REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : **Electrotechnique**

Spécialité : **Commandes Electriques**

Conception d'un système de traitement thermique superficiel par induction «Application sur les pièces mécaniques»

Présentés par :

Diffallah Yazid

Tayeb Errahmani Fateh

Proposés et Dirigés par :

Dr. Bentouati Smain

Promotion 2023

Remerciement

Avant toute chose, nous souhaitons exprimer notre gratitude à Allah qui nous a soutenus et nous a accordé la patience et le courage nécessaires pour achever ce mémoire. Bien entendu, nous aimerions commencer ces remerciements en témoignant notre respect profond et notre reconnaissance envers le

Dr. Bentouati Smain, docteur à l'université Médéa, pour son encadrement et ses conseils patiemment tout au long de ce travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements aux membres du jury. Nous ne pouvons pas oublier de mentionner tous les enseignants du département de Génie électrique de l'Université Médéa qui ont contribué à notre parcours académique.

Dédicace

Je dédie ce travail,
Mes chers parents qui ont sacrifié leur vie pour Mon succès et encouragé que dieu
Garde heureux pour toujours
A mes frère et mes sœurs, et leurs enfants
A toute la famille ***Diffallah***
Sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation, depuis le primaire jusqu'à ce jour,
En particulier :
Dr. ***Bentouati Smain***
A toute mes amis surtout(Mohamed Dm ,Oussama Hn ,Boubakeur bd) et mes collègues surtout Mustapha et zakaria à tous ceux qui m'ont aidé pour réaliser ce mémoire
A l'ensemble des étudiant de ma promotion, particulièrement ceux d'électrotechnique
Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment.

yazid

Dédicace

Je dédie ce travail,
Mes chers parents qui ont sacrifié leur vie pour Mon succès et encouragé que dieu
Garde heureux pour toujours
A toute la famille ***Bouchraier***
Sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation, depuis le primaire jusqu'à ce jour, En particulier :
Dr. ***Bentouati Smain***
A toute mes amis (Karim ,Abdou Terras , Bi Damardji) et mes collègues à tous ceux qui m'ont aidé pour réaliser ce mémoire
A l'ensemble des étudiant de ma promotion, particulièrement ceux d'électrotechnique
Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment.

fateh

Table des matières

Introduction générale……1

Chapitre I Etat de l'art du chauffage à induction

I.1.Introduction…….4

I.2. Principe du chauffage par induction……...4

I.3- Phénomènes et lois physiques lies au chauffage par induction ……6

I.3.1 Lois de Faraday et de Lenz…….6

I.3.2 Profondeur de pénétration……..8

I.3.3 Courants du Foucault…….9

I.4 Effets électromagnétiques …….10

I.4.1 Effet de peau……10

I.4.2 Effet de proximité……..11

I.4.3 l'effet joule …….12

I.5.Constitutions……..15

I.5.1 Les composants d'électronique de puissance……..15

I.5.2 Les composants électromagnétiques…….15

I.6.Caractéristiques du chauffage par induction électromagnétique.....16

I.6.1 Répartition de courant et de puissance dans la charge……..16

I.6.2 Influence de la fréquence de fonctionnement……..19

I.7. Caractéristiques du générateur de puissance à induction ……20

I.7.1 Puissance du générateur ……20

I.7.2 Rendement ……20

I.7.3 Facteur de puissance……..21

I.8.Les Applications du chauffage par induction…….21

I.9. Avantage et inconvénient du chauffage par induction……24

I.9.1 Avantages du chauffage par induction…….24

I.9.2 Inconvénients du chauffage par induction…….25

I.10.Conclusion……25

Chapitre II Convertisseurs Statiques à Résonances

II.1. Introduction……27
II.2. Rappel sur Les convertisseurs statiques ……27
II.3. Qualités d'un bon convertisseur……28
II.4. Les convertisseurs de fréquence…….29
II.4.1 Systèmes d'alimentations classiques…….29
II.4.2 Convertisseurs à groupe rotatif ……..29
II.4.3 Convertisseurs statiques à moyenne fréquence……..30
II.4.4 Convertisseur à résonance…….31
II.4.5 Convertisseurs statiques ……..34
II.4.6 Convertisseurs statiques à résonance ……34
II.4.6.1 Circuit oscillants ……35
II.4.6.1.1.Principe……35
II.4.6.2 Types de convertisseurs statiques à résonance ……..37
II.4.6.2.1 Convertisseurs à résonance coté alimentation ……38
II.4.6.2.2 Convertisseurs à interrupteurs résonants…….38
II.4.6.2.3 Convertisseurs à résonances coté charge……..39
II.5. Onduleurs à résonance……39
II.5.1 Onduleur à résonance série ……41
II.5.2 Onduleur à résonance parallèle ……..42
II.5.3 Onduleur à injection de courant……43
II.6.Convertisseurs à résonance classe E ……..43
II.7 Les différents interrupteurs d'électroniques de puissance ……..44
II.7.1 Interrupteur parfait……..44
II.7.2 Interrupteur à semi-conducteur ……..44
II.7.2.1 Classification des semi-conducteurs ……45
II.7.3 Gamme de fréquences des interrupteurs……49
II.7.4. Les modes de commande des interrupteurs ……49
II.8. Principe et critères de choix de la topologie et des convertisseurs de fréquence pour le chauffage par induction ……..…49
II.9. Propriétés des onduleurs à résonance……..52
II.9.1 Caractéristiques des onduleurs sérient……53

II.9.2 Caractéristiques des onduleurs parallèles…….53

II.10. Techniques de réglage de puissance……..53

II.10.1. Contrôle à fréquence variable……53

II.10.2. Contrôle à fréquence fixe……..54

II.11. Choix de la topologie……55

II.12. Applications des onduleurs à résonance……56

II.13.Conclusion…….57

Chapitre III Commande par modulation de densité d'impulsion

III.1. Introduction……..58

III.2 Principe de la MDI……58

III.3 Mode de fonctionnement……..59

III.4 Caractéristiques de la modulation……..60

III.5 Types de la MDI……61

III.6 Etude analytique……62

III.6.1 Hypothèses……..62

III.6.2 Expression de la puissance moyenne ……...68

III.7 Etude par simulation numérique ……70

III.7.1 Résultats de simulation ……70

III.8Conclusion ……75

Chapitre IV Réalisation pratique

IV. Introduction……...76

IV.1. Onduleur avec circuit RLC série……76

IV.1.1. Principe……76

IV.2. Réalisation pratique ……76

IV.3. Programme arduino ……76

Conclusion générale……83

Chapitre I Etat de l'art du chauffage à induction

Figure I.1 : Principe du chauffage par induction……..5

Figure I.2 Un système de chauffage par induction constitué d'une charge et d'une bobine d'induction……5

Figure I.3: Loi de faraday……7

Figure 1.4 : Représentation de la profondeur de peau Tirée de Rudnev et al. (2003)……...……11

Figure 1.5 : Distribution des courants induits dû à l'effet de proximité a) Courants sources circulant dans le même sens, b) Courants sources circulant dans des sens opposés Tirée de Rudnev et al. (2003)……..……12

Figure I.6 : Pièce à chauffer sous forme d'un cylindre……...13

Figure I.7 : circulation des courants de Foucault dans la pièce à chauffer…….….14

Figure I.8 : Constitution général d'un système de chauffage par induction…….16

Figure I.9 : Profondeur de pénétration et dissipation de la puissance……18

Figure I.10 : Plages de puissance et fréquence pour les différents types de générateurs pour chauffage par induction……..20

Figure I.11 : Schéma de principe d'un four de fusion à creuset …….……..22

Figure I.12 : Schéma de principe d'un four de fusion à canal ……..……23

Figure I.13 : Soudage de deux pièces métalliques par induction……...……23

Figure I.14: Schéma de principe de cuisine d'induction…….24

Figure I.15: Brassage électromagnétique d'alliages métalliques……...……24

Chapitre II Convertisseurs Statiques à Résonances

Figure II.1 : Classification des convertisseurs électroniques de puissance……..…28
Figure II.2: Système d'alimentation classique avec gradateur……..29
Figure II.3: Convertisseur à résonance série……...32
Figure II.4: Convertisseur à résonance parallèle……32
Figure II.5: Les différentes configurations connectant la source et la charge……..33
Figure II.6: Les différentes associations d'un condensateur de compensation avec une charge……...36
Figure II.7 : Graphe illustrant la fréquence de résonance en fonction de la réactance…….37
Figure II.8: Convertisseur à résonance coté alimentation……..38
Figure II.9: Interrupteurs résonnants……..38
Figure II.10 : Le principe de l'onduleur……..39
Figure II.11 : Constitution de l'onduleur à résonnance…….40
Figure II.12 : Onduleur à résonance série (onduleur de tension)……..41
Figure II.13: Onduleur à résonance parallèle (onduleur de courant)……...42
Figure II.14 : Onduleur à injection de courant……...43
Figure II.15: Schéma du convertisseur à résonance Classe-E……...43
Figure II.16: Diode…….45
Figure II.17 : Représentation schématique d'un thyristor…….46
Figure II.18 : MOSFET canal N [39]……47
Figure II.19: MOSFET canal P [39]……48
Figure II.20 : Structure d'un IGBT……..48
Figure II.21 : Onduleur en demi-pont……..51
Figure II.22 : Onduleur en pont-complet…….52

Chapitre III Commande par modulation de densité d'impulsion

Figure (III.1) : Modes de fonctionnement de l'onduleur par MDI (a)circuit équivalent; (b) Mode I; (c) Mode II ; (d) Mode III…….60

Figure (III.2) : Différents type de la MDI: (a) Pleine onde; (b) MDI non régulière; (c) MDI régulière……..62

Figure (III.3) : forme du courant à la charge……..66

Figure (III.4) : Signaux De Commande Des Transistors T1 Et T4……71

Figure (III.5) : Signaux de commande des transistors T2 et T3……72

Figure (III.6) :signale de tension et courant de sorties (R= 4 Ω ,C = 90e-7 F …..72

Figure (III.7) :signale de tension et courant de sorties (R=0.5 Ω)……..73

Figure (III.8) :signale de tension et courant de sorties(R= 1.5 Ω)…….73

Figure (III.9) :signale de tension et courant de sorties (R=4 Ω)……...74

Figure (III.10) : La courbe de puissance électrique ……...74

Chapitre IV Réalisation pratique

Figure IV.1 : schéma du montage…….77

Chapitre I Etat de l'art du chauffage à induction

Tableau. I.1 : Quelques valeurs de la profondeur de pénétration exprimées en mm, pour une perméabilité relative μr =1 (sauf acier à 20 °C)…….9

Chapitre II Convertisseurs Statiques à Résonances.

Tableau II.1: fonctionnement des interrupteurs dans chaque configuration……33

Tableau II.2 : Gamme de fréquences des interrupteurs……...50

$\vec{\mathbf{B}}$**:** Induction magnétique [Tesla] .

$\vec{\mathbf{j}}$**:**Densité Du Courant [A/M2] .

I : Courant Electrique [A] .

$\boldsymbol{E_m}$**:** Champ électromoteur[V/m].

$\vec{\mathbf{E}}$**:** Champ électrique [V/ m] .

$\boldsymbol{\sigma}$ **:** Conductivité électrique du corps[$\Omega.m]^{-1}$.

$\boldsymbol{d\phi}$ **:** Étant la variation de flux d'induction magnétique traversant la pièce à chauffer en [Wb] pendant le temps dt en [s] .

$\mathbf{f_r}$: La fréquence de résonance on [Hz] .

L : L'inductance de la charge [H]

σ : La résistivité du matériau [Ω.m] .

V : Tension Electrique [V] .

S : La surface de cylindre [m^2] .

d : Le diamètre du cylindre [m] .

r : Le rayon du cylindre [m] .

δ : est la profondeur de pénétration (voir l'explication dans les caractéristique de chauffage) .

e : Erreur de puissance (P ref – P réelle) [W] .

$\boldsymbol{N'}$ **:** est le nombre de spires de la bobine.

N : est le nombre de la pièce.

$\boldsymbol{i}$**:** est le courant parcourant la bobine [A] .

L′: Longueur moyenne des lignes de champ [m].

$\boldsymbol{l}$ **:** est la longueur du cylindre [m].

H :est le champ magnétique [A/m].

$\boldsymbol{P_{ch}}$ **:**Puissance dissipée dans la charge .

R : Résistance de la charge [Ω] .

ρ : Résistivité électrique [Ω.m] .

f : Fréquence [Hz] .

$\boldsymbol{\rho}$ **:**Résistivité de l'induit .

$\boldsymbol{i_x}$**:**Densité de courant à la distance x de la périphérie [A/m^2].

$\boldsymbol{i_0}$**:** Densité de courant à la surface de l'induit (x = 0)[A/m^2].

d_0: Constante dépendant en particulier de la fréquence .

μ : Perméabilité magnétique de l'induit avec μ=$\mu_0\mu_r$.

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide .

μ_r : Perméabilité magnétique relative de l'induit.

P_w: puissance recueillie dans la pièce à chauffer;

P_i: puissance dissipée par effet Joule dans l'inducteur, avec ;$P_i = R_i I_i^2$.

R_i: résistance de l'inducteur;

I_i: Intensité du courant électrique parcourant l'inducteur.μ

P : Puissance transmise à la charge

C : Capacité de la charge [F] .

Z : Impédance de la charge [Ω]

E : Tension à l'entrée de l'onduleur [v] .

ω : Pulsation propre de la charge [rd/s] .

f_r : Fréquence de résonance.

ω_0 : Pulsation propre du circuit non amorti (pulsation de résonance, R =0) .

V_c : tension de commutation [V] .

q : Facteur de qualité.

Q : Puissance réactive.

λ : Facteur ou degré de pondération.

CA : Courant alternatif.

CC : Courant continu.

CRS : Convertisseur à résonance série.

MLI : Modulation Larges Impulsions.

MDI : Commande par modulation de densité d'impulsions

CALC : Circuits D'aide A La Commutation.

IGCT : Integrated Gate Commutated Thyristor .

IGBT : Isolated Gate Bipolar Transistor .

MOSFET: Metal Oxyde Semi-Conductor.

ZCS : Zero-Current-Switching.

ZVS : Zero-Voltage-Switching.

الملخص

التسخين التعريفي هو طريقة كهرومغناطيسية تستخدم لتوفير الحرارة في معالجة وتشكيل المعادن وإطلاق وتجميع الأجزاء الموصلة. بفضل أدائها وكفاءتها ، تحظى بشعبية كبيرة في العديد من التطبيقات الصناعية. تتيح تقنية التسخين بالحث الكهرومغناطيسي هذه تسخين المواد دون الحاجة إلى إقامة اتصال مادي بمصدر الهدف من هذا المشروع هو إجراء دراسة كاملة لنظام التدفئة التعريفي ، مع مراعاة عدة جوانب: كهربائي المغناطيسية والحراري والإلكترونية والكهربائية. كجزء من دراستنا لهذا المشروع ، استخدمنا مدي (نبض الكثافة تعديل) تقنية التحكم على العاكس مرحلة واحدة. تظهر نتائج المحاكاة فعالية استراتيجية التحكم هذه

الكلمات المفتاحية: التدفئة التعريفي ، العاكس على مرحلة واحدة ، التحكم تعديل كثافة النبض ، الرنين.

Résumé

Le chauffage par induction est une méthode électromagnétique qui est utilisée pour fournir de la chaleur dans le traitement et le façonnage des métaux, la cuisson et l'assemblage de pièces conductrices. Grâce à ses performances et à son efficacité, il est très prisé dans de nombreuses applications industrielles. Cette technologie de chauffage par induction électromagnétique permet de chauffer les matériaux sans qu'il soit nécessaire d'établir un contact physique avec une source électrique. Le but de ce projet est de mener une étude complète du système de chauffage par induction, en prenant en compte plusieurs aspects : magnétique, thermique, électronique et électrique. Dans le cadre de notre étude de ce projet, nous avons utilisé la technique de commande MDI (Modulation de Densité d'Impulsion) sur un onduleur monophasé. Les résultats de la simulation démontrent l'efficacité de cette stratégie de contrôle.

Mots clés : chauffage par induction, onduleur monophasé, commande MDI , résonance,

Abstract :

Induction heating is an electromagnetic method that is used to provide heat in the processing and shaping of metals, firing and assembly of conductive parts. Thanks to its performance and efficiency, it is very popular in many industrial applications. This electromagnetic induction heating technology makes it possible to heat the materials without the need to establish physical contact with an electrical source.

The aim of this project is to conduct a complete study of the induction heating system, taking into account several aspects: magnetic, thermal, electronic and electrical. As part of our study of this project, we used the MDI (Pulse Density Modulation) control technique on a single-phase inverter. The results of the simulation demonstrate the effectiveness of this control strategy.

Keywords: induction heating, single-phase inverter, MDI control, resonance,

Introduction Générale

Introduction générale

Le principe de chauffage à induction repose sur l'effet de courants de Foucault générés dans un corps conducteur électrique lorsque celui-ci est exposé à un champ magnétique variable. Ces courants de Foucault, également appelés courants induits, circulent à l'intérieur du matériau et produisent de la chaleur par effet Joule.

L'induction électromagnétique est utilisée pour chauffer divers matériaux, qu'ils soient solides ou liquides. Pour cela, un élément chauffant en cuivre ou en aluminium, appelé bobine d'induction, est utilisé pour créer un champ magnétique alternatif. Lorsque le matériau à chauffer est placé à l'intérieur de ce champ magnétique alternatif, des courants électriques sont induits à l'intérieur du matériau.

Ces courants électriques circulant à l'intérieur du matériau rencontrent une résistance électrique, ce qui entraîne la production de chaleur par effet Joule. La chaleur ainsi générée se propage dans le matériau, permettant de le chauffer de manière rapide et efficace.

Le chauffage par induction présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes de chauffage. Il permet un chauffage rapide et précis, avec un contrôle précis de la température. De plus, il est efficace sur le plan énergétique, car la chaleur est générée directement à l'intérieur du matériau, évitant ainsi les pertes d'énergie liées à la conduction ou à la convection [1].

Les courants de Foucault qui en résultent génèrent de la chaleur à l'intérieur de l'élément, ce qui permet de le chauffer de manière rapide et efficace sans contact direct avec une source de chaleur. Cette méthode de chauffage est couramment utilisée dans les applications industrielles pour chauffer des métaux, des plastiques, des liquides et d'autres matériaux conducteurs.

Au cours des dernières années, le chauffage à induction a connu une croissance importante en raison de ses nombreux avantages, notamment son rendement élevé, sa rapidité et sa flexibilité d'utilisation. Cette méthode de chauffage est utilisée dans de nombreux domaines, tels que l'industrie, le secteur domestique et médical. Elle peut être utilisée pour chauffer une large gamme de matériaux conducteurs, tels que les métaux, les plastiques et les liquides. Les puissances utilisées pour le chauffage à induction vont de quelques watts à plusieurs dizaines de mégawatts, avec des fréquences de fonctionnement pouvant atteindre plusieurs centaines

de kilohertz. En raison de sa grande efficacité et de sa flexibilité, le chauffage à induction est devenu un choix populaire pour de nombreuses applications de chauffages industriels et commerciaux.

Pour obtenir un chauffage à induction de grande puissance, il est souvent nécessaire d'utiliser des fréquences plus élevées afin d'améliorer les performances du système. Il existe de nombreux moyens pour obtenir un chauffage inductif précis et synchronisé entre la puissance et la fréquence. Les onduleurs à résonance (série, parallèle) constituent une excellente solution qui couvre tous les domaines où il est nécessaire ou souhaitable d'avoir une fréquence moyenne ou élevée à un certain niveau de puissance. Ces onduleurs permettent de contrôler la fréquence de sortie et la puissance en temps réel, ce qui permet d'ajuster les paramètres du chauffage en fonction des besoins spécifiques de chaque application. Grâce à cette flexibilité, les onduleurs à résonance sont couramment utilisés dans une large gamme d'applications industrielles, telles que la soudure, la trempe, le chauffage par induction, le traitement thermique et bien d'autres encore [2].

Les onduleurs à résonance sont des circuits d'électronique de puissance dotés de composants de haute performance, tels que des transistors de puissance et des condensateurs de haute tension, qui sont commandés pour s'ouvrir et se fermer aux instants précis imposés par des circuits de commande. Ces circuits électroniques de puissance utilisent la résonance pour créer des ondes sinusoïdales à haute fréquence, qui sont ensuite utilisées pour alimenter des bobines d'induction et produire un champ magnétique alternatif. Les onduleurs à résonance sont très efficaces et fiables, et peuvent fournir une puissance élevée à des fréquences élevées, tout en minimisant les pertes de puissance et les dommages aux composants. Ces circuits sont souvent utilisés dans les applications de chauffage par induction, ainsi que dans d'autres applications industrielles où une puissance élevée et une commande précise sont nécessaires.

La technique de modulation de densité d'impulsions (MDI) a été introduite comme un moyen pour remédier aux inconvénients des méthodes de commande classiques cités ci-dessus. L'avantage de la MDI est que la commutation se fait au passage par zéro du courant et ce sur une grande plage de variation de la puissance de sortie [3]. Et de plus la MDIfonctionne toujours à une fréquence fixe (la fréquence de résonance) ce qui facilite sa réalisation.

Dans ce cadre, l'objectif de notre travail est d'étudier un système de chauffage alimenté par un onduleur à résonance série et commandé en puissance par la technique de modulation de

densité d'impulsion (MDI). Pour ce faire nous avons adopté un plan de travail organisé en trois chapitres.

Le premier chapitre présente l'état de l'art des systèmes de chauffage à induction concernant son principe de fonctionnement, ses propriétés et ses différentes applications.

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse des onduleurs à résonance.

Le troisième chapitre représentant le cœur de notre travail, portera sur l'analyse de la technique de commande en puissance (la modulation de densité d'impulsions (MDI). Un programme de simulation numérique de l'ensemble onduleur-charge commandé par la MDI sera effectué dans l'environnement Matlab-Simulink et Matlab/simpowerSystem.

Chapitre I
Etat de l’art du chauffage à induction

I.1. Introduction

Le chauffage par induction est une technique largement répandue dans de nombreuses technologies avancées. Au cours des trente dernières années, l'utilisation de la technique de chauffage par induction s'est généralisée dans les applications métallurgiques, devenant ainsi la méthode privilégiée dans ce domaine Le chauffage par induction est une méthode extrêmement efficace et prometteuse pour le traitement des matériaux par électromagnétisme. Grâce à sa capacité à fournir une chaleur de haute puissance tout en économisant de l'énergie et en travaillant rapidement, cette méthode est considérée comme l'une des plus puissantes. De plus, elle permet un meilleur contrôle de la fusion des métaux et offre une grande souplesse d'utilisation. Les appareils de chauffage par induction de différents types présentent également des avantages par rapport à d'autres équipements similaires.

I.2. Principe du chauffage par induction

Le chauffage par induction est une application directe de deux lois physiques, la loi de Lenz et l'effet Joule, il s'applique aux matériaux conducteurs. Son principe consiste à placer l'élément à chauffer dans un champ magnétique variable, il se développe des courants de Foucault au sein du matériau qui provoque son échauffement par effet Joule [4] En effet, Tout corps conducteur de l'électricité s'échauffe par effet Joule quand il est parcouru par un courant électrique. Cet échauffement s'obtient, soit en appliquant aux extrémités du conducteur une différence de potentiel (c'est le chauffage classique par résistance), soit en plaçant ce conducteur dans un champ magnétique variable (c'est le chauffage par induction électromagnétique) [5] Lorsqu'on applique une différence de potentiel alternatif V aux bornes d'un solénoïde, le courant alternatif de fréquence f qui parcourt cette bobine crée à l'intérieur, mais aussi à l'extérieur de la bobine, un champ magnétique variable. Si on introduit dans la bobine un corps conducteur de l'électricité, la variation du champ magnétique produit une variation du flux magnétique qui traverse ce corps et, d'après la loi de Lenz, induit une force électromotrice donnant naissance à des courants de Foucault.

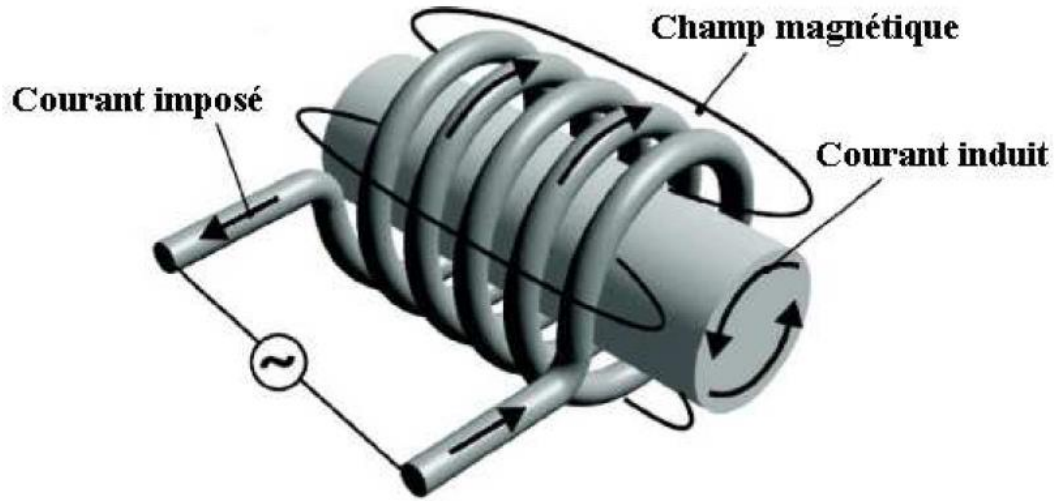


Figure I.1 : Principe du chauffage par induction

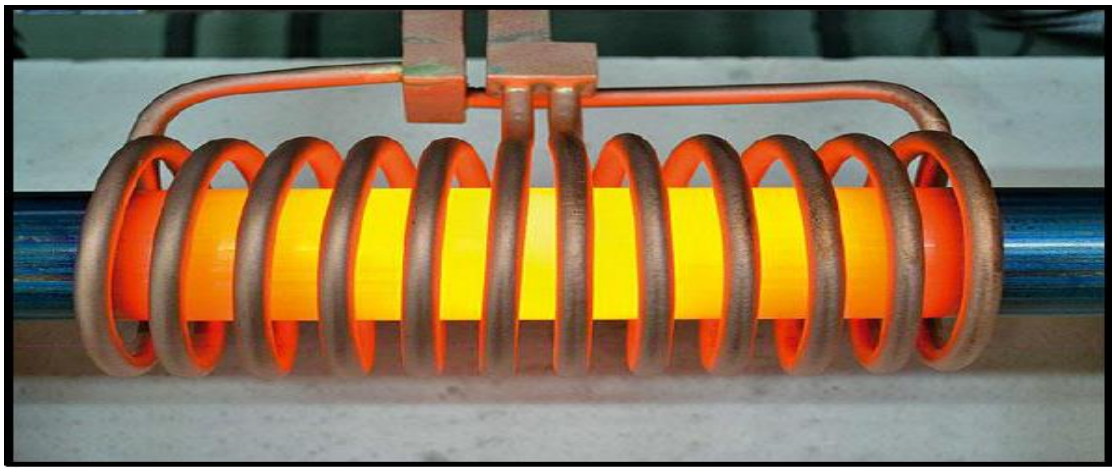


Figure I.2 Un système de chauffage par induction constitué d'une charge et d'une bobine d'induction

La zone soumise à l'effet Joule est concentrée sur une fine couche superficielle, car la densité des courants induits décroit de manière quasi-exponentielle vers le centre de la pièce. Ce phénomène est appelé « effet de peau ». [6]

$$\vec{j} = \sigma\overrightarrow{E_m} \tag{I.1}$$

$$\overrightarrow{E_m} = \vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B} \tag{I.2}$$

Avec :

σ : Conductivité électrique du corps$[\Omega.m]^{-1}$.

E_m: Champ électromoteur$[V/m]$.

E : Champ électrique [V⁄m] .

B : Induction magnétique [T] .

La force électromotrice est déterminée par l'expression suivante [1]

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \qquad \text{(I.3)}$$

$d\phi$: Étant la variation de flux d'induction magnétique traversant la pièce à chauffer en [Wb] pendant le temps dt en(s) .

Ces courants de Foucault -ou courants induits- se transforment en chaleur par effet Joule dans le corps qui s'échauffe. La bobine constitue le circuit primaire ou inducteur, le corps présente le circuit secondaire. Les équipements de chauffage par induction sont donc, dans leur principe et en dehors de leurs caractéristiques particulières de construction, assimilables à des transformateurs, munis ou non de circuits magnétiques avec fer, le primaire étant alimenté à la fréquence du réseau 60 Hz ou à des fréquences plus élevées (moyenne et haute fréquence)[I]. Il faut toutefois rappeler que tout conducteur parcouru par un courant crée un champ magnétique dont l'intensité est proportionnelle à celle du courant. Les applications du chauffage par induction ne se limitent pas au cas d'un corps placé à l'intérieur d'un solénoïde, mais peuvent faire appel à des configurations très variées d'inducteurs (inducteurs plans, inducteurs linéaires, inducteurs tunnels ...)[7] et de positions relatives de la pièce à chauffer par rapport à l' inducteur. L'avantage cependant de l'inducteur en forme de solénoïde vient de ce que le champ magnétique créé par chaque spire s'ajoute à celui créé par les autres spires et que le champ magnétique total est particulièrement intense à l'intérieur de la bobine.

I.3. Phénomènes et lois physiques lies au chauffage par induction

I.3.1. Lois de Faraday et de Lenz

On peut induire une f.é.m. dans un circuit filiforme en faisant varier le flux magnétique à travers ce circuit : c'est le phénomène d'induction électromagnétique. Les cas de variations du flux du champ magnétique à travers un circuit sont :

- Le cas d'un circuit mobile dans un champ magnétique permanent (Lorentz),
- Le cas d'un circuit fixe dans un champ magnétique variable (Newman),
- Le cas général d'un circuit mobile dans un champ magnétique variable.

Le sens du courant induit est imposé par la loi de Lenz qui stipule que le sens du courant induit est tel que le champ magnétique qu'il crée s'oppose à la variation de

flux qui lui a donné naissance. Si le circuit est fermé, la f.e.m. génère un courant électrique, ceci implique l'existence d'un champ électromoteur agissant sur les porteurs de charge du circuit. Ce champ est appelé champ électrique induit.[8] Pendant un temps dt, la variation du flux magnétique total à travers une surface quelconque s'appuyant sur le circuit (C) est : la f.é.m. induite E s'exprime à l'aide de la loi de Faraday :

$$E = -\frac{d\varphi}{dt} \qquad (I.4)$$

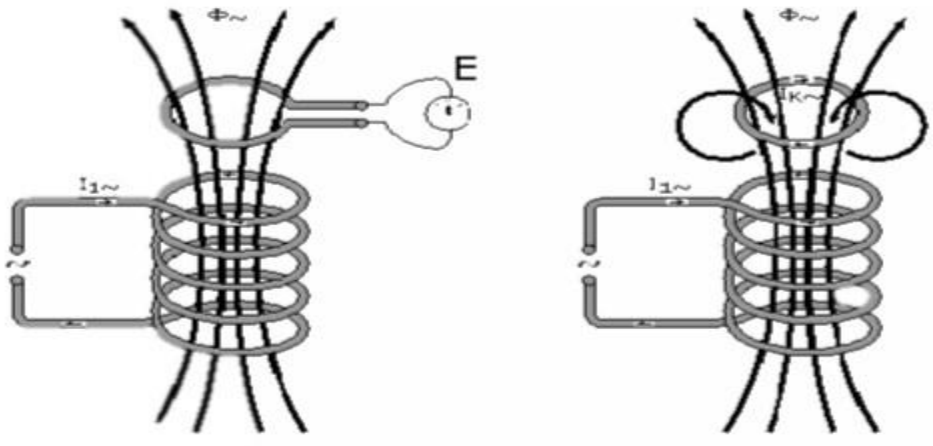
E : tension induite [V]

φ : flux magnétique [Wb]

t : temps [s]

Cette loi, établie expérimentalement pour des variations relativement lentes du flux magnétique en fonction du temps, est valable pour tout régime variable et elle sert de base à l'étude de l'électromagnétisme. [9] [8]

Quand une boucle d'un matériau conducteur (voir figure I.2a) est placée dans un champ magnétique, on voit apparaître aux bornes de la boucle une tension induite E exprimée par l'équation (I.1).



a **b**

Figure I.3: Principe de Loi de faraday.

Quand la boucle est mise en court-circuit, la force électromotrice E va entraîner l'apparition d'un courant de court-circuit circulant dans le sens opposé au phénomène qui le génère. C'est la loi de Faraday-Lenz figure (I.2b). [9]

I.3.2. Profondeur de pénétration

Profondeur de pénétration ou effet de peau caractérise la répartition des courants induits dans la pièce à chauffer .quand une substance conductrice de l'électricité est soumise à un champ magnétique variable, la densité des courants induites décroit d'une manière exponentielle vers le centre de la pièce avec la distance à la surface .c'est ces non-uniformités de la densité des courants induits qui est traduite sous l'appellation d'effet de peau ,dont la grandeur caractéristique est la profondeur de pénétration du champ magnétique ou épaisseur de peau.[10] [11]

La formule théorique permet de connaitre l'ordre de grandeur de l'épaisseur de peau [12] :

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

μ_0 : Perméabilité du vide ($\mu 0 = 4\,\pi 10^{-7}$)

μ_r : Perméabilité magnétique relative du matériau considéré [H/m].

σ : conductivité électrique du métal [S/m].

f : fréquence de la source utilisée [Hz].

La profondeur de pénétration δ dépend donc de :

- La fréquence du champ variable, et δ diminue quand f augment,
- La nature de matériau à chauffer du vu de perméabilité magnétique, et conductivité électrique.

Le tableau suivant regroupe des ordres de grandeur de δ en fonction de plusieurs matériaux Pour différentes fréquences.

Tableau. I.1 : Quelques valeurs de la profondeur de pénétration exprimées en mm, pour une perméabilité relative μ_r =1 (sauf acier à 20 °C)

f(Hz)	Acier		Cuivre		Aluminium		Graphite
	$20C^0$	$800C^0$	$20C^0$	$800C^0$	$20C^0$	$500C^0$	$20\text{-}1300C^0$
50	3,18	67,2	9,35	19,4	11,9	19,4	201
10^2	2,25	47,5	6,61	13,4	8,4	13,4	142
10^3	0,71	14,6	2,09	4,26	2,66	4,26	45
10^4	0,225	4,75	0,661	1,34	0,84	1,34	14,2
10^5	0,071	1,46	0,209	0,426	0,266	0,426	4,5
10^6	0,0225	0,475	0,066	0,134	0,084	0,134	1,42
10^7	0,007	0,146	0,021	0,043	0,0266	0,043	0,45

I.3.3. Courants de Foucault

Foucault a également conduit des recherches sur des phénomènes électriques et magnétiques, comme les courants électriques qui apparaissent à l'intérieure d'un conducteur soumis à des variations de champ magnétique.

Donc, les courants induits sont créé par l'intermédiaire d'un champ magnétique variable dans le temps qui génère un champ électrique, provoquant ainsi l'apparition de courants électriques crées localement dans le matériau, ces courants sont appelés courants induits où courants de Foucault.

Les courants du Foucault circulent de manière à s'opposer aux courants inducteurs et sont utilisée dans certains appareils, pour freiner ou amortir les

oscillations d'une pièce mobile, comme ils sont utilisés dans les diapositifs de chauffage par induction. En revanche, ils sont nuisibles dans les noyaux des transformateurs et des machines électriques tournantes,
où on limite leur effet en utilisant des conducteurs feuilletés qui s'opposent à leur propagation. [13],[14]

I.4. Effets électromagnétiques

Avant d'aborder les équations régissant l'induction électromagnétique, il convient de souligner certains effets qui influent sur le processus de traitement thermique par induction et qui contribuent à déterminer la répartition finale de la température dans une pièce traitée.

I.4.1. Effet de peau

L'effet de peau ou effet pelliculaire (ou plus rarement effet Kelvin) est un phénomène électromagnétique qui fait que, à fréquence élevée, le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs. Ce phénomène d'origine électromagnétique existe pour tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs. Il provoque la décroissance de la densité de courant à mesure que l'on s'éloigne de la périphérie du conducteur. Il en résulte une augmentation de la résistance du conducteur. Cela signifie que le courant ne circule pas uniformément dans toute la section du conducteur. Tout se passe comme si la section utile du conducteur était plus petite. La résistance augmente, ce qui conduit alors à des pertes par effet Joule plus importantes.
L'effet de peau est caractérisé par la profondeur de pénétration (δ), appelée profondeur de peau. Cette profondeur est définie comme étant la région ou se concentre 63% de la densité des courants induits et 86% de la puissance électromagnétique transmise à la pièce traitée (figure I.3). Pour un matériau idéal (variables physiques constantes en fonction de la température), La répartition de courant est donnée par:

$$I_{(x)} = I_{surface}.e^{(\frac{-x}{\delta})} \tag{I.6}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}} \tag{I.7}$$

où f est la fréquence du courant (Hz), σ est la conductivité électrique du matériau (S/m) et μ est la perméabilité magnétique du matériau (H/m).

Pour x = δ, on obtient :

$$I_{(\delta)} = I_{surface}.e^{-1} = 0.368\, I_{surface} \quad \text{(I.8)}$$

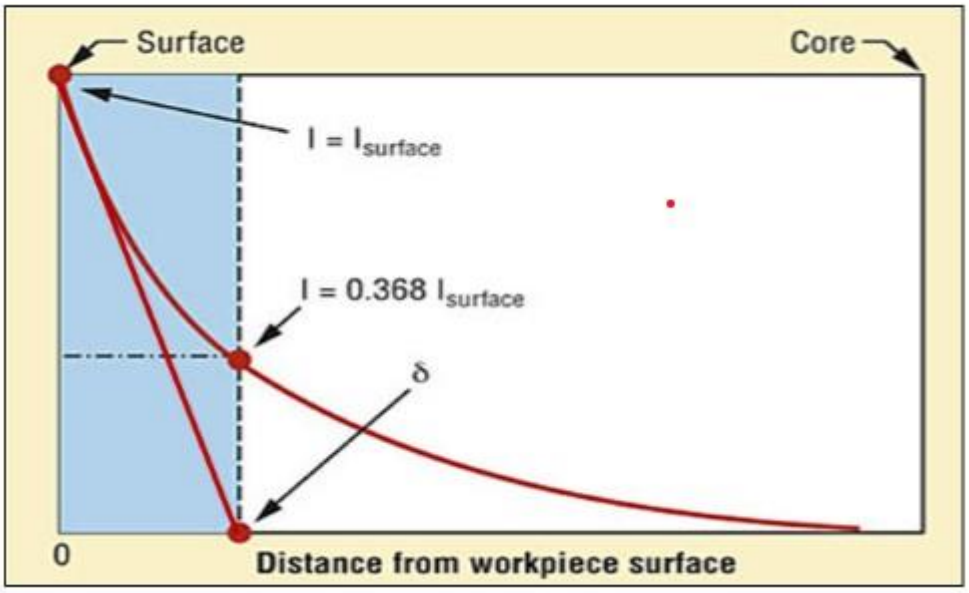


Figure 1.4 : Représentation de la profondeur de peau Tirée de Rudnev et al. (2003)

I.4.2. Effet de proximité

L'effet de proximité est un effet de surface qui consiste à redistribuer la densité du courant dans certaines régions de la pièce traitée. Les systèmes d'induction se composent de deux conducteurs. L'un de ces conducteurs est un inducteur qui porte le courant source et l'autre est la pièce à traiter située près de l'inducteur. Comme on l'a vu au paragraphe 1.2, d'après la loi de Lenz, les courants induits ont un sens opposé à celui des courants sources de l'inducteur. Cela implique que les courants se concentrent sur les surfaces se faisant face (figure I.4). En effet, lorsque les courants circulent dans des sens opposés, les lignes de champs magnétiques crées par chacun des deux conducteurs ont le même sens dans la région entre les deux conducteurs ce qui se traduit par une très forte intensité du champ magnétique dans cette région là.. Dans le cas d'un montage asymétrique, les courants induits ont une densité plus importante à la surface dans la région où la distance pièce-inducteur est petite (bon

couplage). Il en résulte une profondeur de pénétration et une chauffe plus importante, alors que dans la région où la distance pièce-inducteur est grande (mauvais couplage), la concentration des courants induits est plus faible ce qui implique une chauffe et une profondeur de pénétration plus faibles. Pour obtenir une chauffe homogène de la surface de la pièce, cette dernière est souvent mise en rotation durant le processus d'induction.

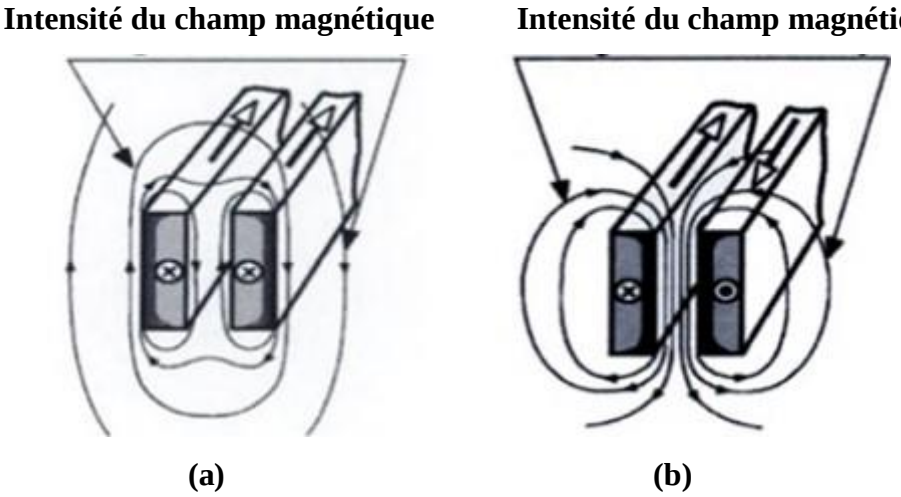


Figure 1.5 : Distribution des courants induits dû à l'effet de proximité a) Courants sources circulant dans le même sens, b) Courants sources circulant dans des sens opposés Tirée de Rudnev et al. (2003**)**

I.4.3. l'effet joule

Ces courants de Foucault (ou courants induits) se transforment en chaleur par effet Joule dans le corps qui s'échauffe. La bobine constitue le circuit primaire ou inducteur, et le corps présent le circuit secondaire. Les équipements de chauffage par induction sont donc, dans leur principe et en dehors de leurs caractéristiques particulières de construction, assimilables à des transformateurs, munis ou non de circuits magnétiques avec fer, le primaire étant alimenté à la fréquence du réseau (50 Hz) ou à des fréquences plus élevées (moyenne et haute fréquence). La formulation simple de la puissance P=$R.i^2$, ne peut pas être facilement utilisée du fait de la non-uniformité de la distribution des courants dans le conducteur.D'une autre manière, la résistance est déterminée par la résistivité (ρ) et la perméabilité (μ) de la pièce à chauffer, le courant est déterminé par l'intensité du champ magnétique.

Donc pour un cylindre, sa résistance est donnée par la relation :

$$R = \rho.\frac{l}{s} \quad (I.9)$$

Qui correspond :

h = π d

$S = \pi(r^2 - (r - \delta)^2)$

$S = \pi\delta(2r - \delta)$

S = πδ(d – δ)

Si d » δ , alors δ est négligeable devant d .

Donc

$$S = \delta.l \quad (I.10)$$

Où :

h: Le périmètre de cylindre [m].

S : La surface de cylindre [m^2].

d : Le diamètre du cylindre [m].

r : Le rayon du cylindre [m].

δ : est la profondeur de pénétration (voir l'explication dans les caractéristique de chauffage).

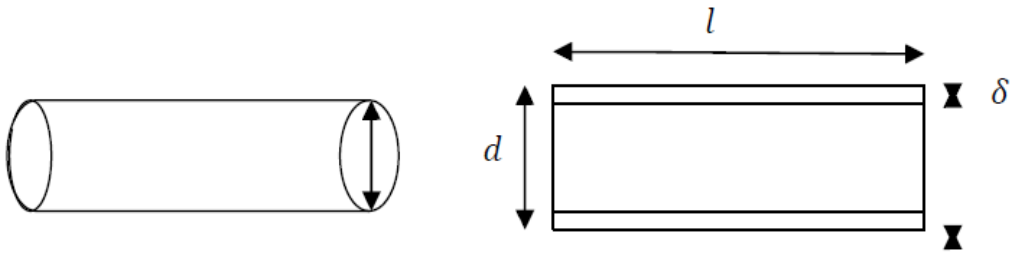


Figure I.6: Pièce à chauffer sous forme d'un cylindre.

Avec des calculs simplifiés, on exprime :

La résistance de la pièce peut s'écrire sous la forme :

$$R = \rho.\frac{\pi.d}{\delta.l} = \rho.\frac{\pi.d}{\sqrt{\frac{1}{\pi.f_r.\sigma.\mu}}.h}, (\sigma = 1/\sigma) \quad (I.11)$$

f_r : La fréquence de résonance on [Hz]

σ : La résistivité du matériau [Ω.m]

Les courants induits appelés courant de Foucault i_f circulent comme indiquer sur la figure (1.3), et dissipent de la chaleur par effet Joule dans la pièce.

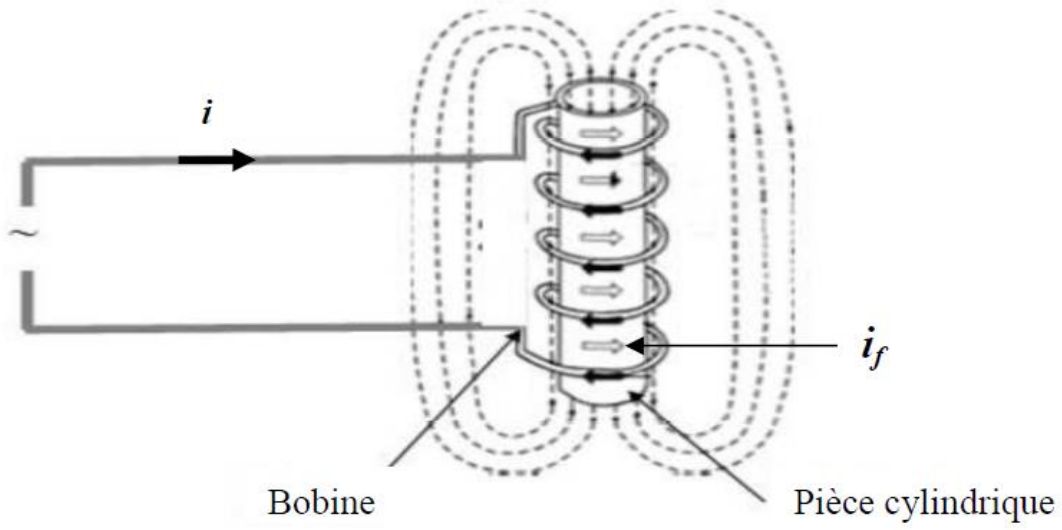


Figure I.7: circulation des courants de Foucault dans la pièce à chauffer.

B = μ.H =μ.$\frac{N'}{L'}$.$i$et $\sum H_i . l_i$ = N.i_f

On a ,

N = 1 spire (pièce cylindrique)

Donc ,

$$i_f = H.l$$

$i_f = N'.\frac{l}{L'}.i$

Avec :

N' : est le nombre de spires de la bobine.

N : est le nombre de la pièce.

I: est le courant parcourant la bobine [A]

L': Longueur moyenne des lignes de champ [m].

l :est la longueur du cylindre [m].

H :est le champ magnétique [A/m].

La puissance dissipée dans la pièce (la charge) est [15]:

$$P_{ch} = R.i_f^2 \tag{I.12}$$

Donc,

$$P_{ch} = \rho.\frac{\pi.d}{\sqrt{\frac{1}{\pi.f_r.\sigma.\mu}.h}}(N'.\frac{l}{L'}.i)^2 \tag{I.13}$$

I.5. Constitutions :

Une installation de chauffage par induction est constituée de deux principaux composants

I.5.1. Les composants d'électronique de puissance :

- Un convertisseur branché sur le réseau électrique (50 Hz) est un dispositif qui permet de modifier la fréquence du courant électrique.
- Un coffret d'adaptation d'impédance est un ensemble de composants électroniques qui comprend une batterie de condensateurs. Son objectif est d'ajuster l'impédance de sortie d'un générateur à l'impédance d'entrée d'un circuit ou d'un appareil électronique. Cela permet de maximiser la puissance transmise entre le générateur et le circuit ou l'appareil, en ajustant le point de fonctionnement optimal du générateur en termes de fréquence et de puissance. Les condensateurs sont utilisés pour ajuster l'impédance de sortie du générateur et améliorer la correspondance avec l'impédance d'entrée du circuit ou de l'appareil électronique.

I.5.2. Les composants électromagnétiques :

- un ou plusieurs inducteurs alimentés par un courant sinusoïdal. Il crée un champ Électromagnétique agissant sur la charge.
- un corps à chauffer. [15]

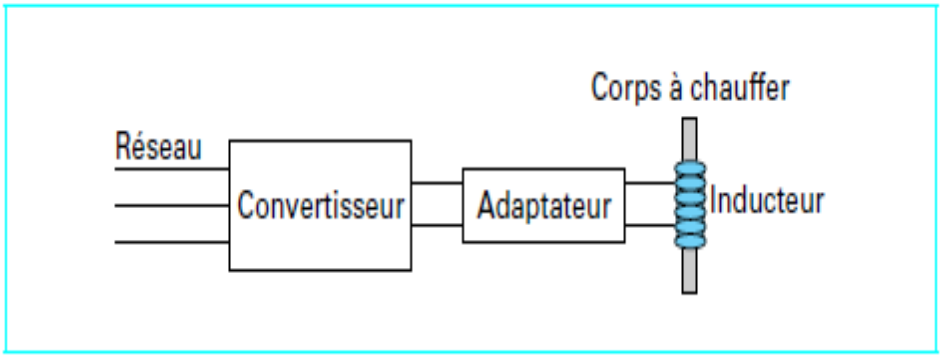


Figure I.8 : Constitution général d'un système de chauffage par induction**.**

I.6.Caractéristiques du chauffage par induction électromagnétique

I.6.1.Répartition de courant et de puissance dans la charge

Parmi les caractéristiques du chauffage par induction, deux retiennent particulièrement l'attention pour les applications industrielles [4] :

- La répartition des courants induits dans la pièce à chauffer;
- La puissance dissipée dans cette pièce.

Afin de transmettre la plus grande énergie à la pièce à traiter, plusieurs paramètres sont à prendre en considération:

1- D'un côté, le flux magnétique traversant le corps à chauffer, on site en particulier:

- La nature du matériau (perméabilité magnétique relative) et de son état (corps magnétique ou non, influence de la température);
- Des fuites magnétiques (dimensions respectives de l'inducteur et de la pièce à chauffer, couplage, caractéristiques du circuit magnétique);
- La fréquence du courant.

2- D'autre côté, les caractéristiques électriques de l'inducteur et de l'induit :

- Résistivité de l'induit et de l'inducteur aux températures considérées;
- Caractéristiques géométriques de l'inducteur et de l'induit;
- Section de l'induit affectée par le passage du courant, distribution de la densité de courant dans cette section, longueur du circuit parcouru par le courant induit.

Tous ces paramètres ont une grande importance car la profondeur de pénétration des courants induits dans le corps à chauffer, la quantité de chaleur dégagée, sa répartition dans l'induit et le rendement de ce mode de chauffage en dépendent étroitement.

Plus la fréquence du courant dans l'inducteur augmente, plus le courant alternatif parcourant la pièce à chauffer a tendance à se concentrer à sa surface [16]. L'énergie dissipée dans la charge et la répartition des courants peuvent être déterminées

rigoureusement en utilisant les lois fondamentales de l'électromagnétisme (équations de Maxwell). On peut montrer qu'en première approximation, la densité de courant décroît de façon exponentielle de la périphérie de la pièce à chauffer vers son centre [4]. La densité de courant est de la forme :

$$i_x = i_0 . e^{(-\frac{x}{d_0})} \quad \text{(I.14)}$$

Où:

i_x: Densité de courant à la distance x de la périphérie $[A/m^2]$.

i_0: Densité de courant à la surface de l'induit (x = 0)$[A/m^2]$.

d_0: Constante dépendant en particulier de la fréquence, profondeur de pénétration du courant ou épaisseur de peau. Le constant do, dans le cas d'un induit cylindrique plein, est donné par [7] :

$$d_0 = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad \text{(I.15)}$$

ρ : Résistivité de l'induit;

F : Fréquence du courant parcourant l'inducteur;

μ : Perméabilité magnétique de l'induit avec μ=$\mu_0 \mu_r$;

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide;

μ_r : Perméabilité magnétique relative de l'induit.

En intégrant la densité de courant, l'intensité l parcourant la pièce sera de la forme[4] : $(I = i_0 i_d)$

Pour faciliter l'analyse du phénomène d'induction, on remplace un courant de répartition non uniforme dans l'induit, dont la densité décroît depuis la surface du corps à chauffer, par un courant fictif équivalent, réparti de façon uniforme dans une zone d'épaisseur do à partir de la surface et de densité égale à sa valeur à la surface $i(d_0)=i_0/ e=0.368\ i_0$.

L' intensité parcourant la couche de matière s'étendant de la périphérie à la profondeur de pénétration do s'élève à :

$$I(d_0) = i_0 d_0 (1 - \frac{1}{e}) \quad \text{(I.16)}$$

Alors I(do)=0.6321 , 63.2 % du courant est donc concentré dans la couche d'épaisseur do. Or, d'après l'équation (I.4) et la loi de Joule, la puissance dégagée est proportionnelle au carré de la densité de courant [17] [4].

$$P_x \backsimeq i_x^2 \backsimeq i_0^2 e^{\frac{-2x}{d_0}}$$

$$P_x = \int_0^{d_0} i_0^2 \, e^{\frac{-2x}{d_0}} dx \qquad \text{(I.17)}$$

$$P(d_0) = 0.865 \, P$$

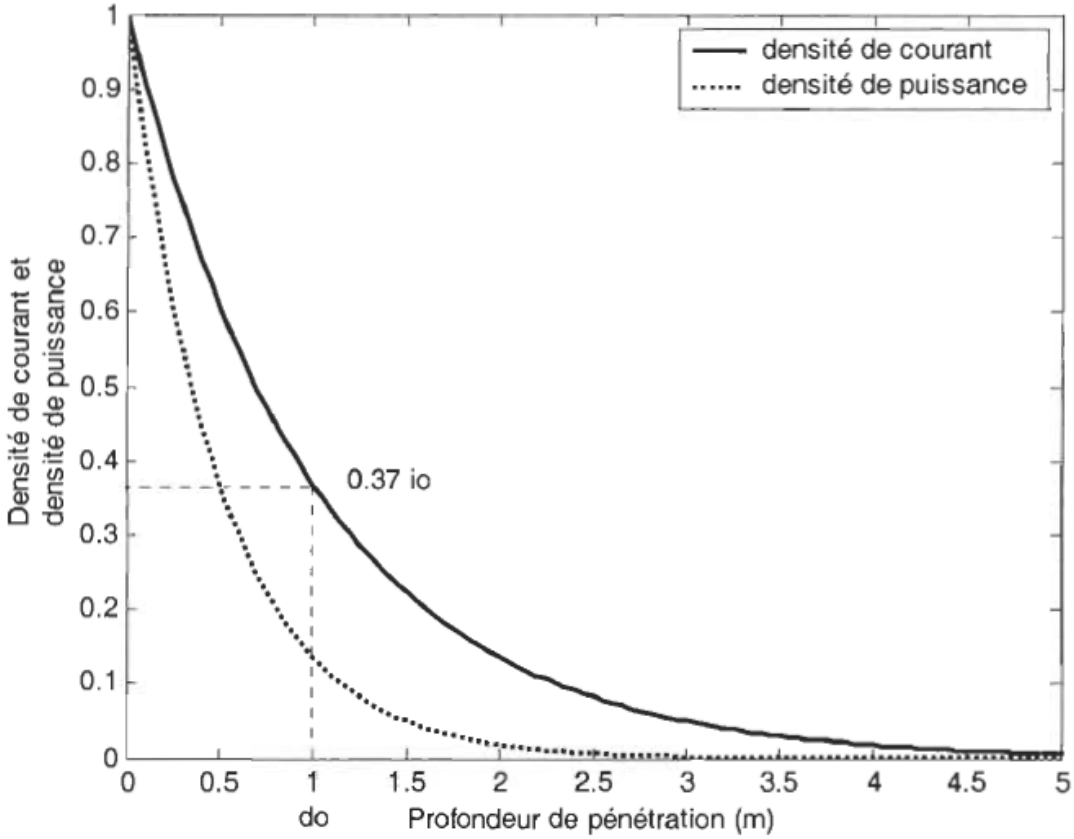


Figure I.9 : Profondeur de pénétration et dissipation de la puissance

Le rendement électrique du chauffage par induction est défini par le rapport de l'énergie utile recueillie dans la pièce à chauffer et l'énergie totale mise enjeu:

$$\eta = \frac{P_w}{P_w + P_i} \qquad \text{(I.18)}$$

P_w: puissance recueillie dans la pièce à chauffer;

P_i: puissance dissipée par effet Joule dans l'inducteur, avec ;$P_i = R_i I_i^2$;

R_i: résistance de l'inducteur;

I_i: intensité du courant électrique parcourant l'inducteur.µ

I.6.2. Influence de la fréquence de fonctionnement

La profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence [17]. Alors que la résistivité et la perméabilité magnétique sont des caractéristiques du corps à chauffer, la fréquence est une grandeur qui peut être choisie par l'utilisateur; celui-ci possède ainsi un moyen de contrôler la dissipation de la puissance à l'intérieur du corps à chauffer et de choisir le chauffage le mieux adapté. Les fréquences utilisées en chauffage par induction sont réparties en quatre familles [4][16] :

- Basse fréquence pour les fréquences inférieures ou égales à la fréquence du réseau (50 Hz en Europe, 60 Hz en Amérique du Nord)
- Moyenne fréquence de 60 à la10000 Hz
- Haute fréquence de la10 000 à 300 000 Hz
- Hyperfréquence au-delà de 300 000 Hz

L'inducteur consomme toujours une énergie réactive. Pour que le générateur qui l'alimente n'ait à fournir que la puissance active, il faut compenser la puissance réactive par des condensateurs.

Mais, si tous les générateurs utilisent ainsi les propriétés de circuits oscillants, ils sont pourtant de conceptions très variées, notamment en fonction de la fréquence et de la puissance de sortie. Ces deux dernières sont les plus importants paramètres dans le chauffage par induction électromagnétique. La figure 2.3 montre le type de générateur à utiliser en fonction de la puissance et la fréquence pour réaliser un processus de chauffage par induction électromagnétique [7].

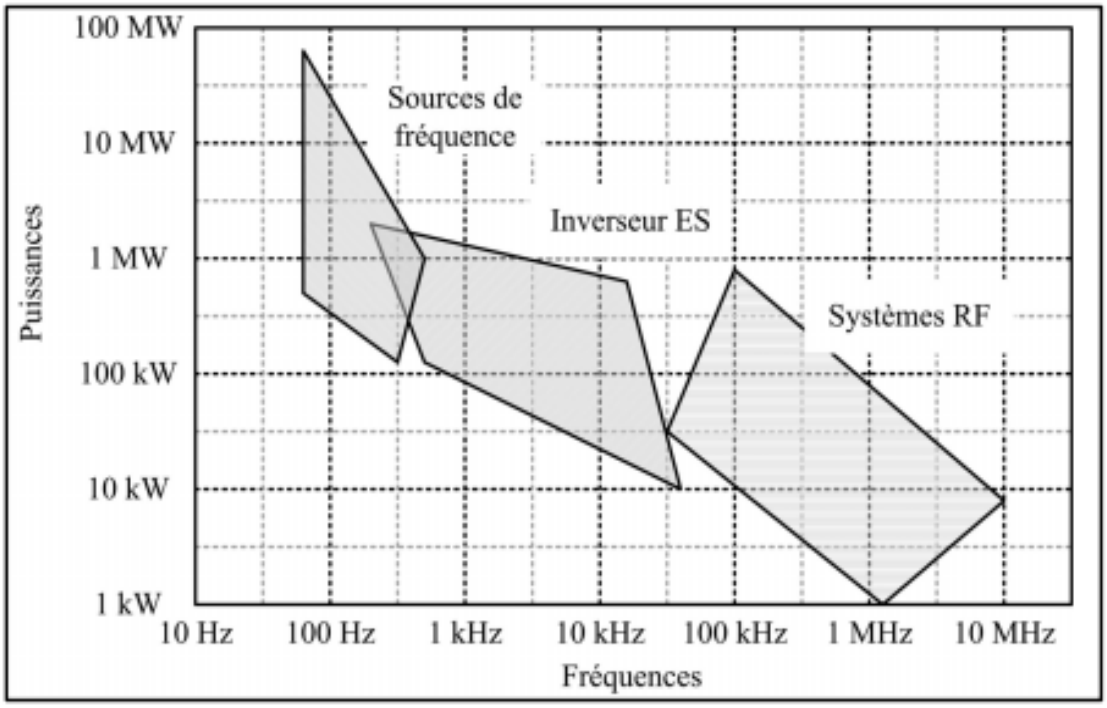


Figure I.10 : Plages de puissance et fréquence pour les différents types de générateurs pour chauffage par induction

I.7. Caractéristiques du générateur de puissance à induction

I.7.1. Puissance du générateur

La formulation simple de la puissance RI^2 ne peut pas être utilisée du fait de la non-uniformité de la distribution des courants induits dans le corps à chauffer [23][18].

La puissance absorbée peut être décrite par :

$$P = \rho . J^2 \tag{I.19}$$

J étant la densité de courant induite.

I.7.2.Rendement

Le rendement électrique est défini comme suit :

$$\eta = \frac{P}{P + P_i} \tag{I.20}$$

P : Puissance transmise à la charge

p_i: Puissance dissipée dans l'inducteur

Le rendement dépend fortement du ratio diamètre/profondeur de pénétration (dans le cas de charge cylindrique) et de la conception de l'inducteur. Les règles de base à respecter pour un meilleur rendement sont [18]:

- Pour l'inducteur, utiliser un matériau de faible résistance, en règle générale du cuivre Électrolytique.
- Minimiser la distance entre les enroulements.
- Etablir une bonne connexion entre l'inducteur et la charge (limitation de l'entrefer, et la taille de l'inducteur suffisamment longue).

I.7.3. Facteur de puissance :

Le fait que l'inducteur et la charge ensemble peuvent être considérés comme une charge inductive globale qui consomme de l'énergie réactive. Cette inductance est due à deux facteurs : l'entrefer entre l'inducteur et la charge, ainsi que le comportement inductif de la charge elle-même, dans le cas où celle-ci prend la forme d'un cylindre.

I.8.Les Applications du chauffage par induction :

On trouve principalement des installations de chauffage par induction dans les domaines de la métallurgie et de la mécanique : 45% pour la fusion, 45 % pour le chauffage avant formage, 10 % pour le traitement thermique et les applications diverses. Les puissances mises en œuvre peuvent varier de quelques centaines de watts (petits fours à induction de laboratoire ou de prothésiste dentaire) à plusieurs mégawatts pour les grosses installations de fusion [19]. Cependant, grâce à l'évolution des technologies de l'électronique de puissance et à l'apparition de composants de commutation plus rapides, des applications innovantes sont apparues dans d'autres domaines : chimie (fusion directe de verres et d'oxydes…), grand public (plaque à induction de cuisine).

En général, les applications du chauffage par induction sont très nombreuses dans l'industrie ou à caractère domestique [20].

On peut citer :

- La fusion des métaux ou de leurs alliages
- Le soudage de pièces métalliques
- Le frettage
- Le réchauffage avant formage et forgeage

- L'industrie chimique

- Le plasma inductif

- Table à cuisson

A. La fusion des métaux ou de leurs alliages

Les fours les plus répandus sont les fours à creuset, à basculement, plutôt utilisés pour la fusion, et les fours à canal, souvent réservés au maintien en température des métaux fondus. Les fours à creuset sont composés d'une bobine, refroidie par une circulation d'eau, entourant un garnissage en réfractaire dans lequel est placé le matériau à fondre. Ses domaines d'utilisation en moyenne fréquence concernent la refusions pour élaborer des aciers spéciaux en quantités limitées avec changements d'alliages fréquents, la production de masse de fonte à graphite sphéroïdal, la fusion d'alliages d'aluminium (fonderie sous pression) et la fusion d'alliages cuivreux. A cause de l'usure des réfractaires, il existe une puissance maximale à ne pas dépasser : 400 kW/tonne à 50 Hz, voire 1000kW/tonne à des fréquences plus élevées.

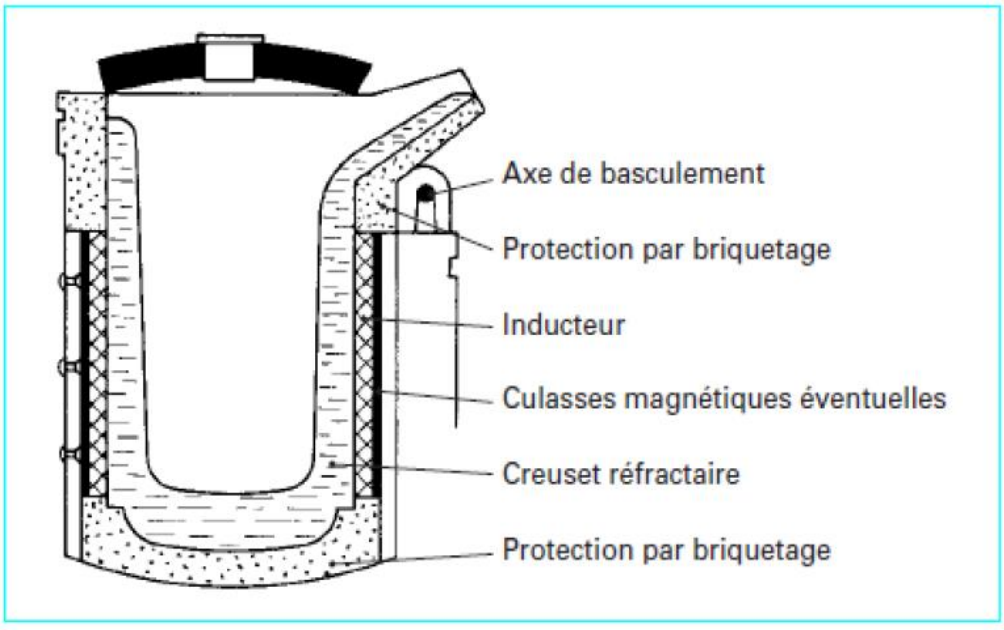


Figure I.11: Schéma de principe d'un four de fusion à creuset [21].

Les fours à canal se composent essentiellement d'un bassin de métal liquide mis en communication avec un canal comportant une ou deux boucles. Un inducteur est bobiné autour d'un circuit magnétique entourant le canal. Les domaines d'utilisation

concernent les fours de maintien pour l'acier et la fonte, la fusion d'alliages cuivreux et la fusion et le maintien d'alliages d'aluminium.

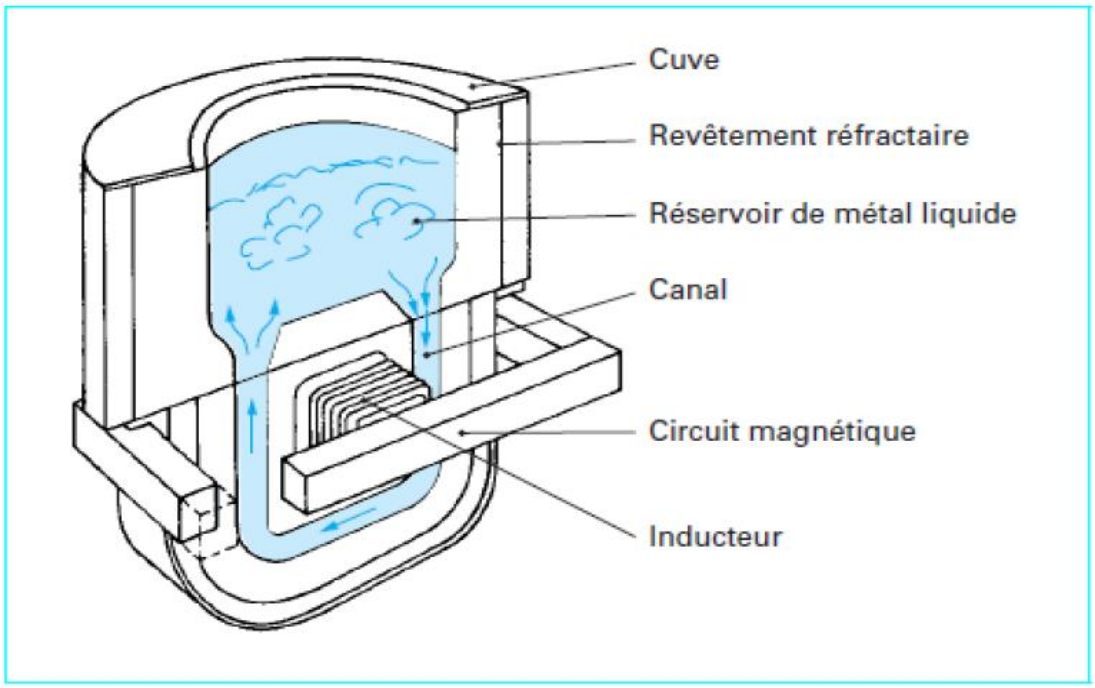


Figure I.12: Schéma de principe d'un four de fusion à canal [21]

B- Soudage de pièces métalliques par induction

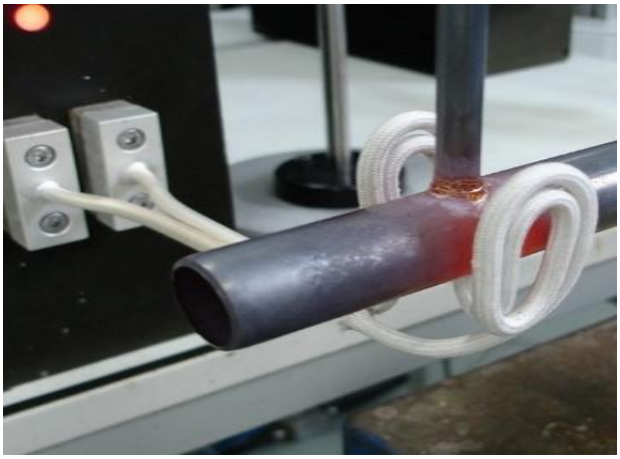


Figure I.13 : Soudage de deux pièces métalliques par induction.

Le soudage est une opération qui consiste à assembler par fusion les bords adjacents de deux pièces ou de deux constituants métalliques, les arguments en faveur du soudage par induction sont les suivants [22] :

- Localisation du chauffage
- Rendement énergétique élevé
- Facilite de contrôle, régulation et automatisation

C. Cuisine d'induction (Table à cuisson)

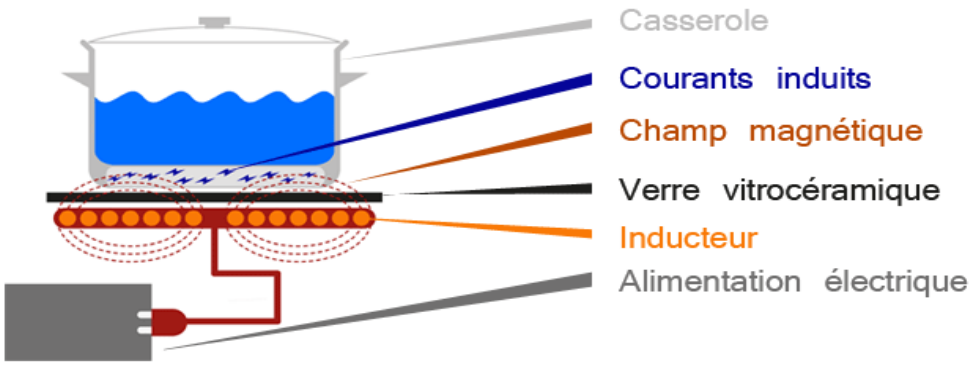


Figure I.14: Schéma de principe de cuisine d'induction.

Autres applications de l'induction :

On peut citer entre autres :

- Le brassage électromagnétique d'alliages métalliques.

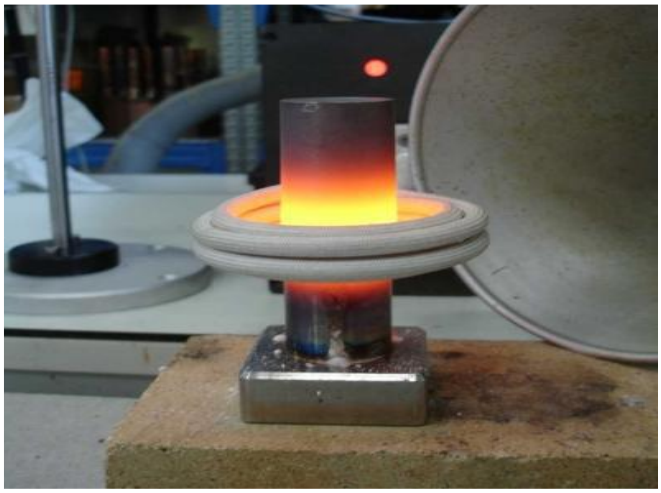


Figure I.15: Brassage électromagnétique d'alliages métalliques.

- Le confinement électromagnétique de plasma.
- Le décapage de peinture.
- La recharge d'accumulateurs.

I.9 Avantage et inconvénient du chauffage par induction :

I.9.1 Avantages du chauffage par induction :

La chaleur inductive permet :

- Il est important de régler la chaleur de manière précise afin de la diffuser efficacement. En effet, la chaleur se transmet beaucoup plus rapidement le long de l'objet qu'à travers une convection traditionnelle. Par conséquent, il est essentiel d'ajuster la température avec précision pour garantir que la chaleur est distribuée uniformément et efficacement dans l'objet à chauffer.
- Le chauffage de parties inaccessibles telles que des morceaux de métal encastrés dans du bois, du PVC ou d'autres matériaux, y compris le vide, peut être réalisé en utilisant différentes méthodes en fonction des contraintes spécifiques de la situation. Certaines options pourraient inclure l'utilisation de sources de chaleur telles que des fers à souder ou des pistolets thermiques, l'application de courant électrique pour générer de la chaleur via des résistances chauffantes, ou l'utilisation de techniques de chauffage par induction pour chauffer le métal directement. Dans tous les cas, il est important de prendre des précautions de sécurité appropriées lors de l'utilisation de ces méthodes de chauffage, en particulier lorsqu'elles sont appliquées à des matériaux inflammables tels que le bois ou le PVC.
- En ajustant la fréquence, il est possible de chauffer une couche plus ou moins épaisse de la pièce. À mesure que la fréquence du champ magnétique augmente, les courants de Foucault induits se forment dans une couche superficielle plus fine de la pièce. Cette caractéristique est utilisée pour durcir superficiellement des pièces en acier sans avoir besoin d'eau de refroidissement, la masse de la pièce faisant office de refroidisseur. Cette technique permet d'obtenir un durcissement superficiel de la pièce sans altérer la résilience du coeur de la pièce, ce qui est particulièrement avantageux dans de nombreux domaines d'application.
- En utilisant une technologie de chauffage par convection, l'économie d'espace est réalisée car la chaleur est déjà présente dans la matière elle-même, réduisant ainsi considérablement la radiation thermique.
- Les installations de chauffage modernes offrent des conditions de travail améliorées grâce à une absence de saleté et de fumée comparées aux installations traditionnelles.
- pour obtenir un meilleur rendement, il est nécessaire de réduire les pertes de chaleur et les émissions.

I.9.2. Inconvénients du chauffage par induction :

- Lorsque des manipulations inappropriées sont effectuées, il est possible que d'autres objets soient accidentellement chauffés. Afin de prévenir cela, deux techniques couramment utilisées sont le procédé d'émulsion et le refroidissement par eau.- Des coûts d´acquisition élevés pour les fortes puissances.
- lorsque les isolations ne sont pas adéquates ou que la protection contre les hautes fréquences (HF) est insuffisante, des champs électromagnétiques peuvent se former et perturber l'environnement.

I.10.Conclusion

Ce chapitre traite des principes et des caractéristiques du chauffage par induction électromagnétique, en soulignant l'importance de prendre en compte plusieurs paramètres dans les applications de cette technique. La répartition des courants induits et la puissance dissipée dans la pièce à chauffer sont des éléments clés à considérer. L’utilisation du chauffage par induction est très diversifiée et nécessite l'utilisation de différentes fréquences pour atteindre différents résultats Il existe plusieurs types de traitements thermiques pour les matériaux. Le premier est le traitement thermique de surface, qui implique le séchage et la refusion des tôles, entre autres techniques. Le deuxième est le traitement thermique à cœur, qui comprend le formage, la fusion et le recuit des matériaux. Enfin, le troisième type est le traitement thermique localisé, qui est utilisé pour résoudre des problèmes de soudage et de dégazage, entre autres applications. Malgré son utilisation la plus fréquente dans les traitements précédents, le chauffage par induction peut être appliqué à de nombreux autres problèmes nécessitant l'utilisation de la chaleur.la fréquence a un impact significatif sur le processus de chauffage par induction, car elle permet de réguler la répartition de la puissance thermique à l'intérieur de l'objet à chauffer. En ajustant la fréquence, on peut choisir la méthode de chauffage la plus appropriée pour un matériau donné.

Les applications d'échauffement, la quantité d'énergie transmise par unité de volume augmente à mesure que la fréquence utilisée augmente. Toutefois, à la fréquence standard de distribution d'énergie électrique (50 ou 60 Hz), la quantité d'énergie injectée est faible, ce qui ralentit le processus de chauffage. Par conséquent, dans la plupart des cas, des fréquences plus élevées sont nécessaires pour accélérer le processus, ce qui exige l'utilisation de convertisseurs spécialement conçus pour cette application.

Chapitre II

Convertisseurs Statiques à Résonances

II.1. Introduction

Le chauffage par induction, par son principe, nécessite l'utilisation d'une alimentation électrique périodique. Au début du siècle, les industriels n'utilisaient que la fréquence du réseau, ce qui limitait les utilisations de l'induction aux gros fours de fusion. Par la suite, les groupes tournants pour la moyenne fréquence (c'est-à-dire 1 à 10 KHz pour l'induction) et les générateurs de fréquence à tubes pour la haute fréquence (c'est-à-dire 10Khz pour l'induction) sont apparus sur le marché, cela a permis d'étendre les utilisations de l'induction au chauffage avant formage et au traitement thermique dans les industries mécaniques. Les années 70 ont vu l'apparition sur le marché des convertisseurs de moyenne fréquence (<10 kHz) à thyristors (de 25 KW jusqu'à plusieurs MW) qui ont désormais remplacé les groupes tournants, car leurs prix sont plus bas et leur utilisation bien souple.

Depuis 1985, ont commencé à apparaitre sur le marché des convertisseurs à haute fréquence utilisant des transistors de puissance. Ceux-ci atteignent aujourd'hui des puissances élevées (de quelques KW à 1 MW) sur une plage de fréquence étendue (5 à 800 KHz) et ils concurrencent désormais fortement les générateurs à tubes, dont le rendement énergétique dépasse rarement 60% contre 90% pour les composants électroniques de puissance. Cette tendance semble désormais inéluctable et actuellement la majorité des convertisseurs à haute fréquence pour le chauffage par induction utilise les transistors [24].

II.2. Rappel sur Les convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un dispositif qui permet de faire le lien entre deux sources d'énergie électrique. Il contrôle le transfert de l'énergie entre les deux sources se fait selon les caractéristiques de ces dernière et de l'application. Le transfert peut être indirect (lorsque l'énergie est entreposée avant d'être utilisée) ou direct [25]. La figure 2.1 montre une classification des convertisseurs électroniques de puissance selon la nature des sources d'entrée et de sortie.

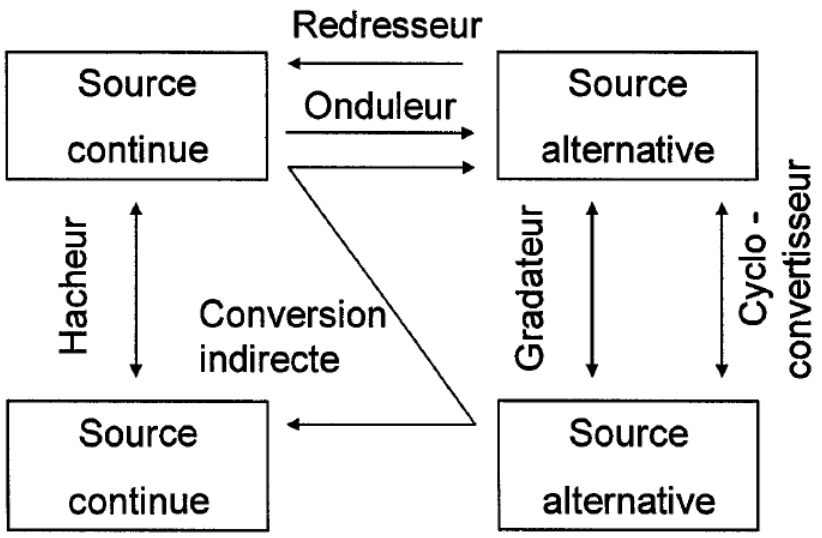


Figure II.1 : Classification des convertisseurs électroniques de puissance [26]

II.3. Qualités d'un bon convertisseur

Avant de passer à l'étude des convertisseurs à résonance, il est utile de mentionner quelques considérations importantes dans le design des convertisseurs électroniques:

• protection du convertisseur

• isolation galvanique

• rendement élevé

• puissance massique élevée

Le rendement est très important puisque en général, les niveaux de puissance sont élevés pour n'importe quelle topologie de convertisseur. Il est donc indispensable que le système soit conçu de manière à minimiser les pertes énergétiques. Pour cela, il faut utiliser des composants qui sont en théorie non dissipatifs, tels que :

• interrupteurs à semi-conducteur

• composants passifs uniquement réactifs (condensateurs, bobines et transformateurs).

Ces derniers accomplissent des tâches diverses telles que le stockage transitoire d'énergie, le filtrage et des sous-systèmes comme des circuits résonants, des circuits d'aide à la commutation et des écrémeurs. La conception des convertisseurs de puissance doit alors être faite à partir de ces éléments et doit suivre un ensemble de règles précises.

II.4. Les convertisseurs de fréquence

Les convertisseurs de fréquence ont comme fonction de fournir, à partir d'un courant à la fréquence du réseau, un courant de fréquence différente, généralement plus élevée, destiné à alimenter l'inducteur. On distingue quatre types de générateurs à induction [7] :

- Systèmes d'alimentation classiques.
- Convertisseurs à groupe rotatif.
- Convertisseurs statiques à moyenne fréquence.
- Système à haute fréquence.

II.4.1. Systèmes d'alimentation classiques

Ces systèmes se raccordent directement sur le réseau de distribution (50-60 Hz) [27]. Généralement, ils n'ont pas besoin d'un convertisseur de fréquence. On y trouve, souvent des éléments réactifs (transformateurs, condensateur), des dispositifs de protection et d'adaptation et parfois des éléments Semi-conducteurs. Ils peuvent opérer à très haute puissance.

La figure II.2 illustre un exemple d'un système d'alimentation d'une charge par contacteur statique à thyristors. Dans ce système, on utilise un gradateur à thyristors, un filtre passif à l'entrée et une charge RL à la sortie. La régulation de puissance est assurée par une commande par retard de phase ou une commande par train d'ondes [4].

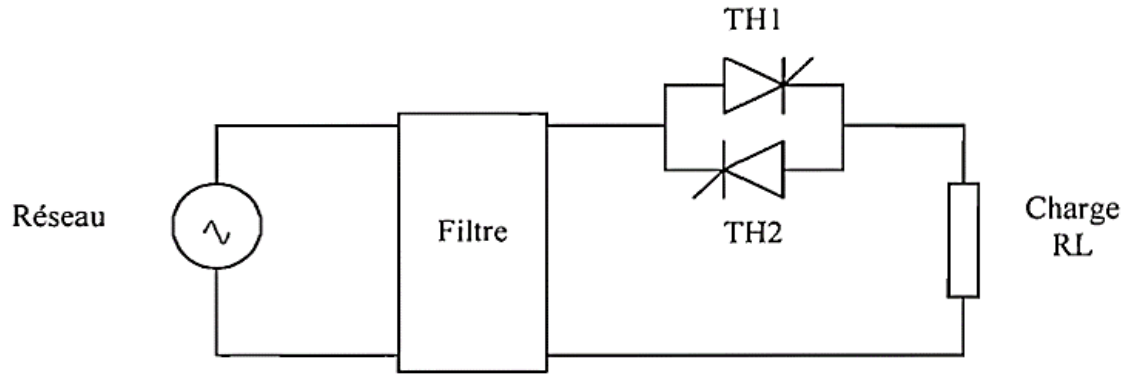


Figure II.2: Système d'alimentation classique avec gradateur

II.4.2 Convertisseurs à groupe rotatif

Les convertisseurs rotatifs sont utilisés comme source de moyenne fréquence variant (500 Hz à10 kHz). Ce groupe de convertisseur se compose essentiellement d'un moteur asynchrone triphasé alimenté à partir du réseau 50 Hz entraînant un alternateur qui fournit le courant à la fréquence désirée [16].

Cet alternateur alimente la charge formée de l'inducteur et des condensateurs de compensation.

Les tensions fournies par les alternateurs sont souvent supérieures à celles qui sont nécessaires aux inducteurs. On utilise alors des transformateurs d'adaptation. Le dispositif d'excitation permet de régler en charge la tension de sortie de l'alternateur et la puissance du convertisseur.

Les groupes convertisseurs utilisés, sont la plupart du temps des ensembles monoblocs à axe vertical et refroidis à l'eau. La vitesse de rotation est généralement de 3000 tr/mn. Le rendement des convertisseurs rotatifs est de l'ordre de 85 % dans la gamme de fréquence 1-3 kHz, de 75 à 80 % dans la gamme de fréquence 3-10 kHz. Le rendement global du groupe convertisseur dépend de la puissance et de la fréquence. Parmi les inconvénients, on cite l'alimentation à fréquence fixe, le faible rendement, le prix élevé, le poids important et le niveau de bruit élevé.

II.4.3 Convertisseurs statiques à moyenne fréquence

Les convertisseurs statiques à moyenne fréquence fournissent des fréquences variant de quelques centaines de hertz à 10 000 Hz environ. Ils sont destinés à produire du courant alternatif à partir d'une source à courant continu. Dans les installations de chauffage par induction, les dispositifs sont composés d'un transformateur destiné à abaisser la tension, d'interrupteurs à semi-conducteurs et des composants passifs [3] [28].

Par rapport aux autres systèmes, les convertisseurs statiques sont plus simples et plus économiques. Ils présentent les principaux avantages suivants :

-Adaptation automatique de la fréquence: la fréquence s'ajuste au fur et à mesure de la variation de l'impédance du four pour fonctionner en permanence à la résonance et la puissance maximale possible est constamment transmise (générateurs statiques à onduleurs);

-Implantation plus simple et taille plus petite;

-Absence de bruit;

-Meilleur rendement.

Ils sont soit pilotés c'est-à-dire à fréquence imposée par le circuit de commande et de régulation, soit le plus souvent autopilotés, c'est-à-dire à fréquence imposée par le circuit d'utilisation. Ces convertisseurs sont appelés les convertisseurs à résonance.

II.4.4 Convertisseur à résonance

L'étude des onduleurs à résonance s'inscrit dans le cadre beaucoup plus vaste de l'étude de l'alimentation alternative d'une charge électrotechnique (RL série) à partir d'une source continue de tension ou de courant. La conversion d'énergie électrique est réalisée par un convertisseur continu-alternatif monophasé, non modulé et dont la structure dépend de la nature de la source continue. Ce convertisseur est soit un onduleur de tension, soit un commutateur de courant et délivre des ondes « carrées» de tension ou de courant [29].

Dans ces convertisseurs, on exploite la résonance pour minimiser les contraintes électriques sur les interrupteurs électriques, maximiser la puissance transférée et réduire les harmoniques .

Ces convertisseurs génèrent des tensions ou courants quasi-sinusoïdaux, à partir d'une source continue: le circuit résonant est alimenté par un onduleur. Ils ont été longtemps utilisés comme onduleurs à forte puissance et à haute fréquence dans le chauffage par induction, les sources ultrasonores, les appareils de soudage, etc. La source est soit du type courant soit du type tension. Les interrupteurs, montés de façon asymétrique ou symétrique (demi-pont ou pont entier), sont unidirectionnels ou bidirectionnels en courant et/ou en tension. La charge se trouve avec le circuit résonant soit en parallèle, soit en série, soit mixte [30].

D'autres classifications sont possibles selon la fréquence, la puissance, la réversibilité, etc. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude des convertisseurs permettant la conversion CC-CA (onduleur à résonance). On distingue deux topologies d'onduleur à résonance [30] :

-Onduleur à résonance série: un onduleur débitant sur un circuit résonant série peu amorti. Le condensateur est placé en série avec la charge, l'onduleur débite sur un récepteur de courant, il doit donc être alimenté par une source de tension (figure II.3).

-Onduleur à résonance parallèle : un onduleur débitant sur un circuit résonant parallèle peu amorti. La charge comportant une capacité directement branchée entre les bornes de sortie, l'onduleur doit être alimenté par une source de courant continu (figure II.4).

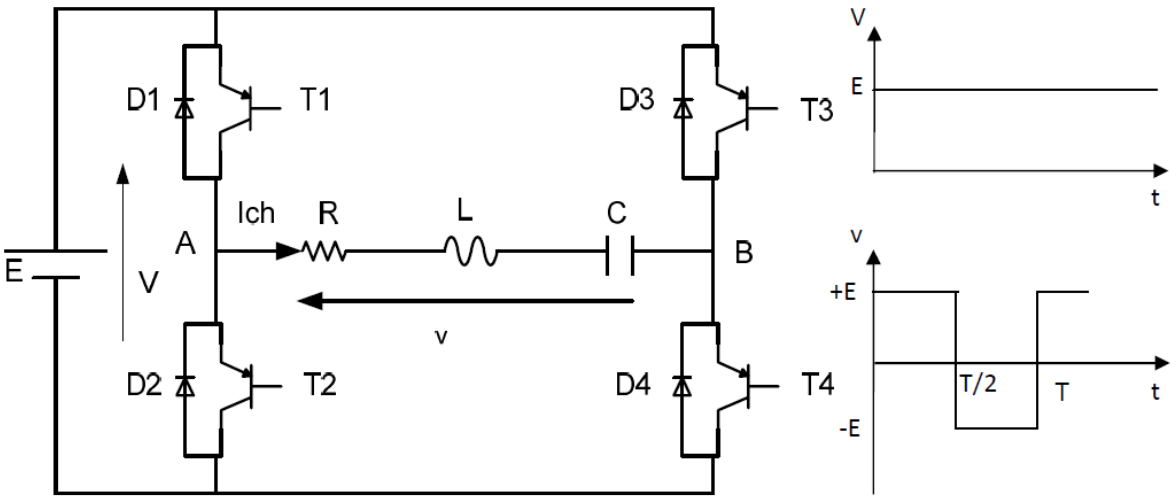


Figure II.3: Convertisseur à résonance série

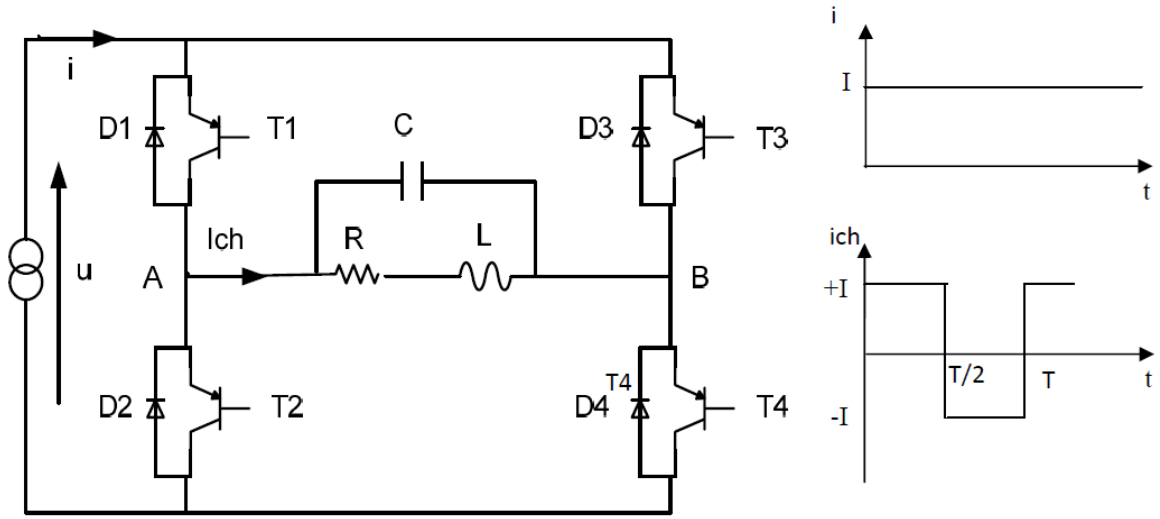
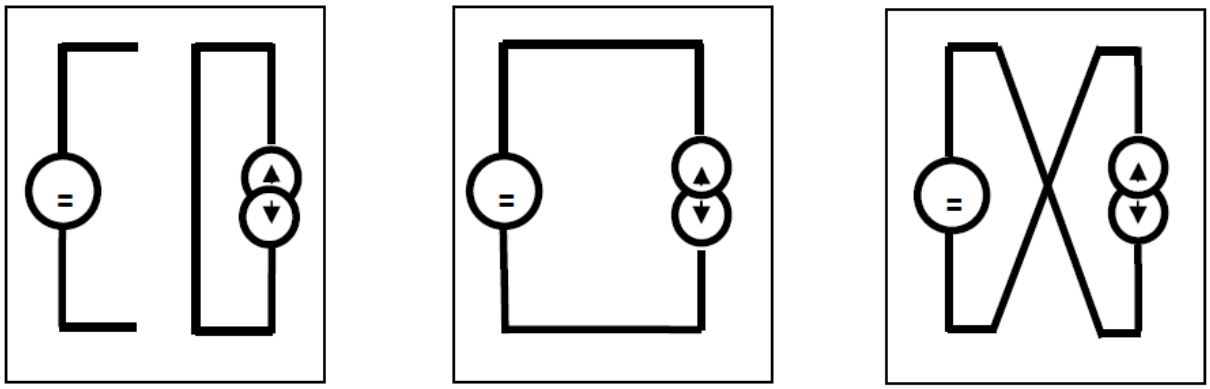


Figure II.4: Convertisseur à résonance parallèle

La synthèse de ces convertisseurs passe par l'étude du fonctionnement de chaque séquence qui permet de déduire les contraintes sur les interrupteurs et d'obtenir leurs caractéristiques statiques. L'enchaînement de ces séquences donne le type de commutation des interrupteurs [31].

Comme exemple, nous allons étudier une conversion série, associant une source de tension à une source de courant (figure II.3). Entre ces deux sources trois typesn de connexions sont possibles (figure II.5).



Configuration A **Configuration B** **Configuration C**

Figure II.5: Les différentes configurations connectant la source et la charge

(Le tableau II.1) présente l'état de fonctionnement des interrupteurs dans chaque configuration

Tableau II.1: fonctionnement des interrupteurs dans chaque configuration..

Configurations	Ouverts	Fermés
A	T1 et T3 Ou T2 et T4	T2 et T4 Ou T1 et T3
B	T2 et T3	T1 et T4
C	T1 et T4	T2 et T3

Les configurations B et C sont indispensables, la configuration A n'est pas obligatoire et son existence est liée à la forme de la tension que l'on désire appliquer.

II.4.5 Convertisseurs statiques

Les convertisseurs électriques statiques sont un ensemble de dispositifs électroniques permettent, avec de forts rendements, de combiner différentes natures de sources d'électricité et la grande diversité des récepteurs qui les utilises.

L'énergie électrique est utilisée soit sous la forme de tensions et courants alternatifs, soit sous la forme de tensions et courants continus, de ce fait on peut classer les convertisseurs statiques en quatre catégories :

- Continu – continu (hacheur).
- Alternatif –contenu (redresseur).
- Continu – alternatif (onduleur).
- Alternatif-alternatif (gradateur).

Dans le cas de chauffage par induction, la puissance volumique transmise croît quand la fréquence augmente, donc il faut avoir recours à des fréquences plus élevées que celle du réseau (50 ou 60 Hz). Néanmoins le gradateur ne permet pas agir sur la fréquence de la tension, on doit alors faire appel à des convertisseurs spécialement développés à cet effet.

Les convertisseurs statiques à moyenne fréquence fournissent des fréquences variant de quelques centaines de hertz à une dizaine de milliers de Hz environ. Ils sont destinés à produire du courant alternatif à partir d'une source à courant continu. Dans les installations de chauffage par induction, les dispositifs sont composés d'un transformateur destiné à abaisser la tension, d'interrupteurs à semi-conducteurs et des composants passifs [16], [28].

Par rapport aux autres systèmes, les convertisseurs statiques sont plus simples et plus économiques. Ils présentent les principaux avantages suivants : - Adaptation automatique de la fréquence : la fréquence s'ajuste au fur et à mesure de la variation de l'impédance du four à induction pour fonctionner en permanence à la résonance - Puissance maximale possible est constamment transmise (générateurs statiques à onduleurs). - Implantation plus simple et taille plus petite. - Absence de bruit. - Meilleur rendement. Ils sont soit à fréquence imposée par le circuit de commande et de régulation, soit le plus souvent à fréquence imposée par le circuit d'utilisation. Ces convertisseurs sont appelés les convertisseurs à résonance.

II.4.6 Convertisseurs statiques à résonance

Dans les circuits de chauffage par induction, l'inducteur consomme toujours une énergie réactive supérieure à l'énergie active. Pour que le générateur qui l'alimente n'ait à fournir que

la puissance active, il faut utiliser des condensateurs de compensation de la puissance réactive. De ce fait la plupart des générateurs utilisent les propriétés des circuits oscillants. Pour avoir un fort courant variant dans l'inducteur, la plupart des auteurs ont tendance à utiliser un circuit oscillant formé par l'inductance et un condensateur en série ou en parallèle. Ce circuit oscillatoire, également connu sous le nom résonnant, est généralement alimenté par un convertisseur, dont les caractéristiques dépendent de la fréquence, la puissance et du type de structure [32].

II.4.6.1 Circuit oscillants

II.4.6.1.1.Principe

Une charge inductive peut être représentée par une inductance et une résistance soit sous forme d'éléments Lset Rs en série (figure II.3 a), soit en forme d'éléments Lp et Rp en parallèle (figure II.3) :

$$L_P\omega = \frac{Z_s^2}{L_s\omega} \tag{II.1}$$

$$R_p = \frac{Z_s^2}{R_s} \tag{II.2}$$

Avec :

$$Z_s^2 = L_s^2\omega^2 + R_s^2$$

Ou d'une autre façon :

$$L_s\omega = \frac{Z_p^2}{L_p\omega} \tag{II.3}$$

$$R_s = \frac{Z_p^2}{R_p} \tag{II.4}$$

Avec :

$$Z_s^2 = \frac{L_p^2\omega^2 R_p^2}{\left(L_p^2\omega^2 + R_p^2\right)}$$

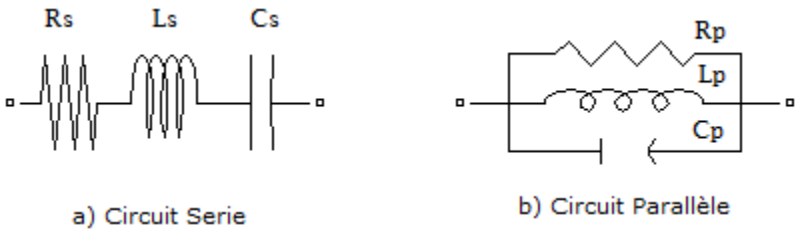


Figure II.6: Les différentes associations d'un condensateur de compensation avec une charge.

L'association de condensateur de compensation réactive à cette charge soit en série (Figure II.6a),soit le plus souvent en parallèle (Figure II.6 b), constitue un circuit oscillant.

a) Pour le circuit résonnant série :

L'impédance totale de circuit Z :

$$Z_s = \sqrt{R^2 + X_T^2} \tag{II.5}$$

Avec :

$$X_T = X_L - X_c \tag{II.6}$$

Le facteur de qualité :

$$q = \frac{L_s \omega_0}{R_s} = \frac{1}{C_s \omega_0 R_s} \tag{II.7}$$

b) Pour le circuit résonnant parallèle :

L'impédance totale de circuit Z :

$$Z_p = \sqrt{R^2 + X_T^2} = \frac{1}{\frac{1}{R} + (wC - \frac{1}{wL})} \tag{II.8}$$

et le facteur de qualité :

$$q = \frac{R_p}{L_p \omega_0} = \quad C_p \omega_0 R_p \tag{II.9}$$

La fréquence de résonance :

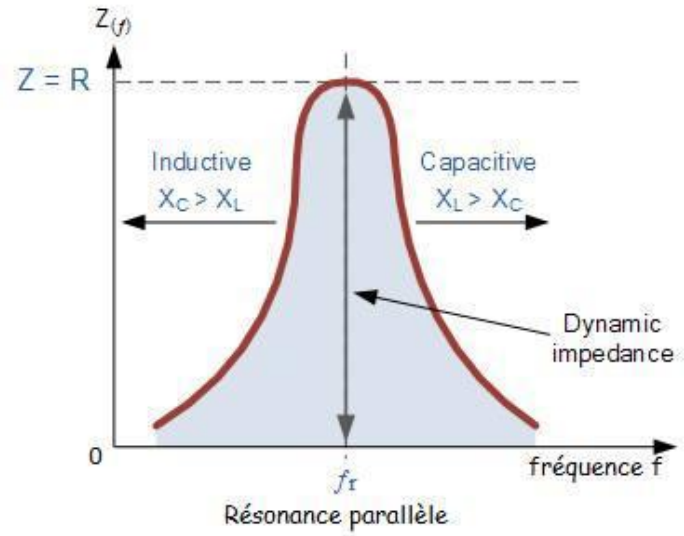


Figure II.7 : Graphe illustrant la fréquence de résonance en fonction de la réactance.

La résonance électrique se produit dans un circuit AC lorsque XL= XC, ce dernier est représenté par le point ou les deux courbes de réactance se croisent dans la figure (II.6). Dans un circuit de résonance, la fréquence de résonance fr peut être calculée comme suit [27].

$$\omega_0 = 2\,\pi\, f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{II.10}$$

$$f_r = \frac{1}{2\,\pi\,\sqrt{LC}} \tag{II.11}$$

II.4.6.2 Types de convertisseurs statiques à résonance

Les convertisseurs à résonance sont une combinaison de la topologie du convertisseur et de la technique de commutation, permettant un fonctionnement à ZVS (zéro-voltage-switching) et ZCS (Zero-Current-Switching). Il existe trois catégories principales de ces convertisseurs :

- Convertisseurs à résonance coté alimentation.
- Convertisseurs à interrupteurs résonants.
- Convertisseurs à résonance coté charge.

II.4.6.2.1 Convertisseurs à résonance coté alimentation :

Dans les onduleurs conventionnels à MLI (Figure II.7), l'entrée de l'onduleur est une tension avec une amplitude constante *Vs*, et la sortie sinusoïdale (monophasé ou triphasé) est obtenue par le mode de commutation, la tension d'entrée est faite pour osciller autour de la tension *Vs* au moyen d'un circuit résonant L-C, donc la tension d'entrée reste zéro pour une durée finie pendant laquelle les états des interrupteurs de l'onduleur peuvent être changés, aboutissant ainsi aux ZVS [33][34].

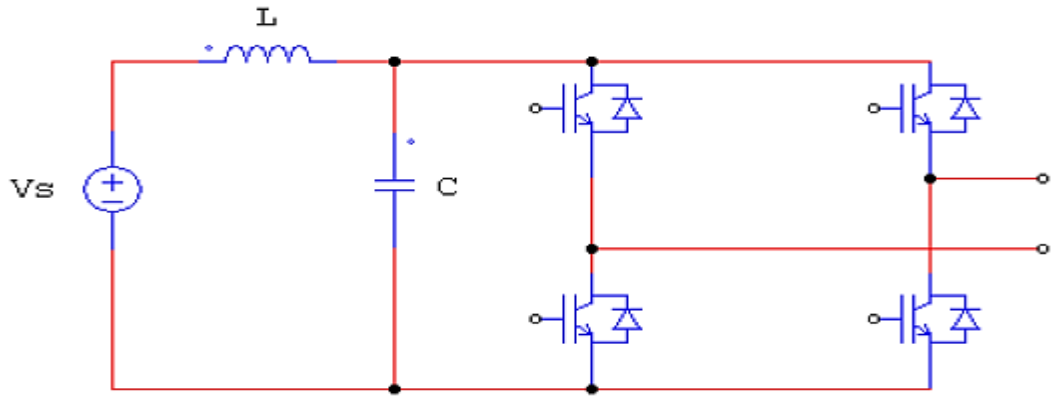


Figure II.8: Convertisseur à résonance coté alimentation.

II.4.6.2.2 Convertisseurs à interrupteurs résonants

Les interrupteurs sont caractérisés par une commutation spontanée et possèdent nécessairement trois segments. On aboutit aux quatre fonctions de la (figure II.8) auxquelles sont associés les CALC (circuits d'aide à la commutation) adéquats, à savoir un condensateur parallèle pour les fonctions de blocage et une inductance série pour les fonctions d'amorçage. Les interrupteurs résonants sont alors obtenus en ajoutant à chacune des fonctions précédentes l'élément dual du CALC associé [35].

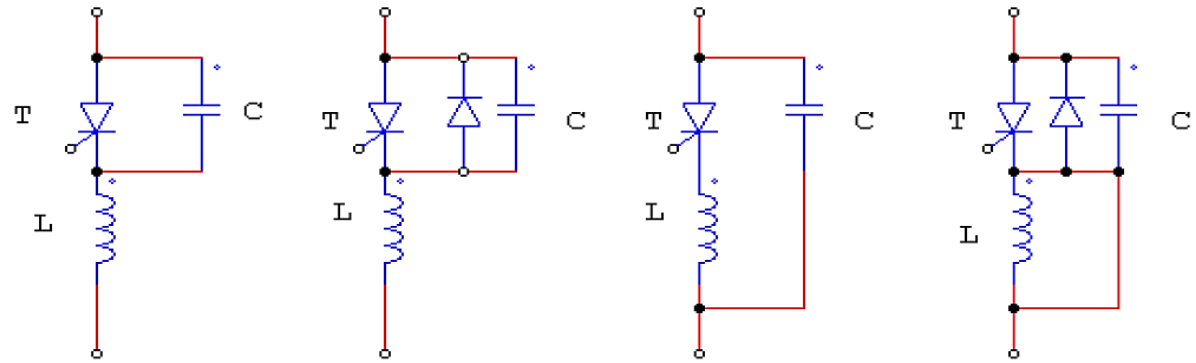


Figure II.9: Interrupteurs résonnants.

II.4.6.2.3 Convertisseurs à résonances coté charge

Ces convertisseurs sont obtenus par des circuits résonants LC. La tension et le courant oscillants, en raison de la résonance du circuit LC, sont appliqués à la charge et les interrupteurs du convertisseur peuvent être commutés à tension nulle et/ou à courant nul. Le circuit LC peut être employé en série ou en parallèle. Dans ces convertisseurs, la puissance écoulée vers la charge est contrôlée par l'impédance résonante, qui à son tour contrôlée par la fréquence de commutation en comparaison avec la fréquence de résonance. Ces convertisseurs DC/DC et DC/AC peuvent être classés comme suit[33] :

A. Onduleurs à résonance

- Convertisseurs résonant séries (onduleurs de tension)
- Convertisseurs résonnants parallèles (onduleurs de courant)
- A injection de courant

B. Convertisseurs à résonances classe E et sub-classe E.

II.5. Onduleurs à résonance

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC).

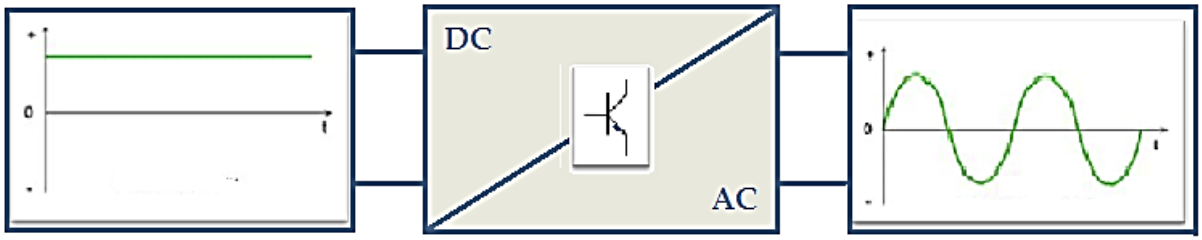


Figure II.10 : Le principe de l'onduleur.

Leur principe est connu depuis de nombreuses années, leurs réel développement n'est venu qu'après l'énorme progression de la technologie des semi-conducteurs.

La conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant la séquence adéquate de commande.

Par rapport aux autres convertisseurs de fréquence utilisés dans le chauffage par induction, les onduleurs présentent les avantages principaux suivants :

- Implantation facilitée par une masse plus faible.
- Meilleur rendement, en particulier sous charge partielle.

- Disponibilité de fonctionnement immédiate.
- Fonctionnement statique et silencieux.
- Compensation capacitive automatique par adaptation de la fréquence.

Dans les applications du chauffage par induction tous les onduleurs sont monophasés et autonomes par opposition aux onduleurs assistés dont la fréquence est imposée par le réseau. Ils sont soit pilotés c'est-à-dire à fréquence imposée par le circuit de commande, soit autopiloté, c'est-à-dire, à fréquence imposé par le circuit lui-même [36].

Parmi les onduleurs de tension ou de courant, on trouve les onduleurs à résonance qui sont une association de ces derniers avec un circuit oscillant.

Les onduleurs à résonance permettent d'imposer le courant ou la tension et la fréquence. Alors, pour le cas particulier où la charge est constituée d'un circuit oscillant peu amorti, on peut commander les interrupteurs à une fréquence très proche de la fréquence de résonance de la charge. Si la charge varie, la fréquence de commande varie. Ce qui signifie que la fréquence de l'onduleur dépend de la charge, il n'est plus non autonome. On distingue deux modèles à résonance [37][38][39].

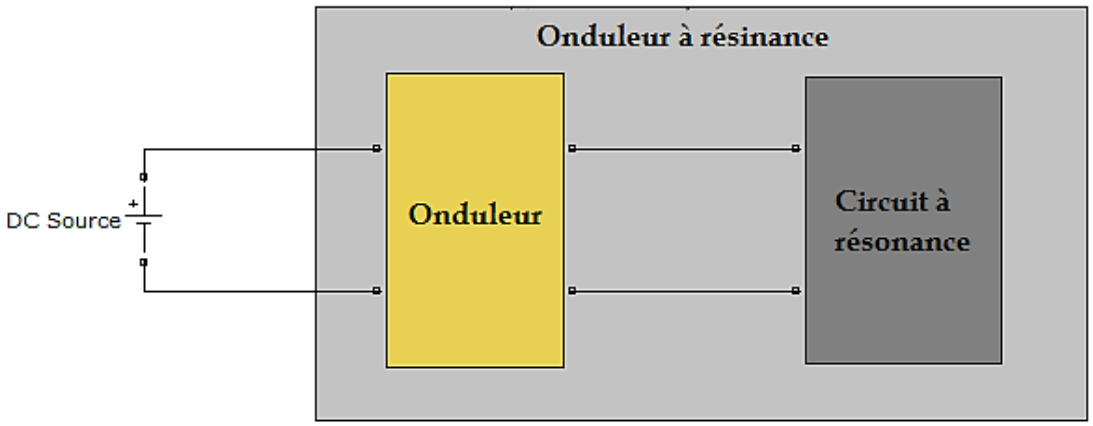


Figure II.11 : Constitution de l'onduleur à résonnance.

II.5.1 Onduleur à résonance série

L'onduleur série est un onduleur de tension, dont la charge est constituée par une inductance, une résistance et une capacité en série, formant un circuit oscillant.

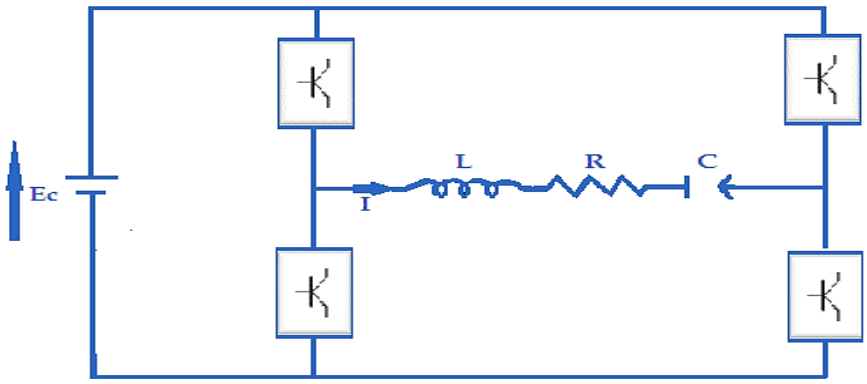


Figure II.12 : Onduleur à résonance série (onduleur de tension).

Un tel montage s'applique naturellement aux cas de fortes puissances et en basses fréquence, car l'impédance de l'inducteur est élevée (Lω), ce qui nécessite une forte tension. L'onduleur, mettant en oeuvre deux cellules de commutation identiques (dans lesquelles les interrupteurs à trois segments restent à définir plus précisément), applique au circuit résonant RLC série une tension rectangulaire symétrique de valeur ± *E*. Du fait de la forte sélectivité du circuit série, le courant I qui circule est quasi-sinusoïdal pour des fréquences proches de la fréquence de résonance. La puissance est réglée à partir de la tension continue. Le fondamental de la tension est parfaitement synchrone avec la tension réelle (même passage par zéro). On retrouve alors les deux cas suivants :

- Si $f < fr$, le courant est en avance par rapport à la tension, on a affaire à une commutation spontanée de blocage et amorçage commandé.
- Si $f > fr$, le courant est en retard par rapport à la tension, on a affaire à une commutation spontanée d'amorçage et un blocage commandé.

Le contrôle du convertisseur ne peut être effectué que par l'intermédiaire de la fréquence de commande [40][41].

Un tel circuit résonne à la fréquence :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{II.12}$$

Pour laquelle l'impédance :

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2} \tag{II.13}$$

Se réduit à R.

Le courant est en phase avec la tension du générateur *Vs* et égal à *Vs/R*.

La tension aux bornes de l'inducteur est égale à Q*Vs* (*Q* = *Lw*0) *Q* : étant le facteur de qualité, (donc très supérieur à *Vs*). Un tel montage s'applique naturellement aux cas de faibles puissances et en haute fréquence, car l'impédance de l'inducteur est alors élevée L*ω*, ce qui nécessite une forte tension.

II.5.2 Onduleur à résonance parallèle

L'inducteur est ici en parallèle avec le condensateur. La source continue réglable est une source de courant obtenue comme précédemment mais avec une forte inductance de lissage. Ce courant circule de façon alternative dans le circuit par ouverture des interrupteurs, selon le même processus que précédemment. Du fait de la forte sélectivité du circuit parallèle, la tension qui apparait aux bornes du circuit est quasi-sinusoïdale.

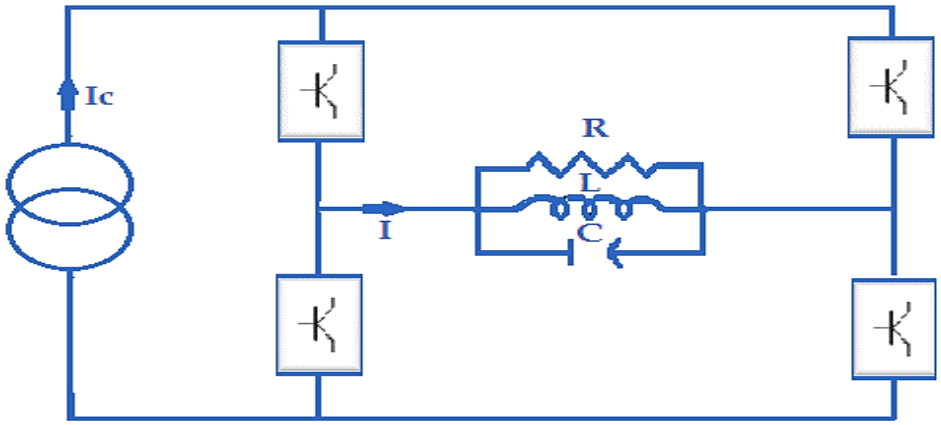


Figure II.13: Onduleur à résonance parallèle (onduleur de courant).

L'analyse du fonctionnement montre que l'influence de la fréquence est tout à fait contraire à celle observée dans les onduleurs de tension :

- Pour *f* < *fr*, les signes de la commutation et du courant, dans chaque cellule, sont opposés, ce qui correspond à un blocage commandé des interrupteurs.
- Pour *f* > *fr*, les signes de la commutation et du courant sont identiques, ce qui correspond à un amorçage commandé des interrupteurs. [40][41]

L'impédance complexe de l'ensemble inducteur-capacité est :

$$Z = \sqrt{\frac{R^2+(L\omega)^2}{(1-LC\omega)^2+(RC\omega)^2}} \qquad \text{(II.14)}$$

A la résonance, Z est maximale en module.

Un cas simple fréquent en chauffage par induction, est celui où la résistance R de l'inducteur est faible devant sa réactance Lω. Dans ces conditions, on peut dire que si la condition de résonance $LC\omega^2 = 1$est vérifiée, on a :

$$Z = \frac{L}{RC} = Rc_e \qquad \text{(II.15)}$$

II.5.3 Onduleur à injection de courant :

Le principe de ce type de dispositif est indiqué par la (figure II.13). Un circuit oscillant parallèle reçoit périodiquement des impulsions de courant apportant l'énergie dissipée dans la charge au cours de la période.

Ces impulsions sont commandées par l'inversion de la tension (dans le sens croissant, dans notre cas de figure) aux bornes de la charge ; elles proviennent de la décharge d'un condensateur C, décharge provoquée par l'enclenchement d'un thyristor T; les bobines servent à limiter l'intensité des courants de charge (L) et de déchargé (l) [42]. La tension aux bornes du thyristor s'exprime, lorsque T est bloqué par :

$$V_T = V_C - V \qquad \text{(II.16)}$$

La tension V_T: prend une valeur maximale voisine de la somme des valeurs maximales de V_C et de V.

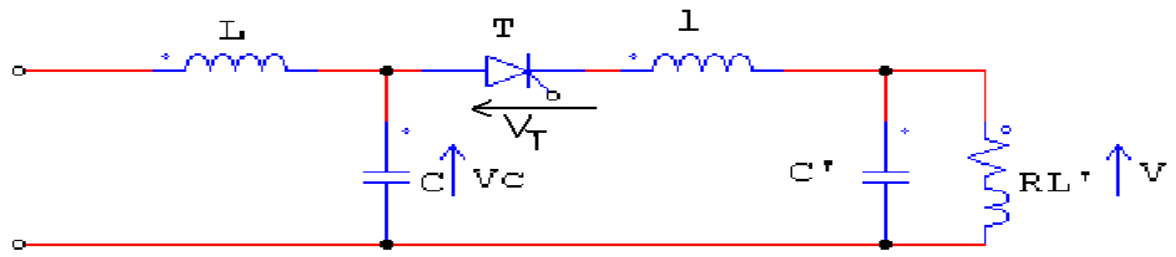


Figure II.14 : Onduleur à injection de courant.

II.6.Convertisseurs à résonance classe E :

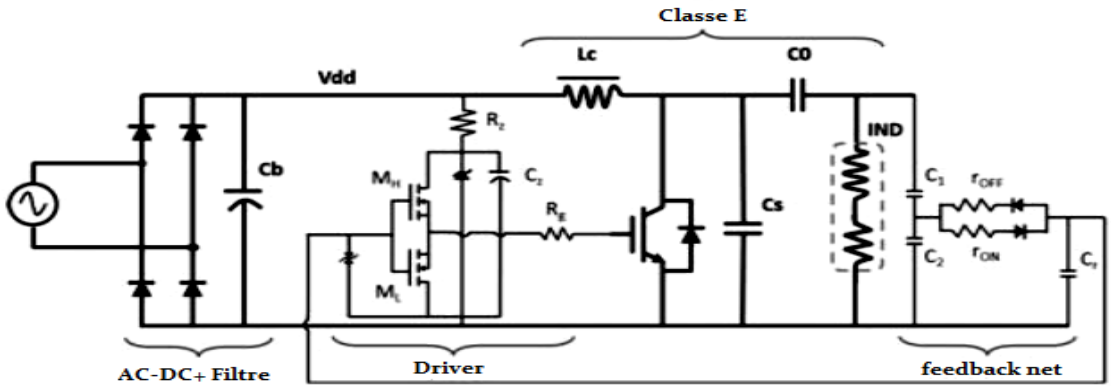


Figure II.15: Schéma du convertisseur à résonance Classe-E

Le convertisseur à résonance Classe-E, offre plusieurs avantages tels que le coût, le bruit réduit, et l'absence de la commande du système d'alimentation par logique floue. Le courant de la charge est quasi sinusoïdal. La conception donnée ci-dessus convient aux applications de la puissance de sortie constantes, telles que des cuiseurs de riz ou les machines à café [43].

II.7. Les différents interrupteurs d'électroniques de puissance

II.7.1 Interrupteur parfait

Un interrupteur idéal est un composant électronique qui peut réaliser un court-circuit ou un circuit ouvert en réponse à une commande externe. Lorsqu'il est fermé, il doit avoir une impédance nulle et lorsqu'il est ouvert, il doit avoir une impédance infinie. En outre, il ne doit pas consommer de puissance ni avoir de temps de commutation. Cependant, il est souligné que ce type d'interrupteur n'existe pas dans la pratique, car les interrupteurs réels ont des limitations et des imperfections. Lorsqu'un interrupteur est fermé, on dit qu'il est passant, et lorsqu'il est ouvert, on dit qu'il est ouvert.

II.7.2 Interrupteur à semi-conducteur

Il existe un grand nombre de composants à base de semi semi-conducteur assurant la fonction d'interrupteur. Tous ces composants fonctionnent en commutation entre deux états, ouvert (ou bloqué) et fermé (ou passant). La fermeture (ou mise en conduction) désigne le basculement de l'état bloqué à l'état passant, et l'ouverture (ou blocage), le basculement inverse. On distingue trois familles de composants à base de semi-conducteurs, suivant les phénomènes physiques présents lors du fonctionnement. On parle de composants bipolaires, unipolaires et mixtes [44].

- **Composants bipolaires :**

Comme la diode et le transistor bipolaire : ils mettent en jeu l'effet de modulation de conductivité qui permet de réduire autant que possible la chute de tension à l'état passant, par contre, ceci dégrade les performances dynamiques à l'ouverture et à la fermeture. Le principe est l'injection, dans la base, de porteurs (électrons/trous), qui réduisent la résistivité dès que leur concentration devient notablement supérieure à celle des porteurs normalement présents (phénomène de forte injection) [45].

- **Composants unipolaires :**

Exemple la diode de Schottky, transistor MOS : contrairement aux précédents, ceux-ci ne mettent en jeu qu'un seul type de porteurs, les majoritaires de la région de base. Ainsi, la résistivité intrinsèque de la région de base n'est pas modulée et intervient pleinement dans la chute de tension.

Il en résulte que, l'emploi de ce type de composants est réservé aux applications de basse tension(jusqu'à quelques centaines de Volts) ce sont des composants plus rapides que les bipolaires [46].

- **Composants mixtes :**

la combinaison de deux types de structures de composants électroniques, à savoir les structures bipolaires et unipolaires, donne naissance à une nouvelle structure appelée mixte. Les composants électroniques mixtes intègrent donc ces deux types de structures dans un seul cristal, ce qui leur confère des caractéristiques particulières. Un exemple de composant mixte est le transistor IGBT, qui combine les avantages des transistors bipolaires et unipolaires pour obtenir des performances optimales.

II.7.2.1 Classification des semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs de puissance actuels peuvent être classés en trois catégories :
- les éléments non commandables (diodes),
- les éléments commandables à la fermeture (thyristors, triacs),
- les éléments commandables à la fermeture et à l'ouverture (transistors bipolaires, MOSFETs, IGBTs, GTOs).

A. Les diodes :

La diode bipolaire est le composant bipolaire usuel en électronique de puissance. A la base, il est simplement issu d'une jonction PN. En électronique de puissance, cette jonction est améliorée pour satisfaire aux exigences de ce domaine. Un compromis doit être trouvé entre la tenue en tension, le courant de fuite, la chute de tension à l'état passant et le temps de commutation. Selon les applications, les compromis sont différents et l'optimisation se fera plus vers une caractéristique désirée (haute tension, fort courant ou temps de commutation). [37]

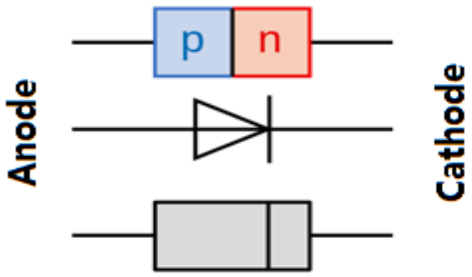


Figure II.16 : Diode

B. Thyristors :

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

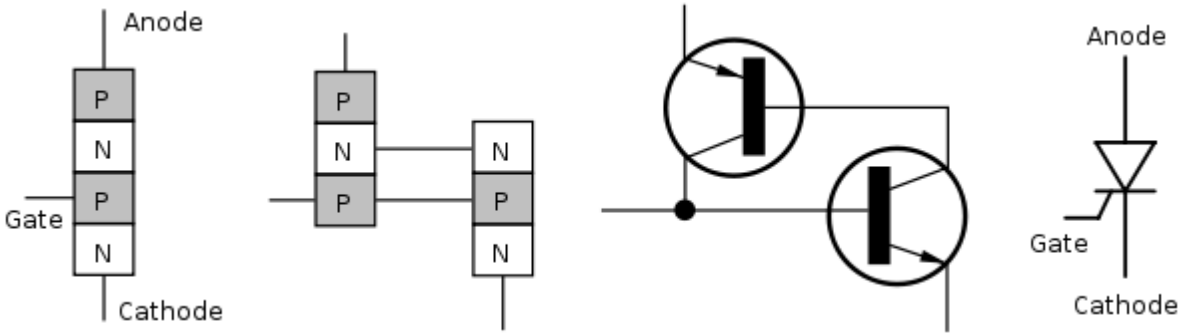


Figure II.17 : Représentation schématique d'un thyristor.

C. Les MOSFETS :

Le transistor MOS, également connu sous le nom de Transistor à Effet de Champ Métal-Oxyde-Semi-conducteur, est un type de transistor unipolaire qui est largement utilisé en électronique de puissance en raison de sa nature normalement fermée. Il est composé d'une grille métallique entièrement isolée d'un canal par une fine couche isolante d'oxyde de silicium (SiO2) d'une épaisseur d'environ 0,1 µm. La grille, la couche de silice et le canal constituent un condensateur dont la polarisation peut modifier la conductivité du canal. En outre, le transistor MOS est doté de 4 électrodes:

a) La Source (Source) S : elle représente le point de départ des porteurs.

b) Le Drain (Drain) D : point de collecte des porteurs.

c) La Grille (Gate) G et le Substrat (Body) B sont les électrodes de la capacité MOS qui contrôle le nombre de porteurs présents dans le canal.

Fonctionnement du MOSFET :

La principale différence avec un transistor bipolaire se situe au niveau du circuit de commande (grille source) : celui-ci présente une impédance d'entrée quasiment infinie. Ce transistor est donc commandé en tension par VGS contrairement au bipolaire qui l'était en courant par le courant de base. Le principal avantage du transistor MOS est donc de pouvoir maintenir un état donné sans avoir à fournir de puissance (courant d'entrée nul). Ce composant est surtout utilisé en commutation que ce soit pour l'électronique de puissance ou

pour la réalisation de circuit numérique. Le transistor MOS à canal N se commande avec une tension grille source positive (VGS >0) qui provoque la circulation d'un courant dans le sens drain source. (ID >0) Le transistor MOS à canal P se commande avec une tension VGS négative et le courant circule de la source vers le drain : ID négatif. Lorsque la tension VGS est nulle le courant de drain l'est aussi [48].

- **MOSFET canal N**

Le transistor MOSFET à canal N doit être dirigé du côté ou le potentiel est le plus bas, c'est-à-dire que la source (l'arrière de la flèche doit être du côté du potentiel le plus bas) Ce transistor MOSFET fonctionne avec une tension Vgs positive. En effet pour que le transistor devienne passant il faut que la tension Vgs soit positive. Plus la tension Vgs sera positive et plus le MOSFET sera passant et le courant circulant dans le drain sera de plus en plus fort (interrupteur complètement fermé). Cas inverse, lorsque la tension Vgs sera proche de zéro il deviendra un interrupteur ouvert et le courant circulant dans le drain sera de plus en plus faible lorsque la tension Vgs diminuera.

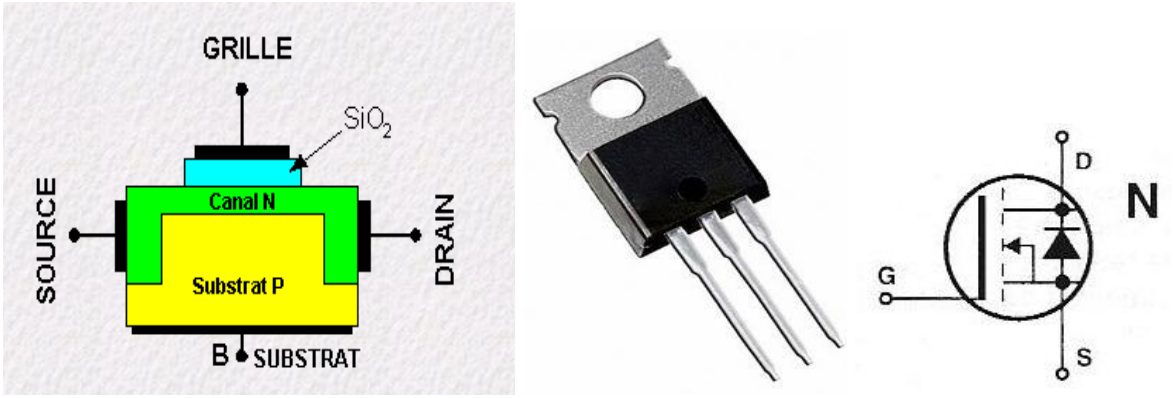


Figure II.18 : MOSFET canal N [49].

MOSFET canal P

Le transistor MOSFET à canal P doit être dirigé du côté ou le potentiel est le plus haut, c'est-à-dire que la source (la tête de la flèche doit être du côté du potentiel le plus haut) Ce transistor MOSFET fonctionne avec une tension Vgs négative, en effet pour que le transistor devienne passant il faut que la tension Vgs soit négative. Plus la tension Vgs sera négative et plus le MOSFET sera passant et le courant circulant dans le drain sera de plus en plus fort (interrupteur complètement fermé). Cas inverse, lorsque la tension Vgs sera proche de zéro il deviendra un interrupteur ouvert et le courant circulant dans le drain sera de plus en plus faible lorsque la tension Vgs augmentera.

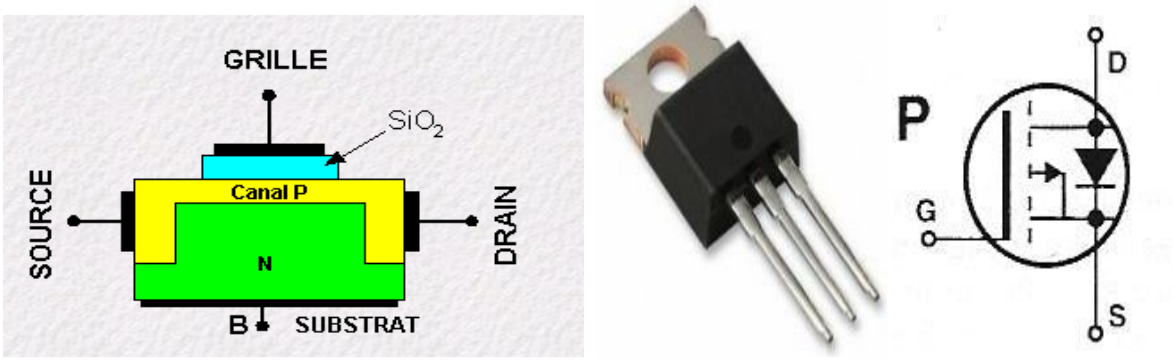


Figure II.19 : MOSFET canal P [49].

Ces dispositifs présentent de nombreuses qualités :

- Impédance d'entrée élevée et donc une facilité de commande par la grille isolée.
- Grande vitesse de commutation liée à l'absence de stockage des porteurs minoritaires.
- Comportement électrothermique positif (augmentation de la résistance à l'état passant lorsque la température augmente) qui empêche l'emballement thermique

D. LES IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) :

Ce sont des composants de puissance qui associent MOS et transistor bipolaire de puissance. Ils cumulent les avantages des deux sans totalement en éliminer les inconvénients un IGBT type NPN possède comme un transistor bipolaire un collecteur et un émetteur mais la base est remplacée par une électrode haute impédance qui est la grille d'un MOS. Il est constitué par un transistor bipolaire PNP de puissance de faible gain associé à un MOS canal N qui fournit le courant de base. La structure interne est représentée sur la figure ci-contre.

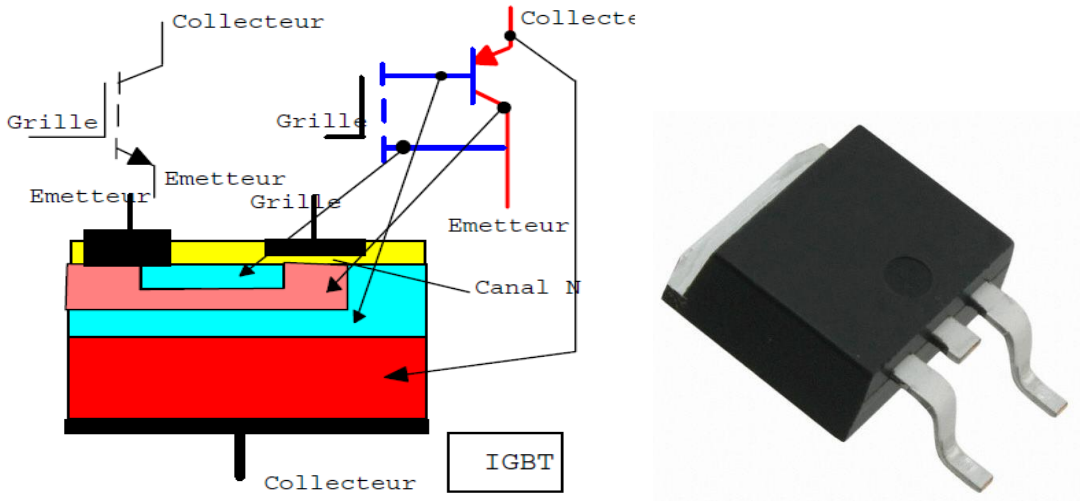


Figure II.20 : Structure d'un IGBT.

II.7.3 Gamme de fréquences des interrupteurs [33]

Tableau II.2 : Gamme de fréquences des interrupteurs

Game de fréquence	300 à 2000 Hz	2 à 5 KHz	10 à 50 KHz	50 à 500 KHz
Interrupteurs	-Thyristors -Thyristors IGCT	-Thyristors rapides IGCT	-Transistors IGBT	-Transistors à effet de champ (MOSFET)

- IGBT : Isolated Gate Bipolar Transistor
- MOSFET: Metal Oxyde Semi-conductor.
- IGCT : Integrated Gate Commutated Thyristor

II.7.4. Les modes de commande des interrupteurs

Les thyristors ne sont commandables qu'à la fermeture.

Les thyristors IGCT et les transistors bipolaires, IGBT et MOSFET sont commandables :

- à la fermeture.
- à l'ouverture.

Ainsi, selon le type de convertisseurs de fréquence et les interrupteurs utilisés, il existe différents modes de commande de ces interrupteurs, sachant qu'ils sont commandés :

- soit à la fermeture (mode thyristor), l'ouverture étant spontanée,
- soit à l'ouverture (mode thyristor dual ou thyristor diode dual), la fermeture étant spontanée, et que leurs caractéristiques intensité/tension sont différentes.

II.8. Principe et critères de choix de la topologie et des convertisseurs de fréquence pour le chauffage par induction :

exprime que le choix de la topologie est entièrement conditionné par les particularités de la situation, ainsi que les contraintes liées à la puissance, le rendement et le coût. En d'autres termes, il n'existe pas de topologie universelle qui convienne à toutes les situations, et il est nécessaire d'adapter la conception en fonction des spécificités du projet. Les contraintes de puissance, de rendement et de coût sont des facteurs déterminants dans le choix de la topologie la plus adaptée.

A. Choix du type d'onduleur et des interrupteurs :

signifie que dans les deux configurations d'onduleurs (série et parallèle), lorsque le circuit atteint la résonance, le courant passe à travers une résistance pure.

•que le montage série est approprié pour les cas où il y a des fortes puissances et des basses fréquences, car l'inducteur a une impédance élevée à ces fréquences, ce qui demande une tension importante pour le traverser. Le montage série permet d'additionner les tensions aux bornes de chaque composant, ce qui permet d'obtenir une tension élevée pour traverser l'inducteur.

• Dans le montage parallèle, la tension aux bornes de l'inducteur est égale à la tension du générateur, car l'inducteur est branché en parallèle avec la source de tension. Ce type de montage convient aux faibles puissances et hautes fréquences, car l'impédance de l'inducteur à ces fréquences est relativement faible. En ce qui concerne les fréquences, il est possible d'utiliser ce type de montage pour des fréquences allant de quelques kilohertz à plusieurs mégahertz. Cependant, il est important de prendre en compte les caractéristiques de l'inducteur et de la source de tension pour choisir le type de montage le plus adapté à l'application spécifique :

-Le réseau est conçu pour fournir du chauffage à une fréquence de 50 Hz et pour des puissances allant jusqu'à plusieurs MW.

- Les générateurs à thyristors sont conçus pour produire des signaux électriques dans une plage de fréquences allant de 300Hz à 10 kHz.

- Il existe des générateurs à transistors IGBT adaptés aux fréquences se situant entre 10 et 50 kHz.

qu'en ce qui concerne les applications qui nécessitent des fréquences plus élevées avec des puissances mises en jeu plus faibles, on utilise généralement des générateurs à Transistors à effet de champ (Mosfet). Les Mosfets sont des dispositifs électroniques qui peuvent être utilisés comme interrupteurs électroniques pour contrôler la circulation des signaux électroniques dans les circuits. Ils sont souvent utilisés dans les applications de haute fréquence en raison de leur faible résistance interne et de leur capacité à commuter rapidement entre les états de fonctionnement. Comparés aux autres types de transistors, les Mosfets ont également une faible consommation d'énergie, ce qui les rend adaptés pour les applications nécessitant une puissance mise en jeu plus faible.

B. Choix de la topologie interne de l'onduleur :

- **Onduleur en Demi-pont (Half Bridgt) :**

Un onduleur en demi-point est constitué de deux interrupteurs comme le montre la figure (II.20)

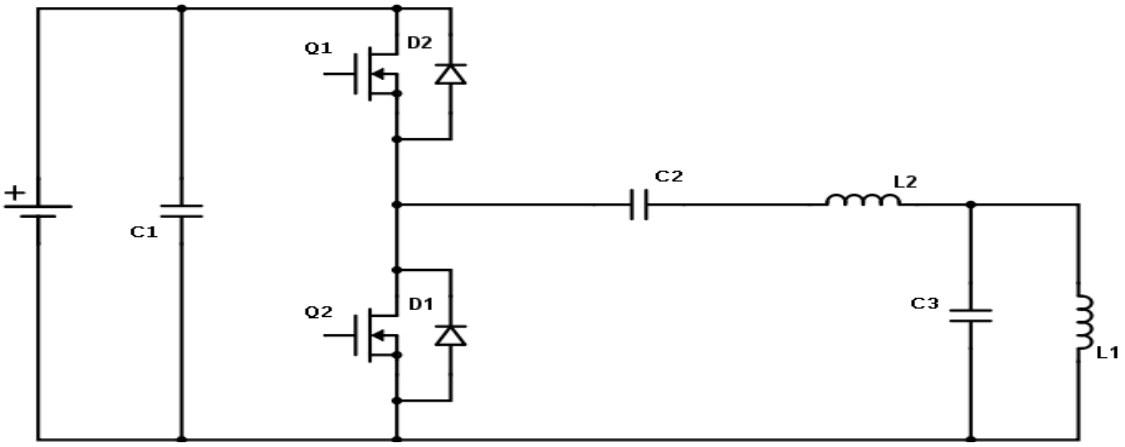


Figure II.21 : Onduleur en demi-point.

les générateurs construits selon cette méthode ont une faible puissance de sortie, mais ils sont peu coûteux. Fait référence à un problème majeur lié à une topologie donnée, qui est la surtension qui se produit aux bornes des deux interrupteurs. Cette surtension peut rapidement devenir interdite lorsque le générateur ne fonctionne pas de manière optimale, notamment lorsque la charge magnétique est importante ou que l'entrefer est petit. En d'autres termes, il est essentiel de trouver une solution pour éviter ou atténuer cette surtension afin que la topologie puisse fonctionner efficacement dans différentes conditions.es capacités de puissance des équipements en question restent limitées, ne dépassant jamais 15 kW. En revanche, les fréquences de fonctionnement peuvent être élevées en fonction de l'interrupteur utilisé.

Le chauffage par induction utilise ce type d'onduleur dans les situations où les charges sont stationnaires, maintenues à une intensité constante et correctement couplées.

- **Onduleur en pont-complet (Full Bridget) :**

Utilisé dans les conceptions de puissance élevée, il est constitué de 4 interrupteurs formant un pont en H (un pont complet).

L'onduleur en pont-complet est préférable à l'onduleur en demi-point. Il peut fournir deux fois la tension de sortie. Ceci implique que, pour la puissance équivalente de sortie, le courant de sortie est divisé par deux [4].

Il est utilisé quand la charge dans le chauffage par induction est évoluant.

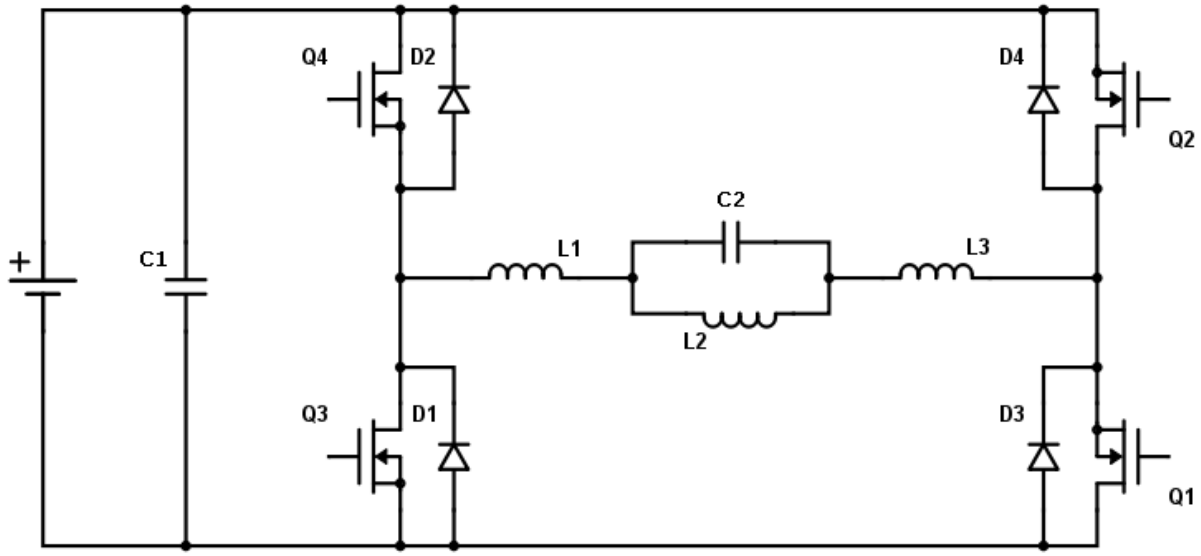


Figure II.22 : Onduleur en pont-complet.

Pour notre système de chauffage, la puissance devrait avoisiner 400 W, la fréquence est inférieure à100 KHz et notre charge sera constante et bien couplée à l'inducteur, ce qui nécessiterai donc un convertisseur parallèle en demi-point avec des transistors MOSFET car on aura une faible puissance une fréquence élevé.

II.9 Propriétés des onduleurs à résonance

Les Convertisseurs à résonnants trouvent une très large application pour les systèmes de Chauffage par induction, ce qui nécessite des courants de haute fréquence. Les onduleurs de Résonant ce Série et Parallèle sont les plus utilisés [50].

Les onduleurs à résonance sont des convertisseurs mettant en œuvre des interrupteurs dont les mécanismes de commutation sont parfaitement définis. Chacun de ces interrupteurs possède une commutation commandée, c'est à dire provoquée par le circuit de commande, et une commutation spontanée résultant de l'action du circuit oscillant sur cet interrupteur. Les conséquences de ce type de fonctionnement sont multiples. La commutation spontanée, mise en conduction sous tension nulle ou blocage au zéro du courant, est théoriquement sans perte. En ce qui concerne la commutation commandée, afin de limiter les contraintes sur les interrupteurs, ces dernières peuvent être munies de circuits d'aide à la commutation CALC. Si un interrupteur est commandé à l'amorçage (ex :thyristor), alors le CALC est une inductance placée en série. Cet interrupteur se bloque alors spontanément au passage par zéro du courant et à cet instant il n'y a donc pas d'énergie stockée (et donc à dissiper !) dans cette inductance. De même, Si un interrupteur est commandé au blocage (ex : thyristor dual), alors le CALC est

un condensateur placé en parallèle sur cet interrupteur. Ces CALC sont donc non dissipatifs et peuvent donc être surdimensionnés [51].

II.9.1 Caractéristiques des onduleurs séries

Le condensateur est placé en série avec la charge qui se présente donc comme une source de courant instantanée. Les onduleurs à résonance qui alimentent cette charge sont donc des onduleurs de tension. L'onduleur série nécessite des composants asymétriques en tension et le choix est actuellement plus vaste. L'analyse des phénomènes de commutation dans un bras d'onduleur de tension montre que la commutation à l'amorçage est plus contraignante que la commutation commandé au blocage, essentiellement à cause des imperfections technologiques des composantes« courant de recouvrement des diodes, dV/dt...» [51].

II.9.2 Caractéristiques des onduleurs parallèles

Le condensateur est placé en parallèle avec la charge qui se présente donc comme une source de tension instantanée. L'alimentation se fait alors en courant et l'onduleur à résonance associé est un commutateur de courant. L'onduleur parallèle qui nécessite des composants symétriques en tension, est traditionnellement du domaine du Thyristor commande à l'amorçage qui naturellement symétrique en tension et éventuellement, du GTO commande au blocage. Par les propriétés intrinsèques de ces deux composants, l'onduleur parallèle est limité en fréquence à quelques kHz et réservé aux applications de forte puissance quelques MW. Pour les puissances plus faibles quelques dizaines de kW, l'augmentation de la fréquence de fonctionnement est envisageable en reconstituant la fonction thyristor à l'aide de composants rapides tels que MOSFET, transistors bipolaires.., placés en série avec une diode. D'autre part, l'alimentation de l'onduleur parallèle par une source de courant lui confère une sûreté de fonctionnement remarquable [51].

II.10. Techniques de réglage de puissance

Par la suite on va considérer la structure série comme notre application. On rappelle ici les différentes méthodes de contrôle couramment utilisées dans ces convertisseurs. Enfin On propose quelques méthodes de réglage de transfert de puissance permettant de fonctionner à fréquence fixe[51].

II.10.1 Contrôle à fréquence variable

Les stratégies de commandes du convertisseur à résonance série les plus répandues sont :

* Le contrôle du temps de conduction des diodes de l'onduleur. Cette commande est bien adaptée lorsque c'est l'amorçage d'un interrupteur qui provoque la commutation de l'onduleur à Thyristor.
* Le contrôle du temps de conduction des interrupteurs commandés. Cette commande n'est facilement envisageable que lorsque c'est le blocage d'un interrupteur qui provoque la commutation de l'onduleur. Cette commande implique donc l'utilisation de composants blocables.
* La méthode de contrôle « Analogie Signal to discrète Time Interval Converter » Les instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur sont déterminés par l'annulation de l'intégrale de la différence d'une tension proportionnelle au courant dans le circuit oscillant redressé deux alternance set d'une tension de référence. Il s'agit donc pratiquement d'une commande qui réalise l'asservissement du courant de sortie à une valeur prédéterminée.
* La commande optimale qui, dans un fonctionnement à une fréquence supérieure (resp. inférieure) à la fréquence de résonance, consiste à imposer dans le plan de phase les trajectoires représentatives des séquences de conduction des diodes (resp. des transistors) de l'onduleur dans le régime permanent que l'on désire atteindre. Cette commande optimale présente l'intérêt de maitriser parfaitement et à tout instant les amplitudes des courants et des tensions au sein du circuit oscillant.
* Le contrôle de la fréquence de l'onduleur. La tension est carrée, d'amplitude ±E et dont la fréquence est imposée par la commande. Contrairement aux quatre méthodes de contrôle précédemment citées, le contrôle de la fréquence ne nécessite aucun capteur dans le convertisseur[52].

II.10.2 Contrôle à fréquence fixe

Puisque le circuit oscillant LC se comporte comme un filtre sélectif, une étude simplifiée est développée en ne considérant que les termes fondamentaux, doit permettre de dégager des résultats d' une précision suffisante, notamment pour des fréquences *fc* voisines de *fr*. Les différentes techniques de contrôle de l'amplitude du courant **j** apparaissent alors plus clairement sur la figure 2.7 [51].

*Réglage de Z (ws) : La première de ces techniques consiste à faire varier Z (ws) en maintenant V1 constante. Ceci peut être obtenu de deux façons différentes :

Par la variation de ws, c'est à dire par la fréquence variable,

Par la variation des paramètres du circuit oscillant LC.

X : Réalisation d'une inductance variable :

Cette inductance variable est habituellement réalisée par une inductance en série avec deux interrupteurs commandée à l'amorçage et à blocage spontané Thyristor et connectés en antiparallèle.

X : Réalisation d'un condensateur variable.

a) Un condensateur en antiparallèle avec un interrupteur bidirectionnel en tension et en courant commandé au blocage,

b) Un redresseur de courant commandé au blocage,

c) Un redresseur de tension commandé au blocage. Seul ce dernier procédé s'applique lorsque la source alternative est une source de tension.

* Réglage de l'amplitude de $V1$:

Cette technique consiste à faire varier l'amplitude de $V1$ en maintenant Z(ws) constant. En doit alors utiliser un convertisseur auxiliaire qui peut être placé en amont de l'onduleur (réglage de la tension$E1$: un redresseur contrôlé ou un hacheur par exemple.

* Réglage par déphasage :

Une solution consiste donc à ne plus considère une seul source de courant telle que celle représentée à la figure (II.22). Mais deux sources identiques et connectées en parallèle, dont le déphasage relatif est variable et contrôlable entre 0 et π.

II.11. Choix de la topologie

Le choix de la topologie dépend entièrement de la situation et des différences doivent être faite quant aux limitations sur la puissance, le rendement et le coût.

. L'onduleur en pont-complet est préférable à l'onduleur en demi-point. Il peut fournir deux fois la tension de sortie. Ceci implique que, pour la puissance équivalente de sortie, le courant de sortie est divisé par deux [53].

. Dans les deux cas (onduleurs série et parallèle), à la résonance, il débite sur une résistance pure.

- Un tel montage série s'applique naturellement aux cas des faibles puissances et en haute fréquences, car l'impédance de l'inducteur est alors élevée Lω, ce qui nécessite une forte tension.

- Dans le montage parallèle, la tension aux bornes de l'inducteur est celle du générateur. Un tel montage s'applique au cas des fortes puissances et aux fréquences basses ou moyennes pour lesquelles l'impédance de l'inducteur ne demande pas une forte tension. Pour ce qui est de la fréquence on peut citer :

* Le réseau pour du chauffage à 50 Hz et pour des puissances pouvant atteindre plusieurs MW.

* Les générateurs à thyristors pour les fréquences comprises entre 50 et 10 kHz, du kW jusqu'au MW.

* les générateurs à triodes pour les fréquences supérieures à 10 kHz.

Et pour les applications qui nécessitent des fréquences plus élevés avec des puissances mises en jeu plus faible, on utilise les générateurs à Transistors

II.12.Applications des onduleurs à résonance

Les onduleurs à résonance sont des équipements précieux dans plusieurs domaines, particulièrement lorsque des niveaux de puissance élevés, allant de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts, doivent être gérés à une fréquence moyenne. Ils sont particulièrement adaptés aux charges inductives telles que les fours à induction ou les charges capacitives telles que les ozoneurs, car ils permettent d'obtenir un circuit oscillant simple en compensant la charge. Ils conviennent également aux systèmes où la charge est elle-même un circuit oscillant à haute fréquence, tels que les ultrasons. Même dans les cas où la charge est ohmique, bien que variable dans la période d'éclairage à moyenne fréquence, les onduleurs à résonance peuvent être utilisés en ajoutant un circuit oscillant LC.

Par ailleurs, on peut citer quelques applications des onduleurs autonomes, telles que la fourniture de secours en cas de coupure de courant, la protection des équipements électroniques sensibles contre les surtensions et les fluctuations de tension, l'alimentation des systèmes de sécurité et des systèmes de surveillance en continu, et l'utilisation en tant que source d'énergie alternative pour les installations photovoltaïques ou éoliennes.

- La production de fréquences moyennes de quelques kHz à quelques centaines de kHz est couramment utilisée dans des applications telles que le soudage et le chauffage par induction.

Ces fréquences permettent de chauffer efficacement les matériaux conducteurs tels que les métaux en utilisant des courants induits. Le chauffage par induction est utilisé dans une variété de processus industriels, notamment pour la fabrication de pièces métalliques et pour le durcissement de surface des matériaux. Le soudage par induction utilise également ces fréquences moyennes pour fondre les matériaux à souder et réaliser des joints solides et durables.

- Cette phrase décrit des systèmes d'alimentation de secours qui utilisent des batteries d'accumulateurs comme source d'énergie. Ces systèmes peuvent être utilisés en cas de panne de courant pour fournir une alimentation électrique temporaire.

- Le filtrage des coupures brèves du réseau consiste à éliminer les fluctuations rapides de tension électrique afin de garantir une alimentation stable et fiable des matériels informatiques. En association avec un redresseur, ce filtrage permet de convertir l'énergie alternative en énergie continue, tout en supprimant les perturbations qui pourraient nuire au bon fonctionnement des équipements.

II.13.Conclusion

Le chauffage par induction est une méthode de chauffage qui nécessite l'utilisation d'une fréquence spécifique, adaptée aux propriétés et dimensions de l'objet à chauffer. Ainsi, l'utilisation de convertisseurs de fréquence, également connus sous le nom d'"alimentations à résonance", est souvent requise pour cette technique de chauffage. Dans ce chapitre, nous abordons plusieurs topologies de convertisseurs à résonance, telles que celles des onduleurs à résonance. Nous explorerons également les différents éléments semi-conducteurs qui sont utilisés dans le domaine du chauffage par induction.il est expliqué que les différentes gammes de fréquences des interrupteurs et leurs modes de commande sont analysés afin de choisir la meilleure configuration pour l'application spécifique.

Chapitre III

Commande par modulation de densité d’impulsion

III.1 Introduction

La commande en puissance de l'onduleur à résonance série est indispensable pour la régulation précise du processus de chauffage dans une application à induction. Plusieurs techniques ont été suggérées pour contrôler la puissance de chauffage, dont :

- La commande par fréquence.
- La commande par phase.
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).
- La commande par modulation de densité d'impulsion (MDI).

Les trois premières méthodes de commande (fréquence, phase et MLI) présentent un inconvénient majeur : elles ne permettent pas une commutation des interrupteurs au passage par zéro du courant, ce qui entraîne une augmentation des pertes par commutation et du bruit électromagnétique. Toutefois, la technique de commande par modulation de densité d'impulsion (MDI) permet de contrôler la puissance de sortie tout en assurant une commutation au passage par zéro du courant. C'est pourquoi, dans notre travail, nous nous concentrerons principalement sur cette dernière méthode.

III.2 Principe de la MDI

La modulation de densité d'impulsions MDI est une commande par train d'ondes. Dans ce cas, la tension est applicable à la charge durant un certain nombre de cycles entiers suivis d'un intervalle d'arrêt (tension nulle). En effet, dans un circuit de commande basé sur la MDI, la régulation de la puissance est assurée en ajustant et en diminuant les nombres d'impulsions dans une période T = N Tr (Tr la période de résonnance et N est un nombre entier de cycles résonants).

La fréquence de commutation, habituellement utilisée pour varier la puissance, est exploitée, dans le cas de la MDI, pour assurer des commutations aux zéro de courant et de tension. Il en résulte des commutations sans pertes et sans variations brusques de courant, autrement dit, un meilleur comportement des points de vue rendement énergétique et compatibilité électromagnétique. La variation de la puissance se fait par le biais du contrôle de la durée relative de la seconde (ou de la première) phase. Le fait de faire commuter l'onduleur à la fréquence de résonance de la charge implique que les durées des

fonctionnements en cycles normaux et de roue libre soient des multiples de la période de résonance [8].

Cette méthode de commande est caractérisée par des techniques qui assurent une bonne adaptation pour la commande des onduleurs à résonnance, et parmi les avantages de cette commande on trouve [9] :

- Régulation sur une large plage de la puissance fournie à la charge.

- Facteur de puissance proche de l'unité.

- Commutation des interrupteurs de puissance au passage par zéro du courant.

- Fréquence de commutation fixe (égale à la fréquence de résonance du circuit RLC).

- Faibles pertes par commutation.

- Bruit électromagnétique réduit.

- Simplicité de l'algorithme.

- Facilité de d'une éventuelle mise en œuvre.

III.3 Mode de fonctionnement

Le fonctionnement en modulation de densité d'impulsions d'un onduleur à résonance série se compose de deux phases qui se succèdent dans le temps, dont la fréquence de commutation Fc des interrupteurs est égale à la fréquence de résonance Fr, donc :

$$F_c = F_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Au cours de la première phase, l'onduleur est en fonctionnement normal c'est-a-dire il applique à la charge une tension en créneaux positifs et négatifs. On considère qu'il s'agit de cycles normaux ou fonctionnement en mode normal [10]:

Mode I de la figure (III.1. (b)) : Tl et T4 sont passants, T2 et T3 sont bloqués. Dans ce cas la tension de l'onduleur$V_{AB} = +u$.

Mode II de la figure (III.1. c) : Tl et T4 sont bloqués et T2 et T3 sont passants ; la tension de l'onduleur est donc$V_{AB} = -u$.

Au cours de la seconde phase, l'onduleur court-circuite la charge et ouvre la source, annulant ainsi la tension et le courant, respectivement, à sa sortie et à son entrée. L'écoulement d'énergie est interrompu. On parle ici de ratage des cycles résonants. Donc on considère qu'il s'agit de cycle de roue libre ou fonctionnement en roue libre.

Mode III de la figure (III.1.(d)): représente le fonctionnement en roue libre, T2 et T4 sont passants.

$$V_{AB} = 0$$

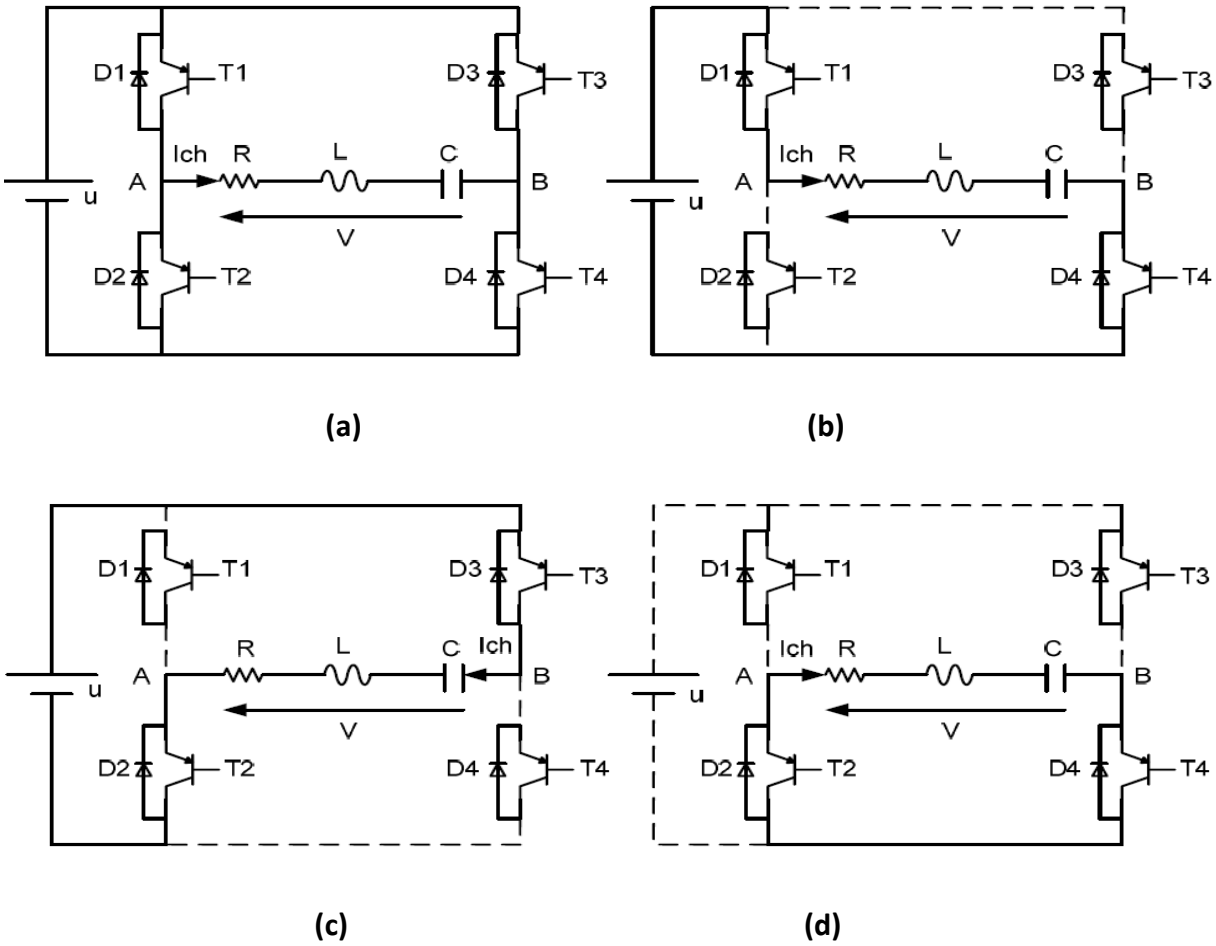


Figure (III.1) : Modes de fonctionnement de l'onduleur par MDI (a) circuit équivalent ; (b) Mode I ; (c) Mode II ; (d) Mode III

III.4 Caractéristiques de la modulation

Nous avons déjà signalé que la MDI permet de réguler la puissance dans la charge. Le principe consiste à alimenter la branche résonante du circuit avec une tension alternative

carrée à la fréquence de résonance. Dans ces conditions, le circuit RLC série se comporte comme un dispositif entièrement résistif. La tension à ses bornes est alors en phase avec le courant qui le traverse. Il en résulte que la commutation des interrupteurs se fait au passage par zéro du courant.

Maintenant, on peut se demander, que se passe-t-il si l'on coupe l'alimentation de la branche RLC ?

Celle-ci va restituer l'énergie qui y est stockée, tant qu'il y a un chemin pour le courant. Le circuit ayant été alimenté à sa fréquence de résonance va continuer à osciller jusqu'à l'épuisement de l'énergie. La MDI prévoit le moyen de faire que le courant dans le circuit circule par lui-même, à l'aide d'un circuit de roue libre formé par les interrupteurs du pont onduleur. En d'autres mots, en absence d'alimentation fournie par la source, la branche RLC va s'autoalimenter jusqu'à ce que l'énergie précédemment emmagasinée se dissipe.

Le principe de la MDI est alors d'alimenter le circuit résonant avec des trains d'impulsions à la fréquence de résonance. Une série d'impulsions est suivie par des temps morts ou d'arrêt. Pendant ces instants, on laisse le courant parcourir le circuit en roue libre. C'est en variant le nombre d'impulsions et de temps d'arrêt qu'on réussit à régler la puissance fournie à la charge [10].

III.5 Types de la MDI

Deux types de modulation sont utilisés dans la commande des onduleurs à résonance, la MDI régulière et non régulière [8].

La MDI régulière présente le principe simple de la commande. En effet, pendant une période T =N Tr, on considère une période Ton (fonctionnement normal du l'onduleur) suivi directement d'une autre période Toff où on rate les cycles résonants (trous). La figure 3.2 (c) présente la forme de la tension illustrée par MDI régulière.

La MDI non régulière présente un nombre très grand de séquences partielles, ceci est dû aux choix de la position et de l'emplacement des trous. Dans ce cas, on choisit de rater les cycles d'une manière symétrique pendant une séquence T afin de diminuer l'amplitude des sous harmoniques au niveau de la charge (figure 3.2 (b)).

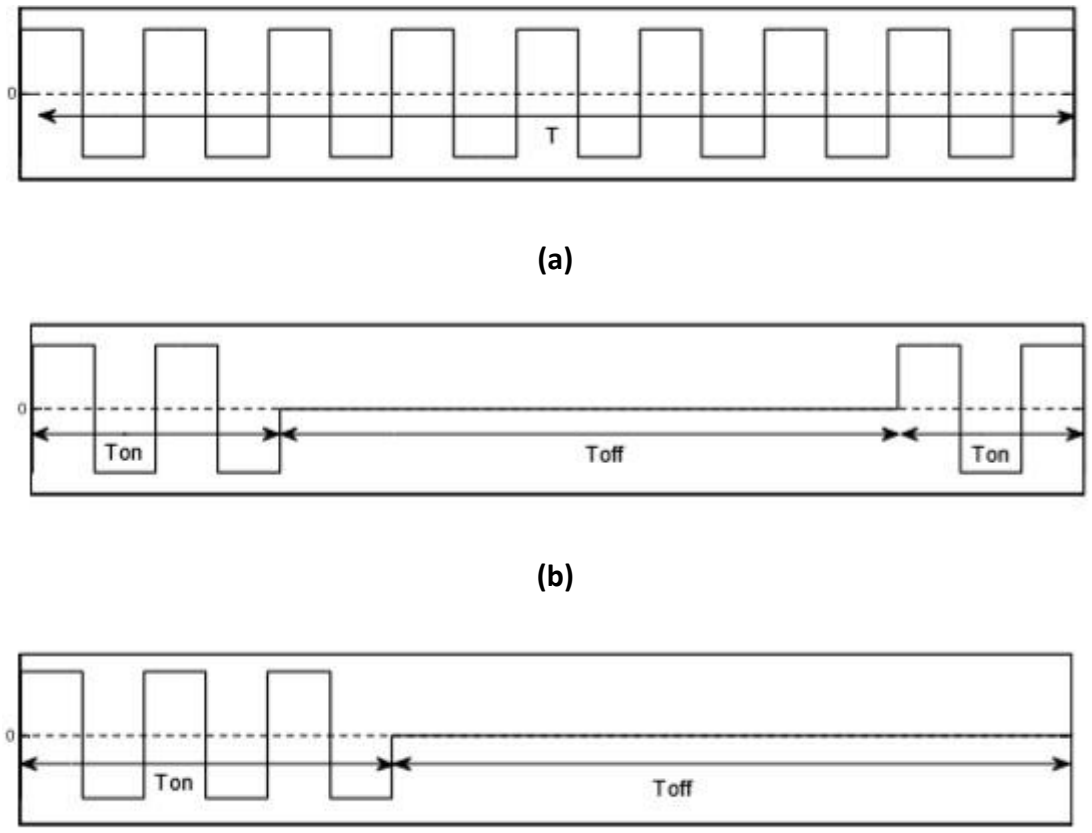


Figure (III.2) : Différents type de la MDI : (a) Pleine onde ; (b) MDI non régulière ; (c) MDI régulière

III.6 Etude analytique

Pour mieux appréhender le fonctionnement de la commande par modulation de densité d'impulsion (MDI), nous procédons à une analyse analytique afin de déterminer l'expression de la puissance au niveau de la charge.

III.6.1 Hypothèses

Apres avoir supposé que les interrupteur sont idéaux l'analyse sera développer en appliquant les deux hypothèses simplificatrice suivante :

Hypothèse de l'invariance de la tension d'alimentation de l'onduleur durant une séquence, c.-à-d. la tension à l'entrée de l'onduleur est supposée constante durant toute les séquences de la MDI ;

Hypothèse du premier harmonique, c'est-à-dire la tension en créneaux à la sortie de l'onduleur est réduite à sa composante fondamentale.

La démarche se compose de deux étapes : une étape de détermination du courant et une autre de calcul de la puissance de la charge [10].

L'expression du courant de la charge est établie suite à la résolution de l'équation:

$$l\frac{di}{dt}+\frac{1}{c}\int i\,dt+Ri=v(t) \qquad \text{(III.1)}$$

$$\frac{di}{dt}+\frac{R}{l}i+\frac{1}{lc}\int i\,dt=\frac{1}{l}v(t) \qquad \text{(III.2)}$$

Notons que :

$$\tau=\frac{2l}{R} \qquad \text{(III.3)}$$

$$w_r=\frac{1}{\sqrt{lc}} \qquad \text{(III.4)}$$

$$q=\frac{w_r l}{R} \qquad \text{(III.5)}$$

- $\boldsymbol{\tau}$: Constante de temps.

- $\boldsymbol{w_r}$: Pulsation du circuit résonant.

- **q** : Facteur de qualité du circuit résonant.

La décomposition de série Fourier de v(t) donne :

$$v(t)=\sum_{n=0}^{\infty} v_n \cos nwt+\varphi_n \qquad \text{(III.6)}$$

$$v_n=\sqrt{{A_n}^2+{B_n}^2} \text{ et } \quad \varphi_n=Arctg\left(-\frac{B_n}{A_n}\right) \text{ et } \quad v_0=\frac{A_0}{2} \qquad \text{(III.7)}$$

D'après le développement en série de Fourier fondamental de la tension peut s'écrire comme suit :

$$v(t) = \frac{4v}{\pi}\sin(w,t) \qquad \text{(III.8)}$$

En négligeant les tensions harmoniques l'équation (III.2) deviendra :

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{l}i + \frac{1}{lc}\int idt = \frac{1}{l}\frac{4v}{\pi}\sin(w_r t) \qquad \text{(III.9)}$$

$$\frac{di^2}{dt^2} + \frac{R\,di}{l\,dt} + w_r^2 i = \frac{4v}{\pi l}w_r\cos(w_r t) \qquad \text{(III.10)}$$

L'équation (III.10) est une équation de deuxième ordre. Pour la résoudre, il va falloir calculer la solution sans second membre (solution homogèneI_h) et la solution avec second membre (solution particulièreI_P).

Solution sans second nombre :

$$x^2 + \frac{R}{l}x + w_r^2 = 0 \qquad \text{(III.11)}$$

$$\Delta = \left(\frac{R}{l}\right)^2 - 4w_r^2 \qquad \text{(III.12)}$$

Notons que la commande du convertisseur se fait par la technique de modulation de densité d'impulsions MDI. La MDI fonctionne à la fréquence de résonance, ce qui implique que :

$$w_c = w_r = \frac{1}{\sqrt{lc}} \qquad \text{(III.13)}$$

A part les avantages de la commande MDI mentionnés ci-dessus, dans la référence [17], **AKAGI** fait l'hypothèse simplificatrice suivante :

$\frac{2w_r l}{R} = 2q \gg 1$ (III.14)

D'après (III.14) et on a :

$$\tau = \frac{2l}{R} = \frac{2q}{w_r}$$

Donc la solution de l'équation (III.11) devient :

$x = \frac{R}{2l} \pm jw_r$ (III.15)

La solution homogène i_{ch}(t) peut s'écrire sous la forme suivante :

$i_{ch}(\mathrm{t}) = \{A\cos(w_r t) + B\sin(w_r t)\}e^{-\frac{R}{2l}t}$ (III.16)

La solution particulière de l'équation (III.10) est :

$i_p(t) = \frac{4u}{\pi R} sin(w_r t)$ (III.17)

Solution générale

$i_{ch}(\mathrm{t}) = \{A\cos(w_r t) + B\sin(w_r t)\}e^{-\frac{R}{2l}t} + \frac{4u}{\pi R} sin(w_r t)$ (III.18)

Avec les conditions initiales :

$i(0) = 0$ et $\frac{di}{dt}(0) = 0$ (III.19)

Nous trouvons :

$A = 0$ et $B = -\frac{4u}{\pi R}$

Donc l'expression du courant i_{ch}(t) en pleine onde peut s'écrire sous la forme suivante :

$$i_{ch}(\mathrm{t}) = \frac{4u}{\pi R}\left(1 - e^{-\frac{R}{2l}t}\right) sin(w_r t) \qquad \text{(III.20)}$$

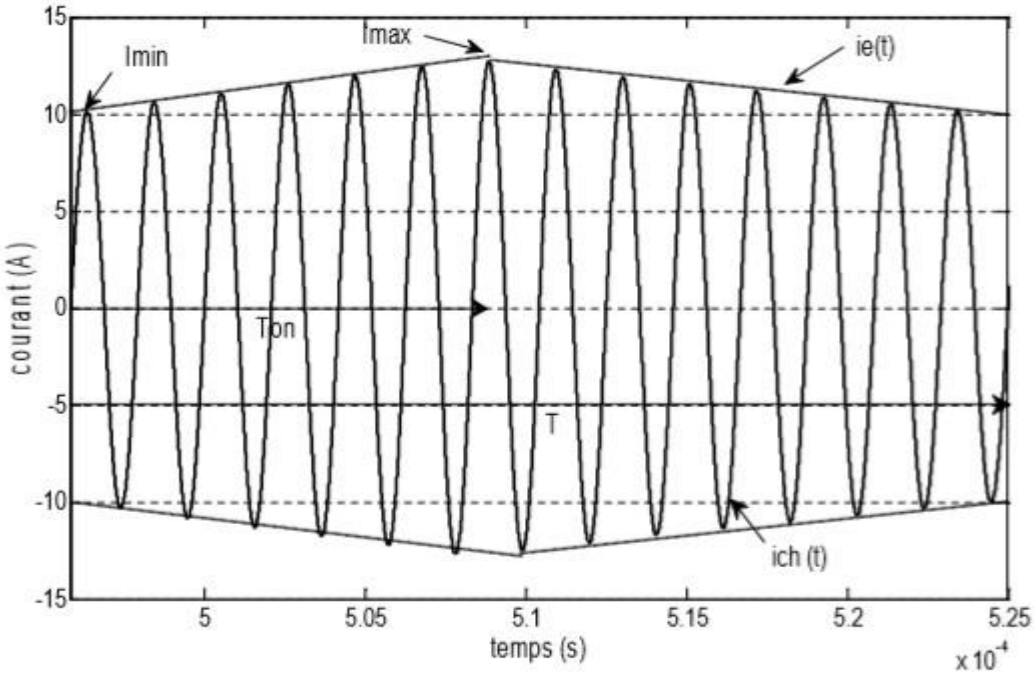


Figure (III.3) : forme du courant à la charge

Les formes d'onde représentées dans la figure (III.3) permettent de vérifier que le courant dans la charge subit des changements d'amplitude selon la séquence de modulation. Or, le courant$i_e(t)$ représente l'enveloppe du courant résonant$i_{ch}(t)$. Ce courant$i_e(t)$ a pourtant une constante de temps d'un système de premier ordre. Cette grandeur est alors calculée en utilisant [45] :

$$i_{ch}(t) = i_e(t)\, sin(w_r t) \qquad \text{(III.21)}$$

Avec :

L'enveloppe du courant résonant se calcule à partir de deux équations, une pour la période T_{on}(lorsque le circuit est alimenté par l'onduleur) et l'autre pour le reste du cycle $(T - T_{on})$On a alors:

$$\begin{cases} i_e(t) = A\left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}}\right) + B & 0 < \mathrm{t} < T_{on} \qquad \text{(III. 22)} \\ i_e(t) = C e^{\frac{t - T_{on}}{\tau}} & T_{on} < \mathrm{t} < \mathrm{T} \qquad \text{(III. 23)} \end{cases}$$

Cherchons A , B et C :

à$t = 0$ $i_e(0) = I_{min} = B$ (III. 24)

$t \longrightarrow \infty$ $i_e(\infty) = I = A + B$ (III. 25)

$t \longrightarrow T_{on} i_e(T_{on}) = C$ (III. 26)

D'après (III. 24), (III. 25)et (III. 26)l'expression de l'enveloppe du courant devient sous la forme suivante :

$$\begin{cases} i_e(t) = I\left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}}\right) + I_{min} e^{-\frac{t}{\tau}} & 0 < t < T_{on} \quad \text{(III. 27)} \\ i_e(t) = i_e(T_{on}) e^{-\frac{t - T_{on}}{\tau}} & T_{on} < t < T \quad \text{(III. 28)} \end{cases}$$

Avec :

I : Courant maximal de$i_e$dans le cas$\frac{T_{on}}{T} = 1$ où dans ce cas le convertisseurfonctionne en mode I et II, l'équation(III. 28) donne$i_e(t) = I$ en régime permanant.

I_{min} : La valeur de i_e à $t = 0$

Le calcul de I_{min} se fait en considérant l'égalité suivante en régime permanent :

$$i_e(t = 0) = i_e(t = T) \quad \text{(III. 29)}$$

$$I_{min} = \left[I\left(1 - e^{-\frac{T_{on}}{\tau}}\right) + T_{min} e^{-\frac{T_{on}}{\tau}}\right] e^{-\frac{T - T_{on}}{\tau}} \quad \text{(III. 30)}$$

Donc :

$$I_{min} = I \frac{1 - e^{\frac{T_{on}}{\tau}}}{1 - e^{\frac{T}{\tau}}} \quad \text{(III. 31)}$$

Si on fait la supposition que le facteur de qualité q du circuit résonant est infini $q \longrightarrow \infty$ alors ,τ tend vers l'infini, donc on trouve que l'amplitude du courant résonant est proportionnelle à la densité des impulsions :

$$\lim_{q\to\infty} i_e = I\,\frac{T_{on}}{T} \qquad \text{(III. 32)}$$

III.6.2 Expression de la puissance moyenne :

L'expression de la puissance s'écrit sous la forme suivante :

$$p = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)\, i_{ch}(t)\, dt \qquad \text{(III. 33)}$$

$$P = \frac{1}{T}\left(\int_0^{T_{on}} u(t)\, i_{ch}(t)\, dt + \int_{T_{on}}^{T} u(t)\, i_{ch}(t)\, dt\right) \qquad \text{(III. 34)}$$

On a :

$$u(t) = 0 T< \mathrm{t} < T_{on} \qquad \text{(III. 35)}$$

Donc :

$$\int_{T_{on}}^{T} u(t)\, i_{ch}(t)\, dt = 0 \qquad \text{(III. 36)}$$

Et :

$$p = \frac{1}{T}\int_0^{T_{on}} u(t)\, i_{ch}(t)\, dt \qquad \text{(III. 37)}$$

En utilisant l'expression du courant (III.21).on trouve que la puissance moyenne peut s'écrire sous la forme suivante :

$$p = \frac{1}{T}\int_0^{T_{on}} u(t)\, i_e \sin(w_r t)\; dt = \frac{4\,u}{\pi\, T}\int_0^{T_{on}} i_e sin^2(w_r t)\, dt \qquad \text{(III. 38)}$$

En utilisant le principe de la commande MDI (la commande des interrupteurs par rapport aux passages par zéro du courant) et l'hypothèse simplificatrice proposée par Akagi(III.14), on peut simplifier l'expression de la puissance, donc le développement de

l'équation ci-dessus avec (III.27)et(III.28)donne l'expression simplifiée de la puissance moyenne fournie à la charge est :

$$P = P_{max}\left[\frac{T_{on}}{T} - \frac{\tau}{T}\left(\frac{1 - e^{-\frac{T_{on}}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}}\right)\left(e^{-\frac{T_{on}}{\tau}} - e^{-\frac{T}{\tau}}\right)\right] \qquad (III.39)$$

Avec :

$$P_{max} = \frac{2}{\pi} u\, l \qquad (III.40)$$

Pour mieux simplifier l'expression de la puissance, deux autres hypothèses peuvent êtres rajoutées [17] :

Première hypothèse : la période de fonctionnement de la MDI $(T = NT_r)$ est très inférieure à la période de l'enveloppe τ $(T \ll \tau)$:

Le circuit RLC est peu amorti. Dans ce cas, l'amplitude du courant résonant est proportionnelle à la densité d'impulsions, et la puissance de sortie aura une expression qui est proportionnelle au carré de densité d'impulsions.

$$\lim_{\tau \to \infty} P = P_{max} D^2 \qquad (III.41)$$

Avec :

$$D = \frac{T_{on}}{T} \qquad (III.42)$$

Deuxième hypothèse : la période de fonctionnement de la MDI $(T = NT_r)$est très supérieure à la période de l'enveloppe τ $(T \gg \tau)$:

Le circuit RLC est moins amorti. La puissance de sortie deviendra proportionnelle à la densité d'impulsions.

$$\lim_{\tau \to \infty} P = P_{max}\, D \qquad (III.43)$$

III.7 Etude par simulation numérique :

Le bloc de commande MDI des interrupteurs est réalisé à l'aide d'une table (N lignes, 2*N colonnes) capable de générer une période T de N cycles carrés, la période de chaque cycle est égale à la période de résonance. Nous étudierons une commande MDI régulière, deux séquences seront traitées N =16. Le programme simulation permet de tracer les différentes formes d'ondes de courant et de la tension aux bornes de l'onduleur, les signaux de commande ainsi que la plage et les valeurs de la puissance.

Les paramètres du circuit de simulation sont les suivants :

- Tension d'entrée E = 15v;

- Résistance R=4 ;

- Inductance de résonance L=700µH;

- La capacité de résonance C =900 e-7 F ;

- Fréquence de commutation Fr =400 Hz ;

III.7 Résultats de simulation

Les figures III.4 et III.5 présentent les signaux de Commande donnée par Matlab/Simulink

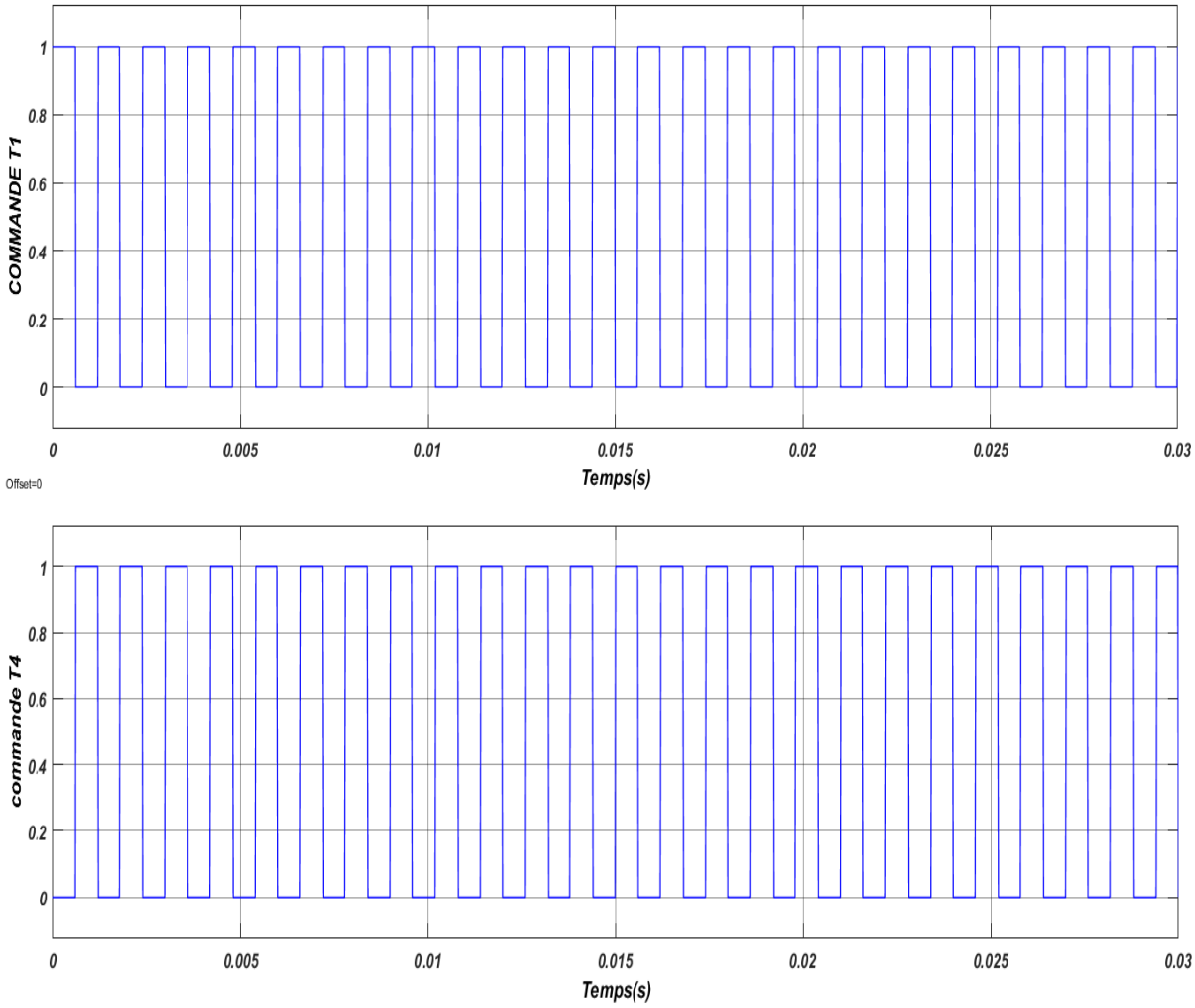


Figure (III.4) : Signaux De Commande Des Transistors T1 Et T4

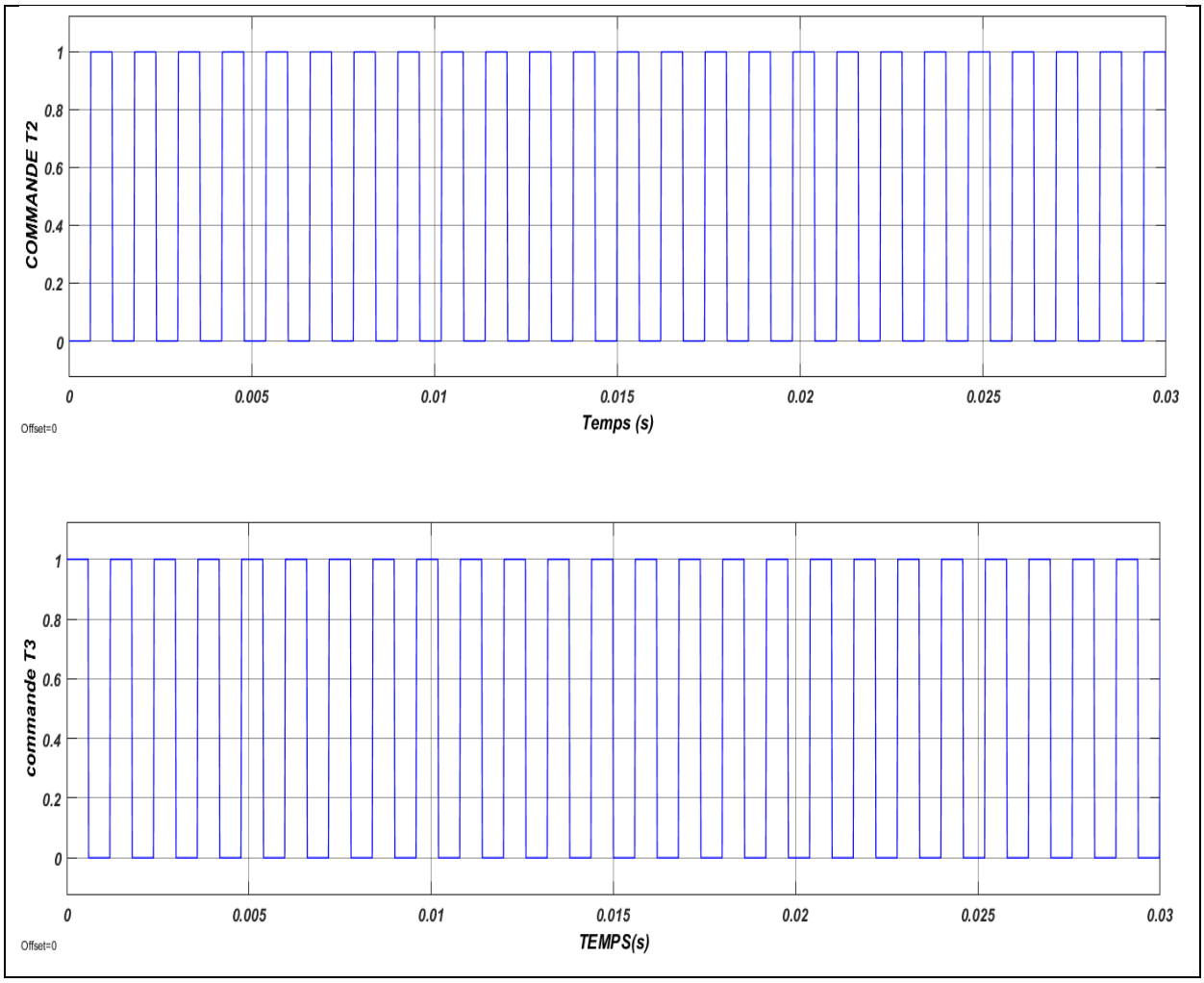


Figure (III.5) : Signaux de commande des transistors T2 et T3

Les figures III.6 et III.7 présentent les signaux de tensions et courants de sortie donnée par Matlab/Simulink avec modification des paramètres de charge.

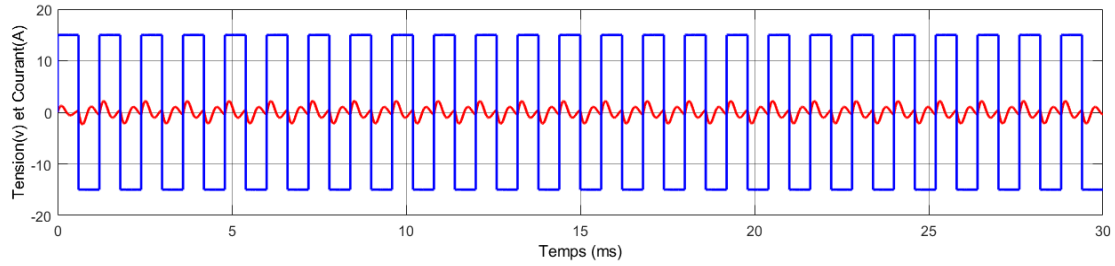


Figure (III.6) : signale de tension et courant de sorties (R= 4 Ω, C = 90e-7 F)

Nous avons observé que le courant électrique présente une valeur négligeable par rapport à la tension, et que le courant n'est pas en phase avec la tension.

- Après avoir changé les valeurs de R= 0.5 Ω et C = 90e-9 F, on obtient la courbe suivante :

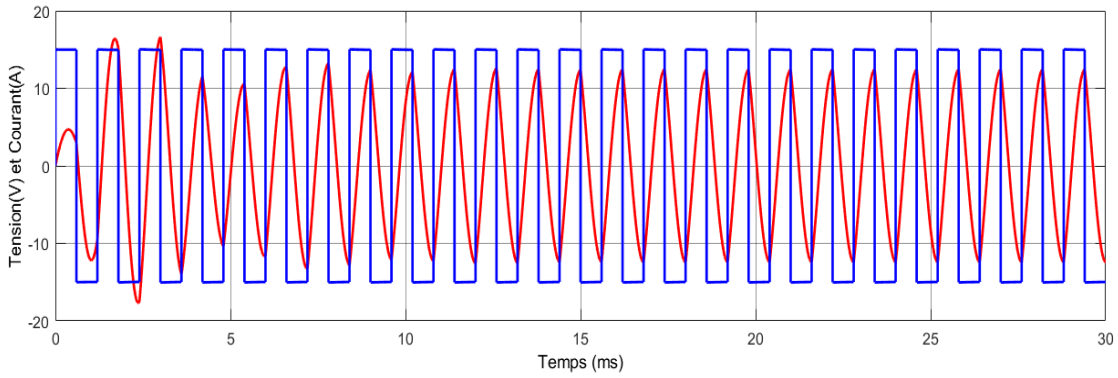


Figure (III.7) : signale de tension et courant de sorties (R=0.5 Ω)

L'analyse de la courbe indique une augmentation significative de la valeur du courant électrique par rapport à la valeur de la tension, et que la courbe de courant ne coïncide pas avec la courbe de tension. On peut affirmer que les composants électriques utilisés, tels que la résistance du circuit R et la capacité C, ont une forte influence sur la relation courant-tension. Il peut y avoir des influences supplémentaires de l'environnement ou des conditions d'application dans lesquelles le circuit est testé. Il est possible qu'un changement de la valeur de R et C entraîne une augmentation du flux de courant et un changement de phase entre le courant et la tension. Pour une compréhension plus précise, il peut être envisagé d'explorer et d'étudier les effets potentiels de ces composants et conditions supplémentaires associés au circuit simulé , Au début, la valeur du courant électrique était I = 16 A après cinq secondes, le courant diminuait et se stabilisait aux valeurs de I = 11 A .

- Après avoir changé les valeurs de R= 1.5 Ω et C = 900 e-9 F, on obtient la courbe suivante :

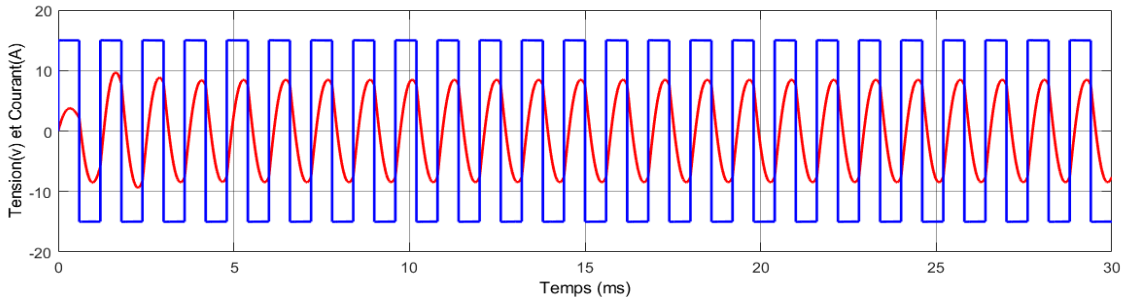


Figure (III.8) : signale de tension et courant de sorties(R= 1.5 Ω)

dans ce cas , il est observable qu'en augmentant la valeur de la résistance, une amélioration initiale se manifeste dans les courbes respectives du courant électrique que nous étudions, tout en étant en corrélation avec la courbe de tension électrique , et la valeure du courant électrique I = 9 A. voir figure (III.8).

- Après avoir changé les valeurs de R = 4Ω et C = 900 e-9 F, on obtient la courbe suivante :

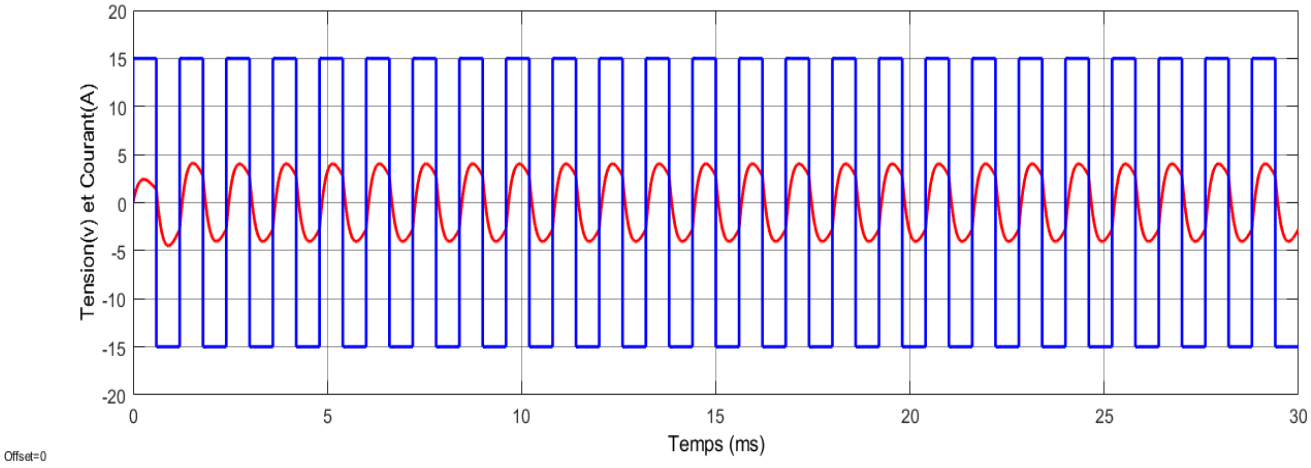


Figure (III.9) : signale de tension et courant de sorties (R=4Ω)

Après de multiples tests et ajustements des valeurs de résistance, nous avons remarqué qu'à une valeur spécifique p = 4, la courbe de courant électrique correspond de manière significative à la courbe de tension électrique, et la valeure du courant électrique I = 4 A

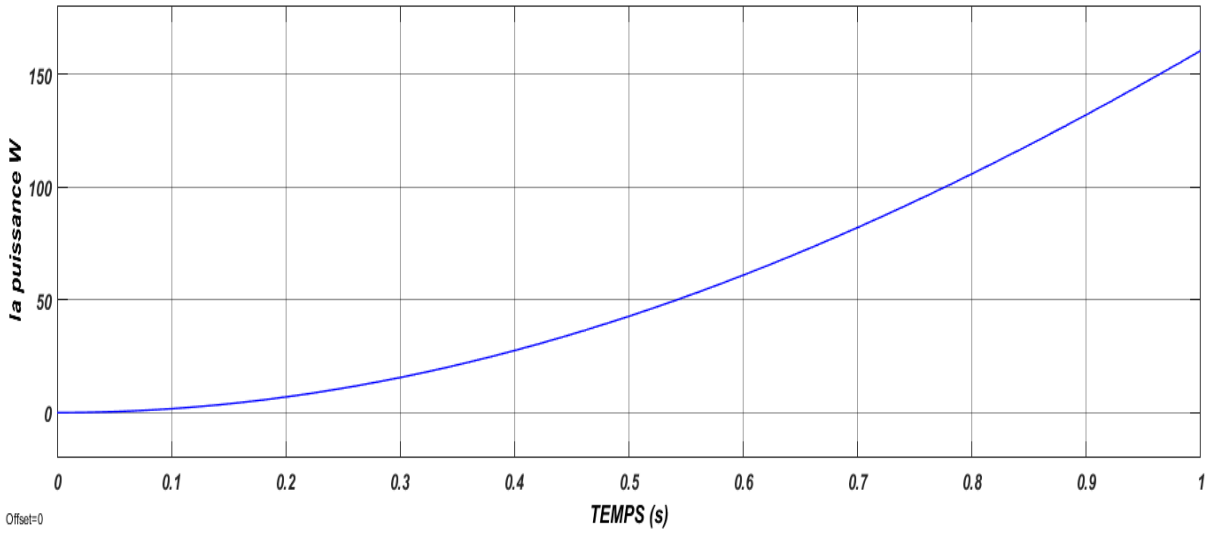


Figure (III.10) : La courbe de la puissance électrique.

Dans la figure (III.10), la puissance augmente de façon continue. Et on remarque bien qu'a une seconde de fonctionnement on dépasse les 150 W.

Conclusion

La modulation de densité d'impulsions est en effet une technique appropriée pour la commande des convertisseurs à résonance utilisés dans le chauffage par induction. Cette technique exploite le fait que, à la résonance, le courant et la tension dans la charge sont en phase, ce qui permet de commuter les interrupteurs au passage par zéro du courant sur une large plage de puissance de sortie.

La technique de modulation de densité d'impulsions (MDI) a été développée pour surmonter les limitations des méthodes de commande classiques. Une approche efficace consiste à commander les interrupteurs en fonction du passage par zéro du courant sur une large plage de variation de la puissance de sortie. La MDI fonctionne également à une fréquence fixe, généralement égale à la fréquence de résonance du système.

En utilisant la MDI, les interrupteurs sont commutés de manière à optimiser l'efficacité de la conversion d'énergie. Lorsque le courant et la tension sont en phase à la résonance, cela permet de réduire les pertes d'énergie et d'améliorer l'efficacité globale du convertisseur.

L'avantage de la MDI est qu'elle offre une meilleure régulation de la puissance de sortie et permet une meilleure adaptation à des variations de charge. Elle permet également de réduire les harmoniques de courant, ce qui peut être bénéfique pour le chauffage par induction.

En résumé, la technique de modulation de densité d'impulsions (MDI) est une approche avancée de commande des convertisseurs à résonance. Elle permet de surmonter les inconvénients des méthodes de commande classiques en optimisant l'efficacité énergétique, en offrant une meilleure régulation de la puissance de sortie et en réduisant les harmoniques de courant.

Chapitre IV

Réalisation pratique

IV. Introduction

Nous présentons dans ce mémoire un schéma du montage Figure IV.1 pour réaliser un petit chauffage par induction contrôlé par Arduino. Le chauffage fonctionne en utilisant une bobine d'induction alimentée par un onduleur qui opère dans une plage de fréquence entre 10 et 100 kHz. L'onduleur est capable de fournir une puissance d'environ quelques dizaines de watts. L'alimentation utilisée est une alimentation de laboratoire de très basse tension, inférieure à 30 V.

Ce petit chauffage a été conçu dans le but de réaliser des expériences permettant d'étudier le chauffage par induction en lui-même, ainsi que d'explorer divers phénomènes thermiques.

Dans un premier temps, le document examine un onduleur à circuit LC série, puis il présente l'onduleur à circuit LC parallèle qui est considérablement plus efficace et mieux adapté à l'utilisation d'une alimentation de laboratoire.

IV.1. Onduleur avec circuit RLC série

IV.1.1. Principe

L'onduleur plein onde est construit autour d'un hacheur en pont complet, composé de 4 interrupteurs. Les interrupteurs sont contrôlés par un signal carré de rapport cyclique 1/2, dont la fréquence f est comprise entre 10 et 100 kHz.

La charge est un circuit RLC série, où l'inductance L correspond à la bobine utilisée pour le chauffage. Le condensateur est sélectionné de manière à obtenir une fréquence de résonance en courant de plusieurs dizaines de kHz. La fréquence du signal de commande est ajustée pour être aussi proche que possible de cette fréquence de résonance.

IV.2. Réalisation

Nous utilisons le pont MOSFET L6203 de ST Microélectroniques, initialement conçu pour alimenter un moteur, mais qui est bien adapté à notre application car sa fréquence de commutation peut atteindre 100 kHz et sa capacité de courant peut atteindre 4 A.

Voici le schéma du montage :

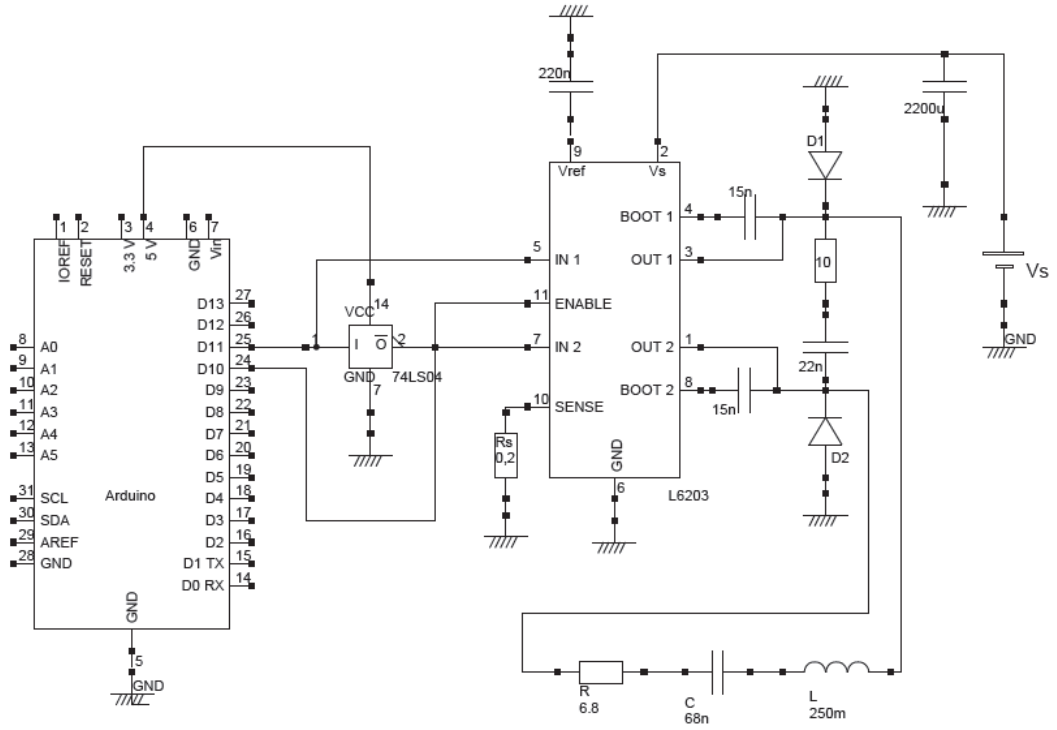


Figure IV.1 : schéma du montage

La bobine L, le condensateur C et la résistance R sont connectés en série entre les bornes de sortie OUT1 et OUT2 du pont MOSFET. La sortie D11 de l'Arduino MEGA (ou D9 pour un UNO ou un YUN) pilote directement l'entrée IN1 du pont, tandis que l'entrée IN2 est pilotée par une porte NON.

Il est nécessaire d'utiliser une alimentation stabilisée en tension avec une tension Vs d'au moins 12 V pour assurer le bon fonctionnement du pont.

Le circuit RLC est préalablement étudié à faible courant à l'aide d'un GBF (générateur basse fréquence), ce qui permet d'obtenir la fréquence de résonance en courant et ainsi d'estimer la valeur de L. La bobine a une résistance interne de 0,6 Ω en continu.

Une résistance de puissance R de 6,8 Ω, de type radiateur (résistance bobinée), a été utilisée.

Les expériences ci-dessous ont été réalisées avec un condensateur polyester ordinaire. Cependant, il s'est rapidement échauffé et s'est détérioré lorsque nous avons tenté de réduire la résistance pour augmenter le courant. Étant donné que le condensateur est soumis à des tensions élevées, de l'ordre de 100 V en l'absence de charge, il est nécessaire d'utiliser un type de condensateur capable de supporter une tension alternative de l'ordre de 50 kHz à ce niveau de tension. Des condensateurs à film de polypropylène métallisé de grande capacité adaptés à cette utilisation sont disponibles (par exemple, Kemet ou Epcos).

IV .3. Programme arduino :

onduleurChauffageInduit.ino

```
#include "Arduino.h"

#define ENABLE 10

#define TE_MESURES 1000 // microsecondes

#define N_MESURES 250

#define AREF 4.85

#define RESISTANCE 6.8

#define DIVISEUR 2

   uint32_t icr;

   float period_pwm;

   uint16_t diviseur[6] = {0,1,8,64,256,1024};

   volatile uint32_t inter2;

  float somme;

  fluât moyenne;

  Flat Ieff;

  Char réglage;
```

La fonction suivante programme le timer1 pour qu'il génère un signal PWM. La période est un flottant en microsecondes. Le rapport cyclique est un flottant entre 0 et 1.

```
void init_pwm_timer1_fixe(float period, float ratio) { // rapport cyclique fixe, period en 1/100 us
     char clock Bits;
   TCCR1A = 0;
   TCCR1A |= (1 << COM1A1); //Clear OC1A on compare match when up counting, set OC1A on compare match when down counting
   TCCR1B = 1 << WGM13; // phase and frequency correct pwm mode, top = ICR1
   Int d = 1;
   ici = (F_CPU/1000000*période/2);
   white ((ici>0xFFFF)&&(d<6)) { // choix du diviseur d'horloge
      d++;
      icr = (F_CPU/1000000*période/2/diviseur[d]);
  }
  cloc kbits = d;
  ICR1 = icr; // valeur maximale du compteur
  OCR1A = ratio*icr;
  OCR1B = icr;
  TCNT1 = 0; // mise à zéro du compteur
  TCCR1B |= cloc kbits; // déclenchement du compteur
}
```

La fonction setup configure en sortie les bornes D10 (ENABLE) et D11 ou D9 suivant le modèle d'ardin. La période du signal de commande est choisie (en microsecondes).

```
void timer2_init (uint32_t période) { // compteur 8 bits
  TCCR2A = 0;
  TCCR2B = 0;
  TCCR2B |= (1 << WGM21); // mode CTC avec OCR0A pour le maximum
  uint32_t top = (F_CPU/1000000*period);
   int clock = 1;
   while ((top > 0xFF)&&(clock<5)) {
   clock ++;
   top = (F_CPU/1000000*period/divisor[clock]);
  }
  OCR2A = top; // période
  TIMSK2 = (1 << OCIE2A); // interruption lorsque TCNT0 = OCR0A
  inter2 = 0;
  TCCR2B |= clock;
}
void adc_init(uint8_t prescaler) {
  ADCSRA = 0;
  ADCSRA |= (1 << ADEN);
  ADCSRA |= prescaler;
  ADMUX = 0b01000000 | 0; // voie 0
```

```
  ADCSRB = 0;
}

ISR(TIMER2_COMPA_vect) {
    ADCSRA |= 0b01000000;
    while (ADCSRA & 0b01000000);
    float x = ((ADCL | (ADCH << 8))*AREF/1024);
    somme += x;
    inter2++;
    if (inter2==N_MESURES) {
      inter2 = 0;
      moyenne = somme/N_MESURES;
      Ieff = sqrt(moyenne*10*DIVISEUR)/RESISTANCE;
      somme = 0.0;
    }
}

void setup() {
     Serial.begin(9600);
     pinMode(ENABLE,OUTPUT);
     digitalWrite(ENABLE,LOW);
#if defined(__AVR_ATmega2560__)
     pinMode(11,OUTPUT); // sortie PWM pour MEGA
```

```
#else
   pinMode(9,OUTPUT); // sortie PWM pour UNO
#endif
   period_pwm = 31.0; // en microsecondes
   somme = 0.0;
   inter2 = 0;
   adc_init(4);
   timer2_init(TE_MESURES);
   init_pwm_timer1_fixe(period_pwm,0.5);
   digitalWrite(ENABLE,HIGH);
   reglage = 1;
}
void loop() {
   delay(3000);
   if (reglage) {
     for (period_pwm=20; period_pwm<30; period_pwm+=0.2) {
       init_pwm_timer1_fixe(period_pwm,0.5);
       delay(1000);
       Serial.println(String(period_pwm)+" "+String(Ieff));
     }
   reglage = 0;
   }
```

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le but de ce mémoire était d'analyser et de modéliser un système de chauffage à induction utilisant un onduleur et une nouvelle technique de modulation de densité d'impulsions, et de réaliser une simulation numérique de ce système. L'onduleur sélectionné pour cette application était un onduleur à résonance série en pont complet qui fonctionne à haute fréquence.

Pour atteindre notre objectif, nous avons commencé par réaliser une revue de littérature approfondie basée sur des références récentes, afin de présenter les principes de fonctionnement, les caractéristiques et les différentes applications du chauffage à induction. Ensuite, nous avons étudié les structures et les principes de fonctionnement des onduleurs à résonance monophasés. De plus, nous avons effectué une simulation numérique des principales techniques de commande conventionnelles. Les résultats obtenus ont démontré que ces techniques (commandes simultanée) permettent une régulation directe et rapide de la puissance, mais ne garantissent pas toujours des commutations au passage par zéro de la tension ou du courant. Cela entraîne des pertes par commutation et un mauvais facteur de puissance.

Pour remédier aux limitations des méthodes de commande classiques, nous avons proposé la technique de modulation de densité d'impulsions (MDI). Nous avons introduit cette technique en commençant par une présentation générale, puis nous avons réalisé une étude analytique afin de déduire les expressions de la puissance au niveau de la charge, en tenant compte des hypothèses simplificatrices du système étudié.

Nous avons développé un programme de simulation numérique dans l'environnement MATLAB pour modéliser le système de l'onduleur-charge commandé par la technique de modulation de densité d'impulsions (MDI). La partie relative à la puissance de l'onduleur et de la charge a été mise en œuvre dans l'environnement Matlab-SimpowerSystems.

La partie de commande a été implémentée dans l'environnement Matlab-Simulink en utilisant une table matricielle (avec N lignes et 2*N colonnes) capable de générer N signaux ayant une période T, où chaque cycle a une durée égale à la période de résonance.

Les signaux de commande sont transmis aux interrupteurs de l'onduleur, qui permettent le blocage et le passage du courant vers la charge. Du côté de la charge, nous avons ajouté un

transformateur à la sortie de l'onduleur afin d'adapter la charge à son alimentation, dans le but d'obtenir des courants appropriés.

Plusieurs essais de simulation ont été réalisés, et les résultats des formes d'onde du courant et de la tension au niveau de la charge ont été présentés. Les résultats de la puissance démontrent clairement la capacité de modifier la puissance de chauffage sur une

large plage de commande en fonction des besoins. Une comparaison entre les résultats de simulation et ceux obtenus à partir des expressions analytiques a révélé une bonne concordance, ce qui nous assure de la validité de notre modèle de simulation.

Cette étude a démontré que la technique de modulation de densité d'impulsions (MDI) est une solution prometteuse pour développer des onduleurs à résonance permettant une large variation de la puissance de chauffage. Cette technique améliore l'efficacité énergétique et réduit le bruit électromagnétique.

Dans une perspective future, il serait souhaitable de réaliser une expérimentation d'un système de chauffage à induction (avec l'onduleur et l'inducteur) afin de tester différents types de commandes, en particulier la commande MDI.

[1]- «Induction Heating: Principles, Methods, and Applications » by Frank Curtis, Pearson Education, 2010.

[2] **LEE, C. Q., & CHEN, J. F**. (2018). Power ElectronicsHandbook: Devices, Circuits, and Applications. CRC Press.

[3] **Hideaki Fujita et Hirofumi AKAGI** « Pulse-density modulated power control of a 4kw,50 kHz voltage-source inverter for induction melting applications» IEEE Transactions onIndustry Applications, vo1.32, No.2, Mars / Avril 1996, pp 279-286

[4] **MAURICE ORFEUIL**« Electrothermie industrielle » Paris Dunod 1981. Principe.

[5] **S. L. SEMIATIN** et **D.E. STUTZ**« Induction heat treatment of steel » Metals Park, OhioAmerican Society for Metals 1986, États-Unis.

[6] **MAANANI YACINE**« Alimentation des systèmes de chauffage par induction par convertisseurs a résonance » Thèse de MagisterConstantine 2014.

[7] S. L. Semiatinet D.E. Stutz « Induction heat treatment of steel » Metals Park, OhioAmerican Society for Metals 1986, États-Unis.

[8] **M.HABI, B.KHENGUAOUI**, « Simulation d'un électroaimant », Université K. MERBEH Ouargla, 09/06/2015.

[9] **J. CALLEBAUT**, « Chauffage par induction », Laborelec, Edition aout 2007.

[10] **P.AURIOL**, **N.BORAIS**, «Comptabilité électromagnétique en chauffage par induction, partie A : corps humain », Congrès internationale, Induction dans les procédés industriels, Paris, France 1997.

[11] **G.DEVELY**, « L'induction : effets thermiques et mécaniques .rappelles des bases théoriques » congrès internationale, induction dans les procédés industriels, paris, France 1997

[12] **V. LABBE**, « Modélisation numérique du chauffage par induction : approche éléments finis et calcul parallèle », Mécanique [physics.med-ph], École nationale supérieure des mines de paris, 2002. Français.

[13] **J.LIGNON**, **G-FUCHS**, « Nouveau cours d'électricité pratique », Delagrave, Evreux, France, Aout 1983.

[14] **H. FRAUDET**, **F. MILSANT**, « Cours d'électricité »,Dixième édition, paris France ,1981.

[15] **S.WANSER,**«Simulationdesphénomènesdechauffageparinduction– Applicationàlatrempesuperficielle»,Thèsededoctorat,Ecole Centralede Lyon,1995.

[16] **VICTOR PASCHKIS**« Les fours électroniques industriels » Dunod. Paris 1952.

[17] **HUGO CALLEJA**et**JOEL PACHECO**« Power distribution in pulse-density modulatedwaveforms » IEEE Power Electronics Specialists Conference 2000, pp. 1457-1462.

[18] **JEANT CALLBAUT**« Guide Power Quality, section 7 : Efficacité Energétique ».www.leonardo-energy.org/france. (Edition Aout 2007).

[19] **INRS**, « Champs électromagnétiques – Le chauffage par induction électromagnétique», ED 4211, Juin 2012.

[20] **A.BECKER, PH. DEMARET, P. DONATI,** « Champs électromagnétiques éd 4211 » INRSLorraine juin 2012.

[21] **G. DEVELY**, «Chauffage par induction électromagnétique : Technologie », Techniquede l'ingénieur, traité Génie électrique, D 5 936,

[22] **OLIVIER PERROT**« Cours d'électrothermie» I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque 2010-2011.

[23]**Y.S.KNOW,S.YOO**and**D.S.HYUN**« Half-BridgeSeriesResonantInverterforInduction Heating Applications with Load-Adaptive PFM Control Strategy » IEEEJournal, pp. 575-581.

[24] **JAQUES NUNS**, **JEAN -LOUIS PEUREUX**« Chauffage par induction : principe et critères de choix des convertisseurs de fréquence » Ref N°5 Mai 2004.

[25] **J. P. FERRIEUX et F. FOREST**, « Alimentations à découpage - Convertisseurs à résonance »,Masson, Paris, (1994)

[26] **GERARD DEVELEY «** technique de l'ingénieur », D 5 935

[27] «http://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/series-resonance.html »

[28] **KIYOSHI IZAKI , HIDEKAZOU YAMASHITA, HIDEKI**Omori « A novel high-frequency ZVSPWMinverter for multi-burners induction heating appliance » IEEE Power Electronicsand Variable Speed Drives, 21-23 September 1998, pp. 656-661.

[29] **YVON CHERON**« La commutation douce dans la conversion statique de l'énergieélectrique » Paris Technique et documentation-Lavoisier 1989.

[30] **GUY SEGUIER**et **FRANCIS LABRIQUE**« Les convertisseurs de l'électronique de puissance, Laconversion continu-alternatif» Technique et documentation-Lavoisier Paris 1989.

[31] **JEAN-PAUL FERRIEUX**et **FRANÇOIS FOREST**« Alimentations à découpage, convertisseurs àrésonance : principes - composants - modélisation » Paris Masson 1994.

[32] **GUILLERMO MARTIN SEGURA**«Induction heating converter's design, control and modelingapplied to continuous wire heating» Doctoral these, university Politecnica deCatalunya Barcelona. juin 2012.

[33] **N. MOHAN, T.M UNDELAND** et**W. ROBINS**, « Power electronics, converter, applicationand design », By J. Wiley and Sons, Inc Singapore (1989).

[34] **P. KARLSON**, « Quasi resonant DC link converters: analysis and design for a batterycharge application » LUND, (1999).

[35] **J.P FERRIEAU, F. FOREST**, « Alimentations à découpages et convertisseurs à résonances »DUNOD, (1999).

[36] **ALEXANDRE TOURAINE**«chauffage par induction électromagnétique». Techniquesd'ingénieur. Réf D828 V1, 10 juin 1984.

[37] «Onduleur de tension : mise en œuvre et Structures-principes-applications». Techniques d'ingénieur, Traité de génie électrique D.3176-3177.

[38] «Onduleurs et harmoniques » Cahiers techniques Merlin Gerin N°159.

[39] **T. WILDI**« Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999) »

[40**] H. AKAGI, T. SAWAE ET A. NABAE**, «130 kHz, 7,5 kW current source inverter using static induction transistors for induction heating application », IEEE Trans power electronics, vol

[41] **G. DEVELY**, «Chauffage par induction électromagnétique : principes », Technique del'ingénieur, traité Génie électrique, D 5 935, pp. 1-22.

[42] **DAMASSON, J. LOUIS**, « Cours d'électrotechnique 2 : traitement de l'énergie électrique »,, ISBN 2701108578,Belin,. 19843, (july 1988).

[43] **MAANANI YACINE**« Alimentation Des Systèmes De Chauffage Par Induction ParConvertisseurs à Résonance.» .Mémoire de Magister univ.Constantine 2014

[44] **LOUNAS FATMA**« Calcul des Pertes dans les Convertisseurs Statiques, Application duModèle Moyen et du Modèle Instantané » Mémoire de magistère, UMMTO.

[45] **LAMB, H**. 1883. On electrical motions in a sphericalconductor. Philosophical Transactions of the Royal Society, vol. 174, 519-549 p.

[46] **HELALI HASSAN**« Méthodologie de pré - dimensionnement de convertisseurs depuissance : Utilisation des techniques d'optimisation multi- objectif et prise en comptede contraintes CEM » Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquéesde Lyon, Novembre 2006.

[47] **PIERRE BROSSELARD**« Conception, Réalisation et Caractérisation d'interrupteurs(thyristors et JFETs) haute tension (5kV) en carbure de silicium» Thèse de doctorat del'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, décembre 2004.

[48] http://djelectro71.com/theories-mosfet-canal-n-et-canal-p/

[49] http://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/unip/unip810.htm

[50] **H. HENAO, G.A. CAPOLINO, J.A. MARTINEZ-VELASCO**,«A new structure of fuzzyhysteres is current controller for vector controlled induction machine drives », Proceedings of IEEEconference on power electronics, 1996, pp. 708-712, (1996).

[51] **Y. CHERON**, « La commutation douce dans la conversion statique de l'énergie électrique », Tec et Doc, (1989).

[52] http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89 l'elctronique de puissance.

[53] **B. ADNANI** « Modélisation et Contrôle des Convertisseurs à Résonance : Application au Chauffage par Induction » Thèse de Magister de l'université de Batna. (2010).