

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

*Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique*

*Université Echahid Hamma Lakhdar – EL OUED*



Faculté des Technologies

Département d'Electrotechnique

Mémoire de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Master en Electrotechnique

Option : Commande Electrique

Par MOHAMED CHERIF DAIA EDDINE OUSSAMA

---

***ETUDE, CONCEPTION ET REGULATION OPTIMALE  
(LQR)  
D'UN FOUR PAR INDUCTION***

---

soutenue le 04 / 06 / 2018

Devant le jury composé de:

PRÉSIDENT

Dr. ZALOUMA Laid

Université de El Oued

RAPPORTEUR

Prof. ALLAG Abdelkerim

Université de El Oued

EXAMINATEUR

Dr. TIR Zoheir

Université de El Oued

**2017/2018**

# ***REMERCIEMENTS***

Le plus grand merci revient à Dieu qui lui seul m'a guidé dans le bon sens durant ma vie, et qui m'a aidé à réaliser ce modeste travail.

Je tiens à remercier particulièrement mon encadreur Mr. **ALLAG ABDELKARIM** professeur à l'Université Hamma Lakhdar d'El Oued pour l'intérêt qu'il a apporté pour ce travail ainsi qu'aux conseils donnés.

Mes sincères remerciements s'adressent également à messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me feront en participant au jugement de ce travail.

Je tiens à remercier vivement toute personne qui m'a aidée, de près ou de loin, à élaborer et réaliser ce mémoire surtout HAMIDANI BILLAL, ZEGHIB OKBA, NABIL ABIDI et CHERIFI HAKIMA.

J'aimerais à présent remercier mes proches et en premier lieu mes parents de m'avoir soutenu et d'avoir cru en moi. Je remercie aussi toute ma famille.

Mes remerciements vont également à mes amis, mes collègues et mes enseignants.

Enfin, tous ceux et celles qui m'ont aidé et soutenu durant tout mon parcours qu'ils trouvent ici l'expression de mes remerciements les plus sincères.

*A ma très cher Mère, dont le sacrifice, l'amour, la patience, le Soutien,  
l'encouragement et les prières sont l'essence de ma Réussite. Merci d'être si  
fiers de moi.*

*A mon cher Père,*

*A mon frère AKRAM*

*A ma grand-mère*

*A la mémoire de mes grands-parents*

*A tout ma famille*

*A mes chers amis*

*À ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée de mes études,*

*Je dédie ce mémoire.*

# NOTION SYMPOLIQUE

A: Anode d'un diode.

A: matrice d'état.

B: La base d'un transistor bipolaire.

B: matrice de commande.

C: collecteur d'un transistor bipolaire.

C: matrice d'observation.

C: capacité de filtrage de redresseur [F].

$C_f$ : capacité de filtrage [F]

$C_r$ : capacité de résonance parallèle [F].

c: La chaleur massique de la pièce [J/Kg.C].

D: drain d'un MOSFET.

D: diamètre de l'inductance [m]

$D_p$ : Diamètre du la pièce [m].

$D_{1,2..4}$ : diode de redressement.

D: matrice d'action direct.

$d_0$ : le profondeur de pénétration [m]

E: émetteur d'un transistor bipolaire.

E: les pôles du système.

f : Fréquence [Hz].

$f_r$ : fréquence de résonance [Hz]

G: la grille d'un MOSFET.

H: l'hauteur de l'inductance [m]

$H_p$ : Hauteur du la pièce [m].

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

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

$i_c$ : le courant dans la capacité [A]

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

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

J: critère d'optimisation.

K: vecteur de gain.

k: cathode d'un diode.

$L_f$ : inductance de lissage [H].  
 $L_p$ : l'inducteur [H].  
 $L$ : l'inductance [H].  
 $L_A$ : inductance d'adaptation [H].  
 $L_s$ : L'inductance série équivalent de  $L_p$  [H].  
 $m$ : L'indice de modulation.  
 $m$ : La masse de la pièce [Kg].  
 $\eta$ : le rendement du système.  
 $n_1$ : nombre de spire de l'inducteur.  
 $n_2$ : nombre de spire de la secondaire.  
 $P$ : la solution de l'équation de Ricatti  
 $P_c$ : La puissance de chauffage [w].  
 $P$  : Puissance transmise à la charge [w].  
 $P_i$  : Puissance dissipée dans l'inducteur [w].  
 $Q$ : matrice de pondération  
 $Q_s$ : facteur de qualité.  
 $RA$ : réseaux d'adaptation.  
 $R$ : La résistance de la charge [ $\Omega$ ].  
 $R_c$ : La résistance de condensateur [ $\Omega$ ].  
 $R$ : matrice de pondération.  
 $R_{eq}$ : La résistance rapporté de la pièce [ $\Omega$ ].  
 $R_s$ : La résistance série équivalent  $R_{eq}$  [ $\Omega$ ].  
 $r$ : Le coefficient de réglage en tension.  
 $\rho$  : Résistivité [ $\Omega.m$ ]  
 $S$ : la source d'un MOSFET.  
 $T_{1,2,3,4}$ : les interrupteurs d'un onduleur.  
 $T_f$ : La température finale [C].  
 $T_i$ : La température initiale [C].  
 $t$ : Le temps nécessaire [s].  
 $U$ : La tension DC de l'onduleur [V].  
 $U$ : colonne de commande.  
 $\mu_0$ : Perméabilité magnétique du vide ( $4\pi.10^{-7}$  H/m).  
 $\mu_r$  : Perméabilité relative.  
 $V_d$ : La tension au borne la diode [V].

$V_{1;2;3}$ : la tension simple d'un réseaux électrique [V].

$V_1$ : la tension au borne de l'inducteur [V].

$V_2$ : la tension au borne de la charge induit [V].

$v_{GS}$ : La tension entre la grille et la source d'un MOSFET [V].

$v_{GE}$ : La tension entre la grille et l'émetteur [V].

$\omega_r$ : Pulsation de résonance [rad/s]

X: colonne d'état.

Y: colonne de sortie.

Z: L'impédance [ $\Omega$ ].

# SOMMAIRE

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| NOTION SYMPOLIQUE     | I   |
| SOMMAIRE              | IV  |
| LISTE DES FIGURES     | VI  |
| LISTE DES TABLEUX     | VII |
| INTRODUCTION GENERALE | 1   |

## **CHAPITRE 01 : LE SYSTEME DU CHAUFFAGE A INDUCTION**

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| I.INTRODUCTION                                 | 4  |
| II.PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT                  | 4  |
| III.SCHEMA D'UN FOUR A INDUCTION               | 5  |
| 1.L'INDUCTEUR                                  | 6  |
| 2.L'ALIMENTATION ELECTRIQUE                    | 7  |
| 3.RESEAU D'ADAPTATION D'IMPEDANCE              | 7  |
| IV.PROPRIETES DU CHAUFFAGE PAR INDUCTION       | 8  |
| 1.TRANSFERT DE PUISSANCE                       | 8  |
| 2.RENDEMENT ELECTRIQUE                         | 9  |
| 3.FACTEUR DE PUISSANCE                         | 10 |
| V.PROFONDEUR DE PENETRATION                    | 10 |
| VI.CARACTERISTIQUES DU CHAUFFAGE PAR INDUCTION | 11 |
| 1.AVANTAGES                                    | 11 |
| 2.INCONVENIENTS                                | 12 |
| VII.APPLICATIONS INDUSTRIELLES                 | 12 |
| 1.SIDERURGIE ET METALLURGIE                    | 12 |
| 2.FABRICATION MECANIQUE                        | 13 |
| 3.SOUDAGE DES PIECES METALLIQUES PAR INDUCTION | 13 |
| VIII.CONCLUSION                                | 13 |

## **CHAPITRE 02: LES CONVERTISSEURS STATIQUE AC/DC ET DC/AC**

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| I.INTRODUCTION                                   | 15 |
| II.LES SEMI-CONDUCTEURS                          | 15 |
| 1.DIODE                                          | 15 |
| 2.TRANSISTOR DE PUISSANCE                        | 15 |
| III.REDRESSEURS A DIODES (NON COMMANDE)          | 17 |
| 1.REDRESSEUR SIMPLE ALTERNANCE MONOPHASE         | 17 |
| 2.REDRESSEUR MONOPHASE DOUBLE ALTERNANCE         | 17 |
| 3.REDRESSEUR TRIPHASE SIMPLE ALTERNANCE          | 18 |
| 4.REDRESSEUR TRIPHASE DOUBLE ALTERNANCE TRIPHASE | 19 |
| IV.LES ONDULEURS                                 | 20 |
| 1.LES ONDULEUR DE TENSION                        | 20 |
| 2.LES ONDULEUR DE COURANT                        | 21 |
| 3.LES ONDULEURS A RESONANT                       | 21 |
| 4.ONDULEUR RESONANT SERIE                        | 22 |
| 5.ONDULEUR A RESONANT PARALLELE                  | 23 |
| 6.STRATEGIE DE COMMANDE DES ONDULEURS            | 25 |

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.PRINCIPE DE LA TECHNIQUE DE MLI                                                                        | 25 |
| V.CONCLUSION                                                                                             | 27 |
| <b><u>CHAPITRE 03: LA COMMANDE OPTIMALE (LQR)</u></b>                                                    |    |
| I.INTRODUCTION                                                                                           | 29 |
| II.COMMANDE PAR RETOUR D'ETAT                                                                            | 29 |
| 1.REPRESENTATION D'ETAT                                                                                  | 29 |
| 2.LA COMMANDABILITE ET L'OBSERVABILITE D'UN SYSTEME                                                      | 30 |
| 3.RETOUR D'ETAT                                                                                          | 31 |
| III.COMMANDE OPTIMALE LQR                                                                                | 32 |
| 1.CRITERE DE PERFORMANCE                                                                                 | 32 |
| 2.CRITERE D'OPTIMISATION DE L'ENERGIE                                                                    | 32 |
| 3.COMMANDE OPTIMALE                                                                                      | 32 |
| 4.CHOIX DES FONCTIONS DE POIDS Q ET R                                                                    | 33 |
| IV.CONCLUSION                                                                                            | 34 |
| <b><u>CHAPITRE 04: MODÉLISATION ET RALISATION PRATIQUE DU SYSTEME<br/>DU CHAUFFAGE PAR INDUCTION</u></b> |    |
| I.INTRODUCTION                                                                                           | 36 |
| II.MODELISATION DU CHAUFFAGE PAR INDUCTION                                                               | 36 |
| 1.DIMENSIONNEMENT DE LA PIECE                                                                            | 37 |
| 2.L'INDUCTEUR                                                                                            | 38 |
| 3.CONCEPTION ET CALCUL                                                                                   | 38 |
| 4.SIMULATION ET RÉSULTATS PRATIQUE                                                                       | 46 |
| III.RÉALISATION PRATIQUE D'UN FOUR A INDUCTION                                                           | 50 |
| IV.CONCLUSION                                                                                            | 51 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE                                                                                      | 52 |
| BIBLIOGRAPHIE                                                                                            | 53 |
| ANNEXE A                                                                                                 | 56 |
| ANNEXE B                                                                                                 | 57 |
| ANNEXE C                                                                                                 | 58 |
| ANNEXE D                                                                                                 | 59 |

# LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1-1 La loi de Faraday                                                                                     | 5  |
| Fig. 1-2 Un système de chauffage par induction constitué d'une charge et d'une bobine d'induction              | 5  |
| Fig. 1-3 Le schéma des parties essentielles de four par induction                                              | 6  |
| Fig. 1-4 La forme de l'inducteur                                                                               | 6  |
| Fig. 1-5 Différentes topologies de RA                                                                          | 8  |
| Fig. 1-6 Charge cylindrique                                                                                    | 9  |
| Fig. 1-7 Densité de puissance et de courant dans PP                                                            | 10 |
| Fig. 2-1 Le symbole représentatif de la diode et les deux segments de sa caractéristique statique simplifiée.  | 15 |
| Fig. 2-2 Représente la caractéristique $v - i$ d'un transistor                                                 | 16 |
| Fig. 2-3 Les symboles utilisés pour représenter les différents types de transistors.                           | 16 |
| Fig. 2-4 Montage de redresseur monophasé simple alternance non commandé.                                       | 17 |
| Fig. 2-5 Les courbe de tension la source, la charge et le courant                                              | 17 |
| Fig. 2-6 Montage de redresseur monophasé double alternance (pont de Graëtz )                                   | 18 |
| Fig. 2-7 Courbes de redressement monophasé double alternance.                                                  | 18 |
| Fig. 2-8 Montage de redresseur triphasé simple alternance                                                      | 18 |
| Fig. 2-9 Les courbes de redresseur triphasé simple alternance.                                                 | 19 |
| Fig. 2-10 Montage d'un redresseur triphasé double alternance                                                   | 19 |
| Fig. 2-11 Les courbes de redresseur triphasé simple alternance.                                                | 20 |
| Fig. 2-12 Structure d'un onduleur de tension en pont.                                                          | 21 |
| Fig. 2-13 Fonctionnement à deux séquences.                                                                     | 21 |
| Fig. 2-14 Structure d'un onduleur de courant en pont.                                                          | 21 |
| Fig. 2-15 Onduleur à résonant série                                                                            | 22 |
| Fig. 2-16 L'amplitude de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de Q (RLC série)     | 23 |
| Fig. 2-17 La phase de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de Q (RLC série)        | 23 |
| Fig. 2-18 Onduleur à résonant parallèle                                                                        | 24 |
| Fig. 2-19 L'amplitude de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de Q (RLC parallèle) | 24 |
| Fig. 2-20 La phase de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de Q (RLC parallèle)    | 25 |
| Fig. 2-21 Exemple de la technique de commande MLI                                                              | 26 |
| Fig. 3-1 Représentation d'état matricielle                                                                     | 30 |
| Fig. 3-2 Représentation d'un commande par retour d'état                                                        | 32 |
| Fig. 3-3 Régulateur linéaire quadratique (LQR)                                                                 | 33 |
| Fig. 4-1 Schéma équivalent de l'inducteur et de la charge                                                      | 36 |
| Fig. 4-2 Une pièce pour chauffer                                                                               | 37 |
| Fig. 4-3 Modèle de l'inducteur et la charge en parallèle                                                       | 39 |
| Fig. 4-4 Modèle de l'inducteur et la charge en série                                                           | 39 |
| Fig. 4-5 Condensateur de compensation de l'énergie réactive.                                                   | 40 |
| Fig. 4-6 Inductance d'adaptation de l'impédance (LCRL).                                                        | 40 |

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 4-7 L'amplitude de l'impédance $Z$ en fonction de la fréquence.                                    | 42 |
| Fig. 4-8 La phase de l'impédance en fonction de la fréquence.                                           | 42 |
| Fig. 4-9 L'amplitude de courant absorbé par l'onduleur pour une tension 1V en fonction de la fréquence. | 43 |
| Fig. 4-10 Le courant circulant dans l'inducteur.                                                        | 43 |
| Fig. 4-11 Le rapport entre le courant absorbé et le courant dans l'inducteur ( $I_a/I_s$ ).             | 44 |
| Fig. 4-12 La réponse du système sans régulateur                                                         | 46 |
| Fig. 4-13 Le système avec régulateur LQR                                                                | 47 |
| Fig. 4-14 La réponse du système sans/avec régulateur LQR                                                | 47 |
| Fig. 4-15 La réponse du système avec différentes valeurs de $\lambda$                                   | 48 |
| Fig. 4-16 La réponses du système avec différentes valeurs de $R$ .                                      | 48 |
| Fig. 4-17 La commande optimale du régulateur LQR avec différentes valeurs de $R$                        | 49 |
| Fig. 4-18 Modélisation du système du chauffage avec la commande optimale et l'onduleur                  | 49 |
| Fig. 4-19 La technique de commande des onduleurs MLI                                                    | 50 |
| Fig. 4-20 Système du chauffage par induction                                                            | 50 |
| Fig. 4-21 Le courant de l'onduleur (a) et le courant dans l'inducteur                                   | 50 |
| Fig. 4-22 La pièce dans l'inducteur.                                                                    | 51 |

## LISTE DES TABLEUX

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 1-1 Profondeur de pénétration $d_0$ en fonction de $\rho$ , $\mu_r$ et $f$ . | 11 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|

## INTRODUCTION GENERALE

Le four à induction est une technique qui permet de chauffer un matériau sans contact direct avec une source d'énergie électrique, fonctionnant grâce au phénomène d'induction magnétique, les avantages de cette technique de chauffage sont : économe en énergie, rendement, rapidité, souplesse d'emploi et permet de mieux contrôler la fusion des métaux. Ces applications sont très nombreuses et les plus importantes dans le domaine de la métallurgie, sidérurgie, les traitements des métaux aussi la fabrication mécanique. La puissance et la fréquence de ce four déterminent principalement selon les dimensions de la charge, le type de métal sera chauffé et la température désirée. Les procédés de chauffage par induction intéressent toute la chaîne industrielle, de la transformation de matière première aux produits finis [1].

Les recherches dans ce domaine permettent de développer des autres applications de chauffage par induction et s'étendent actuellement dans beaucoup de domaines surtout l'usage domestique.

Le développement des convertisseurs statiques et les semi-conducteurs fait une révolution sur l'électronique de puissance qui permet de contrôler la puissance et la fréquence délivrée aux systèmes électriques. Les fours par induction ont besoin des onduleurs à résonance. Ce sont des circuits électroniques à circuit oscillant série ou parallèle pour contrôler la puissance et la fréquence avec une manière bien précise. Ces convertisseurs ont des structures complexes et leur mise en application nécessite une connaissance parfaite de la structure et du mécanisme de commutation des interrupteurs.

Les techniques de commande moderne permettent d'assurer la stabilité, rapidité et précision des systèmes électriques. La commande optimale LQR (linear-quadratic regulator) est une méthode qui permet de calculer la matrice de gain d'une commande par retour d'état ayant des valeurs optimales. L'application de cette régulation sur le four à induction offre une commande très précise qui soit sur le temps ou la puissance de chauffage pour obtenir la température désirée selon le but de chauffage de la charge. Les onduleurs à base de MOSFET ou IGBT sont très utilisés et capables de produire de grandes puissances aux charges thermiques d'induction fonctionnant entre les fréquences 10 et 200 KHz [2].

Les objectifs de ce travail sont orientés premièrement l'étude, ensuite la conception et enfin la régulation du four par induction. Pour ce faire, on a adopté le plan de travail qui est constitué de quatre chapitres organisés comme suit :

Le premier chapitre présente une étude théorique des systèmes de chauffage par induction concernant son principe de fonctionnement, ses propriétés, les différentes applications industrielles, les structures de puissance et les convertisseurs statiques utilisés pour l'alimentation de ces dernières.

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse des convertisseurs statiques et leurs propriétés et applications, les éléments semi-conducteurs utilisés ainsi que les différentes techniques de réglage de puissance.

Le troisième chapitre présente la technique de commande optimale par retour d'état. Une attention est donnée à la représentation d'état et les méthodes de calcul des gains du régulateur à retour d'état.

Le quatrième chapitre est constitué en partant de la modalisation du four par induction jusqu'à sa commande optimale. Une comparaison est faite sur le système sans et avec régulation et pour différentes matrices de poids  $Q$  et  $R$ . Le travail est clôturé par l'application pratique de cette théorie de la commande optimale.

Enfin, ce travail sera résumé par une conclusion générale constitué l'ensemble des résultats obtenus, des suggestions et des recommandations sur les travaux futurs dans ce domaine de recherche.

## CHAPITRE 1

# LE SYSTEME DU CHAUFFAGE A INDUCTION

## **I. INTRODUCTION:**

Le chauffage par induction est largement utilisé dans des nombreuses technologies avancées. Au cours des trois dernières décennies, le chauffage par induction est devenu la technique préférée dans les applications métallurgiques. C'est l'une des méthodes les plus puissantes et les plus prometteuses dans le traitement électromagnétique moderne des matériaux, car le chauffage par induction fournit une chaleur à grand puissance, économe en énergie en un minimum de temps, rendement, rapidité, souplesse d'emploi et permet de mieux contrôler la fusion des métaux. Les appareils de chauffage par induction de différents types offrent certains avantages par rapport à un équipement similaire.

## **II. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT:**

Une tension alternative appliquée à une bobine d'induction entraînera un courant alternatif dans la bobine. Le courant de bobine alternatif produira un champ magnétique variable dans son environnement qui a la même fréquence que le courant de la bobine. L'intensité du champ magnétique dépend du courant circulant dans la bobine d'induction, de la géométrie de la bobine et de la distance de la charge par rapport à la bobine. Le champ magnétique variable crée des courants de Foucault dans la pièce située à l'intérieur de la bobine. Ces courants ont la même fréquence que le courant de la bobine d'induction. Les courants de Foucault alternatifs produisent la chaleur dans la pièce chauffée par effet Joule ( $I^2R$ ) [3].

L'ensemble de la bobine d'induction et la pièce chauffer peut-être considérée comme un transformateur électrique. La bobine d'induction comme le primaire où la source électrique injecte l'énergie, et la pièce est comme un secondaire à un tour court-circuité. Cela provoque d'énormes courants à travers la pièce.

Pour la plupart des applications de chauffage par induction, la résistance  $R$  ne peut pas être facilement déterminée du fait de la distribution non uniforme des courants de Foucault dans le conducteur [2] [4].

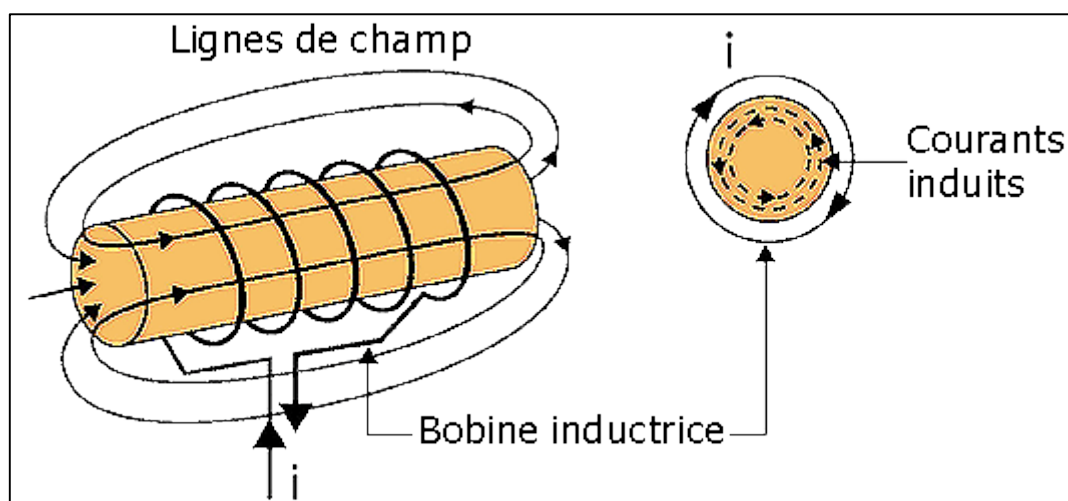


Fig. 1-1 La loi de Faraday

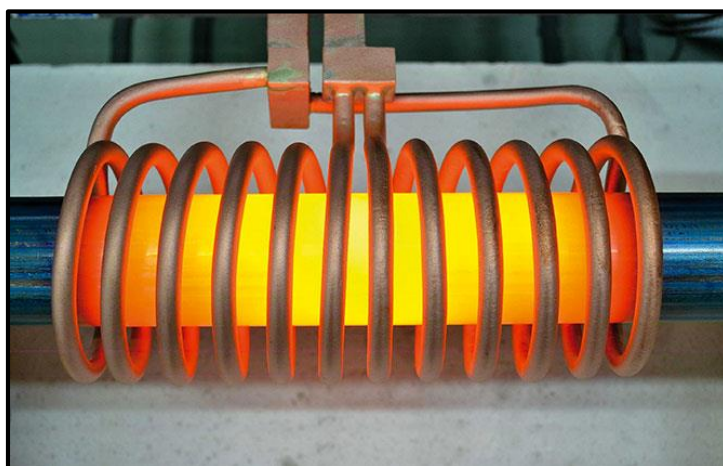


Fig. 1-2 Un système de chauffage par induction constitué d'une charge et d'une bobine d'induction

La zone soumise à l'effet Joule est concentrée sur une fine couche superficielle, car la densité des courants induits décroît de manière quasi-exponentielle vers le centre de la pièce. Ce phénomène est appelé « **effet de peau** ». [5]

### III. SCHEMA D'UN FOUR A INDUCTION:

Le chauffage par induction est une technique produire très hautes température pour des applications industrielles telles que fusion d'acier, la soudure et durcissement extérieur. Son installation constitué d'une bobine inductrice et une alimentation permette de fait la variation de fréquence assuré par des convertisseurs statique (Onduleur ... etc) aussi un coffre d'un réseau d'adaptation d'impédance.

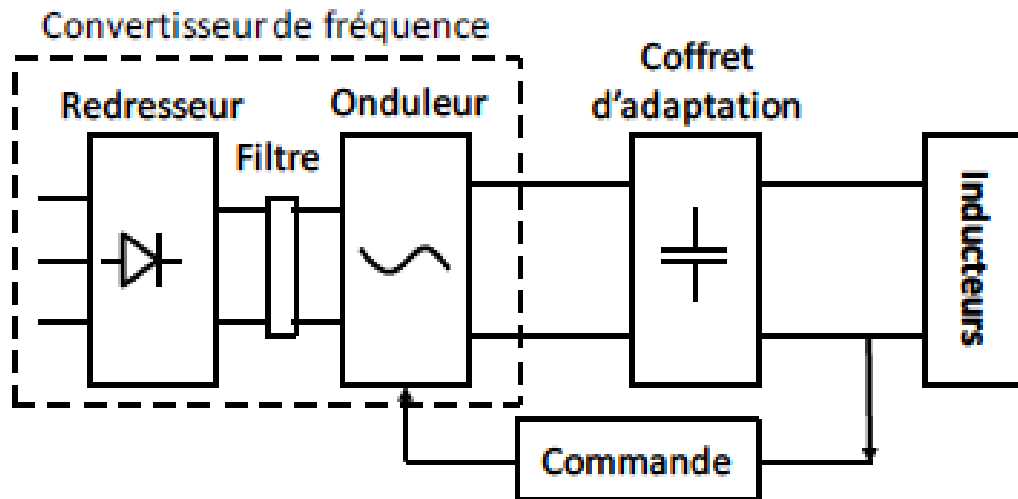


Fig. 1-3 Le schéma des parties essentielles de four par induction

Les installations de chauffage inductif doivent inclure un système de refroidissement pour le convertisseur de fréquence et pour l'inducteur, ainsi qu'un système de transport de l'énergie et un système de commande et de mesure adapté [2] [4].

### 1. L'INDUCTEUR:

Pour la plupart des applications, l'inducteur est un tube en cuivre creux se présentant comme un enroulement venant couvrir l'objet qu'on va chauffer. Toutefois, l'inducteur peut être placé de différentes façons selon l'application. [2]

L'inducteur est le plus souvent en cuivre, afin de limiter les pertes électriques, il est refroidi par eau, dans la plupart des cas. [4]

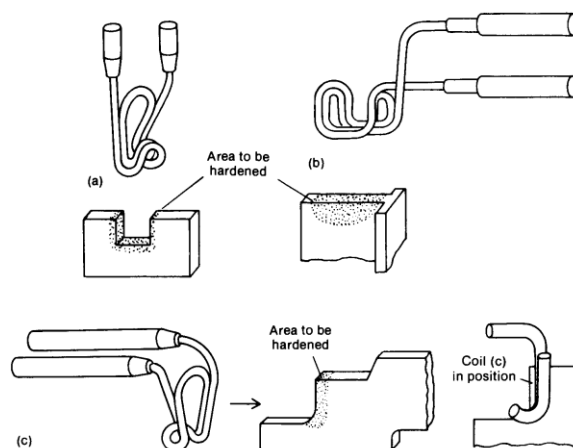


Fig. 1-4 La forme de l'inducteur [6]

## 2. L'ALIMENTATION ELECTRIQUE [2]:

L'alimentation électrique peut être de différente nature selon la fréquence d'alimentation de l'installation.

Pour les installations à 50Hz la charge est directement connectée au transformateur. Le transformateur peut être réglé pour ajuster le courant à l'impédance de la charge.

Convertisseur de fréquence à thyristors :

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

Convertisseur de fréquence à transistors :

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

Convertisseur de fréquence à lampe à vide :

- Rendement : 55-70%
- Plage de fréquence : jusqu'à 3000kHz
- Plage de puissance : jusqu'à 1200kW

## 3. RESEAU D'ADAPTATION D'IMPEDANCE:

Le réseau d'adaptation (RA) est un dispositif qui va se charger de réaliser une transformation d'impédances entre deux blocs, de façon à optimiser le transfert d'énergie. Le moyen le plus répandu et le plus performant pour réaliser cette fonction consiste en l'association d'éléments passifs, notamment des inductances, capacités et lignes de transmission. La manière avec laquelle ces éléments sont disposés permet de réaliser une transformation d'impédances déterminée.

Lorsque l'application exige que l'on puisse modifier l'impédance générée, des éléments variables sont introduits et le RA devient accordable. [7]

Le choix de la topologie de RA la plus appropriée dépend fortement du contexte de l'application, de la technologie disponible et de plusieurs critères, tels que la couverture d'impédances, les pertes d'insertion et l'encombrement. La brique élémentaire d'un RA permettant d'adapter des impédances complexes est constituée de l'association de deux éléments passifs, l'un en série et l'autre en parallèle. Lorsque le RA est formé par une seule brique de ce type, on dit que le RA présente une topologie en  $L$ , alors que si l'on ajoute un deuxième étage, on a une topologie en  $2L$ , en  $T$  ou en  $\pi$ , selon la façon de le disposer Fig. 1.5 [7]

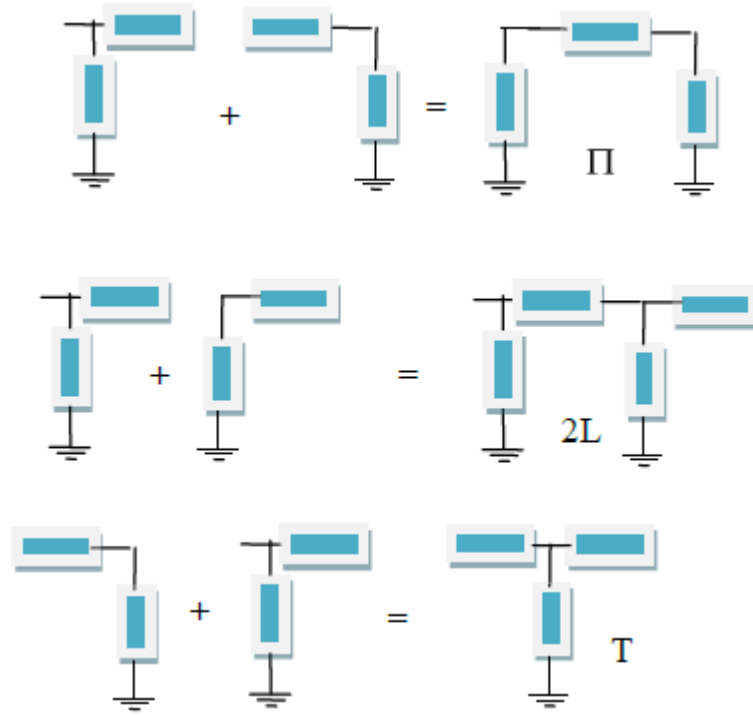


Fig. 1-5 Différentes topologies de RA [7]

#### IV. PROPRIETES DU CHAUFFAGE PAR INDUCTION:

##### 1. TRANSFERT DE PUISSANCE:

C'est l'effet Joule, dû aux courants de Foucault, qui est responsable de l'augmentation de la température de l'objet à chauffer. La formulation simple de la puissance  $P = R/I^2$  ne peut pas être utilisée du fait de la non-uniformité de la distribution des courants induits dans le conducteur [2].

La puissance absorbée peut être décrite comme :

$$P = \frac{\rho}{Hp} \frac{Dp \pi}{d_0} I^2 \quad (1.1)$$

en remplaçant l'épaisseur de peau *par*:  $d_0 = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r f}}$  (1.2)

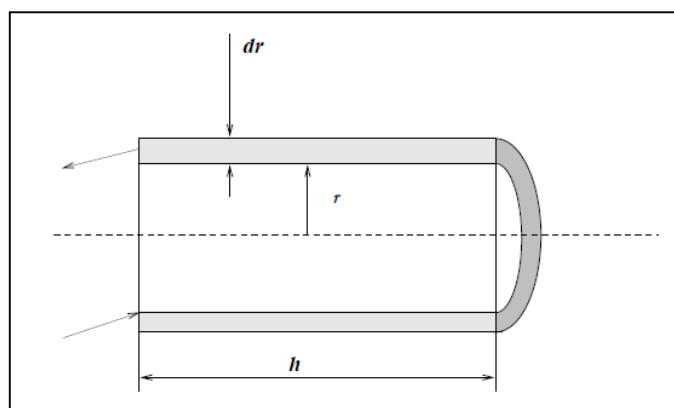


Fig. 1-6 Charge cylindrique

$$P = \frac{2\pi^2 Dp}{Hp} \sqrt{10^{-7} \rho \mu_r f} I^2 \quad (1.3)$$

$Dp$ : Diamètre de la pièce [m].

$Hp$ : Hauteur de la pièce [m].

$\rho$  : Résistivité [ $\Omega \cdot m$ ]

$\mu_0$ : Perméabilité magnétique du vide ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m).

$\mu_r$  : Perméabilité relative.

$f$  : Fréquence [Hz].

## 2. RENDEMENT ELECTRIQUE:

Le rendement électrique est défini comme suit [2] :

$$\eta = \frac{P}{P + P_i} \quad (1.4)$$

$P$  : 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 :

- Pour l'inducteur, utiliser un matériau de faible résistance, en règle général 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).

### 3. FACTEUR DE PUISSANCE:

L'ensemble constitué de l'inducteur et de la charge est assimilable à une charge globalement inductive gourmande en énergie réactive. Ce caractère inductif est dû, d'une part à l'entrefer (entre l'inducteur et la charge) et d'autre part, au comportement inductif de la charge elle-même (dans le cas d'un cylindre) [2].

Le facteur de puissance de l'inducteur et de la charge se situe entre 0,05 et 0,6. Dans tous les cas, un relèvement du facteur de déplacement par condensateurs est requis [2][4].

### V. PROFONDEUR DE PENETRATION :

Une caractéristique générale des courants alternatifs est de ne pas utiliser toute la surface utile des conducteurs pour circuler. Il apparaît, en effet, qu'ils se concentrent sur la périphérie des conducteurs : c'est l'effet de peau. Ainsi, les courants de Foucault induits dans le matériau à chauffer sont plus importants en périphérie qu'au cœur de l'objet. L'effet de peau est caractérisé par la profondeur de pénétration, qui se définit comme l'épaisseur de la couche surfacique dans laquelle circule 87% de la puissance générée [8].

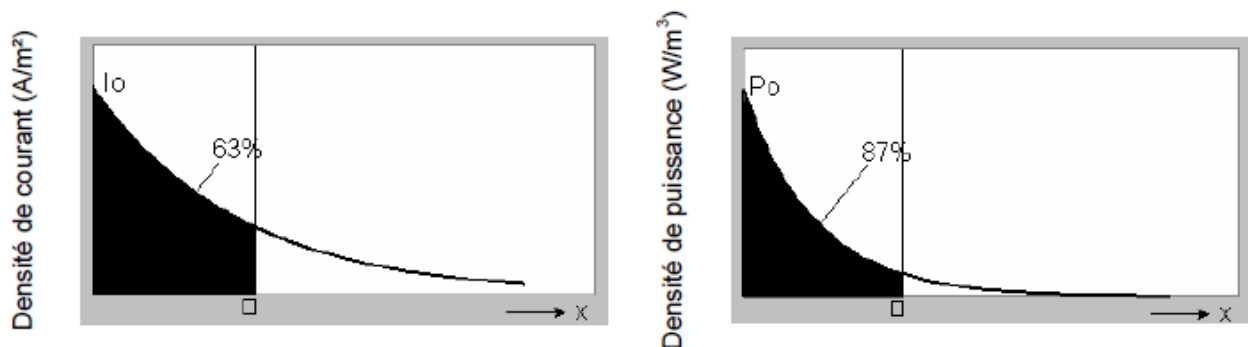


Fig. 1-7 Densité de puissance et de courant dans PP [4]

La profondeur de pénétration peut être déduite des équations de Maxwell. Pour une charge cylindrique d'un diamètre très supérieur à épaisseur pénétration, la formule est la suivante :

$$d_0 = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r f}} \quad (1.5)$$

Il apparaît que la profondeur de pénétration dépend à la fois des caractéristiques du matériau à chauffer ( $\rho$ ,  $\mu$ ), et de la fréquence du courant alternatif le parcourant. La fréquence est donc un levier de contrôle de la profondeur de pénétration. Le tableau suivant regroupe des ordres de grandeur de  $d_0$  en fonction de plusieurs matériaux pour différentes fréquences.

| $d_0$ [mm]               | Acier 20°C | Acier 20°C | Cuivre 20°C | Cuivre 900°C | Graphite 20°C |
|--------------------------|------------|------------|-------------|--------------|---------------|
| $\rho$ [ $\mu\Omega$ mm] | 0.16       | 0.16       | 0.017       | 0.086        | 10            |
| $\mu_r$                  | 40         | 100        | 1           | 1            | 1             |
| Fréquence                |            |            |             |              |               |
| 50 Hz                    | 4.5        | 2.85       | 9.31        | 20.87        | 225.08        |
| 100 Hz                   | 3.18       | 2.01       | 6.58        | 14.76        | 159.15        |
| 1 KHz                    | 1.01       | 0.64       | 2.08        | 4.67         | 50.33         |
| 10 KHz                   | 0.32       | 0.20       | 0.66        | 1.48         | 15.92         |
| 100 KHz                  | 0.10       | 0.06       | 0.21        | 0.47         | 5.03          |
| 1 MHz                    | 0.03       | 0.02       | 0.07        | 0.15         | 1.59          |

Tab. 1-1 Profondeur de pénétration  $d_0$  en fonction de  $\rho$ ,  $\mu_r$  et  $f$ . [2]

D'après la formule (1.5), il apparaît que la profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la racine carrée de la perméabilité magnétique  $\mu_r$ . Pour des matériaux non magnétiques tels que le cuivre ou l'aluminium, le coefficient de perméabilité magnétique  $\mu_r = 1$ , alors que les matériaux ferromagnétiques (tels que le fer et de nombreux types d'acier) ont, au contraire, un coefficient de perméabilité beaucoup plus élevé. Ces matériaux offrent donc des profondeurs de pénétration beaucoup moins importantes. La perméabilité magnétique des matériaux ferromagnétiques dépend fortement de la nature du matériau et des conditions imposées (température, intensité du champ magnétique, saturation). Au-delà de la température de Curie ( $760^\circ\text{C} = 1400^\circ\text{F}$ ), la perméabilité chute brutalement à  $\mu_r = 1$ , ce qui engendre une hausse rapide de la profondeur de pénétration [8].

## VI. CARACTERISTIQUES DU CHAUFFAGE PAR INDUCTION:

### 1. AVANTAGES:

#### a. PROCEDES TECHNIQUES:

- L'induction permet d'obtenir des températures de chauffe très élevées.
- L'induction peut être appliquée de façon très locale.
- Les installations à induction sont compatibles avec les automatismes.

**b. CONSOMMATION ENERGETIQUE:**

- Les installations à chauffage par induction ont en règle générale un bon rendement. Toutefois, le rendement dépend aussi de la nature du matériau à chauffer.
- Une partie importante des pertes calorifiques peut être récupérée.
- Possibilité de chauffer à des températures très élevées avec un rendement pratiquement indépendant de la température.

**c. QUALITÉ:**

- Une pureté extrême peut être obtenue en travaillant sous vide ou dans des atmosphères inertes.
- Rapidité de chauffage liée à la possibilité d'obtenir des densités de puissance très élevées.
- Localisation précise de l'effet thermique grâce à une conception d'inducteur et une fréquence de fonctionnement adaptée à la pièce à chauffer.
- Le chauffage peut être régulé précisément.

**d. ENVIRONNEMENT ET CONDITIONS DE TRAVAIL:**

- Pas de production de fumée (absence de pollution par source de chaleur).
- Bonnes conditions de travail.
- Le chauffage par induction est utilisé principalement pour le chauffage de formes simples.

**2. INCONVENIENTS:**

- Des coûts d'acquisition élevés pour les fortes puissances.
- Des champs électromagnétiques peuvent apparaître ce qui peut alors perturber l'environnement, lorsque les isolations sont mauvaises.

**VII. APPLICATIONS INDUSTRIELLES:**

Les applications du chauffage par induction sont très nombreuses dans l'industrie. Elles concernent plus particulièrement la métallurgie et les traitements des métaux. La sidérurgie et la mécanique restent un domaine privilégié du chauffage par induction dans les domaines suivants :

**1. SIDERURGIE ET METALLURGIE :**

- Élaboration de produits semi finis;
- Élaboration de produits finis.

## **2. FABRICATION MECANIQUE :**

- traitements thermiques et préparations de pièces avant usinage.

## **3. SOUDAGE DES PIECES METALLIQUES 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 :

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

## **VIII. CONCLUSION :**

Dans le premier chapitre, on a étudié le chauffage par induction qui est une opération plus importante dans l'industrie grâce à plusieurs avantages (critères de choix) tels que : rendement élevé, échauffement localisé, pas de flamme, son contact ...etc. On a fait aussi une description technique concernant ce type de chauffage, son principe de fonctionnement dont on a expliqué la profondeur de pénétration et son importance pour l'échauffement, on a cité leurs propriétés ainsi que leurs caractéristiques et quelques applications. Le prochain chapitre on s'intéressera aux convertisseurs statiques nécessaires pour assurer la commande dans notre four à induction du côté structure et puissance ; en série, en parallèle et leurs différentes stratégies de commande.

## CHAPITRE 2

# LES CONVERTISSEURS STATIQUES

## AC / DC ET DC / AC

## I. INTRODUCTION:

A partir d'une alimentation alternative triphasé (220V/380V) et fréquence (50 Hz), nous devons alimenter une charge en courant alternative avec haute fréquence (10 KHz) par exemple. On doit utiliser des convertisseurs statique AC / DC pour le redressement et un convertisseur DC/AC pour varier sur la fréquence.

Dans ce chapitre on va détailler ces types des convertisseurs statiques et les semi-conducteurs nécessaire pour assurer le fonctionnement du système de chauffage par induction.

## II. LES SEMI-CONDUCTEURS:

L'électronique de puissance utilise des semi-conducteurs fonctionnant en « interrupteurs ». Un « interrupteur » peut être formé par un seul semi-conducteur ou par un groupement en série ou en parallèle de plusieurs semi-conducteurs [9].

### 1. DIODE:

La diode est un composant à deux électrodes, l'anode  $A$  et la cathode  $K$ , sans électrode de commande. Son fonctionnement, lui, est totalement imposé par le circuit dans lequel elle est insérée.

Quand ce circuit tend à faire passer un courant dans le sens direct ou perméable, c'est-à-dire de  $A$  vers  $K$ , la diode est conductrice ou passante.

Quand ce circuit applique une tension négative ou inverse à ses bornes, la diode est bloquée ou isolante [9].

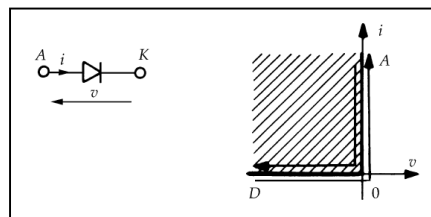


Fig. 2-1 Le symbole représentatif de la diode et les deux segments de sa caractéristique statique simplifiée.

### 2. TRANSISTOR DE PUISSANCE:

C'est un interrupteur commandé. Les deux segments de sa caractéristique ne se distinguent plus par un changement de polarité du courant et de la tension.

Le segment sur lequel se trouve le point de fonctionnement doit être fixé par un signal de commande via un accès de commande :

- le signal de commande  $ON$  fixe le point de fonctionnement sur la branche  $OA$ , l'interrupteur est fermé,

- le signal de commande *OFF* fixe le point sur *OB*, l'interrupteur est ouvert.

Un transistor comporte donc trois bornes, deux bornes de puissance entre lesquelles il remplit la fonction interrupteur et une borne auxiliaire qui forme avec une borne de puissance l'accès de commande. [9]

La figure 2.2 représente la caractéristique  $v - i$  d'un transistor. La figure 2.3 montre les symboles utilisés pour représenter les différents types de transistors.

Dans le transistor bipolaire classique (figure 2.3a) et l'IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) (figure 2.3c), l'accès de puissance est formé par le collecteur *C* et l'émetteur *E*, l'accès de commande par la base *B* et l'émetteur ou par la grille *G* et l'émetteur.

Dans le transistor MOSFET (*Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor*), schématisé figure 2.3b, le circuit de puissance est relié au drain *D* et à la source *S*, le circuit de commande est branché entre la grille *G* et la source.

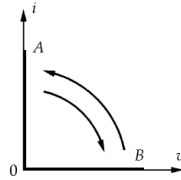


Fig. 2-2 Représente la caractéristique  $v - i$  d'un transistor

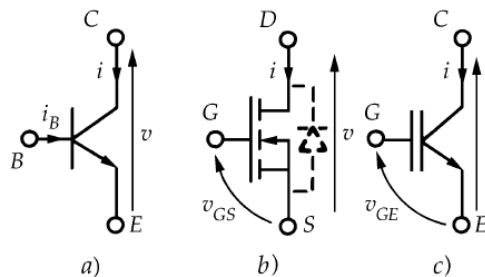


Fig. 2-3 Les symboles utilisés pour représenter les différents types de transistors.

- Le transistor bipolaire : utilise une *commande en courant*. Si on injecte dans le circuit base-émetteur un courant de commande  $i_B$  suffisant, le transistor se comporte comme un interrupteur fermé (segment *OA*). Si on impose à  $i_B$  une valeur nulle l'interrupteur est ouvert (segment *OB*).
- Les transistors MOSFET et IGBT ont une *commande en tension*. Le circuit entre grille et source ou entre grille et émetteur se comporte comme une capacité qu'il faut charger ou décharger. Une tension  $v_{GS}$  ou  $v_{GE}$  négative ou nulle maintient le point de fonctionnement sur la branche *OB*. En donnant à  $v_{GS}$  ou  $v_{GE}$  une valeur positive suffisante, on fait passer ce point sur la branche *OA*. Les transistors MOSFET et IGBT ont une *commande en tension*. Le circuit entre grille et source ou entre grille et émetteur se comporte comme une capacité qu'il faut charger ou décharger. Une tension  $v_{GS}$  ou  $v_{GE}$  négative ou nulle maintient le point de fonctionnement sur

la branche  $OB$ . En donnant à  $v_{GS}$  ou  $v_{GE}$  une valeur positive suffisante, on fait passer ce point sur la branche  $OA$ .

### III. REDRESSEURS A DIODES (NON COMMANDE):

Les montages redresseurs, souvent appelés simplement redresseurs, sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent directement la conversion alternatif continu. Alimentés par une source de tension alternative monophasée ou polyphasée, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie.

Les redresseurs à diodes, ou redresseurs non contrôlés, ne permettent pas de faire varier le rapport entre la ou les tensions alternatives d'entrée et la tension continue de sortie. De plus, ils sont irréversibles, c'est-à-dire que la puissance ne peut aller que du côté continu vers le côté alternatif.

#### 1. REDRESSEUR SIMPLE ALTERNANCE MONOPHASE:

Est un redresseur supprimant les alternances négatives et conservant les alternances positives d'une entrée monophasée. La fréquence en sortie du redresseur est alors égale à la fréquence d'entrée.

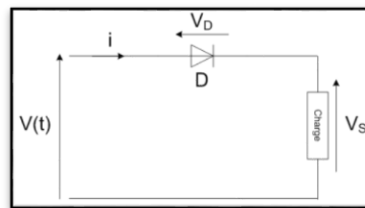


Fig. 2-4 Montage de redresseur monophasé simple alternance non commandé.

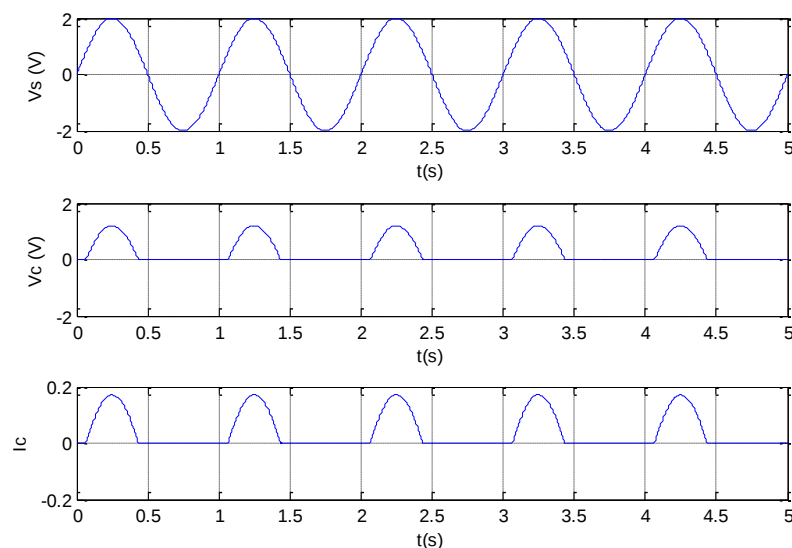


Fig. 2-5 Les courbe de tension la source, la charge et le courant

#### 2. REDRESSEUR MONOPHASE DOUBLE ALTERNANCE:

Un redresseur double alternance monophasé est un redresseur redressant les alternances négatives et conservant les alternances positives du courant à l'entrée. La fréquence en sortie du redresseur est alors le double de la fréquence d'entrée.

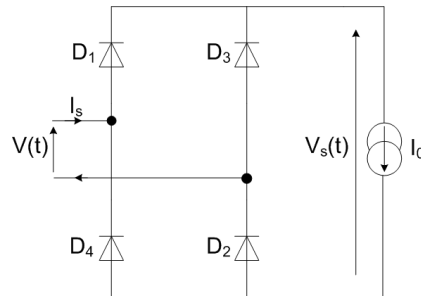


Fig. 2-6 Montage de redresseur monophasé double alternance (pont de Graëtz)

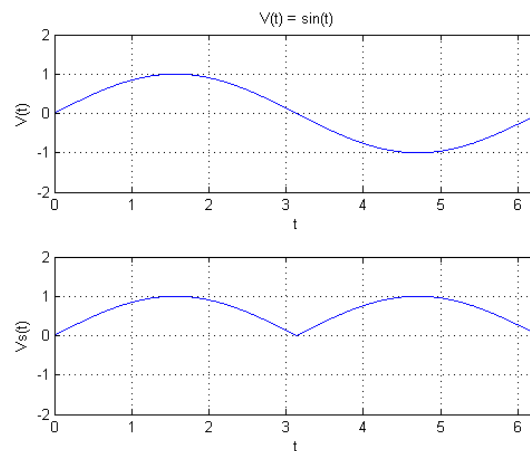


Fig. 2-7 Courbes de redressement monophasé double alternance.

### 3. REDRESSEUR TRIPHASÉ SIMPLE ALTERNANCE:

Un redresseur simple alternance triphasé est un redresseur permettant de redresser une source triphasée. Le signal redressé a alors une fréquence trois fois supérieure au signal d'entrée. Ce type de redresseur est réalisé en mettant une diode sur chaque phase Il y a deux montages de ce type :

- Les diodes étant placées en cathode commune (a).
- Les diodes étant placées en anode commune (b).

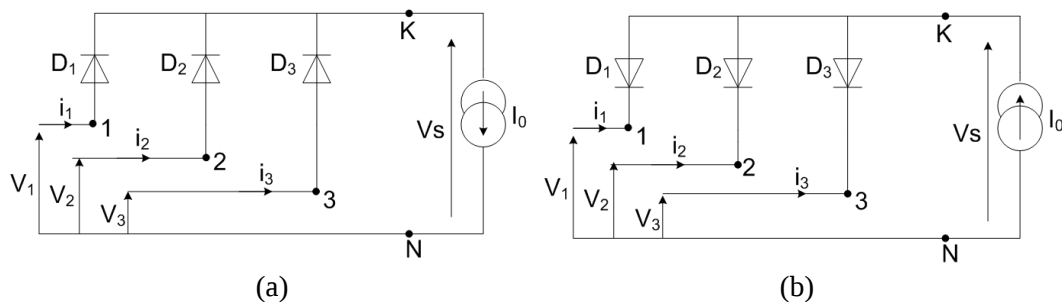
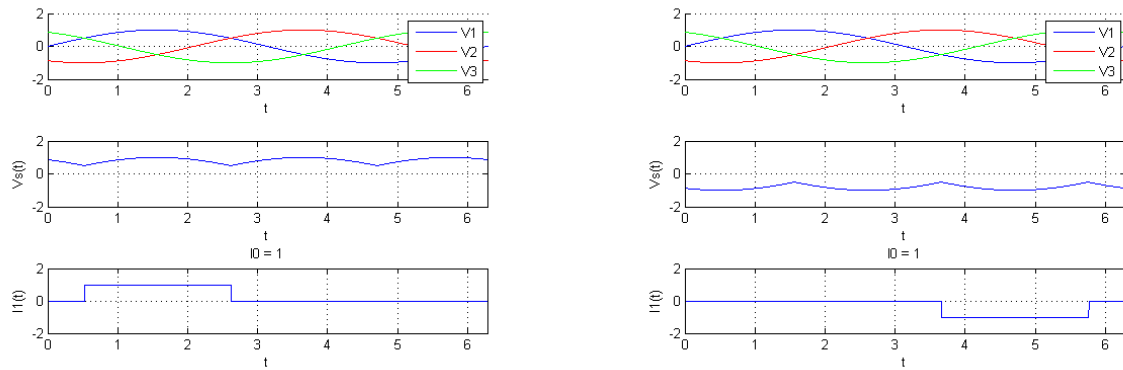


Fig. 2-8 Montage de redresseur triphasé simple alternance



(a) (b)  
Fig. 2-9 Les courbes de redresseur triphasé simple alternance.

#### 4. REDRESSEUR TRIPHASÉ DOUBLE ALTERNANCE TRIPHASÉ:

Un redresseur double alternance triphasé est un redresseur permettant de redresser une source triphasée. Le signal redressé a alors une fréquence six fois supérieure au signal d'entrée. Ce type de redresseur est réalisé en utilisant un montage en pont de Graëtz avec des diodes comme le montre le schéma suivant :

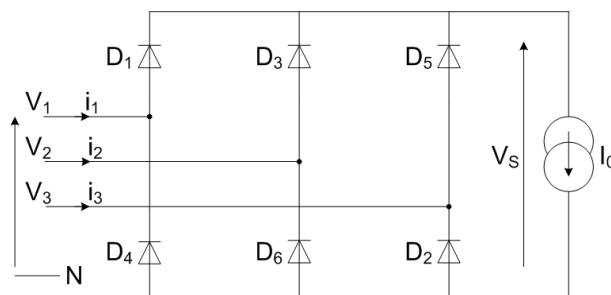


Fig. 2-10 Montage d'un redresseur triphasé double alternance

Les tensions  $V_1, V_2$  et  $V_3$  sont des tensions entre phase et neutre (tensions simples) de valeur efficace  $V$ .

- parmi les diodes  $D_1, D_3$  et  $D_5$ , celle qui a la tension sur son anode la plus positive conduit.
- Parmi les diodes  $D_2, D_4$  et  $D_6$ , celle qui a la tension sur sa cathode la plus négative conduit.

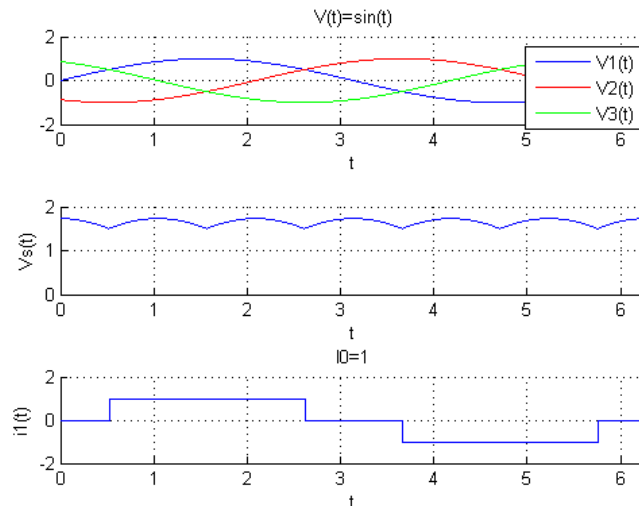


Fig. 2-11 Les courbes de redresseur triphasé simple alternance.

#### IV. LES ONDULEURS:

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu/alternatif. Alimenté par une source continue, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie pour obtenir à la sortie une tension et un courant alternatif, c'est-à-dire de valeur moyenne nulle. Les onduleurs à résonance sont des onduleurs de tension ou de courant à un créneau par alternance fonctionnant dans des conditions particulières. La charge doit être un circuit oscillant peu amorti. [9]

Pour aborder les structures des onduleurs, on caractérise le générateur et le récepteur, continu ou alternatif, de tension ou de courant au point de vue des commutations, ceci nous conduit à distinguer deux types d'onduleurs : Pour aborder les structures des onduleurs, on caractérise le générateur et le récepteur, continu ou alternatif, de tension ou de courant au point de vue des commutations, ceci nous conduit à distinguer deux types d'onduleurs :

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

Les premiers sont alimentés par une source de tension continue, les seconds par une source de courant continu. La nature de la source continue impose celle du récepteur alternatif, les onduleurs de tension alimentent des récepteurs de courant, les onduleurs de courant alimentent des récepteurs de tension [10].

##### 1. LES ONDULEUR DE TENSION:

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue, sa tension n'est pas affectée par les variations du courant qui la traverse, la source continue impose la

tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie. La configuration la plus générale de l'onduleur de tension monophasé est celle dont la structure est en pont complet.

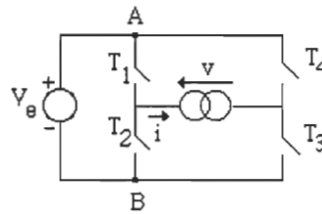


Fig. 2-12 Structure d'un onduleur de tension en pont.

Ce fonctionnement correspond à la fermeture et l'ouverture simultanées des deux couples d'interrupteurs ( $T_1 T_3$ ) et ( $T_2 T_4$ ), ces deux couples d'interrupteurs sont complémentaires.

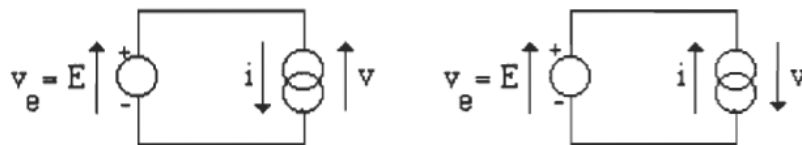


Fig. 2-13 Fonctionnement à deux séquences.

La première séquence correspond à la fermeture de  $T_1$  et  $T_3$  et l'ouverture de  $T_2$  et  $T_4$  la deuxième séquence correspond à l'ouverture de  $T_1$  et  $T_3$  et la fermeture de  $T_2$  et  $T_4$  [10].

## 2. LES ONDULEUR DE COURANT:

Un onduleur de courant, souvent appelé commutateur de courant, est alimenté par une source de courant continu. L'inductance interne de la source est si grande que le courant qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension à ses bornes, notamment par les brusques variations correspondantes aux commutations [10].

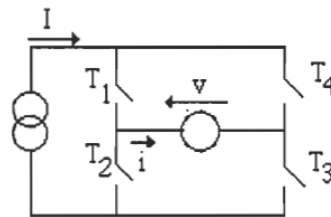


Fig. 2-14 Structure d'un onduleur de courant en pont.

## 3. LES ONDULEURS A RESONANT:

Les onduleurs à résonance apparaissent lorsque la charge est de nature oscillante (RLC), on doit commander les interrupteurs à une fréquence très proche de la fréquence de résonance de la charge. Si les caractéristiques de cette dernière varient, il faut varier la fréquence de commande, donc l'onduleur sera non autonome [8].

Ils se divisent en deux types :

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

#### 4. ONDULEUR RESONANT SERIE :

L'onduleur série est un onduleur à résonance alimentant un circuit résonnant série de constantes  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . A cause de l'inductance, la charge constitue un récepteur de courant. L'onduleur doit donc être un onduleur de tension utilisant quatre interrupteurs trois segments réversibles en courant [9].

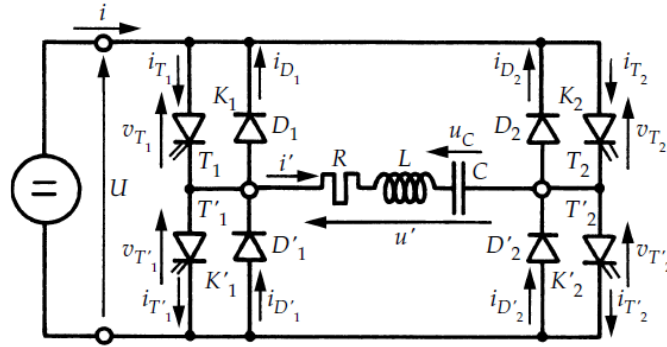


Fig. 2-15 Onduleur à résonant série [9]

Pour  $0 < t < T/2$ ,  $K1$  et  $K2'$  sont fermés,  $U' = +U$ .

Pour  $T/2 < t < T$ ,  $K1'$  et  $K2$  sont fermés,  $U' = -U$ .

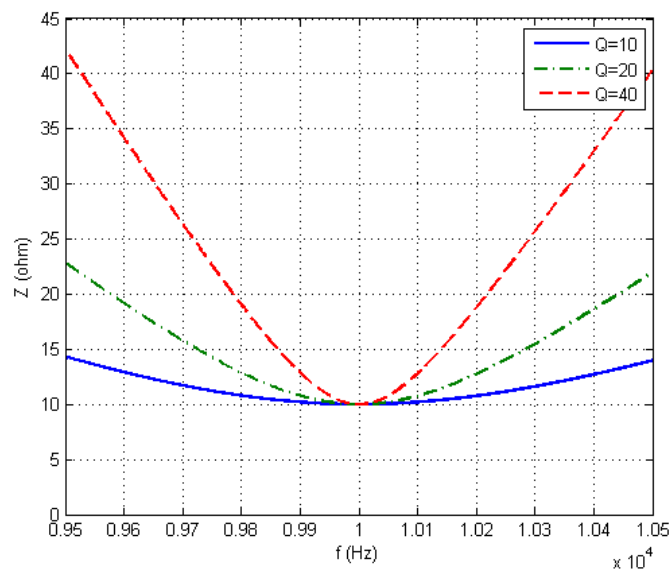
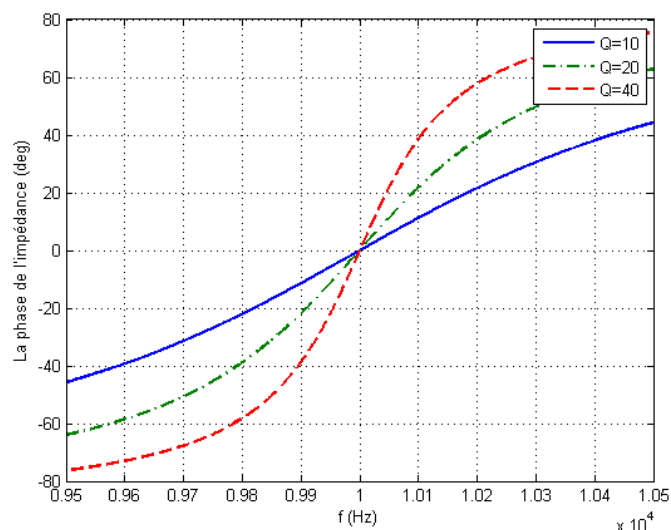
$$Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (2.1)$$

La fréquence de résonance de cette circuit est :

$$\omega_r = 2\pi f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.2)$$

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

$$Q = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{\omega_r C R} \quad (2.3)$$

Fig. 2-16 L'amplitude de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de  $Q$  (RLC série)Fig. 2-17 La phase de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de  $Q$  (RLC série)

## 5. ONDULEUR A RESONANT PARALLELE :

L'onduleur parallèle est un onduleur à résonance débitant sur un circuit résonnant parallèle peu amorti. La charge, comportant une capacité directement branchée entre les bornes de sortie, constitue un récepteur de tension ; l'onduleur doit donc être un onduleur de courant [9].

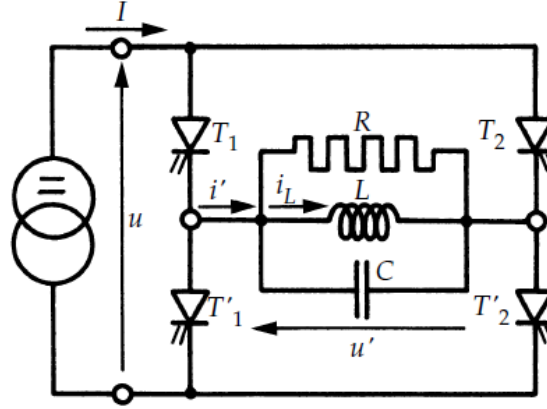


Fig. 2-18 Onduleur à résonant parallèle [9]

Pour  $0 < t < T/2$ ,  $T_1$  et  $T_2'$  sont fermés :  $i' = I$ ,  $u = + u'$ .

Pour  $T/2 < t < T$ ,  $T_1'$  et  $T_2$  sont fermés :  $i' = -I$ ,  $u = - u'$ .

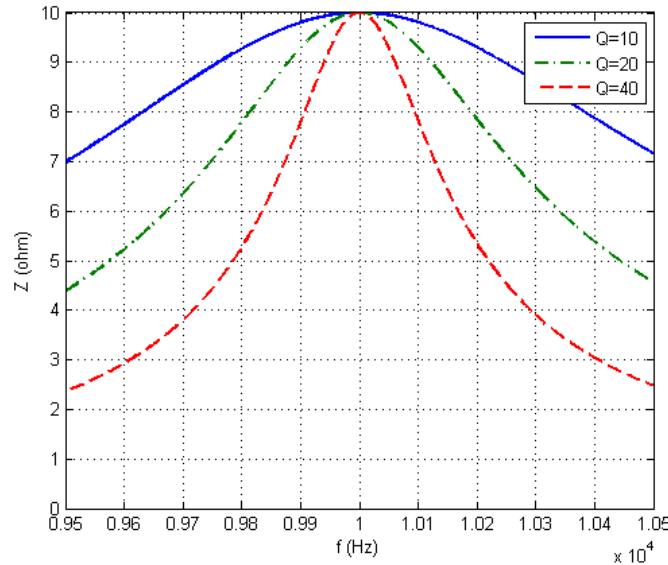
$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})} \quad (2.4)$$

La fréquence de résonance de cette circuit est :

$$\omega_r = 2\pi f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.5)$$

Le facteur de qualité  $Q$  du circuit oscillant parallèle est :

$$Q = \frac{R}{\omega_r L} = \omega_r C R \quad (2.6)$$


 Fig. 2-19 L'amplitude de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de  $Q$  (RLC parallèle)

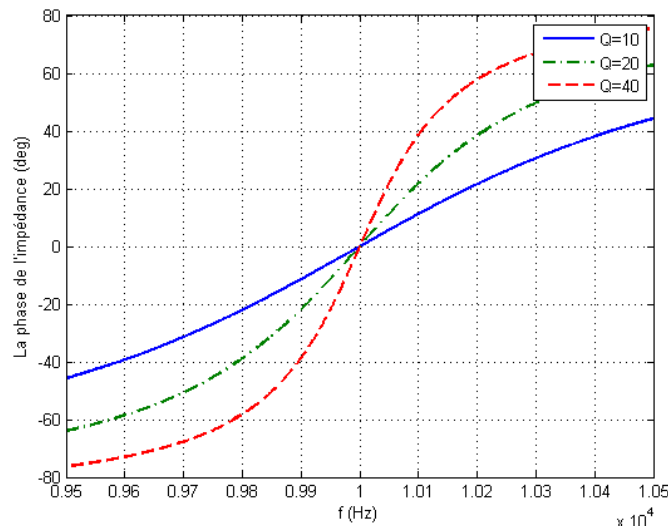


Fig. 2-20 La phase de l'impédance en fonction de la fréquence avec différentes valeurs de Q (RLC parallèle)

## 6. STRATEGIE DE COMMANDE DES ONDULEURS :

Il y a plusieurs stratégies de commande des onduleurs :

- Commande plaine-onde (180°).
- Commande décalé.
- Commande MLI... etc.

Les tensions qui sont générées par les deux premières techniques ayant une forme rectangulaire et leurs décompositions en série de Fourier montrant une richesse en harmonique très importante [11].

Dans notre projet la technique utilisé est la technique MLI (Modulation de largeur d'impulsion). Elle s'avère être la technique la plus appropriée pour la commande de l'onduleur tout en ayant une bonne neutralisation de l'onde de sortie.

## 7. PRINCIPE DE LA TECHNIQUE DE MLI :

La conversion continue alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge.

Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs (MLI), cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice d'amplitude  $A_r$  et de fréquence  $f$ , avec un signal appelé porteuse d'amplitude  $A_p$  et de fréquence  $f_p$  très élevée [11].

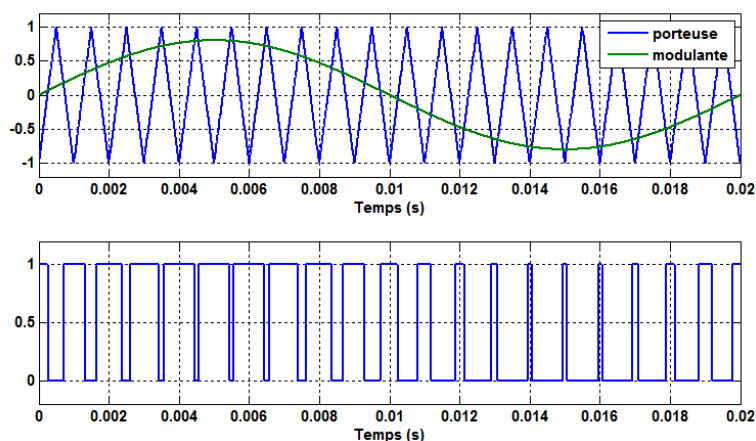


Fig. 2-21 Exemple de la technique de commande MLI

L'indice de modulation :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (2.7)$$

Le coefficient de réglage en tension :

$$r = \frac{A_r}{A_p} \quad (2.8)$$

La modulation montre que plus « m » est grand et plus la neutralisation des harmoniques est efficace, d'autre part on cherche à obtenir une valeur de r la plus élevée possible [11].

La modulation est dite synchrone si « m » est un nombre entier cela conduit à une tension de sortie « U' » qui se reproduit identiquement à elle-même tous les périodes.

Pour le choix de « m », on doit tenir compte des pertes supplémentaires pendant les commutations d'un état à l'autre. Ces pertes croissent lorsque la fréquence de modulation augmente. [11]

## **V. CONCLUSION :**

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes structures des convertisseurs. Les redressements avec différentes structures (monophasé et triphasé). Ensuite on a présenté les onduleurs de résonance série et parallèle. Ainsi que les différents éléments semi-conducteurs qui sont très utilisés dans le domaine de chauffage par induction. Nous avons vu aussi les propriétés des onduleurs à résonance et enfin la stratégie de commande utilisée en MLI

## CHAPITRE 3

# LA COMMANDE OPTIMALE

## LQR

## **I. INTRODUCTION:**

L'optimisation est une caractéristique très souhaitable dans la vie de tous les jours. Nous aimons travailler et utiliser notre temps de manière optimale, utiliser les ressources de façon optimale, etc.

La conception de contrôle optimal des systèmes est une fonction importante de l'automatique. Le but de la conception est de réaliser un système de contrôle de telle façon que le système en boucle fermée est identique à un système désiré (ce système est imposé selon des critères bien défini). L'exécution de ces critères désirés est obtenue par la minimisation d'un critère de performance ou l'indice de performance (note  $J$ ). Les indices de performance sont normalement spécifiés dans le domaine temporel ; donc, il est normal que nous souhaitions élaborer des procédures de conception dans le domaine temporel.

Dans cette section, nous considérerons la conception de système de contrôle optimal qui est décrit par une formulation de variable d'état. Nous considérerons que la mesure des variables d'état est utilisée pour calculer un signal de commande  $u(t)$  de sorte que l'exécution du système soit optimisée.

## **II. COMMANDE PAR RETOUR D'ETAT :**

La commande par retour d'état est une technique de commande des systèmes modélisés par leur représentation d'état dont la boucle fermée est représentée par une fonction de transfert. L'idée consiste toujours à piloter le système par un signal de consigne et à générer automatiquement le signal de commande en confrontant en permanence la valeur de la consigne et le comportement réel du système. L'écart entre consigne et comportement réel sert de base au signal de commande du système.

Dans la commande par retour d'état, nous n'allons pas mesurer le signal de sortie pour le boucler sur l'entrée, mais nous allons nous servir du vecteur d'état complet pour prendre connaissance du comportement du système. [12]

### **1. REPRESENTATION D'ETAT :**

Une représentation d'état permet de modéliser un système dynamique en utilisant des variables d'état. Cette représentation, qui peut être linéaire ou non, continue ou discrète, permet de déterminer l'état du système à n'importe quel instant futur si l'on connaît l'état à l'instant initial et le comportement des variables exogènes qui influent sur le système. La représentation d'état du système permet de connaître son comportement "interne" et pas seulement son comportement "externe" comme c'est le cas avec sa fonction de transfert [13].

La représentation d'un système sous forme d'équation d'état est :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX(t) + B U(t) \\ Y = C X(t) + D U(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

(3.1) Equation d'état

(3.2) Equation de sortie

$X \in \mathbb{R}^n$  : colonne représente les n variables d'état.

$U \in \mathbb{R}^m$ : colonne représente les m commandes.

$Y \in \mathbb{R}^p$ : colonne représente les p sorties.

$A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ : matrice d'état.

$B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ : matrice de commande.

$C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ : matrice d'observation.

$D \in \mathbb{R}^{p \times m}$ : matrice d'action direct.

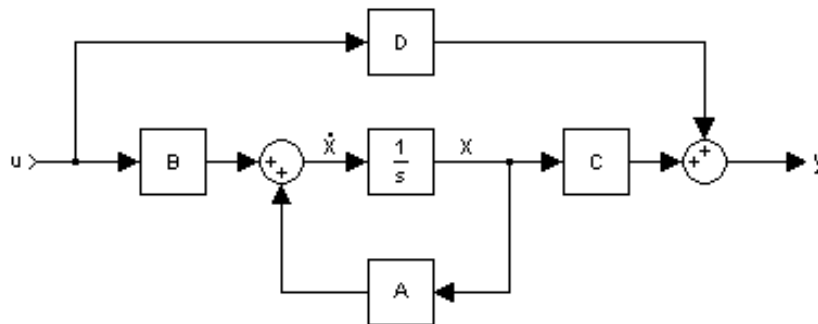


Fig. 3-1 Représentation d'état matricielle

Remarque: en générale  $D=0$ .

## 2. LA COMMANDABILITE ET L'OBSERVABILITE D'UN SYSTEME :

Les concepts de commandabilité et d'observabilité sont des concepts fondamentaux pour l'étude des systèmes. Ils décrivent respectivement comment les états d'un système sont influencés par les entrées et quelle information les sorties mesurées donnent sur les états du système. De plus, ces concepts (commandabilité et observabilité) sont utilisés pour avoir la possibilité du passage d'un système d'espace d'état vers un système à fonction de transfert, puisque la représentation de fonction de transfert est validée seulement si elle remplit les conditions de la contrôlabilité et de l'observabilité des systèmes sous forme d'espace d'état [12].

### • LA COMMANDABILITE:

La commandabilité a pour objet de caractériser la capacité d'un système à voir ses caractéristiques dynamiques modifiées par les entrées. Si un système n'est pas complètement

commandable, alors pour certaines conditions initiales il n'existe pas d'entrée de commande pouvant ramener le système à l'origine.

Selon la théorie de Kalman  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$  est commandable si et seulement si la matrice de commandabilité, C'est de rang  $n$ , (avec  $C$  est la matrice de commandabilité)

$$\text{rang}(C) = \text{rang} [B \ A^2 B \ \dots \ A^{n-1} B] = n \quad (3.2)$$

- **L'OBSERVABILITE :**

En représentation d'état, il nous importe d'être capable de connaître à chaque instant, l'état du système, autrement dit de pouvoir déterminer le vecteur d'état  $x(t)$ . Certaines variables d'état sont très faciles à mesurer. Un capteur placé au bon endroit, à l'intérieur du système, peut nous donner accès à l'information recherchée. Dans ce cas, on dit que la variable d'état considérée est mesurable. Dans d'autres cas, cette investigation directe n'est pas possible. La grandeur est alors dite non mesurable.

En revanche, elle peut, tout en étant non mesurable, influencer la sortie  $y(t)$  du système. Il est alors possible, à partir de la mesure de la sortie, de déduire la grandeur considérée. On dit que celle-ci est observable.

Un critère de Kalman existe également pour la notion d'observabilité et fait intervenir la matrice dynamique  $A$  et la matrice de sortie  $C$ . Le système est observable seulement si :

$$\text{rang}(O) = \text{rang} \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} = n \quad (3.3)$$

### 3. RETOUR D'ETAT

En automatique, la commande par retour d'état est un moyen de modifier le comportement en boucle fermée d'un système dynamique donné par une représentation d'état. Cette approche suppose l'état connu. Quand ce n'est pas le cas, on peut utiliser un observateur d'état de manière à reconstruire l'état à partir des mesures disponibles. Une finalité de la commande par retour d'état peut être de minimiser (ou maximiser) un indice de performance (Commande optimale). Ce peut être aussi d'obtenir un système en boucle fermée dont les pôles, c'est-à-dire les valeurs propres de la matrice d'état, soient placées de manière appropriée. Ces pôles, en effet, déterminent le comportement du système, mais uniquement si celui-ci est monovariable : dans le cas multivariable, il est indispensable de considérer également les valeurs propres [14].

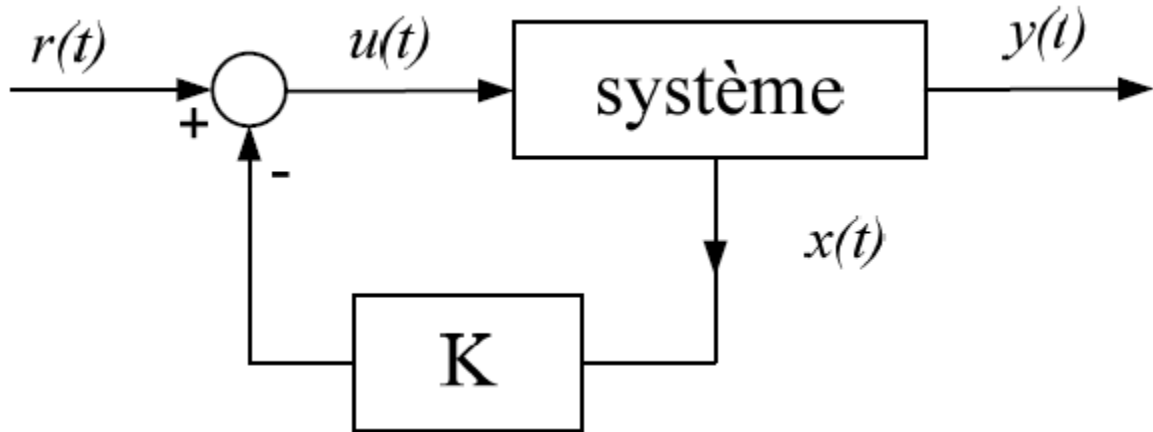


Fig. 3-2 Représentation d'une commande par retour d'état

### III. COMMANDE OPTIMALE LQR :

Soit un régulateur par retour d'états dont le processus a pour équation d'état l'équation (3.1). Le problème simplifié du régulateur linéaire quadratique consiste à trouver la matrice du correcteur  $K$  qui minimise la fonction du coût suivante :

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)) dt \quad (3.4)$$

Les matrices de pondération  $Q$  et  $R$  sont définies positives et symétriques. On remarque que il y a deux termes du critère, l'un optimise les performances de précision de système et l'autre optimise l'énergie consommée  $u(t)$  [15].

#### 1. CRITERE DE PERFORMANCE :

Ce critère qui est appelé le critère de performance permet d'améliorer les performances d'un processus d'un système d'état :

$$J = \int_{t_0}^{t_f} x^T Q x dt \quad (3.5)$$

#### 2. CRITERE D'OPTIMISATION DE L'ENERGIE :

Le critère ci-dessous permette d'améliorer les performances avec optimisation l'énergie de la commande :

$$J = \int_{t_0}^{t_f} u^T R u dt \quad (3.6)$$

#### 3. COMMANDE OPTIMALE :

La commande optimale adoptée par la régulateur LQR est :

$$u_{opt} = -Kx(t) \quad (3.7)$$

tel que: 
$$K = -R^{-1}B^T P \quad (3.8)$$

Et la matrice P présente la solution de l'équation de Ricatti suivante :

$$A^T P + PA + PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (3.9)$$

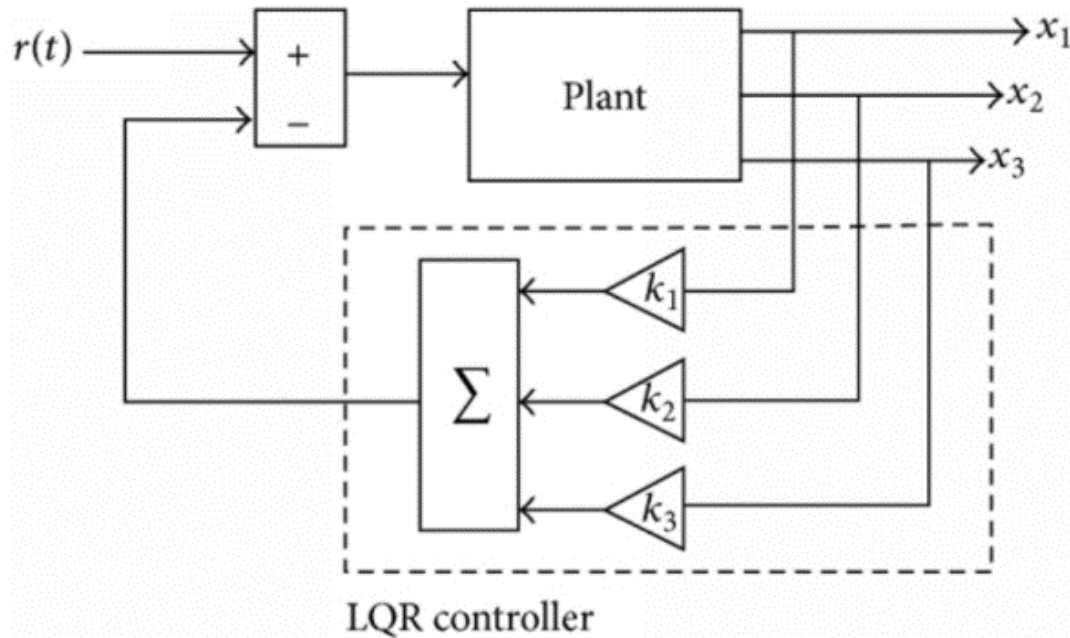


Fig. 3-3 Régulateur linéaire quadratique (LQR)

#### 4. CHOIX DES FONCTIONS DE POIDS Q ET R [12]:

Voici une méthode simple de choix et de modification des pondérations en vue d'aboutir à un correcteur satisfaisant.

- Au départ, on choisit généralement des pondérations égales aux matrices identité.
- Dans une seconde étape, on accélère ou décélère globalement le système en multipliant la matrice Q par un scalaire  $\rho$  (accélération avec  $\rho > 1$  et décélération avec  $\rho < 1$ ), jusqu'à obtenir une dynamique moyenne adaptée.
- Dans le cas où certains états auraient des dynamiques trop lentes par rapport à d'autres, on peut choisir d'augmenter la pondération de Q correspondant aux premiers.
- Dans le cas où certains actionneurs seraient trop sollicités par rapport à d'autres, on peut augmenter la pondération de R qui lui est correspondant

#### **IV. CONCLUSION :**

Nous avons discuté dans ce chapitre de la commande par retour d'état d'une manière générale et plus particulièrement du régulateur linéaire quadratique. Aussi les principaux critères utilisés dans l'application de la commande optimale, la commandabilité, l'observabilité et la formule de la commande  $u$  qui obtenir avec la résolution de l'équation de Ricatti, ce qui nécessite le choix de matrices  $Q$  et  $R$ . Enfin, nous avons cité la manière de choix les matrice de poid  $Q$  et  $R$ .

## CHAPITRE 4

# MODÉLISATION ET RÉALISATION PRATIQUE DU SYSTEME DU CHAUFFAGE PAR INDUCTION

## I. INTRODUCTION:

La modélisation mathématique de système du chauffage par induction est la partie la plus importante avant de passer à la partie de réalisation pratique pour élaborer la commande des systèmes d'alimentation.

Dans ce chapitre on va présenter la modélisation de système du chauffage en faisant le calcul et le dimensionnement de la charge (la pièce chauffer). Ensuite, on va calculer la puissance nécessaire pour une application de chauffage par induction en modélisant le système avec l'association du convertisseur en boucle ouvert, puis en boucle fermée mais cette fois ci avec un régulateur optimale (LQR).

Le but est de chauffer une pièce, d'après les cahiers de charge, jusqu'à  $800^{\circ}\text{C}$  par un four à induction régulé par un régulateur optimale LQR.

## II. MODELISATION DU CHAUFFAGE PAR INDUCTION:

L'inducteur avec la charge peuvent être considérés comme un transformateur dont le secondaire possède une seule spire  $n_2=1$  et chargé par  $R$ . En considérant, le transformateur parfait.

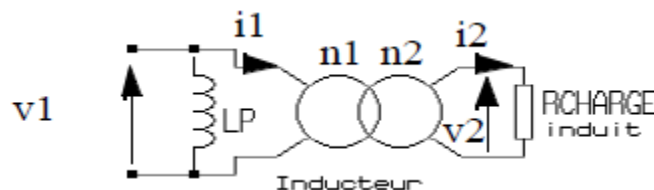


Fig. 4-1 Schéma équivalent de l'inducteur et de la charge

$n_1$ : nombre de spire de l'inducteur.

$n_2$ : nombre de spire de la secondaire  $n_2=1$ .

$L_p$ : L'induction de l'inducteur.

$I_1$ : le courant dans l'inducteur.

$I_2$ : le courant dans la charge induit.

$V_1$ : la tension au borne de l'inducteur.

$V_2$ : la tension au borne de la charge induit.

Pour faire un modèle, il faut choisir une pièce comme référence pour calculer les dimensions, la puissance ainsi que la fréquence opérationnelle pour calculer les réseaux d'adaptation.

## 1. DIMENSIONNEMENT DE LA PIÈCE:

Les caractéristiques de la pièce à chauffer sont :

Hauteur h:  $50 \times 10^{-3}$  m

Masse m: 0.006 Kg

Résistivité  $\rho$ :  $800 \times 10^{-8}$

Diamètre d:  $4 \times 10^{-3}$  m

Perméabilité relative  $\mu_r$ : 2000

c: 470 J/Kg.C



Fig. 4-2 Une pièce pour chauffer

$$R = 2\pi^2 \frac{d}{h} \sqrt{10^{-7} \rho \mu_r f} \quad (4.1)$$

$$R = 2\pi^2 \frac{0.004}{0.050} \sqrt{10^{-7} 800 * 10^{-8} * 2000 * 10 * 10^3} \quad (4.2)$$

$$R = 0.0063 \Omega$$

L'épaisseur de pénétration :

$$d_0 = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r f}} = \sqrt{\frac{800 * 10^{-8}}{\pi^2 * 4 * 10^{-7} * 2000 * 10 * 10^3}} = 3.183 * 10^{-4} \text{ m} \quad (4.3)$$

L'objectif est chauffé la pièce jusqu'à 800°C en une minute, la puissance nécessaire pour cette application se calcule par la formule suivante :

$$P_c = \frac{m c (T_f - T_i)}{t} = \frac{0.006 * 470 * (800 - 25)}{60} = 36.43 \text{ W} \quad (4.4)$$

$P_c$ : La puissance nécessaire [w].

m: La masse de la pièce [Kg].

c: La chaleur massique de la pièce [J/Kg.C].

$T_f$ : La température finale [C].

$T_i$ : La température initiale [C].

t: Le temps nécessaire [s].

Le courant dans la pièce est :

$$I_{2eff} = \sqrt{\frac{P_c}{R}} = \sqrt{\frac{36.43}{0.0063}} = 75.93 \text{ A} \quad (4.5)$$

## 2. L'INDUCTEUR:

L'inducteur c'est une partie très importante pour l'application de chauffage. Avant tout, il faut étudier avec une manière très précise.

On choisit le nombre des spires à  $n_1 = 60$  spires ; cela nous permet de calculer la valeur de l'inducteur est:

$$L_p = \frac{n_1^2 u_0 \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2}{H} = \frac{60^2 * \pi^2 * 10^{-7} \left(\frac{0.045}{2}\right)^2}{0.065} = 1.1567 * 10^{-4} \text{ H} \quad (4.6)$$

$L_p$ : la valeur de l'inductance [H]

$H$ : l'hauteur de l'inductance [m]

$D$ : diamètre de l'inductance [m]

$U_0$ : la perméabilité de l'air

## 3. CONCEPTION ET CALCUL:

### A. LA FONCTION DE TRANSFERT DU SCHEMA EQUIVALANT:

$$\frac{I_2(s)}{I_1(s)} = \frac{n_1}{n_2} \left[ \frac{-1}{\frac{R}{\omega_r * L_p s} \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 + 1} \right] \quad (4.7)$$

L'amplitude de  $I_1$  le courant dans l'inductance est:

$$\|I_1\| = \left[ \left( \frac{\omega_r}{R * \frac{n_1^2}{L_p}} \right) + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \frac{\|I_2\|}{n_1} * \frac{R * \frac{n_1^2}{L_p}}{\omega_r} \quad (4.8)$$

$$\|I_1\| = 4.1574 \text{ A}$$

**B. SIMPLIFICATION:**

On peut transformé le schéma équivalent dans la figure 4-1 à un autre schéma simple par un formule utilisé pour rapporter la résistance dans le secondaire à un résistance équivalent placé en parallèle avec l'inductance  $L_p$  de primaire, alors:

$$R_{eq} = R * \left(\frac{n1}{n2}\right)^2 \quad (4.9)$$

$$R_{eq} = 0.0063 * \left(\frac{60}{1}\right)^2 = 22.74 \Omega$$

La figure suivant présente le nouveau schéma équivalent :

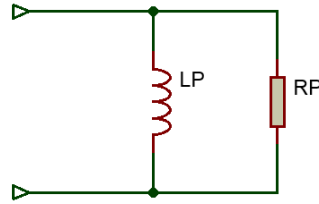


Fig. 4-3 Modèle de l'inducteur et la charge en parallèle

Avec des relations, on peut transformer ce modèle à un autre modèle constitué d'une inductance série avec une résistance :

$$R_s = \frac{R_p (\omega_r L_p)^2}{R_p^2 + (\omega_r L_p)^2} \quad (4.10)$$

$$L_s = \frac{R_p^2 (\omega_r L_p)}{R_p^2 + (\omega_r L_p)^2} \quad (4.11)$$

$$R_s = 2.1 \Omega$$

$$L_s = 1.0495 \times 10^{-4}$$



Fig. 4-4 Modèle de l'inducteur et la charge en série

Le facteur de qualité de la charge est:

$$Q = \frac{\omega L_s}{R_s} = 3.129$$

### C. CONDENSATEUR DE COMPENSATION:

La charge RL est une charge inductive alors il faut ajouter un condensateur pour compenser la puissance réactive et augment le facteur de puissance.

La relation qui donne la valeur de la condensateur est :

$$C_r = \frac{1}{L_s(2\pi f_p)^2} \quad (4.12)$$

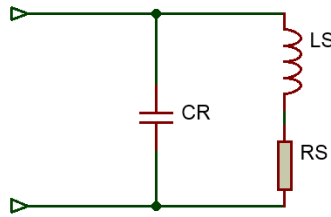


Fig. 4-5 Condensateur de compensation de l'énergie réactive.

### D. INDUCTANCE D'ADAPTATION DE L'IMPIDANCE:

Si on ajoute une inductance d'adaptation en série avec le modèle précédant la valeur de l'impédance réduire en haute fréquence afin de calculer la valeur de cette inductance il faut déterminer la formule de l'impédance [16]:

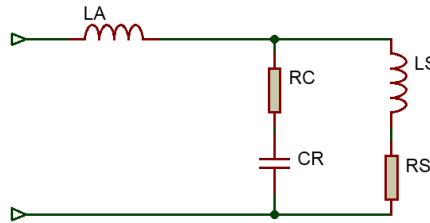


Fig. 4-6 Inductance d'adaptation de l'impédance (LCRL).

$$Z = j\omega L_A + \frac{1}{\frac{1}{R_s + j\omega L_s} + \frac{1}{R_c + j\frac{1}{\omega C_r}}} \quad (4.13)$$

En mettant les affectations suivantes :

$$A = R_s^2 + \omega^2 L_s^2 \quad B = R_c^2 + \frac{1}{\omega^2 C_r^2} \quad (4.14)$$

$$Z = j\omega L_A + \frac{AB}{R_s B + R_c A - j\left(\omega B L_s - A \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (4.15)$$

$$Z = j\omega L_A + \frac{AB(E + jF)}{E^2 + F^2} \quad (4.16)$$

$$\begin{cases} E = R_s B + R_c A \\ F = \omega B L_s - A \frac{1}{\omega C} \end{cases}$$

$$Z = \frac{ABE + j((E^2 + F^2)\omega L_A + ABF)}{E^2 + F^2} \quad (4.17)$$

Pour la résonance, la partie imaginaire de l'impédance doit être nulle alors on trouve la valeur de l'inductance  $L_A$ .

$$L_A = -\frac{ABF}{\omega(E^2 + F^2)} \quad (4.18)$$

#### **E. CHOIX DES VALEURS OPTIMALE DE $C_r$ ET $L_A$ :**

Pour choisir les valeurs optimales de condensateur de compensation et l'inductance d'adaptation il faut utiliser le diagramme de bode du système du chauffage afin de choisir les grandeur électrique nécessaire.

La fréquence de résonance série choisie à 10 KHz la résonance parallèle entre l'inducteur  $L_s$  et  $C_r$  doit être avant la fréquence série, alors on doit choisir 3 fréquences de résonance parallèle 7,8 et 9 KHz et ensuit calculer les condensateurs nécessaires avec la relation (4.12):

$$C_{r1} = 4.9256e-06 \text{ F}$$

$$C_{r2} = 3.7712e-06 \text{ F}$$

$$C_{r3} = 2.9797e-06 \text{ F}$$

Avec la relation (4.18) on obtient les valeurs de l'inductance d'adaptation :

$$L_{A1} = 8.6898e-05 \text{ H}$$

$$L_{A2} = 1.3394e-04 \text{ H}$$

$$L_{A3} = 1.7963e-04 \text{ H}$$

Les courbes de chaque cas présentés dans les figures suivantes :

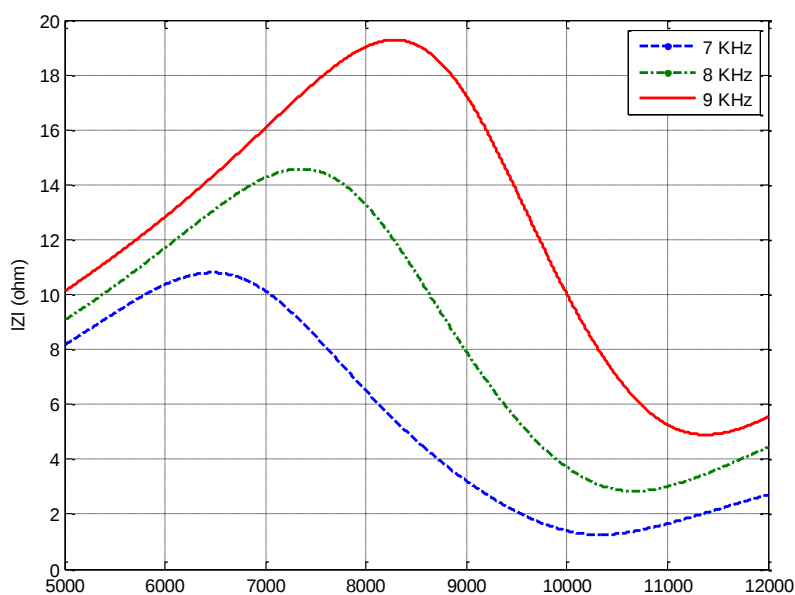


Fig. 4-7 L'amplitude de l'impédance  $Z$  en fonction de la fréquence.

L'impédance  $Z$  augment lorsque la fréquence parallèle entre  $C_r$  et  $L_s$  s'approche à la fréquence de résonance série. L'impédance à 10 KHz est purement résistive mais ce n'est pas la valeur minimale.

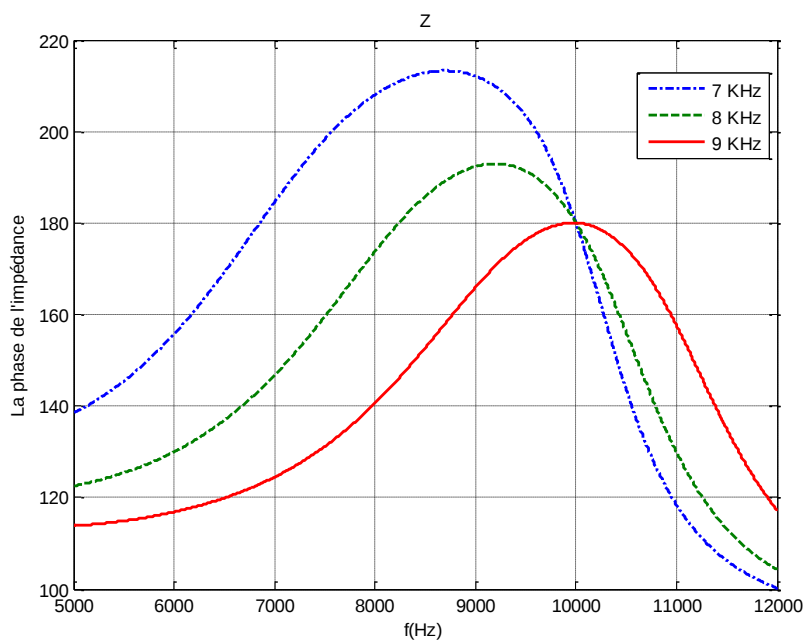


Fig. 4-8 La phase de l'impédance en fonction de la fréquence.

Dans la figure suivante on remarque que le courant  $I_a$  absorbé par l'onduleur dont l'amplitude à la fréquence de résonance série 9 KHz s'est réduit, par contre dans les autres cas à 8 et 7 KHz augmentent.

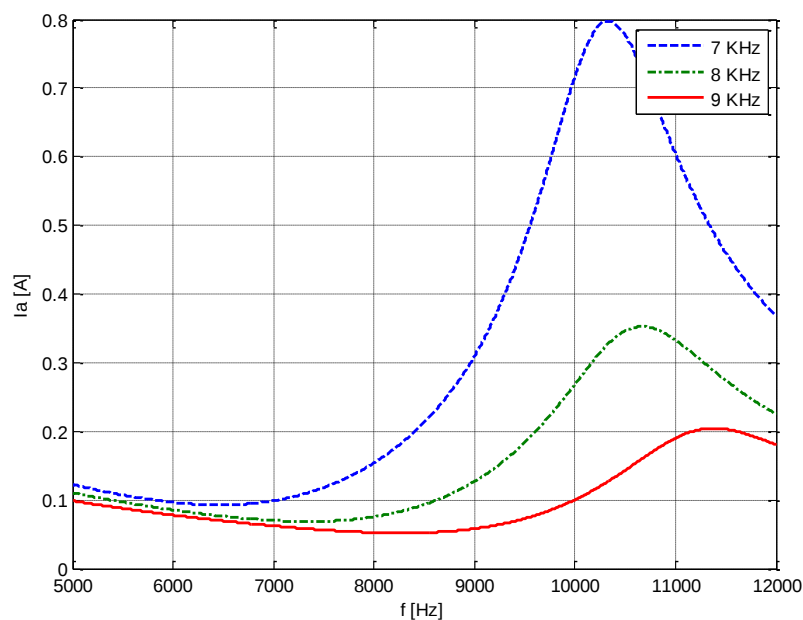


Fig. 4-9 L'amplitude de courant absorbé par l'onduleur pour une tension 1V en fonction de la fréquence.

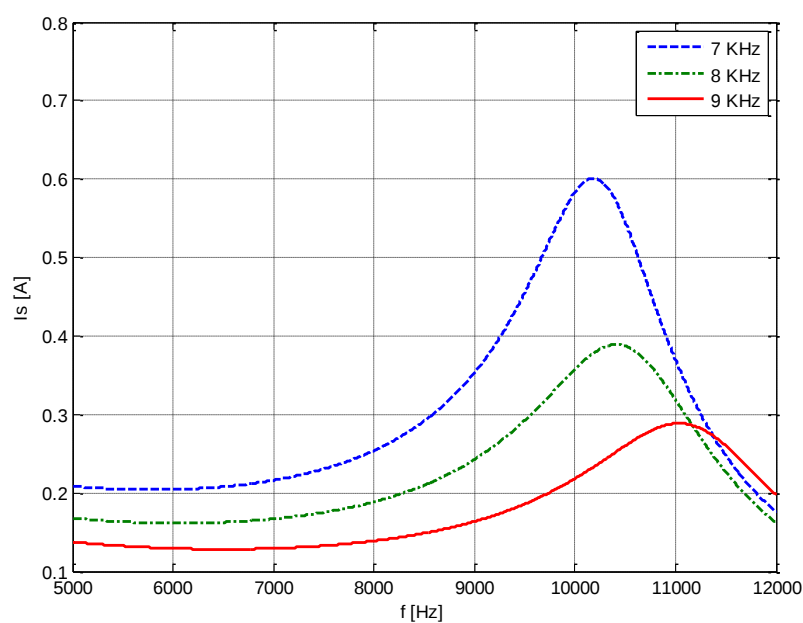


Fig. 4-10 Le courant circulant dans l'inducteur.

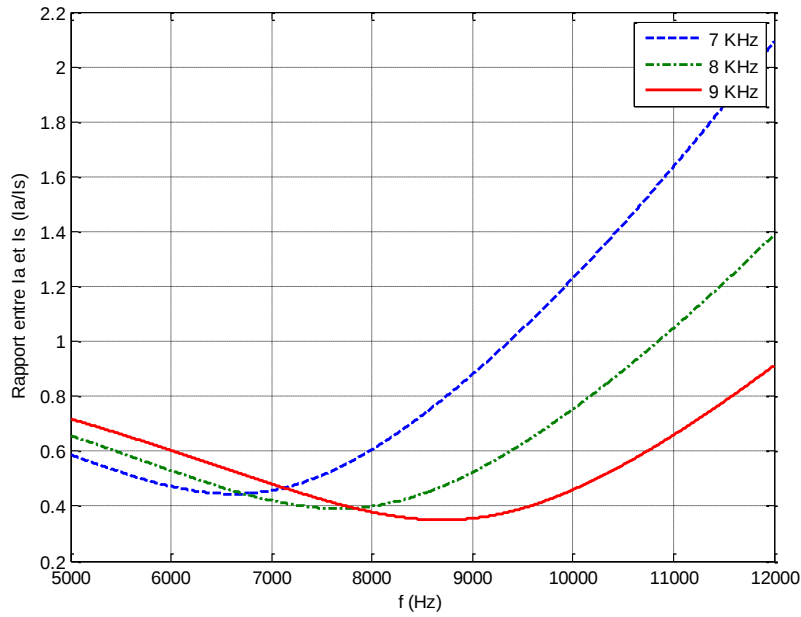


Fig. 4-11 Le rapport entre le courant absorbé et le courant dans l'inducteur ( $I_a/I_s$ ).

A partir les deux courbe 4-9 et 4-10 on remarque que le courant dans l'inducteur augmente lorsque la fréquence de résonance parallèle approche à la résonance série 10 KHz d'autre part le courant absorbé diminue.

Les valeurs à sélectionner sont les valeurs du troisième cas ( 9KHz )

$$L_a = 1.7963e-04 \text{ H} \quad \text{et} \quad C = 2.9797e-06 \text{ F}$$

#### F. REPRÉSENTATION D'ETAT DE SYSTEME DU CHAUFFAGE :

A partir le schéma de système du chauffage dans la figure 4-6 on trouve les équations suivantes :

$$i_c = C_r \frac{dV_c}{dt} \text{ et } i_c = i_A - i_s$$

$$U = L_A \frac{di_A}{dt} + R_c i_c + V_c \quad (4.20)$$

$$R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} = R_c i_c + V_c \quad (4.21)$$

$$i_A = C_r \frac{dV_c}{dt} + i_s \quad (4.22)$$

A partir (4.20) on trouve :

$$\frac{di_A}{dt} = \frac{U}{L_A} - \frac{R_c(i_A - i_s)}{L_A} - \frac{V_c}{L_A} \quad (4.23)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{i_A - i_s}{C_r} \quad (4.24)$$

$$\frac{di_s}{dt} = -\frac{R_s i_s}{L_s} + \frac{R_c(i_A - i_s)}{L_s} + \frac{V_c}{L_s} \quad (4.25)$$

Les équation différentielle précédentes seront écrites sous une forme matricielle ( $X_1=i_A$ ,  $X_2=V_c$  et  $X_3=i_s$ )

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_c}{L_A} & -\frac{1}{L_A} & \frac{R_c}{L_A} \\ \frac{1}{C_r} & 0 & -\frac{1}{C_r} \\ \frac{R_c}{L_s} & \frac{1}{L_s} & -\frac{(R_s + R_c)}{L_s} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_A} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = [0 \quad 0 \quad 1]$$

- **COMANDABILITE:**

Par la commande `ctrb` dans MATLAB et la fonction `rank` peut être calculer le rang de matrice de commandabilité :

```
>> rank(ctrb(A,B))
```

```
ans =
```

```
3
```

- **OBSERVABILITE:**

Par la commande `obsv` dans MATLAB qui donne la matrice d'observabilité, ensuite on peut calculer le rang de matrice d'observabilité.

```
>> rank(obsv(A,C))
```

```
ans =
```

```
3
```

#### 4. SIMULATION ET RÉSULTATS PRATIQUE :

Dans notre application l'état le plus important c'est le courant dans l'inducteur X3 qu'on souhaite la commander qui est donné dans la figure suivante représentant la réponse de système sans régulateur avec une entrée de fréquence de 10 KHz.

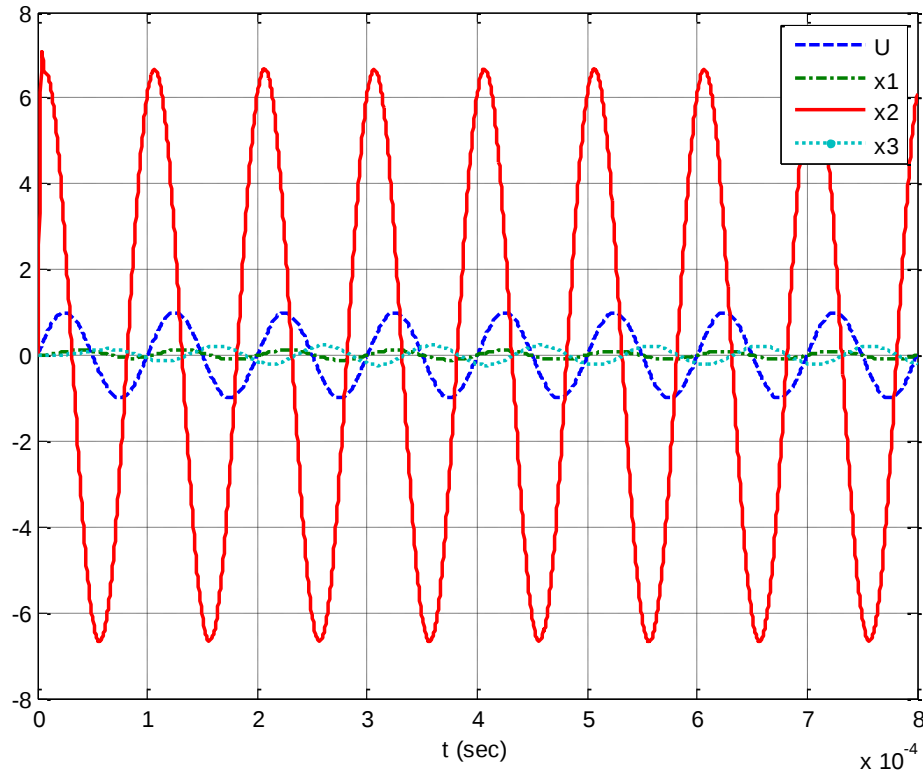


Fig. 4-12 La réponse du système sans régulateur

Pour ajouter un régulateur optimal, il faut déterminer les matrices  $Q$  et  $R$  selon l'état qu'on va commander et enfin, revient à résoudre l'équation de Riccati permettant de déterminer les gains de retour d'état. La commande `lqr(A,B,Q,R)` sous MATLAB nous donne les gains  $K$  et localise les pôles du système ainsi que la matrice  $P$  qui représente la solution de l'équation de Riccati.

Dans notre application l'état  $X3$  est en relation avec la puissance de la charge, alors la commande de  $X3$  est la commande qui agit sur la puissance.

On pose que:  $Q = \lambda * C^T * C$  et  $R = 0.0001$  et  $\lambda = 10000$ .

Les gains trouvés sont:  $K = [197.5 \ 323.3 \ 9119.1]$

A l'aide du programme de simulation SIMULINK sera créé un modèle du système de chauffage par induction sous une forme matricielle.

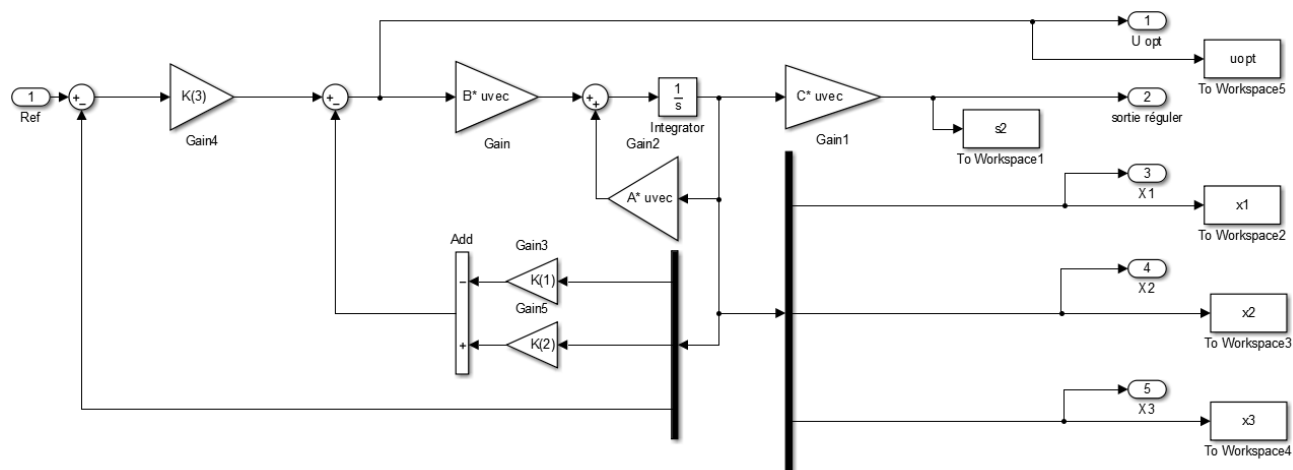


Fig. 4-13 Le système avec régulateur LQR

La réponse du système sans/avec régulateur dans la figure suivant :

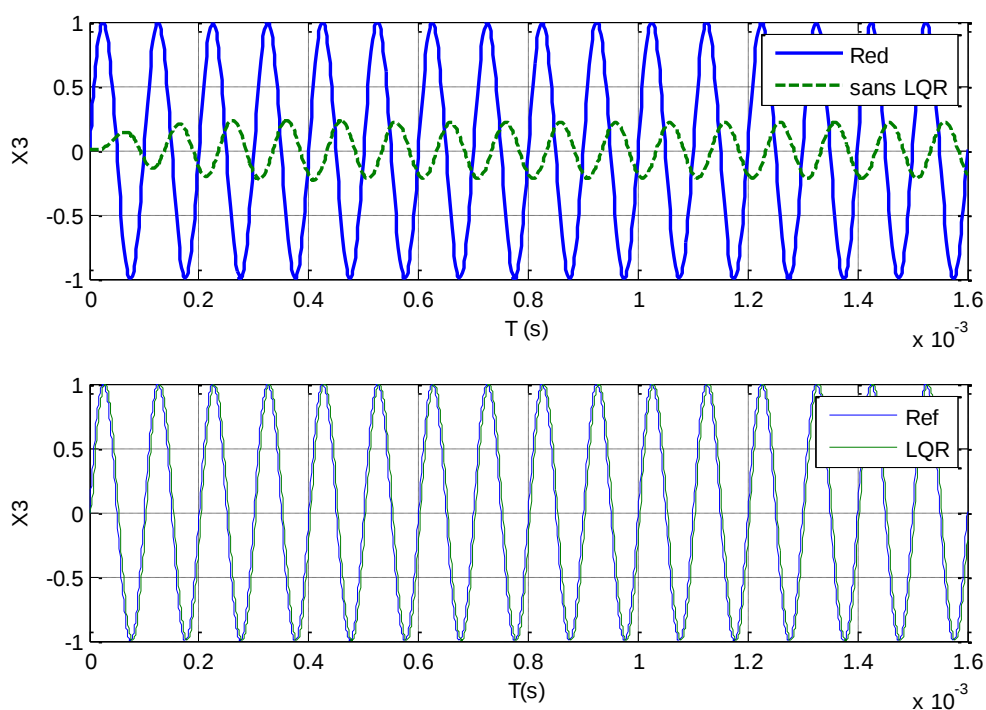
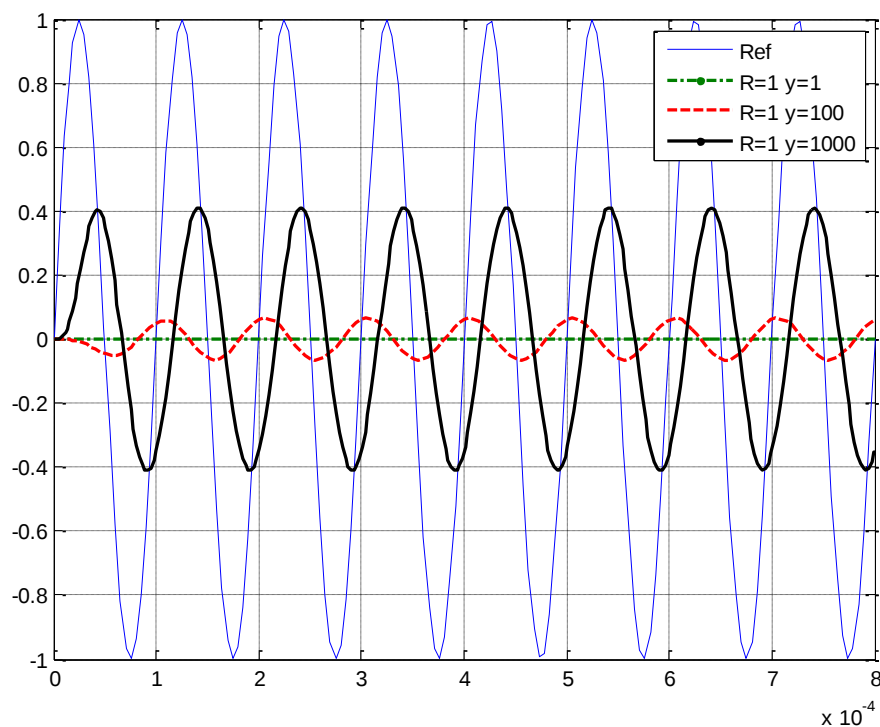
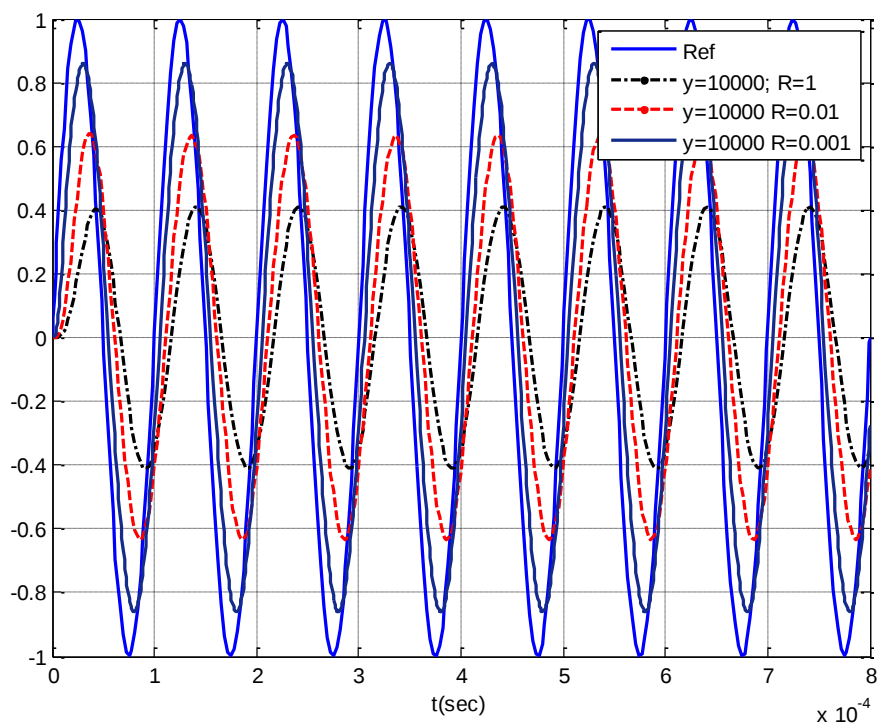


Fig. 4-14 La réponse du système sans/avec régulateur LQR

L'augmentation de  $\lambda$  permette d'améliorer la performance de  $X3$  avec la commande  $U$  très grande et par contre l'augmentation de  $R$  permette de minimiser l'énergie de la commande  $U$  mais avec influence sur les performances. Dans les figures suivantes ; les réponses de système pour différentes valeurs de  $R$  et  $\lambda$ .

Fig. 4-15 La réponse du système avec différentes valeurs de  $\lambda$ 

On remarque que l'augmentation de  $\lambda$  améliore la réponse du système aux valeurs de la référence. Dans la figure suivante, la valeur de  $\lambda$  sera fixée et variant la valeur de  $R$ .

Fig. 4-16 La réponses du système avec différentes valeurs de  $R$ .

Si on réduit la valeur de  $R$  on remarque que la réponse s'améliore de plus en plus que les cas ou  $R$  est une valeur grande, mais de l'autre coté la valeur de l'énergie nécessaire augmente (voir la figure 4-17).

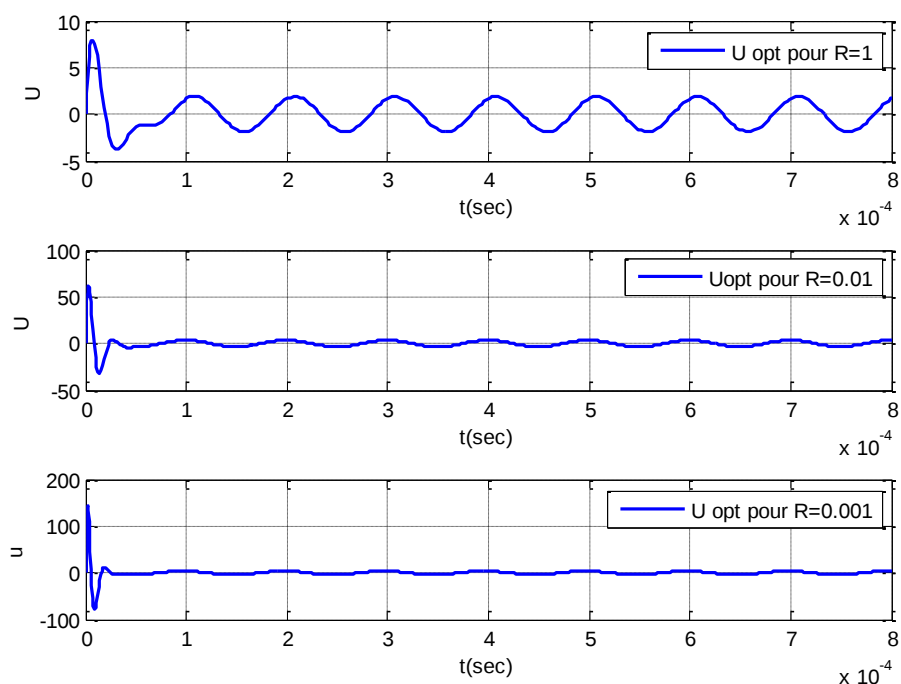


Fig. 4-17 La commande optimale du régulateur LQR avec différentes valeurs de  $R$

En remarque que la réponse dépend de la chois les matrice  $Q$  et  $R$  mais l'inconvénient il n'y a pas une méthode directe pour choisir  $Q$  et  $R$ .

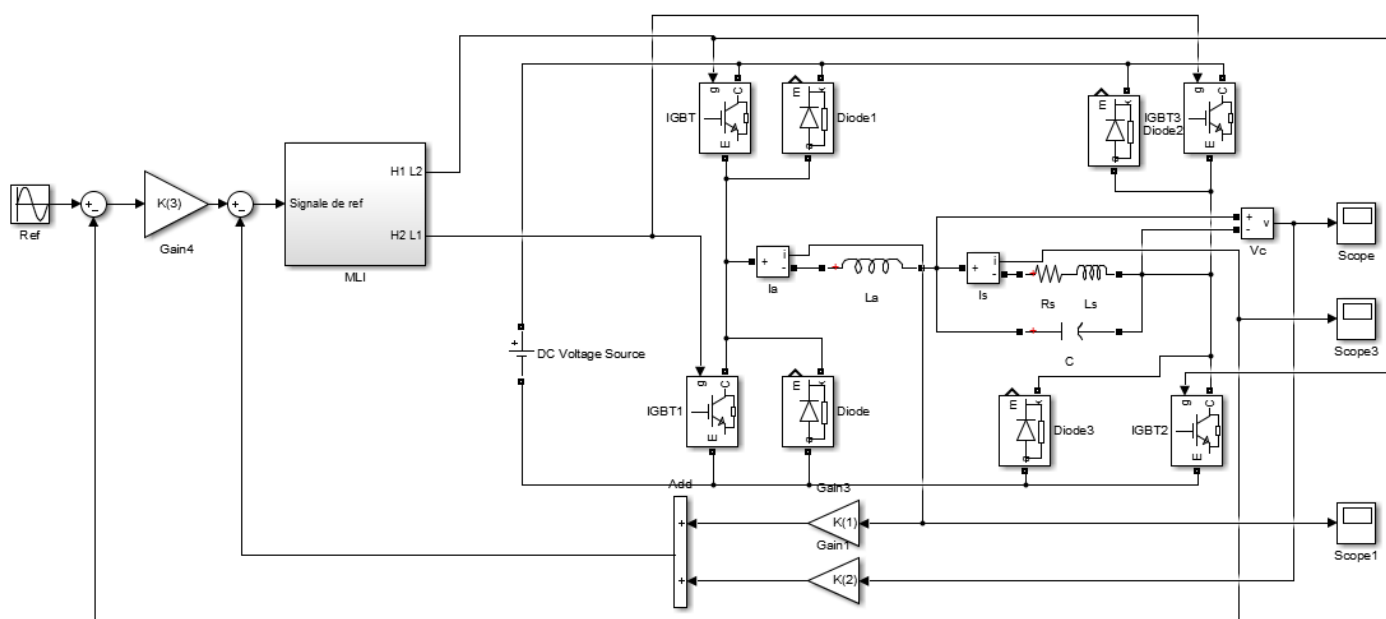


Fig. 4-18 Modélisation du système du chauffage avec la commande optimale et l'onduleur

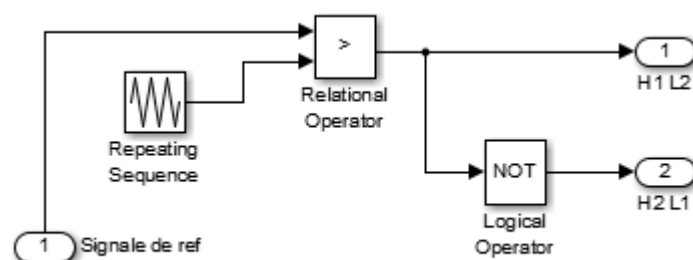


Fig. 4-19 La technique de commande des onduleurs MLI

### III. RÉALISATION PRATIQUE D'UN FOUR A INDUCTION:

Dans la partie pratique nous avons réalisé un four par induction représenté dans les photos suivant :

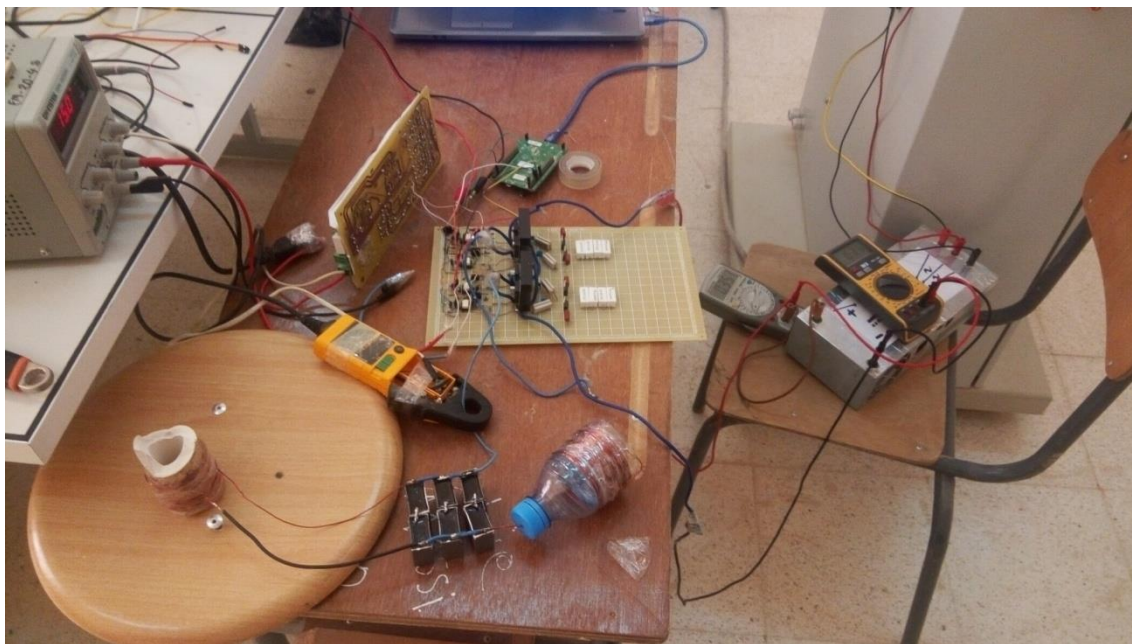


Fig. 4-20 Système du chauffage par induction

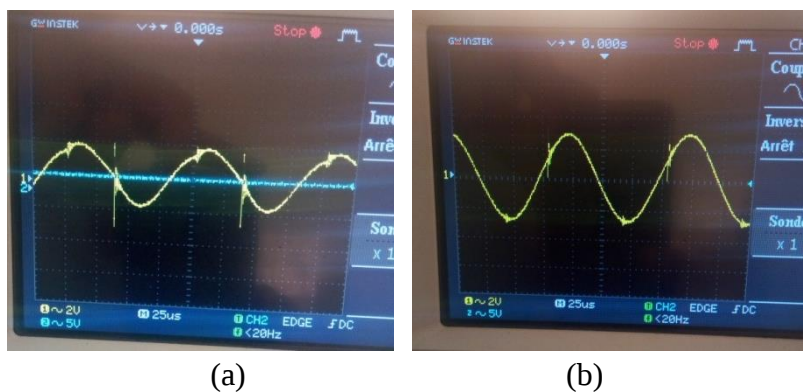


Fig. 4-21 Le courant de l'onduleur (a) et le courant dans l'inducteur



Fig. 4-22 La pièce dans l'inducteur.

#### **IV. CONCLUSION:**

Après l'analyse de circuit du système de chauffage et comment choix les valeurs de l'inducteur nous avons créés le modèle du système et fait la simulation, l'application de la commande optimale (LQR) sur le système et comparaison entre la réponse sans régulateur et avec régulateur qui donne bonne résultats.

Enfin nous avons présenté la réalisation pratique du four par induction

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail nous a permis de voir la modélisation et la commande des systèmes d'alimentation du chauffage par induction, par un régulateur optimal LQR. Cette étude nous a permis en premier lieu de modéliser ce système constitué d'une charge entourée par une bobine, et de proposer une approche de contrôle des convertisseurs statiques qui alimentent ce système en deuxième lieu.

Dans ce travail, nous avons présenté d'abord le fonctionnement, les caractéristiques et le principe général du chauffage par induction électromagnétique. Ensuite nous avons complété l'étude en abordant les structures des convertisseurs à résonance, ainsi que le principe de fonctionnement d'un convertisseur à résonance série et parallèle. Une simulation des régimes permanents et transitoires des différentes configurations était décrite et réalisée dans l'environnement Matlab/Simulink. En fait, une stratégie de commande ou de régulation optimale a été proposée aux convertisseurs à résonance utilisés dans le chauffage par induction électromagnétique à haute fréquence basée sur l'approche d'optimisation Lagrangienne. En particulier, la commande par un régulateur LQR est déterminée une fois la représentation d'état standard du système de chauffage est établie, la commande par ce régulateur offre une régulation efficace de puissance, automatiquement les variables d'états de façon directe et rapide. Les résultats de simulations ont été obtenus, une fois l'équation de Ricatti est résolue. La régulation est faite par l'alimentation de l'onduleur à travers une source continue, Le régulateur LQR a permis, par la commande de cet onduleur à travers la modulation de largeur d'impulsions, d'obtenir de bonnes performances comparés aux techniques conventionnelles PID.

Une partie de la thèse a été réservée à la conception et à la réalisation pratique du système de chauffage partant de l'alimentation jusqu'à l'inducteur autour de la carte STM32F407. Afin de valider les résultats de simulation. Nos premières observations et constatations montrent les concordances de résultats pratiques avec celles de simulations.

Vu le temps, nous recommandons une étude approfondie de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et prévoir peut être une solution adaptative et optimale aussi la régulation de fréquence de commutation qui doit suivre la fréquence de résonance de la charge.

# BIBLIOGRAPHIE

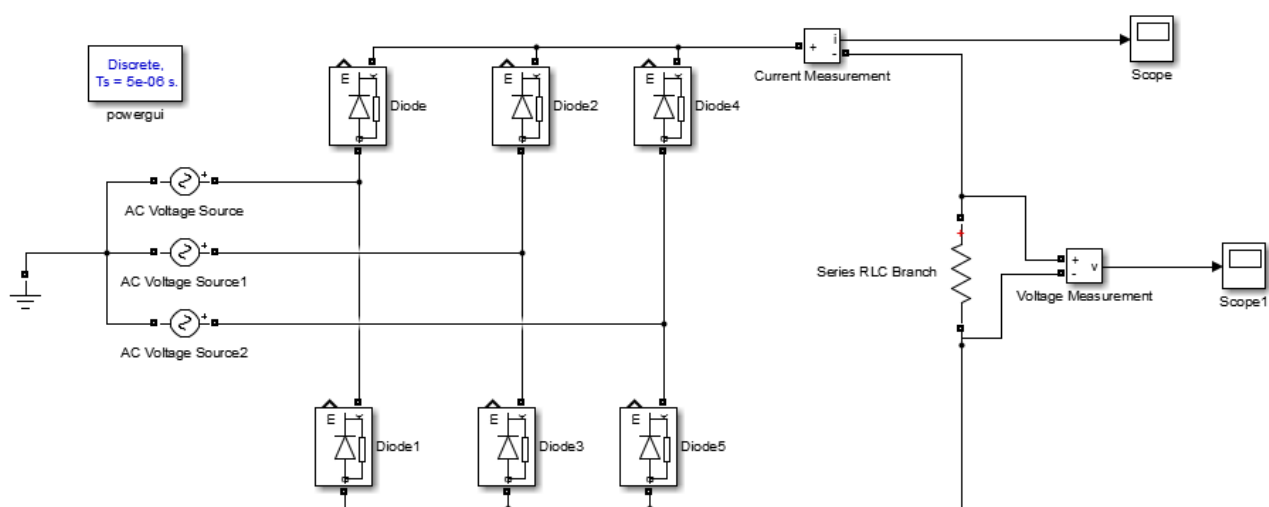
- [1] **J.M.DEDULLE, V.POULBOT, J.MORANDINI** "MODELISATION 3D DE PROBLEMES COUPLES MAGNETOTHERMIQUES PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS APPLICATION AU TRAITEMENT THERMIQUE PAR INDUCTION " thèse doctorat, l'université du Meylan–France 2010.
- [2] **ADNANI BOUBEKEUR** " MODELISATION ET CONTROLE DES CONVERTISSEURS A RESONANCE : APPLICATION AU CHAUFFAGE PAR INDUCTION" Thèse Magister , Université de Batna 2010.
- [3] **L. L. FAULKNER** "OPTIMAL CONTROL OF INDUCTION HEATING PROCESSES",2007
- [4] **JEANT CALLBAUT** "GUIDE POWER QUALITY, SECTION 7 : EFFECACITE ENERGETIQUE", [www.leonardo-energy.org/france](http://www.leonardo-energy.org/france). (Edition Août 2007).
- [5] **MAANANI YACINE** "ALIMENTATION DES SYSTEMES DE CHAUFFAGE PAR INDUCTION PAR CONVERTISSEURS A RESONANCE" Thèse de Magister CONSTANTINE 2014.
- [6] **S.ZINN , S.L. SEMIATIN** "ELEMENTS OF INDUCTION HEATING DESING, CONTROL AND APPLICATION" 1988.
- [7] **VITOR FREITAS.** "ETUDE ET REALISATION DE RESEAUX D'ADAPTATION D'IMPEDANCES ACCORDABLES LINEAIRES ET NON LINEAIRES, SUR PCB ET SILICIUM CMOS, POUR DES APPLICATIONS EN RADIOFREQUENCES". Université de Grenoble, 2012. Français.
- [8] **AMRANE FAYSSAL** , " ETUDE ET REALISATION D'UN ONDULEUR A RESONANCE POUR UTILISATION POUR LE CHAUFFAGE PAR INDUCTION" Thèse Master 2012 Université Ferhat ABBAS Setif-1.
- [9] **G.SEGUIER, L.FRANCIS, D.PHILIPPE** "ELECTRONIQUE DE PUISSANCE: STRUCTURE, COMMANDES, APPLICATIONS" 10<sup>e</sup> Edition, Dunod, 2015.

- [10] **FAÏÇAL MNIF**, "ÉTUDE ET RÉALISATION DES LOIS DE COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT ET PAR APPROCHE GÉOMÉTRIQUE: APPLICATION À UN ONDULEUR DE TENSION MONOPHASÉ", L'université du QUÉBEC 1991
- [11] **BERREZZEK FARID** "ETUDE DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE COMMANDE DES ONDULEURS A MLI ASSOCIES A UNE MACHINE ASYNCHRONE", thèse de Magister , UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA 2006
- [12] **MERABET BOULOUIHA** "NOTES DE COURS : TECHNIQUES DE COMMANDE AVANCÉE" Université de Rélizane Ahmed Zabana 2014.
- [13] **THOMAS KAILATH**, "LINEAR SYSTEMS", Prentice Hall, 1980
- [14] **HENRI BOURLES**, "LINEAR SYSTEMS", John Wiley & Sons, 2010
- [15] **DESINENI SUBBARAM NAIDU** ,"OPTIMAL CONTROL SYSTEM", Idaho State University. USA 2003.
- [16] **XIYING LI** "Linear Quadratic Tracking Optimum Controller Model Design to Optimize High Frequency Power Supply Performance" Master of Science in Engineering, Youngstown State University 1999 USA.

# ANNEXES

**ANNEXE A:**

## 1. Redresseur triphasé double alternance non commandé:



**ANNEXE B:**

**ANNEXE C:**

## ANNEXE D:

%calcul le condensateur et la bobine d'adaptation

```
clear all
clc
Rc=0.216e-3;
Rs=2.1074;
Ls=1.0495e-4;
fp=9e3;
w0=2*pi*fp;
c=1/(w0(1)*w0(1)*Ls)
w00=2*pi*10e3;
A=((Rs)^2)+(w00*Ls)^2;
B=((Rc)^2)+(1/((c*w00)^2));
F=(w00*B*Ls)-(A/(c*w00));
E=Rs*B+Rc*A;
La=-(A*B*F)/((E*E+F*F)*w00)
-----
```

%pour tracer le diagramme de bode

```
clear all
clc
Rc=0.216e-3;
Rlo=2.1074;
Llo=1.0495e-4;
C=[2.6373e-6];
k=length(C);
Lse=[2.9882e-5];
F=[1:1:25e3];
n=length(F);
vd=1;
for q=1:1:k
for m=1:1:n
w00=2*pi*F(m);
a=w00*1j+Rc/Lse(q);
b=1/Lse(q);
c=-Rc/Lse(q);
d=-1/C(q);
e=w00*1j;
f=1/C(q);
g=-Rc/Llo;
h=-1/Llo;
i=w00*1j-(Rlo+Rc)/Llo;
ise(m)=vd*abs((e*i-f*h)/Lse(q))/abs(a*e*i+b*f*g+c*d*h-g*e*c-h*f*a-i*d*b);
vc(m)=vd*abs((g*f-d*i)/Lse(q))/abs(a*e*i+b*f*g+c*d*h-g*e*c-h*f*a-i*d*b);
ilo(m)=vd*abs((d*h-g*e)/Lse(q))/abs(a*e*i+b*f*g+c*d*h-g*e*c-h*f*a-i*d*b);
z(m)=vd/ise(m);
r(m)=ise(m)/ilo(m);
P(m)=Rlo*ilo(m)^2;
```

```
Vrc(m)=(ise(m)-ilo(m))*Rc;
```

```
end
```

```
plot(F,ise),grid,title('Is'),pause
```

```
plot(F,vc),grid,title('vc'),pause
```

```
plot(F,ilo),grid,title('ilo');pause
```

```
plot(F,z),grid,title('Z'),pause
```

```
plot(F,r),grid,title('r'),pause
```

```
plot(F,P),grid,title('P')
```

```
end
```

```
-----  
%calcul les gains
```

```
clear all
```

```
clc
```

```
Rc=0.216e-3;
```

```
Rlo=2.1074;
```

```
Llo=1.0495e-4;
```

```
Lse=1.7963e-4;
```

```
c=2.9797e-6;
```

```
A=[-Rc/Lse -1/Lse Rc/Lse;1/c 0 -1/c;Rc/Llo 1/Llo -(Rc+Rlo)/Llo];
```

```
B=[1/Lse;0;0];
```

```
C=[0 0 1];
```

```
%x1=Ise;x2=Vc;x3=Ilo
```

```
D=0;
```

```
sys=ss(A,B,C,D);
```

```
R=0.0001;
```

```
roh=100000;
```

```
Q=roh*C'*C;
```

```
[K,P,E]=lqr(A,B,Q,R);
```

```
-----  
clear all
```

```
clc
```

```
fo=10e3;%la fréquence opérationnel
```

```
wo=2*pi*fo;
```

```
%-----résistance de la pièce-----
```

```
ro=800e-8;%la résistivité
```

```
u0=4*pi*1e-7;%perméabilité de l'air
```

```
ur=2000;%perméabilité relative de la pièce
```

```
ep=sqrt(ro/(pi*u0*ur*fo));%la profondeur de pénétration des courants dans l'acier ppp=
```

```
d=4e-3;%diamètre
```

```
h=50e-3;%hauteur
```

```
R=(pi*d)*sqrt(ro*pi*u0*ur*fo)/h;%la résistance de la pièce
```

```
%-----la puissance de chauffage-----
```

```
Mc=0.006; %la masse de la pièce
```

```
Cc=470;%la chaleur massique de la pièce
```

```
Ti=25;%la température initial
```

```
Tf=800;%la température final
```

```
t=60;%le temps de chauffage en seconde
```

```
Pc=Mc*Cc*(Tf-Ti)/t;%la puissance nécessaire pour le chauffage
```

```
%-----le courant dans la pièce-----  
I2=sqrt(Pc/R);%le courant dans la pièce  
%-----l'inducteur-----  
H=65e-3;%6.5  
D=46e-3;  
n1=60;  
Lp=n1*n1*(u0*pi*(D*D/4))/H;  
n1=sqrt(Lp*H/(u0*pi*(D*D/4)));  
%  
wh=R*n1*n1/Lp;  
I1=sqrt((wo/wh)^2+1)*I2*wh/(n1*wo)  
V1=I1*Lp*wo;  
%-----  
Req=R*n1*n1;  
z=fo*pi/(wh);  
Q=1/(2*z);  
%-----Calcule Rs et Ls-----  
Rs=Req/(1+Q^2);  
Ls=Lp/(1+(1/Q^2));  
%-----  
rs=(Req*(wo*Lp)^2)/(Req*Req+wo*wo*Lp*Lp)  
ls=Req*Req*Lp/(Req*Req+wo*wo*Lp*Lp)  
%-----  
P=I1*I1*rs;  
Ieq=V1/(Req)
```

## ملخص:

هذا العمل يطرح دراسة حول احد تقنيات التسخين الفعالة و السريعة هي التسخين الحثي، حيث لا يكون هناك تلامس بين القطعة المراد تسخينها و مصدر الطاقة حيث تتولد الحرارة ذاتيا بداخل هذه القطعة حيث يتم التحكم في الطاقة اللازمة للتسخين عن طريق متحكم تربيعي خطي احد طرق التحكم المثالي. كجزء من هذا العمل، و لتنفيذ هذا النظام قمنا بدراسة أهم جوانب و أساسيات التسخين الحثي بالإضافة التحكم المثالي لتحكم في استطاعة التسخين و نمذجتها. كما تم الاستعانة ببرنامج المحاكاة MATLAB/SIMULINK للتأكد من توافق النتائج النظرية و التجريبية.

**كلمات مفتاحيه:** التسخين الحثي، التحكم المثالي، متحكم تربيعي خطي، مموج الرنين

## Résumé:

Ce travail présente une technique du chauffage efficace et rapide, c'est le chauffage par induction, sans contact entre l'objet à chauffer et la source d'énergie, d'où la chaleur est générée directement à l'intérieur de cette pièce et comment contrôler l'énergie absorbé à l'inducteur par la technique de commande optimale LQR.

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié les principaux aspects du chauffage par induction avec l'intégration d'un régulateur linéaire quadratique pour contrôler la puissance du chauffage et son modélisation. Aussi, nous avons utilisé le programme de simulation MATLAB/SIMULINK pour assurer la concordance entre les résultats théoriques et ceux expérimentaux.

**Mots clés :** Chauffage par induction, Command optimale, Régulateur linéaire quadratique, Onduleur à résonance.

## Abstract:

This work presents a technique of efficient and fast heating, it is the induction heating, without contact between the object to be heated and the source of energy, from where the heat is generated directly inside this piece and how to control the energy absorbed at the inductor by the LQR optimal control technique. In this work, we studied the main aspects of induction heating with the integration of a quadratic linear regulator to control the heating power and its modeling. Also, we used the MATLAB / SIMULINK simulation program to match theoretical and experimental results.

**Keywords:** Induction heating, Optimum control, Quadratic linear regulator, Resonance inverter.