFET on haut de convertisseur.

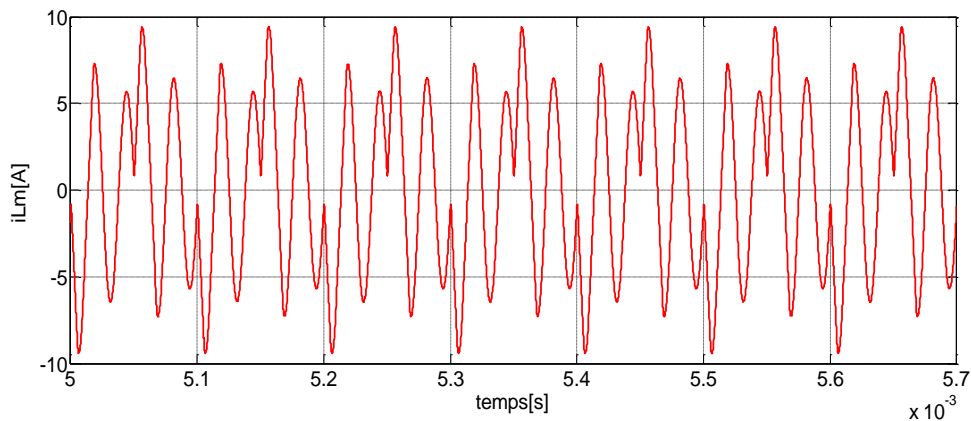
La figure (IV.11) représente l'enveloppe du courant dans le circuit résonant. La partie (a) montre le courant à la sortie de l'onduleur en pont et traversant l'inductance L_r . Nous pouvons observer que ce courant est alternatif mais non sinusoïdal en raison de la présence d'harmoniques. Il présente des ondulations entre -10 et +10 ampères. La partie (b) illustre le courant traversant l'inductance de magnétisation L_m . Nous pouvons constater qu'il s'agit

Chapitre 04 : Présentation des résultats et discussion

également d'un courant alternatif avec moins d'harmoniques, filtré par une valeur de $80\mu\text{H}$. Ce courant présente maintenant des ondulations entre -9 et $+9$ ampères. De plus, la fréquence de résonance est calculée à 40 kHz à partir de la période de la courbe. Dans ce cas, la fréquence de commutation des MOSFETS est quatre fois inférieure à la fréquence de résonance.



-a-



-b-

Figure.IV.11. Courants dans le circuit de résonance.

La figure (IV.12) présentée montre les formes d'onde de tension à la sortie de l'onduleur. Nous pouvons observer qu'il s'agit d'une tension alternative non sinusoïdale. Il est ondulé entre $[-400,400]$ volt.

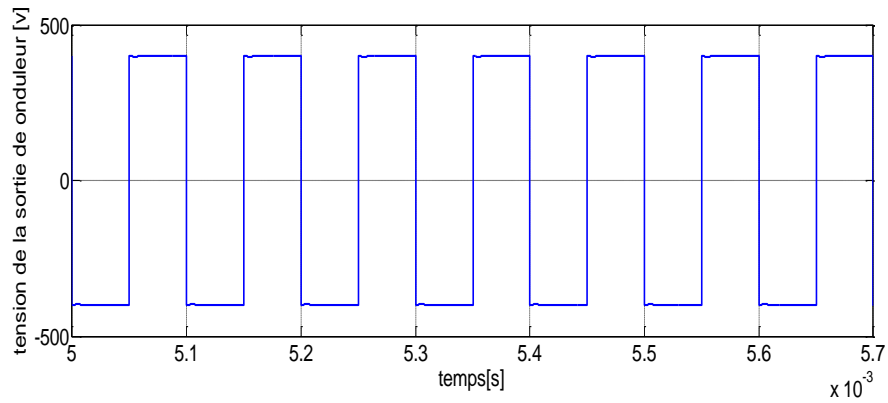
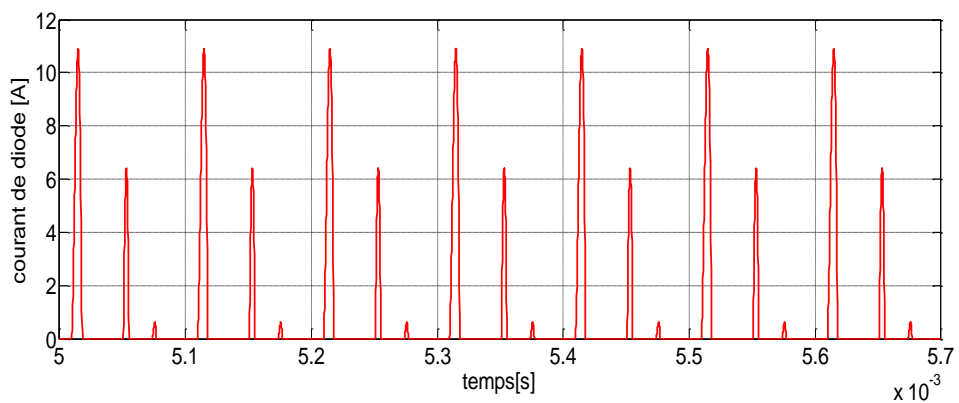
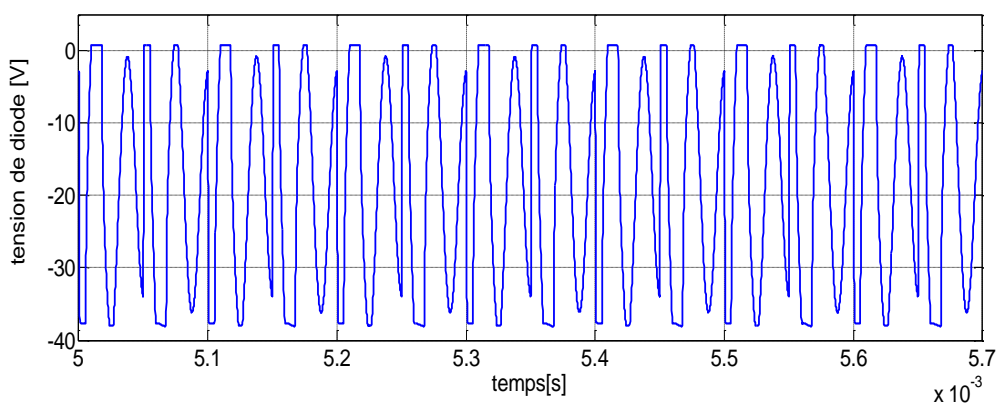


Figure.IV.12. Forme d'onde de tension à la sortie de l'onduleur.

La figure (IV.13) illustre les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la diode D1, située dans le coin supérieur gauche du convertisseur redresseur. Lorsque la diode est en position bloquée, la tension est mesurée à -38 volts. En revanche, lorsque la diode est conductrice, la tension chute à zéro volt et le courant atteint environ 11 ampères.



-a-

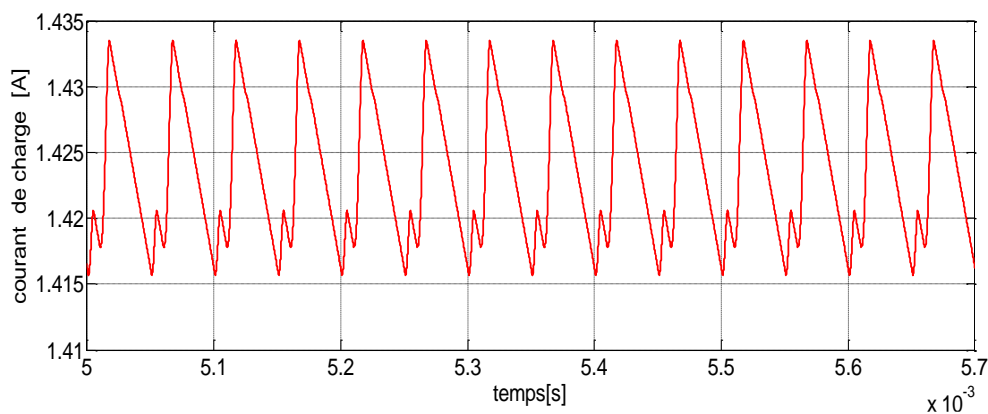


-b-

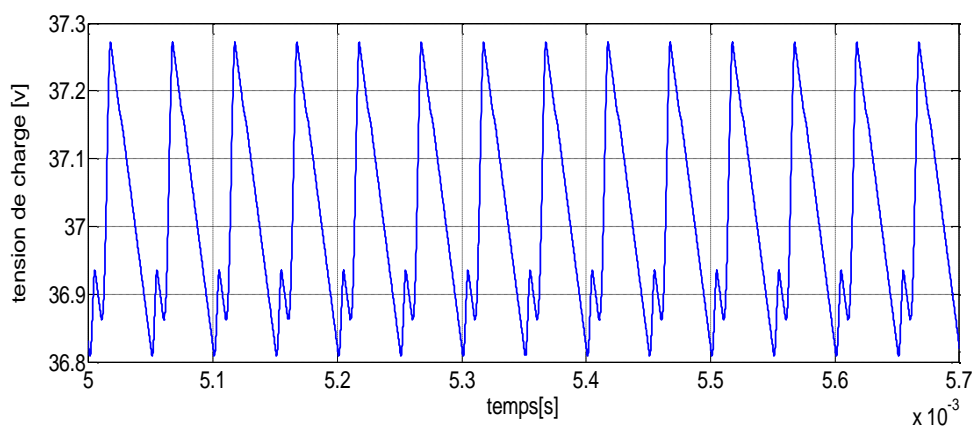
Figure.IV.13. Les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la diode D1.

Chapitre 04 : Présentation des résultats et discussion

La figure (IV.14) présente les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la charge (R_{eq} et L_{eq}). La tension redressée est mesurée autour de 37,28 volts, tandis que le courant atteint environ 1,434 ampère.



-a-



-b-

Figure IV.14. Les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la charge.

IV.3.1.5. Cas $f_s > f_r$

Nous avons réalisé l'assemblage illustré dans la Figure (IV.15), qui présente le schéma bloc du convertisseur LLC en pont H. Ensuite, nous avons conçu un circuit de commande afin de générer le signal de commande (S1 et S2) pour contrôler les MOSFETS (M1, M3 et M4, M2).

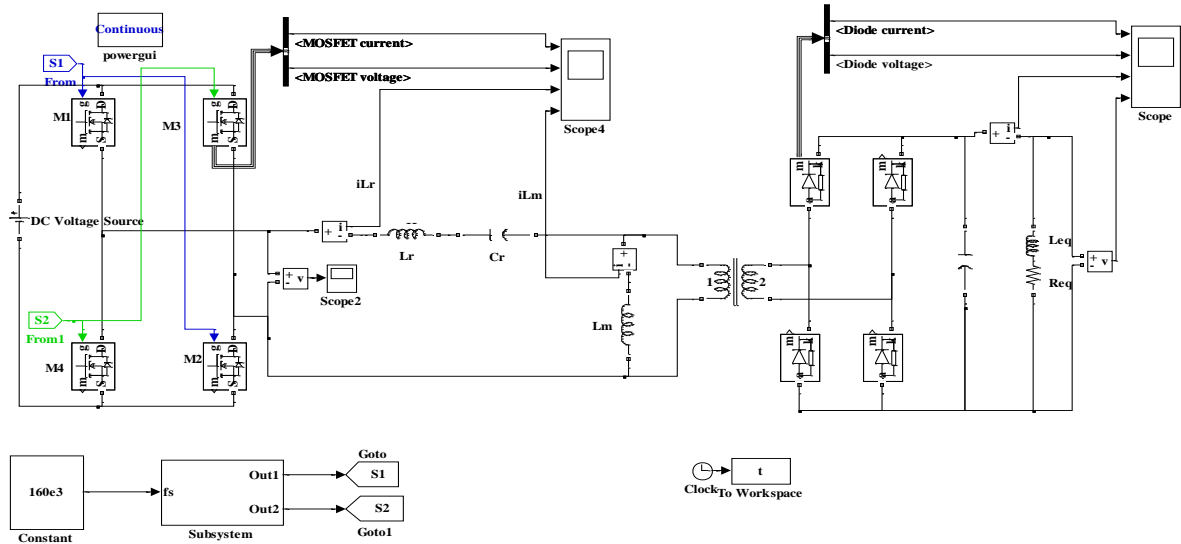
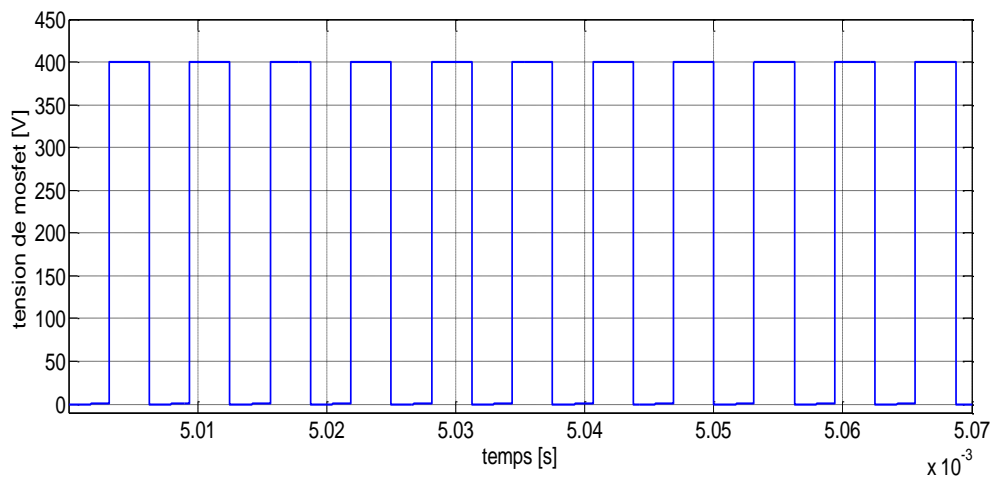


Figure.IV.15. Modèle simulation du convertisseur à résonance en pont H.

IV.3.1.6. Résultats et discussions

Le schéma représenté dans la figure (IV.16) présente les formes d'onde de tension et de courant au niveau de l'interrupteur 1 situé en haut du convertisseur. Lorsque l'interrupteur est en position bloquée, la tension est égale à la source DC à 400 volts. En revanche, lorsque l'interrupteur change d'état, la tension chute à zéro volt et le courant atteint environ 4 ampères. La partie négative du courant apparaît à ce moment-là en raison du changement d'état de l'interrupteur.



-a-

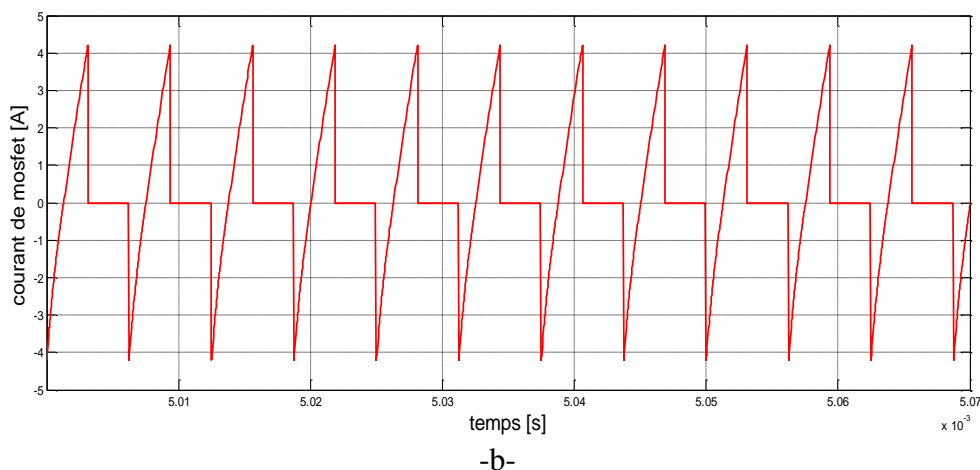
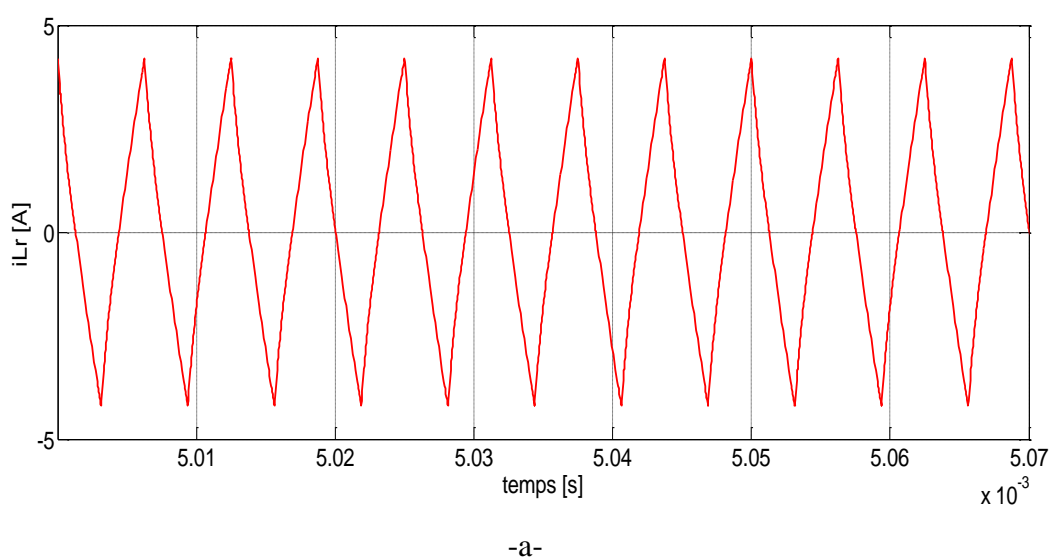


Figure.IV.16. Tension et courant de MOSFET on haut de convertisseur.

La figure (IV.17) présente l'enveloppe du courant dans le circuit résonant. La partie (a) illustre le courant à la sortie de l'onduleur en pont, traversant l'inductance L_r . Nous pouvons constater qu'il s'agit d'un courant alternatif non sinusoïdal en raison de la présence d'harmoniques. Il présente des ondulations entre -4 et +4 ampères. La partie (b) montre le courant traversant l'inductance de magnétisation L_m . Nous observons également qu'il s'agit d'un courant alternatif avec moins d'harmoniques, filtré par une valeur de $80 \mu\text{H}$. Ce courant présente maintenant des ondulations entre -2.25 et +2.25 ampères. De plus, la valeur de la fréquence de résonance est calculée à 40 kHz à partir de la période de la courbe. Dans ce cas, la fréquence de commutation des MOSFETS est quatre fois supérieure à la fréquence de résonance.



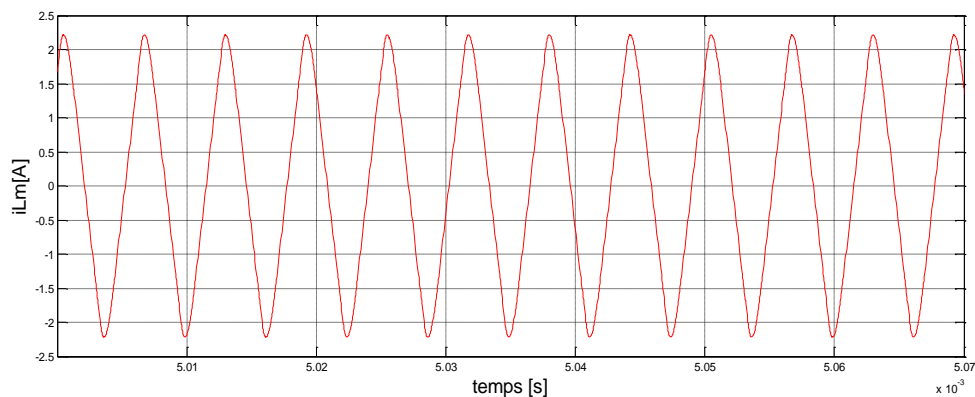


Figure.IV.17. courants dans la circuit de résonance .

La figure (IV.18) illustre les formes d'onde de tension à la sortie de l'onduleur. Nous pouvons observer que cette tension est alternative mais non sinusoïdale. Elle présente des ondulations entre -400 et 400 volts.

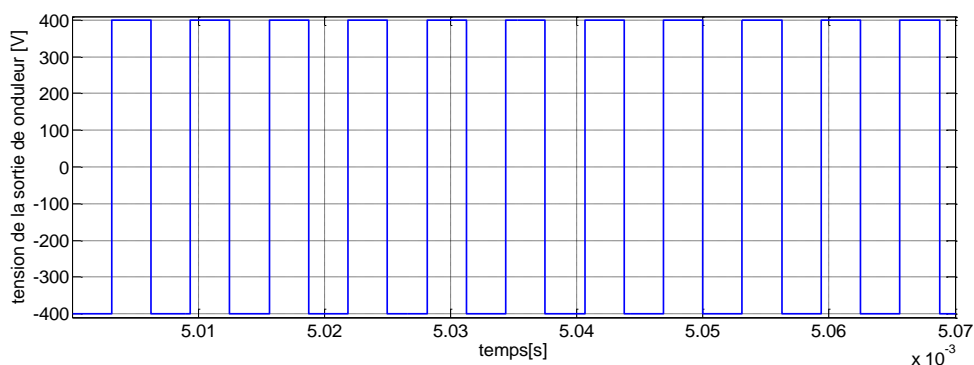
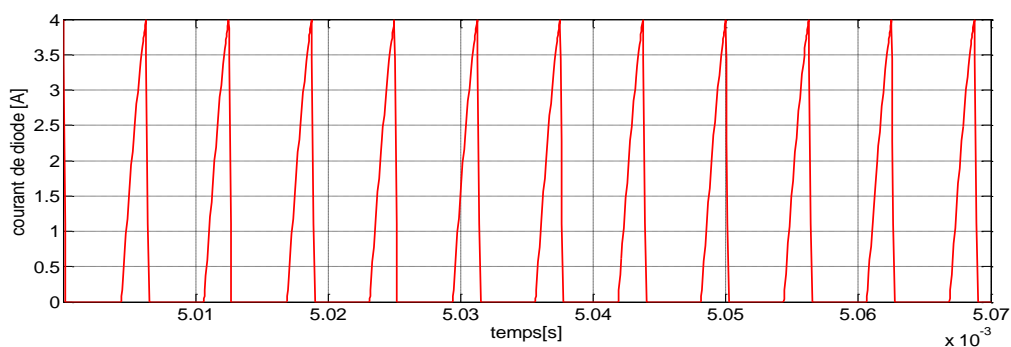
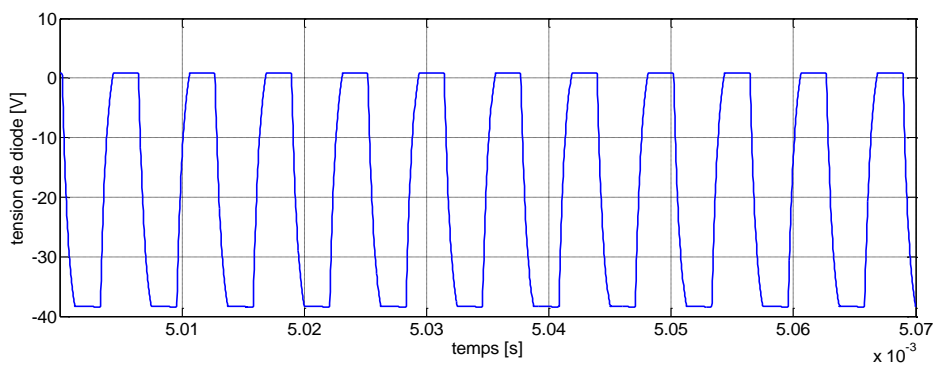


Figure.IV.18. Forme d'onde de tension à la sortie de l'onduleur.

La figure (IV.19) montre les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la diode D_1 , située dans le coin supérieur gauche du convertisseur redresseur. Lorsque la diode est en position bloquée, la tension mesurée est de -40 volts. En revanche, lorsque la diode est conductrice, la tension chute à zéro volt et le courant atteint environ 4 ampères.

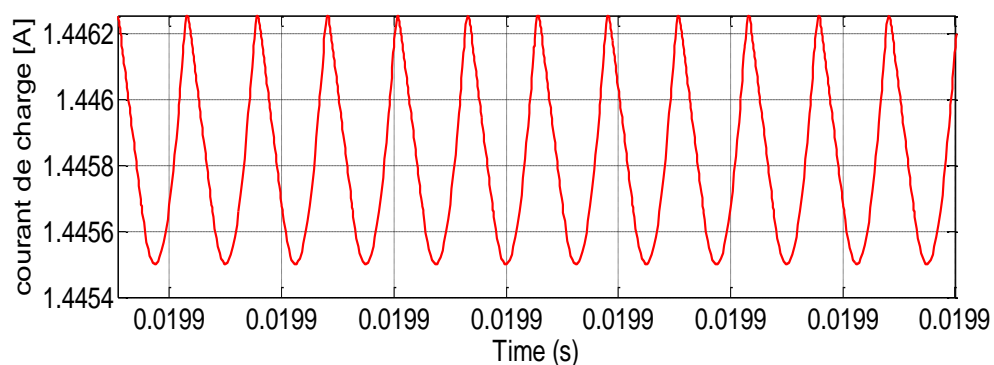




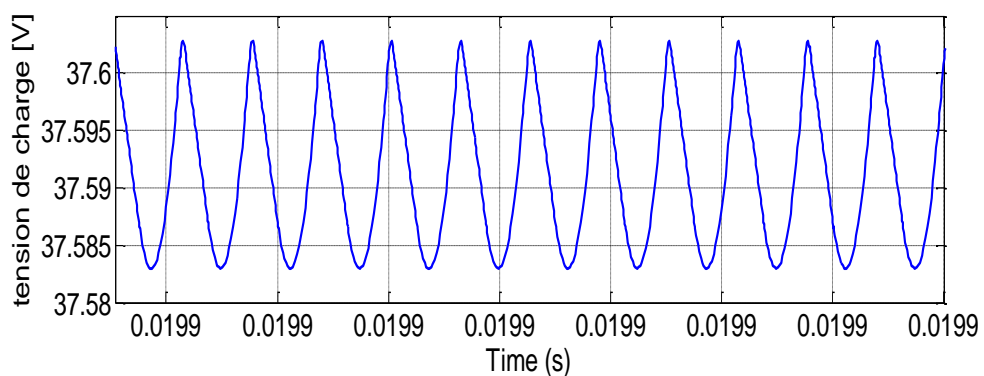
-b-

Figure.IV.19. Les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la diode D1

La figure (IV.20) présente les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la charge (R_{eq} et L_{eq}). La tension redressée est mesurée autour de 38 volts, tandis que le courant atteint environ 1.5 ampères.



-a-



-b-

Figure.IV.20. les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la charge.

IV.4. Partie B

Nous avons mis en place l'assemblage présenté dans la Figure (IV.21), qui représente le schéma bloc du convertisseur LLC en trois niveaux de type NPC (Neutral Point Clamped). Ensuite, nous avons conçu un circuit de commande pour générer les signaux de commande (S1, S2, S3 et S4) afin de contrôler les MOSFETS (M1, M3, M4 et M2).

IV.4.1. Model de simulation

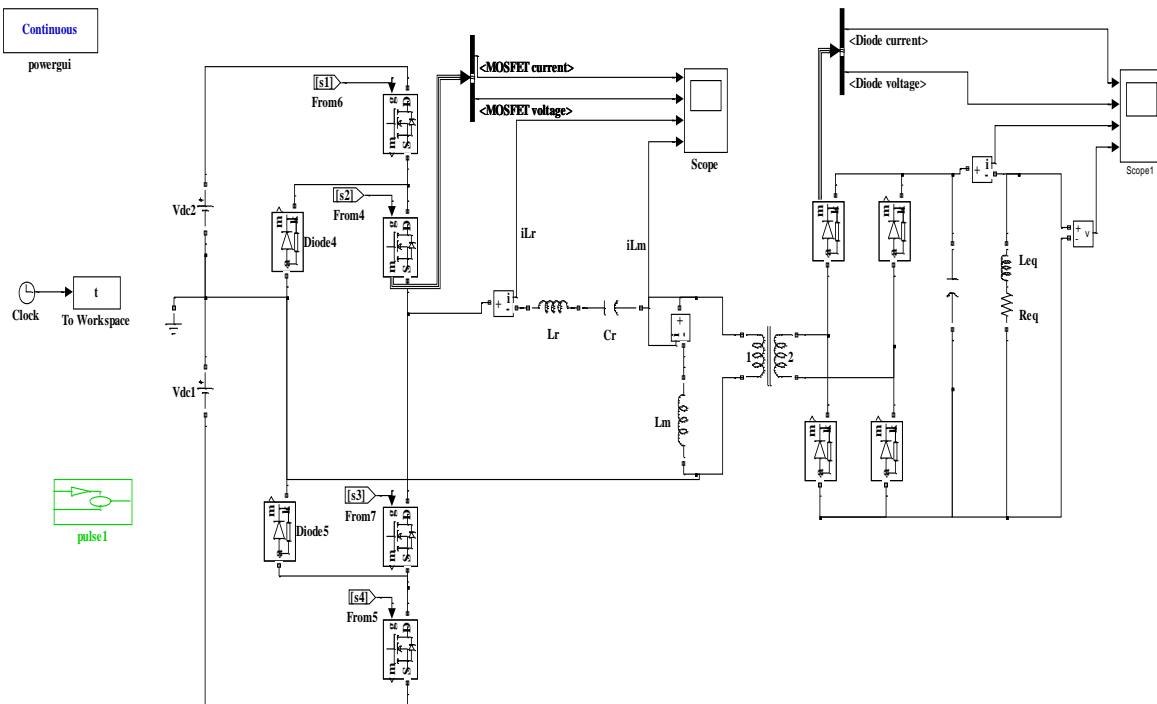


Figure.IV.21. Modèle simulation du convertisseur à résonance.

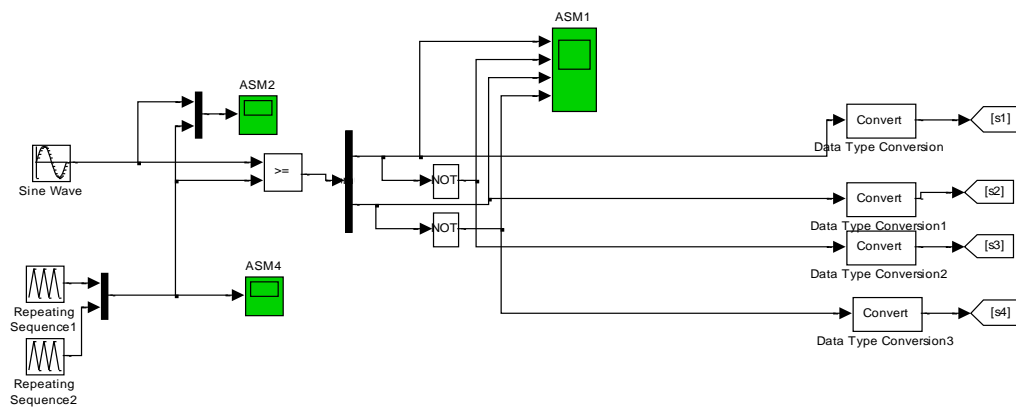
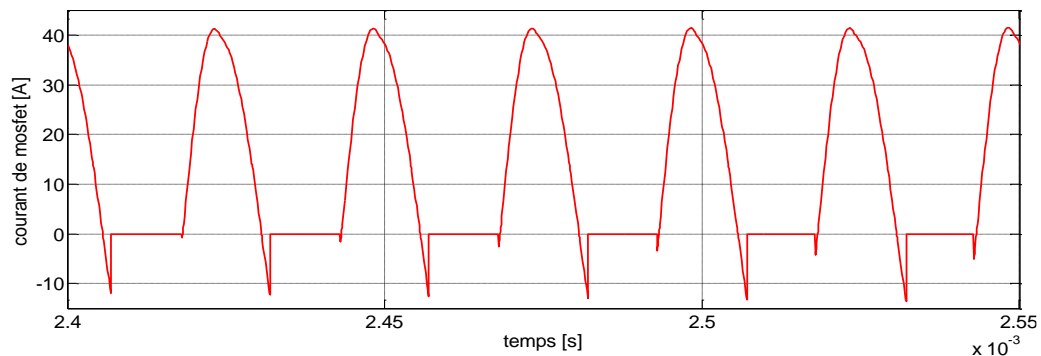


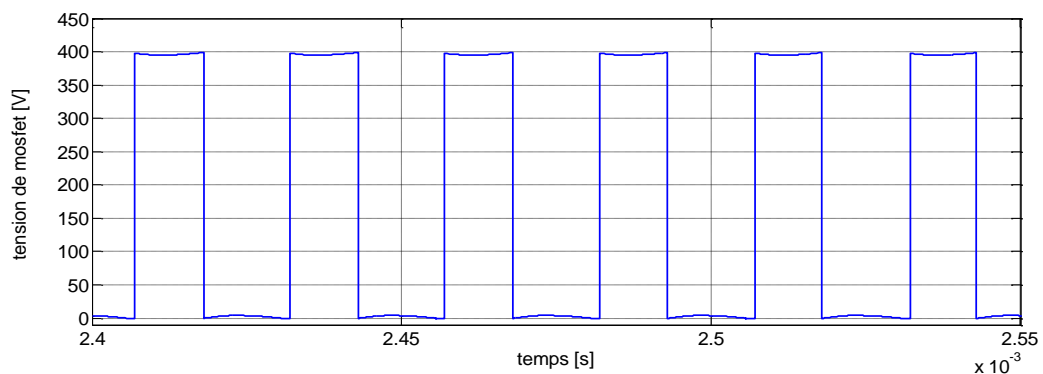
Figure.IV.22. Générateur d'impulsions (commande MLI).

IV.4.2. Résultats et discussions

Dans la figure (IV.23), les formes d'onde de tension et de courant au niveau de l'interrupteur 1 du convertisseur sont représentées. Lorsque l'interrupteur est en position bloquée, la tension atteint la valeur de la source DC à 400 volts. En revanche, lorsque l'interrupteur change d'état, la tension devient nulle et le courant atteint environ 41 ampères. La partie négative du courant apparaît en raison du changement d'état de l'interrupteur



-a-



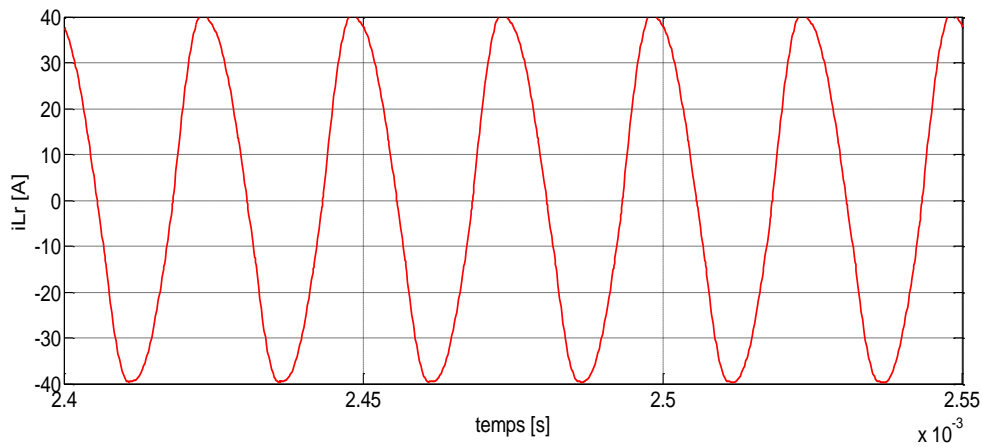
-b-

Figure.IV.23. Les formes d'onde de tension et de courant au niveau de l'interrupteur 1 situé en haut d'onduleur.

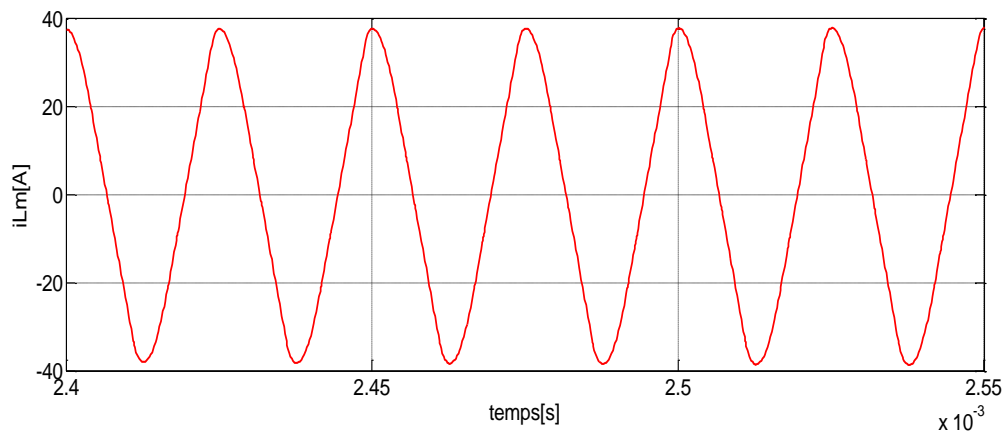
Dans la figure (IV.24 (a)), nous pouvons observer le courant à la sortie de l'onduleur traversant l'inductance L_r . Ce courant présente des caractéristiques alternées mais moins sinusoïdales en raison de la présence d'harmoniques. Il oscille entre -40 et +40 ampères. La figure (IV.24 (b)) représente le courant traversant l'inductance de magnétisation L_m . Nous pouvons constater qu'il s'agit également d'un courant alternatif avec moins d'harmoniques, filtré par une inductance de 80 μH . Ce courant présente maintenant des ondulations entre -39 et +39

Chapitre 04 : Présentation des résultats et discussion

ampères. De plus, la valeur de la fréquence de résonance est calculée à 40 kHz à partir de la période de la courbe.



-a-



-b-

Figure.IV.24. Les formes les courants de circuit de résonance.

Dans la figure (IV.25), on peut observer les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la diode D_1 , située dans le coin supérieur gauche du redresseur. Lorsque la diode est en position bloquée, la tension mesurée est de -175 volts. En revanche, lorsque la diode est conductrice, la tension chute à zéro volt et le courant atteint environ 29 ampères.

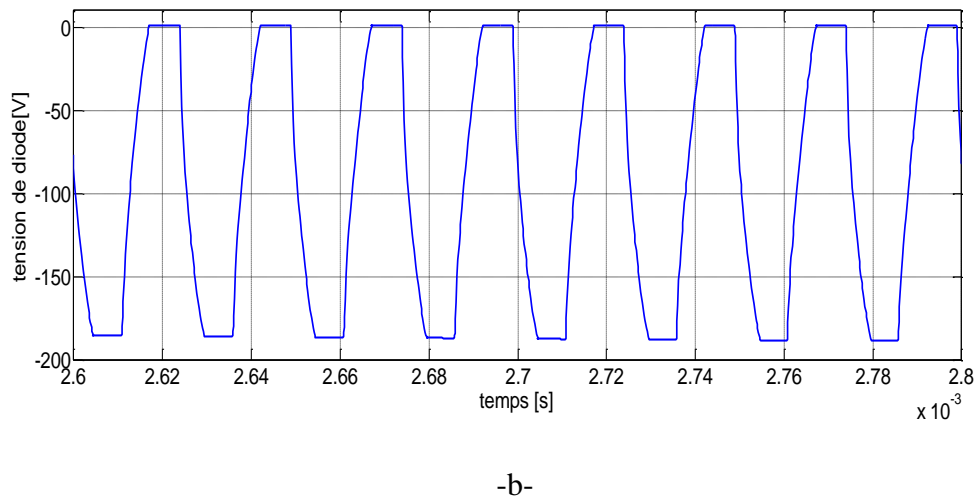
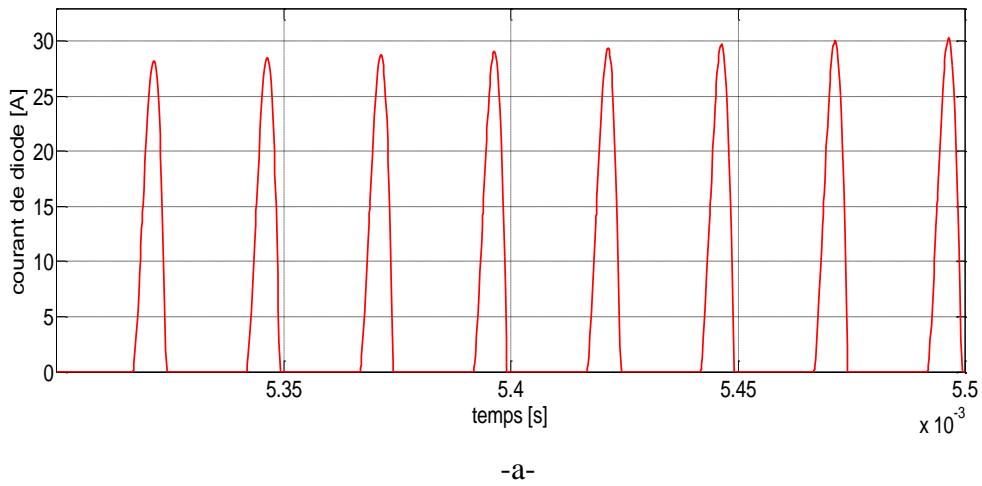
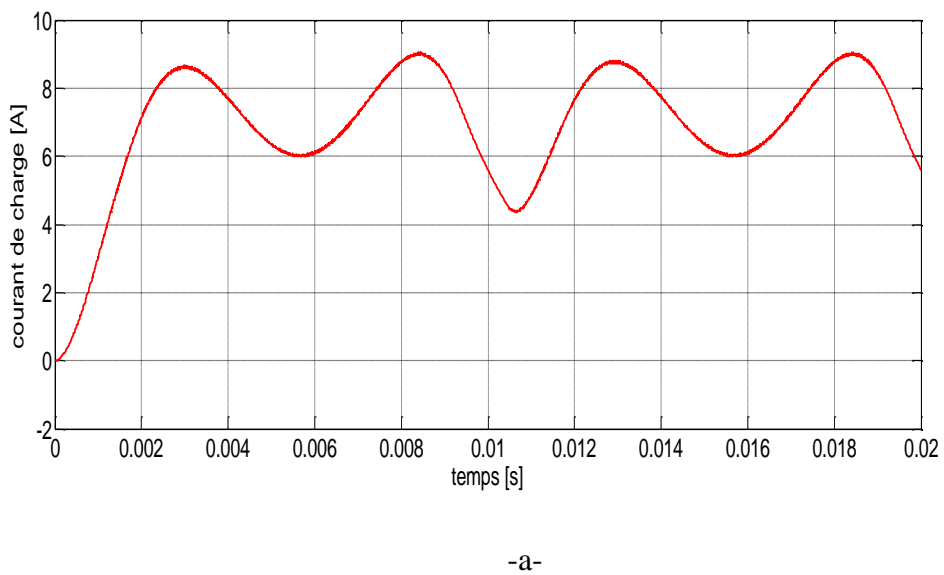
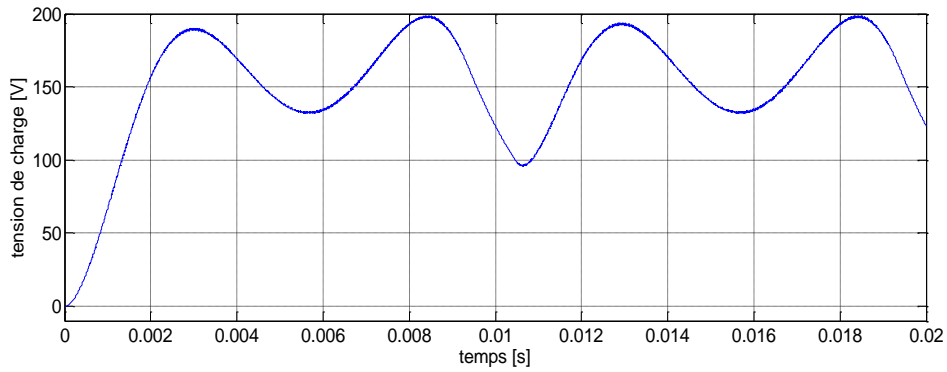


Figure.IV.25. Les formes d'onde de tension et de courant au niveau de la diode.





-b-

Figure.IV.26. La forme de tension et de courant de la charge.

IV.5. Partie C :

Selon le schéma électrique de puissance de l'entreprise "ANABIB " (Voir l'annexe), qu'est présente le schéma d'alimentation en énergie du four électrique rappelons, ce dernier a contrôlé le même principe de chauffage par induction magnétique à l'aide d'une configuration un convertisseur statique (Redresseur \ Onduleurs) ; l'ancienne à bas des thyristors qui ne supportent pas les fréquences élevées.

IV.5.1. Model de la simulation

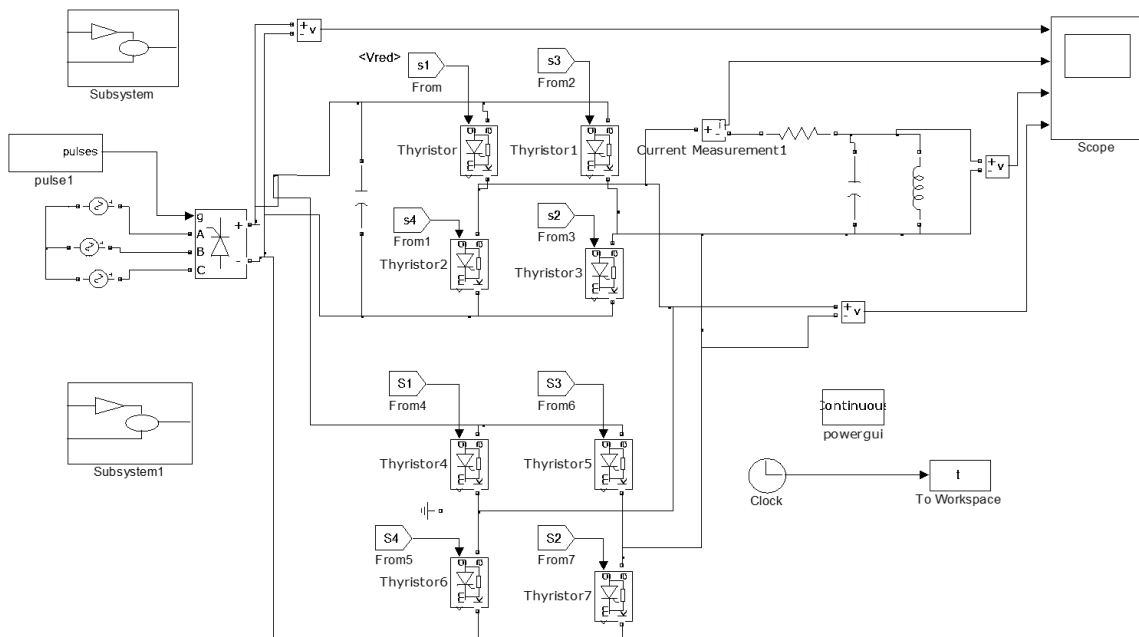


Figure.IV.27. Schéma bloc du convertisseur statique à résonance de l'entreprise.

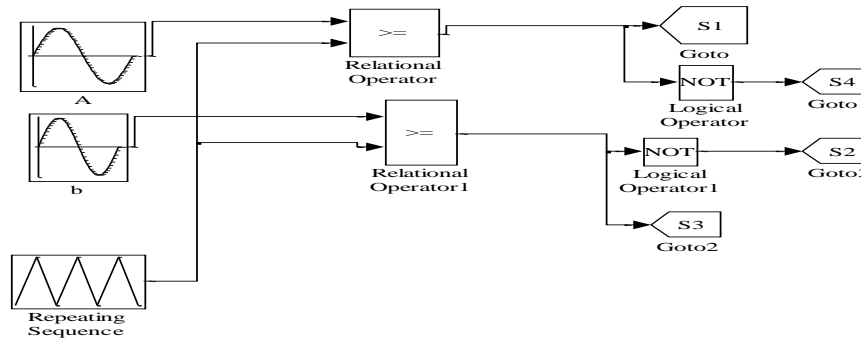


Figure.IV.28. Stratégie de commande.

Dans Cette section, nous avons réalisés un schéma bloc de simulation qu'est basé essentiellement sur les paramètres et la topologie d'un convertisseur statique de l'entreprise, pour faire une comparaison entre nôtre système proposé et celle de l'entreprise. Le tableau suivant montre les paramètres utilisés :

Tableau.IV.2. Paramétrés utilises.

Elément	Symbole	Valeur
Condensateur de résonance	C_r	$36.53 \times 36 \mu\text{F}$
Inductance de résonance	L_r	$170.1 \mu\text{H}$
Résistance	R	1Ω

IV.5.2. Résultats et discussion :

La figure (IV.29) montre la tension à la sortie du redresseur. On remarque que ; de [0 ; 0.0033 S] ta tension augment qui représente le régime transitoire des phénomènes. Et après, la tension se stabilisé à valeur de 1000V d'environs.

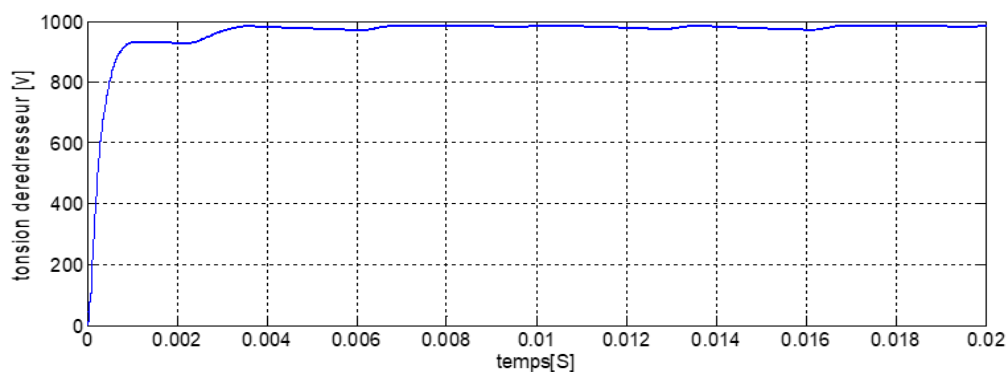


Figure.IV.29. La tension à la sortie du redresseur.

La tension à la sortie de l'onduleur est présente par la figure (IV.30). On remarque que cette forme d'onde est alternative et n'est pas sinusoïdale à cause de l'existence des harmoniques. Elle est ondulée entre $[-1000 ; +1000]$ volts.

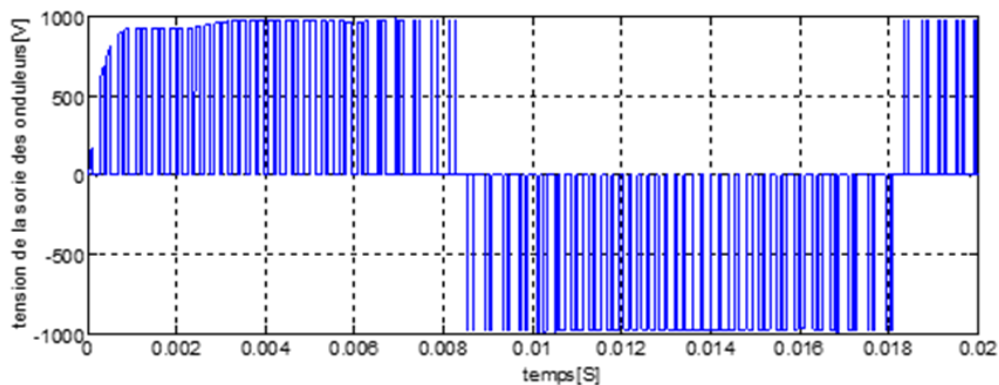


Figure.IV.30. La tension à la sortie d'onduleur.

La figure (IV.31) montre la tension de charge côté alternative ou on a le phénomène de résonance représenté par les oscillations répétitives à haut fréquence. Elle est ondulée entre $[-50, +50]$ Volts.

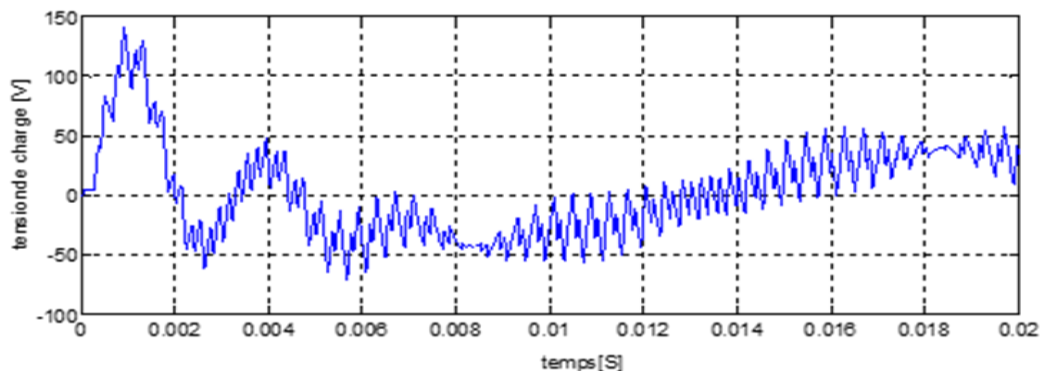


Figure.IV.31. La tension de charge.

Chapitre 04 : Présentation des résultats et discussion

La dernière figure (IV.32) représente le courant de la charge (RLC). C'est le courant qui produit l'induction magnétique. On observe que, la valeur de l'intensité du courant est augmentée élevée entre [-1000 ; +1000] ampères.

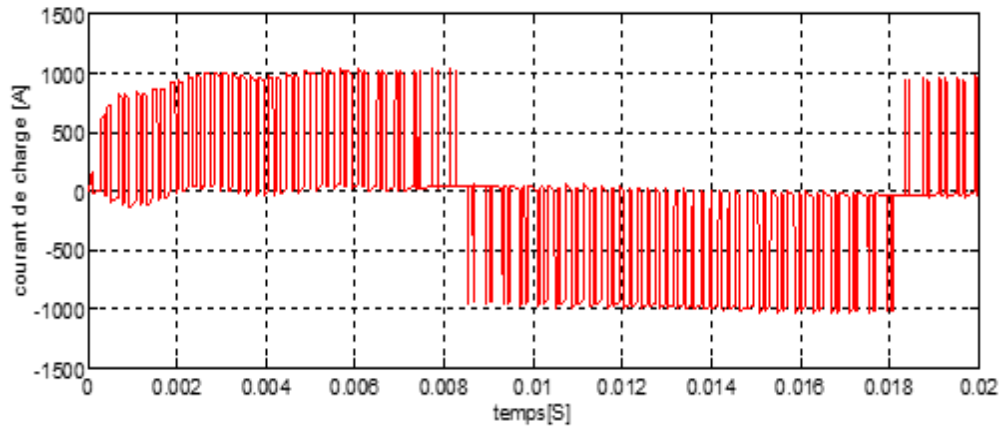


Figure IV.32: le courant de charge.

IV.6. Conclusion

La simulation du chauffage par induction offre une approche précieuse pour étudier et modéliser le fonctionnement d'un système de chauffage avant sa mise en pratique. Cette simulation permet de reproduire virtuellement les conditions réelles, ce qui permet d'évaluer l'efficacité et le comportement thermique du système. En utilisant un modèle mathématique et physique complet, incluant des composants tels que l'onduleur, la charge à résonance LLC, le transformateur redresseur et la charge en courant continu, la simulation permet de comprendre l'interaction de ces éléments et de générer un champ électromagnétique qui induit la chaleur par induction. Les paramètres clés tels que la fréquence de l'onduleur, l'intensité du courant et la géométrie de la charge sont analysés pour optimiser l'efficacité énergétique et assurer une répartition uniforme de la chaleur. Cette approche de simulation est donc essentielle pour améliorer la conception et la performance des systèmes de chauffage par induction.

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons présenté d'abord le fonctionnement, les caractéristiques et le principe général du chauffage par induction électromagnétique. Puis, nous avons exposé une étude sur la fréquence de fonctionnement du chauffage, la dissipation de la puissance, le rendement et l'alimentation pour améliorer les performances du système.

Notre objectif est de réaliser une étude par simulation d'un système de chauffage par induction alimenté par un onduleur à résonance série. Nous analysons différentes topologies de générateurs, telles que le pont complet en H la structure de type NPC.

Dans la première partie de notre travail, nous présentons un état de l'art des procédés de chauffage par induction, qui sont complexes en raison de leur nature multi physique. Nous proposons un modèle simple pour évaluer le rendement du chauffage par induction et étudions divers paramètres électriques qui influencent ses avantages et ses utilisations actuelles.

La conception des installations de chauffage par induction est souvent basée sur l'expérience empirique du constructeur et les essais successifs, ce qui peut être long et coûteux. Pour remédier à cela, nous utilisons des simulations pour évaluer les performances du système de chauffage par induction et optimiser la conception de l'inducteur, réduisant ainsi la dépendance des essais empiriques et améliorant l'efficacité du système.

Dans la deuxième partie de notre étude, nous analysons en détail les différentes structures topologiques et les principales caractéristiques des générateurs électroniques utilisés pour alimenter le système de chauffage par induction. Nous constatons que la mise en série d'onduleurs monophasés est la topologie la plus adaptée en raison de la nécessité de sources de tension continues isolées les unes des autres. Cette topologie offre modularité et simplicité structurelle, permettant une extension facile à un nombre élevé de niveaux de tension de sortie.

Nous soulignons les avantages et les limitations des différentes topologies de convertisseurs multi niveaux, notamment les convertisseurs en pont H à résonance. Nous notons que l'augmentation du nombre de niveaux de tension de sortie réduit le taux de distorsion harmonique, mais cela peut également complexifier le système et nécessiter des exigences de contrôle plus élevées.

Dans la dernière partie de notre étude, nous proposons une topologie d'onduleur résonant en pont amélioré LLC pour le chauffage par induction. Nous vérifions la validité de cette configuration à travers des simulations et constatons que l'onduleur en pont résonant, combiné avec les paramètres du réservoir résonant et la combinaison des deux convertisseurs statiques, offre une excellente alimentation pour le chauffage par induction.

Cette topologie permet d'obtenir une forme d'onde de courant de sortie plus stable avec une fluctuation minimale. De plus, elle nécessite moins de tours primaires que d'autres topologies pour obtenir le même gain de tension et la même oscillation de flux magnétique. L'analyse de la topologie LLC démontre qu'elle offre de meilleures performances que d'autres topologies pour les applications de chauffage par induction.

Conclusion Générale

Les résultats de simulation confirment les performances prometteuses de cette topologie pour les applications de chauffage par induction à haute fréquence. En conclusion, notre étude par simulation contribue à améliorer la compréhension des systèmes de chauffage par induction et offre des informations précieuses pour optimiser leur conception et leur efficacité énergétique.

Bibliographie

- [1] ADNENI. Modélisation et contrôles des convertisseurs a résonance : Application ou chauffage par induction. Thèse de Magéstre de l'université de betna, 2010.
- [2] GERARD Develey. Technique de l'ingenieur .D5935.
- [3] CITTM, centre d'innovation et de transfert technologique des métaux. INFOMETAL NB. Source : [www.richiburnett.co.uk/Numéro2- juin 2006](http://www.richiburnett.co.uk/Numéro2-juin2006).
- [4] G. Murry. Les aciers pour traitement thermique ; les aciers pour trempe superficielle. Le courrier technique de l'OTUA N° :28, office Technique pour l'utilisation de l'Acier-13, cours Valmy.
- [5] Ala Houam, Fares Zaamouche, Rabah Daouadi, Moussa Attia. Efficiency Considerations of LLC Resonant Converter for Induction Heating Application. European Journal of Electrical Engineering. Vol. 24, No. 5-6, December, 2022, pp. 257-263. <https://doi.org/10.18280/ejee.245-604>
- [6] MEROUANE Boudjemaâ, «Distribution des champs électromagnétique et thermique dans une billette placée dans un four à induction», THESE
- [7] PERROT Olivier, « COURS D'ELECTROTHERMIE 1re année, I.U.T. » de Saint-Omer Dunkerque Département Génie Thermique et énergie, 2011.
- [8] CALLEBAUT Jean, « Chauffage par induction, Laborelec, Guide Power Quality Section 7»: Efficacité Energétique www.leonardo-energy.org/France Edition Août 2007.
- [9] WANSER M.Sven, « Simulation des phénomènes de chauffage par Induction, Application à la trempe superficielle » , thèse de doctorat. Edition de l'Ecole Doctorale de Lyon des Sciences pour l'Ingénieur : Electrotechnique, Electronique, Automatique. (1995)
- [10] WILDI Théodore, « Electrotechnique » Avec la collaboration de Gilbert Sybille (Ingénieur, Institut de recherche d'Hydro-Québec) ,3ème édition, 1978, 1991,2000 les Entreprises Spérika ltée, Imprimé au Canada, ISBN PUL 2-7637-7593-4.
- [11] Valérie Labbé « Modélisation numérique du chauffage par induction. Approche éléments finis et calcul parallèle » Thèse de doctorat. Edition de l'école nationale supérieure des Mines de Paris. Edition : 22 Avril 2002.

- [12] G.DEVELEY, «L'Induction: Effets Thermiques et Mécaniques. Rappel des Bases Théoriques », Congrès International, « L'Induction dans les Procédés Industriels », Paris, France, Mai 1997.
- [13] CARDINAUX David. « Etude et modélisation numérique 3D par éléments finis d'un procédé de traitement thermique de tôles embouties après chauffage par induction : Application à un renfort de pied central automobile. » Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. Edition : 7 Novembre 2008.
- [14] LEE info, centre national de la recherche scientifique. « Applications thermiques de l'électricité » Septembre 2001, Numéro5.
- [15] ADNANI Boubekeur «MODELISATION ET CONTROLE DES CONVERTISSEURS A RESONANCE : APPLICATION AU CHAUFFAGE PAR INDUCTION» Thèse Magister, Université de Batna 2010
- [16] Fairchild Semiconductor. « Induction Heating System Topology Review». Discrete Application, Power Device Division. Rev D, July 2000.
- [17]https://www.researchgate.net/figure/14-Principe-du-chauffage-par-induction_fig5_30511912
- [18] G. SEGUIER, L. FRANCIS, D. PHILIPPE. ELECTRONIQUE DE PUISSANCE : STRUCTURE, COMMANDES, APPLICATIONS. Edition10, Dunod, 2015.
- [19] BROSELARD Pierre. Conception, Réalisation et Caractérisation d'interrupteurs (thyristors et JFETS) haute tension (5kV) en carbure de silicium. Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, décembre 2004.
- [20] DAIAE DINE Mohamed Cherif Oussema. ETUDE, CONCEPTION ET REGULATION OPTIMALE (LQR) D'UN FOUR PAR INDUCTION. 2017/2018.
- [21] <http://djelectro71.com/theories-mosfet-canal-n-et-canal-p>
- [22] M. Hicham, H. Sofiane, « Etude et modélisation du convertisseur statique destiné à améliorer La qualité de l'énergie électrique, Mémoire magistrale », Université. Dr Tahar Molay Saida (Algérie) 2016/2017.
- [23] A. Chouder, A. Malek et F. Krim. Modèle de Simulation d'une Commande en Temps Réel d'un Onduleur de Tension Triphasé. Laboratoire Photovoltaïque, Centre d Développement des Energies Renouvelables. Laboratoire d'Electronique de Puissance, Université Ferhat Abbas, Sétif, 1999.
- [24] MNIF Faïçal. ÉTUDE ET RÉALISATION DES LOIS DE COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT ET PAR APPROCHE GÉOMÉTRIQUE : APPLICATION À UN ONDULEUR DE TENSION MONOPHASÉ. L'université du QUÉBEC 1991.
- [25] ABBASSEN Lyes. Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque. Mémoire de magister. Université de TIZI OUZOU. Mai 2011.
- [26] AMRANE Fayssal. ETUDE ET REALISATION D'UN ONDULEUR A RESONANCE POUR UTILISATION POUR LE CHAUFFAGE PAR INDUCTION. Thèse Master 2012 Université Ferhat ABBAS Setif-1.
- [27] BERREZZEK Farid. ETUDE DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE COMMANDE DES ONDULEURS A MLI ASSOCIES A UNE MACHINE ASYNCHRONE. Thèse de Magister, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA 2006.

- [28] BOUAFIA Abdelouahab. Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance : application aux redresseur.
- [29] ONDULEURS A.Mli ASSOCIES A UNE MACHINE ASYNCHRONE", thèse de Magister, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA 2006seurs à MLI". Université Ferhat Abbas, Sétif, 2010.
- [30] DAOUADI Rabah, ZAAMOUCHE Fares, ATTIA Moussa, HOUAM Ala. (2022). Sensorless field oriented control applied for an induction machine by using the discontinuous PWM strategy. European Journal of Electrical Engineering. Vol. 25, No. 1, December, 2022, pp. 9-14. <https://doi.org/10.18280/ejee.250102>.
- [31] ZAAMOUCHE Farès. Cours ELECTRONIQUE DE PUISSANCE NIVEAU3^{ème} Année Licence. OPTION Electromécanique2019\2020.Maitre de conférences «B» à l'université de Tébessa. E-mail : zaamouche.fares@univ-tebessa.dz .
- [32] TRABELSI Mohamed Abdallah. Modélisation et Commande des Systèmes Physiques à Topologie Variable : Application au Convertisseur Multicellulaire. Thèse pour obtenir le grade de Docteur. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Edition 2009. N° d'ordre 2009.
- [33] G. DEVELY. Chauffage par induction électromagnétique : principes. Technique de l'ingénieur, traité Génie électrique, D 5 935, pp. 1-22.
- [34] ATTIA Moussa, ZAAMOUCHE Fares, HOUAM Ala, DAOUADI Rabah. (2022). Stability Control Modeling and Simulation Strategy for an Electric Vehicle Using Two Separate Wheel Drives. European Journal of Electrical Engineering. Vol. 24, No. 5-6, December, 2022, pp. 239-245. <https://doi.org/10.18280/ejee.245-602>
- [35] G.Grellet, G.Clerc. Actionneurs Electriques, principe, modèles, commande. Collection Electrotechnique. Edition Eyrolles, 2000.
- [36] M. G. Ribaud. Le théorème du chauffage par courants induits de haute fréquence. Article de conférence faite à la Société Française de Physique, le vendredi 13 mai 1932.
- [37] E.J. DAVIES, J. et SIMPSON. Induction Heating Handbook, McGraw-Hill, UK. P. (1979).
- [38] BIRAME Mohamed. Commande floue d'un convertisseur AC-DC à UPF en cascade avec un convertisseur DC-DC double étage alimentant un système de biberon nage par super capacités d'un véhicule électrique. Thèse de Magister en Électrotechnique. Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna. Édition 2003.
- [39] T. Hanane. Robustesse de commande vectorielle de structure minimale d'une machine. Thèse de magistère, Batna 2006.
- [40] SEGHIOUR Abdellatif. Commande électrique cour 2^{ème} année électrotechnique. POLYCOPIÉ DE COURS SITE WEB <https://elearning.esgee-oran.dz/> , 2022.
- [41] B. Bendjedia. Stratégies de commande en mode dégradé d'un convertisseur multi bras (application aux variateurs de vitesse). Mémoire de magistère, EMP, 2012.
- [42] Zaamouche Fares, Saad Salah, Hamiche Larbi. (2020). Discontinuous PWM applied for a three-phase five-level CHB inverter fed by PV solar-boost converter. European Journal of Electrical Engineering, 22(2), 153-161. <https://doi.org/10.18280/ejee.245-602>.

[43] F. BRICHAUT, "Les onduleurs autonomes : conception et applications industrielles", DUNOD, (1982).

[44] I. D. de Vries. High Power and High Frequency Class-DE Inverter. Thesis Presented for the Degree of doctor of philosophy In the Department of Electrical Engineering university of Cape Town, august (1999).

[45] J Niard, R Moreau. Electronique, cours et travaux pratiques. Classe de terminale avec la collaboration de Philippe NIARD. Edition Fernand Nathan 1984.

[46] Zachari Peterson. LLC Resonant Converter Design and PCB Layout. february 2,2021. <https://resources.altium.com/p/llc-resonant-converter-design-and-pcb-layout> .

Annexe 1

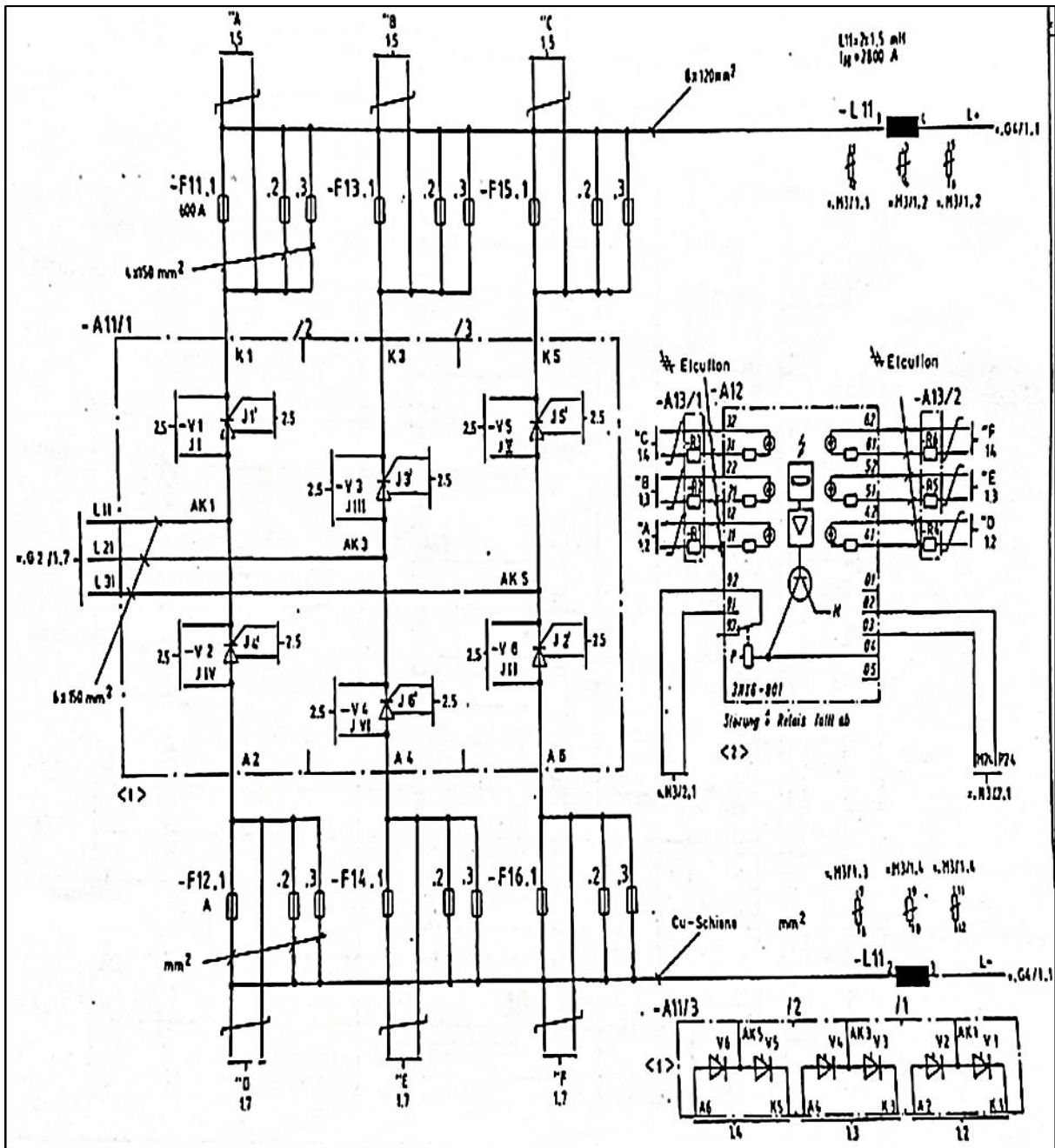


Figure A-2 : Le schéma électrique de redresseur

Annexe 1

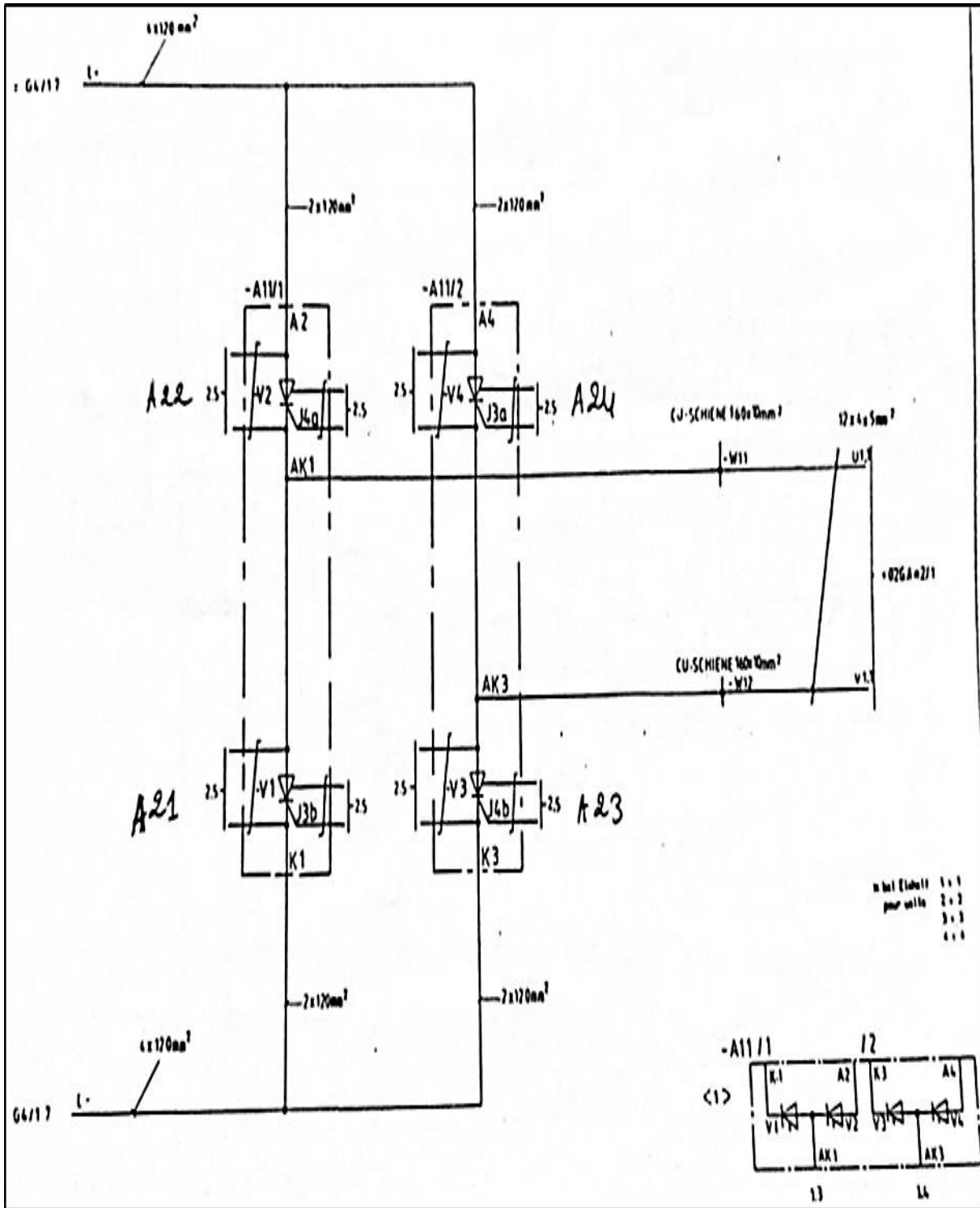


Figure A-3 : Le schéma électrique d'onduleur 1.

Annexe 1

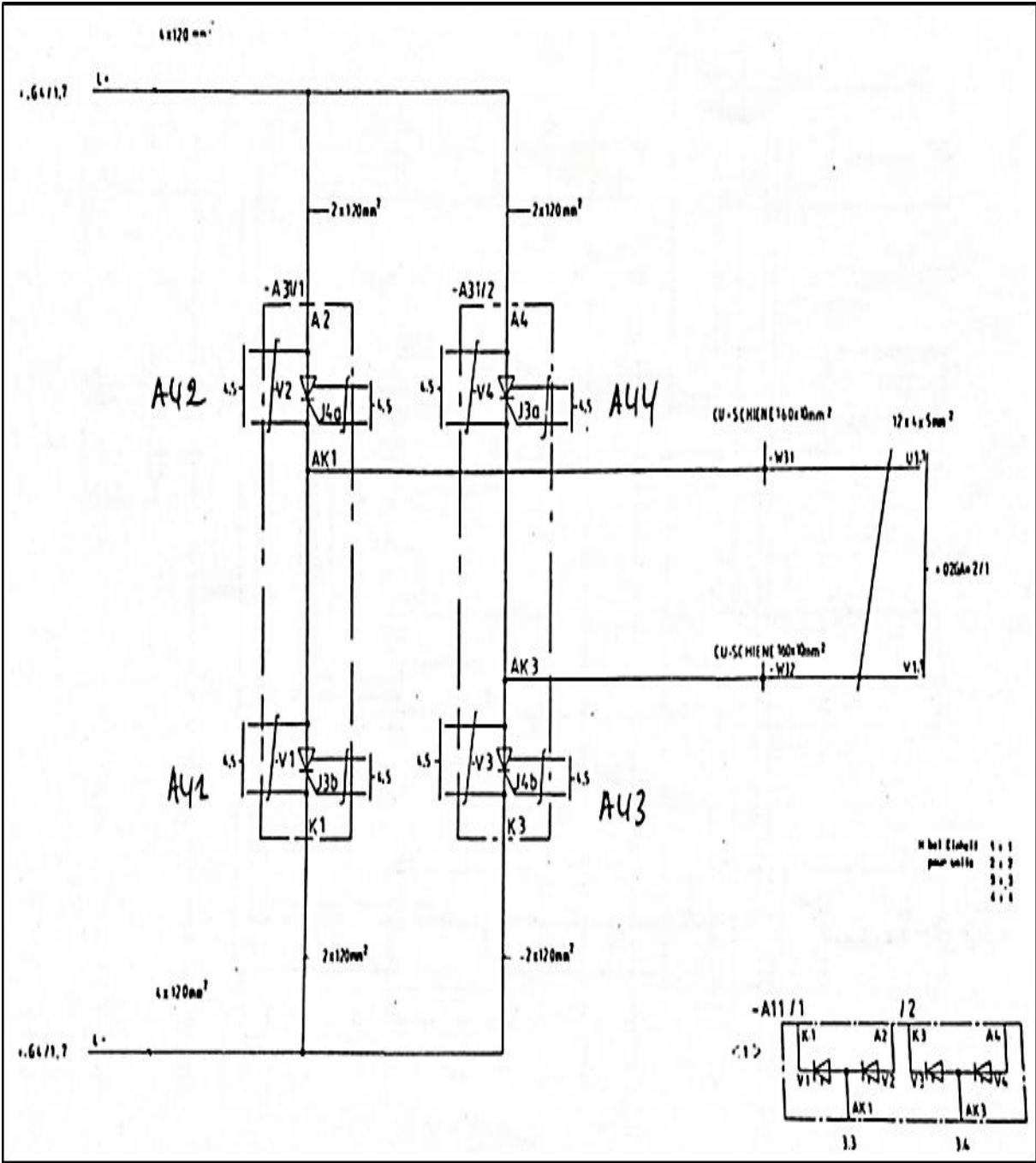


Figure A-4 : Le schéma électrique l'installation d'onduleur.