

MODÉLISATION ET COMMANDE PAR RÉSEAUX DE NEURONES D'UNE TABLE DE CUISSON À INDUCTION

ABDELKADER KANSSAB¹, BENYOUNES MAZARI², MOSTEFA BRAHAMI³,
FADHELA BELLOUAZANI¹, BACHIR BELMADANI¹

Mots-clé: Table de cuisson, Modelisation FLUX 2D, Commande M.L.I , Réseaux de neurones.

L'objectif du présent travail est la modelisation par FLUX2D et commande par réseaux de neurones d'un onduleur à haute fréquence HF destiné à une table de cuisson par induction[1]. Dans un premier temps l'étude fait appel à la modelisation électromagnétique, utilisant le logiciel FLUX2D [2], du système étudié (inducteur-récipient) et détermination de ses parametres . Pour la stabilisation du courant inducteur deux méthodes de commande sont appliquées à l'onduleur HF et comparées selon le teste de robustesse de chacune: une méthode à commande à M.L.I [3] avec un régulateur PI et une méthode basée sur l'utilisation des réseaux de neurones [4].

1. INTRODUCTION

Année après année, la cuisson par induction accroît ses parts de marché dans la cuisson des aliments, conséquence de ses grands avantages (comparé aux autres modes de cuisson), tels que rendement énergétique très amélioré, sécurité accrue (pas de risque de brulure grave), aptitude à rester propre, simplicité d'utilisation et précision du réglage de puissance. Ce mode de cuisson à l'image par induction, procédé d'échauffement par courant induit dans le matériau sous l'effet d'excitation périodiques.

Pour la cuisson par induction on utilise un inducteur de puissance alimenté par un convertisseur (onduleur à haute fréquence) [1] et recouvert d'une vitrocéramique de protection.

Dans ce travail nous calculons les paramètres de notre système étudié (tables de cuisson à induction) par la méthode des éléments finis, en utilisant le logiciel FLUX 2D [2], et pour stabiliser le courant dans l'inducteur nous avons appliqué une commande par réseau de neurones qui sera comparée à celle de la commande classique.

¹ "abdelkader kanssab" Hassiba Ben bouali University – chlef kanssab@yahoo.fr

² "benyounes mazari" Oran University- Electrotechnics Department mazai_dz@yahoo.fr

³ "mostefa brahami" Djillali Liabès University- Sidi Bel Abbès mbrahami@yahoo.fr

2. MODELISATION DE L'ENSEMBLE INDUCTEUR-RÉCIPIENT

2.1. FORMULATION

Les phénomènes électromagnétiques, sont modélisés en résolvant les équations de Maxwell [4].

$$\text{rot}(\mathbf{E}) = -\partial \mathbf{B} / \partial t; \quad (1)$$

$$\text{rot}(\mathbf{H}) = \mathbf{J}; \quad (2)$$

$$\text{div}(\mathbf{B}) = 0; \quad (3)$$

$$\text{div}(\mathbf{D}) = 0, \quad (4)$$

avec le potentiel magnétique vecteur $\mathbf{A}$ défini par :

$$\mathbf{B} = \text{rot}(\mathbf{A}). \quad (4^1)$$

La combinaison des équations ci-dessus et leurs application à notre système nous donne une équation qui s'écrit en coordonnées cylindriques comme suit :

$$\frac{\partial^2 A_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 A_\theta}{\partial z^2} + j\omega A_\theta \sigma\mu = \mu J_{ex}. \quad (5)$$

La relation (5) représente l'équation du modèle magnétodynamique, pour sa résolution on applique la méthode des éléments finis.

2.2. MODÈLE DE L'ENSEMBLE

Le schéma équivalent de notre système (inducteur-récipient) peut être assimilée à un transformateur Fig 1. L_1 et L_2 sont respectivement les inductances de l'enroulement primaire (inducteur) et celui du secondaire (charge), M est leur inductance mutuelle [5]

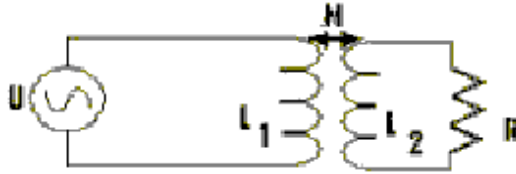


Fig. 1 – Schéma équivalent de l'ensemble (inducteur-charge).

Les équations définissant le modèle sont :

$$V_{L1} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + M \frac{di_{L2}}{dt}, \quad (6)$$

$$0 = R_2 \cdot i_{L2} + M \frac{di_{L1}}{dt} + L_2 \frac{di_{L2}}{dt}, \quad (7)$$

avec :

$$\tau = \frac{L_2}{R_2} \text{ et } k = \sqrt{\frac{M^2}{L_1 \cdot L_2}}, \quad (8)$$

τ et k sont respectivement la constante de temps et le coefficient de couplage, on déduit :

$$0 = \frac{\phi_2}{\tau} + k^2 \cdot \frac{d\phi_1}{dt} + \frac{d\phi_2}{dt}. \quad (9)$$

2.3. MODÉLISATION NUMÉRIQUE

La modelisation numérique permet de calculer avec une très bonne précision des systèmes magnétodynamique dont la géométrie est purement axisymétrique[2]. Le logiciel utilisé est le FLUX2D.

2.3.1 GEOMETRIE

On considère la symétrie du modèle étudié et on introduit seulement la moitié de la géométrie du système dans le logiciel FLUX 2D représentée par la Fig 2.

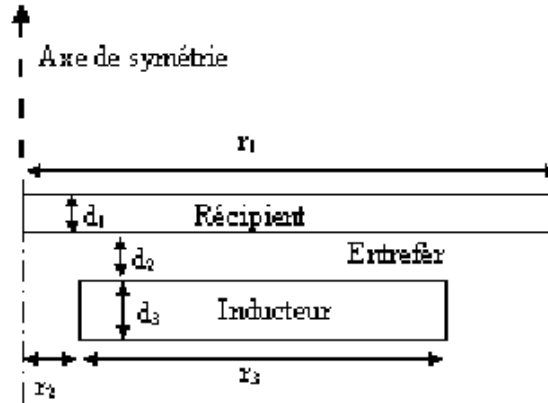


Fig. 2 – Géométrie du modèle étudié dans le logiciel FLUX 2D
($r_1=100\text{cm}$, $r_2=25\text{cm}$, $r_3=65\text{mm}$, $d_1=10\text{mm}$, $d_2=8\text{mm}$, $d_3=1,8\text{mm}$).

2.3.2. CONDITIONS AUX LIMITES

Dirichlet: $A = 0$ à l'infini [5].

2.3.3. MAILLAGE

Dans ce logiciel le maillage (Fig. 3) par éléments finis est réalisé automatiquement. Le calcul est arrêté pour un nombre de nœuds = 456487. Les courbes données par la Fig. 4, sont obtenues à partir des valeurs suivantes:

- en faisant varier N (nombre de spires) de l'inducteur de 10 à 70 tours.
- le récipient est ferromagnétique, avec une perméabilité relative $\mu_r = 1273$ et une résistivité $\rho = 2.77.10^{-7} \Omega.m$.

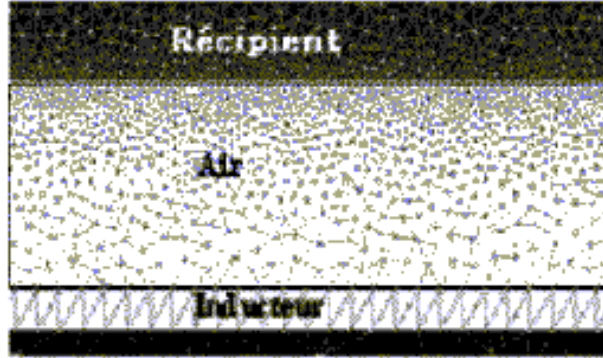
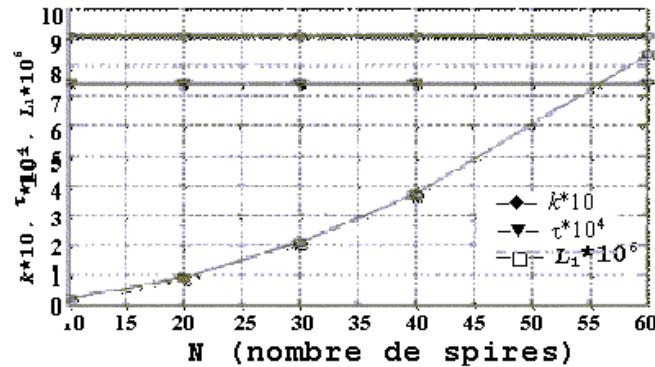


Fig. 3 – Maillage dans l'inducteur + air + récipient.

2.3.4. COURBES OBTENUES

Comme le montrent la Fig. 4 ci-dessus, l'inductance L_1 croît quand N augmente, τ et k sont pratiquement indépendants de N .

Fig. 4 – Courbes de L_1 , taux (τ) et k en fonction de N .

3. CONFIGURATION DE LA TABLE À INDUCTION

Une table de cuisson à induction est alimentée par un onduleur à haute fréquence HF (20 à 25 kHz) qui peut être réalisée soit avec un seul I.G.B.T [3], soit avec deux I.G.B.T. Ce dernier est appliqué dans notre cas Fig. 5.

La configuration de la Fig. 5 est appelée V.P.C.F (Variable Puissance Constante Fréquence) [3] et est utilisée pour remédier aux problèmes de bruits acoustiques gênant l'utilisateur.

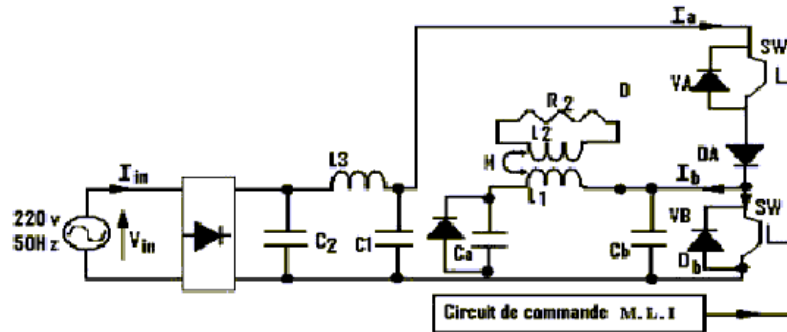


Fig. 5 – Schéma électrique global du système de la table de cuisson à deux I.G.B.T.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Avec une commande M.L.I [3] sans régulateur, appliquée aux systèmes de la Fig. 5, le courant inducteur est représenté par la Fig. 6.

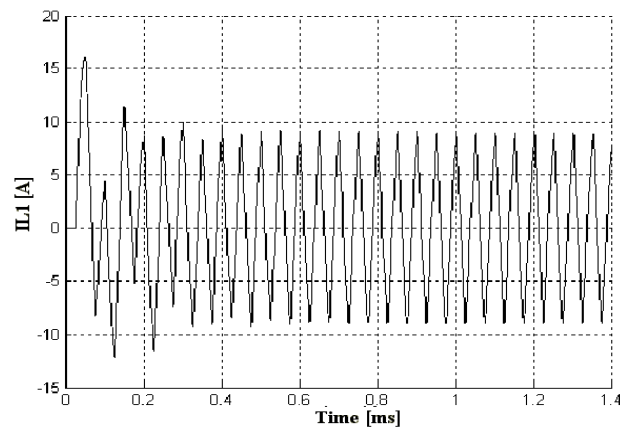


Fig. 6 – Simulation du courant de l'inducteur :

$$E = 220V, C_b = 2\mu F, C_a = 1\mu F, L_1 = 60 \mu H, k = 0,65, \tau = 9,09 \mu s.$$

La forme de l'onde du courant Fig. 6 présente une amplitude oscillante qui n'est pas stable. Pour la stabiliser on va appliquer une régulation en courant qui est le but de notre travail.

5. COMMANDE CLASSIQUE AVEC REGULATEUR PI

Pour mieux stabiliser le courant inducteur on applique un régulateur PI [6]. Le schéma synoptique de la commande classique avec régulation est donné par la Fig. 7.

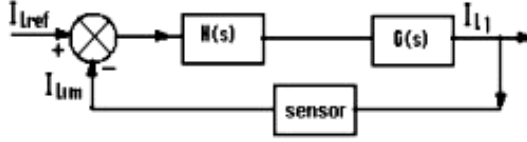


Fig. 7 – Boucle fermée du système avec régulateur PI.

Les fonctions de transfert du système étudié et du régulateur PI sont données respectivement par (10) et (11)

$$G(s) = \frac{L_2 C_a s^2 + R_2 C_a s}{(L_1 L_2 - M^2) C_a s^3 + (R_2 L_1 + R_1 L_2) C_a s^2 + (R_1 R_2 C_a + L_2) s + R_2}; \quad (10)$$

avec

$$C_a = 1 \mu F, L_1 = 60 \mu H, k = 0,65, \tau = 9,09 \mu s,$$

$$H(s) = K_p + \frac{K_i}{s}. \quad (11)$$

Les résultats du courant sont présentés sur les Figs. 8 et 9 pour $t = 5 \cdot 10^{-2} s$.

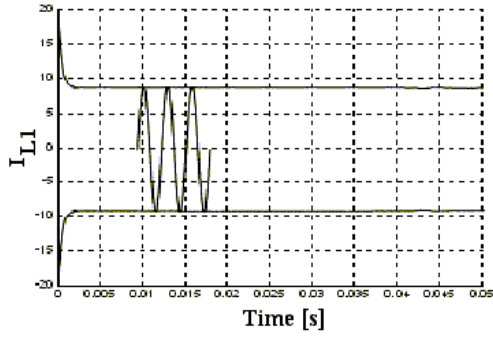


Fig. 8 – Enveloppe du courant contrôlé dans l'inducteur pour un temps de 0,05 s.

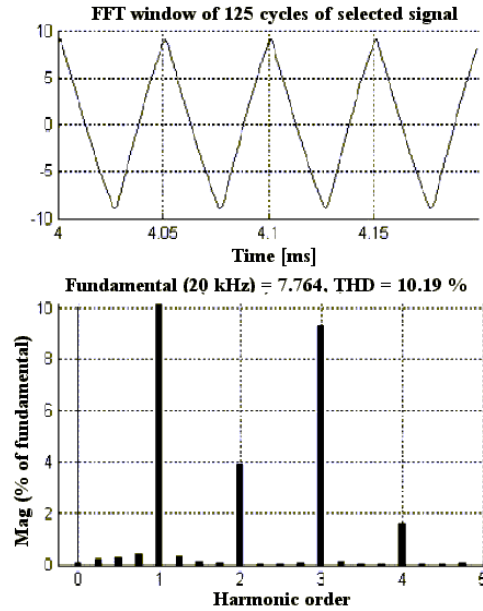


Fig. 9 – Spectres d'harmoniques.

5.1 TEST DE ROBUSTESSE

La robustesse de la commande classique vis-à-vis des perturbations est étudiée en appliquant à l'instant $t = 0,02$ s une perturbation de 30% du courant inducteur. L'allure du courant obtenu est donné par la Fig 10.

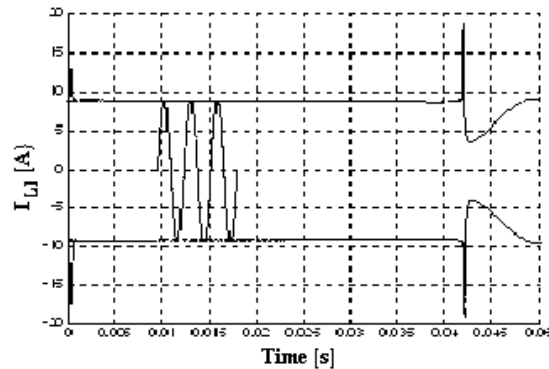


Fig. 10 – Enveloppe du test de robustesse vis-à-vis d'une perturbation (de 30% à $t = 0,02$ s).

Nous remarquons d'après la Fig. 10 que la grandeur à commander ne suit pas la valeur de consigne qu'après un certain moment d'application de cette perturbation.

6. COMMANDE PAR RÉSEAUX DE NEURONES

Les réseaux de neurones ont été fortement sollicités ces dernières années pour la commande des systèmes non linéaires [6]. Dans cette partie on utilise les caractéristiques des réseaux de neurones pour identifier le comportement du système (PI), qu'on remplace par un seul réseau de neurones formel.

6.1. CHOIX DE LA STRUCTURE DU RÉSEAU DE NEURONES

Chaque réseau de neurones remplit une fonction bien définie dépendant de l'architecture choisie (le nombre de neurones dans chaque couche cachée). Le problème est de trouver la fonction qui donne de meilleur résultat. Pour cela, plusieurs essais doivent être effectués afin de déterminer l'architecture optimale du réseau [7].

- l'entrée du réseau est e : l'erreur entre le courant et celle de la valeur de consigne.

- la sortie de commande calculée par le réseau est i_c : courant.

Dans tous les essais, l'apprentissage se déroulera sous les conditions initiales nulles. L'apprentissage est obtenu en présentant plusieurs exemples au réseau avec une erreur admissible de 10^{-4} et le nombre maximal d'itérations égal à 10^4 . L'algorithme d'apprentissage utilisé est celui de la rétropropagation [9].

Le Tableau 1 présente les résultats d'apprentissage effectués sur différentes structures du réseau de neurones.

Tableau 1

Résultats d'apprentissage pour différentes structures

Essai	Structure	Nombre d'itérations	Erreur
1	1-1-1	10^3	$5,62 \times 10^{-5}$
2	1-5-1	10^3	$5,30 \times 10^{-5}$
3	1-10-1	10^3	$5,06 \times 10^{-5}$
4	1-2-2-1	10^3	$4,50 \times 10^{-5}$
5	1-2-1	10^4	$5,40 \times 10^{-5}$
6	1-1-1-1	10^4	$4,80 \times 10^{-5}$

D'après les essais effectués, on remarque que l'erreur est plus petite pour l'essai 4, dont la structure qui lui convient [1-2-2-1] est celle adoptée à notre système Fig. 11.

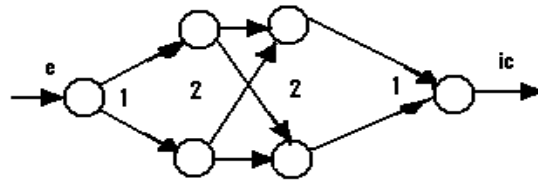


Fig. 11 – Exemple de réseaux de neurones structure [1-2-2-1].

6.2. SIMULATIONS ET COMMENTAIRES

L'application du résultat d'apprentissage avec la structure [1-2-2-1] permet d'obtenir de bonnes performances du courant inducteur, qui a une forme très proche de la sinusoïde et ne présente pas d'ondulations et d'oscillations sur l'amplitude (Figs. 12, 13).

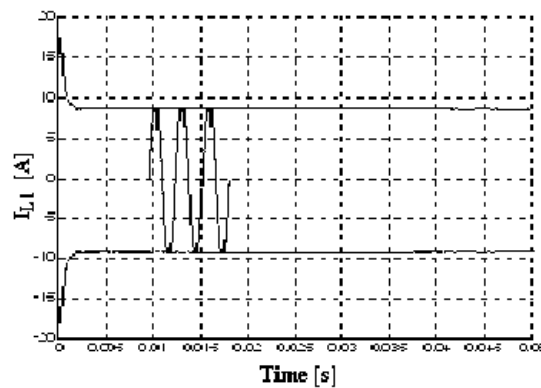


Fig. 12 – Enveloppe du courant contrôlé dans l'inducteur avec un temps de 0,05 s.

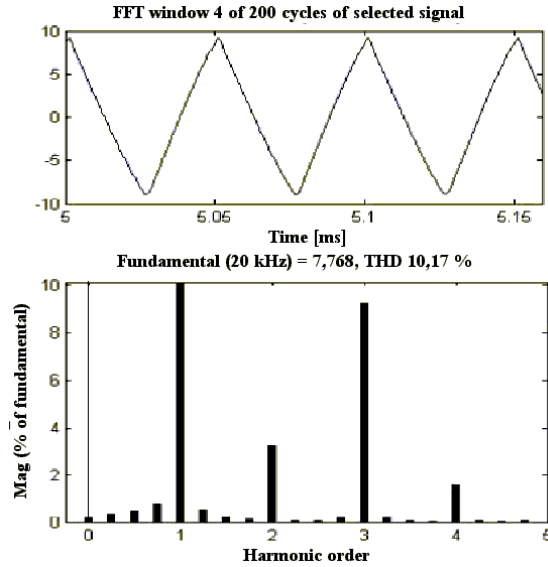
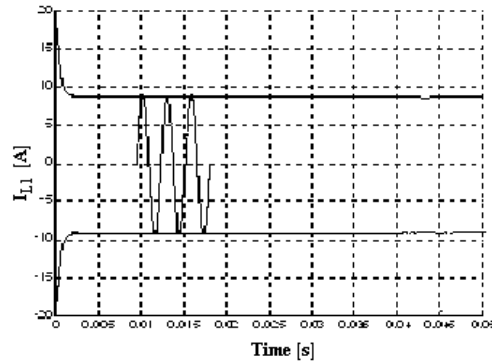


Fig. 13 – Spectre d'harmoniques.

6.3. TEST DE ROBUSTESSE

La robustesse d'une commande est sa capacité à surmonter l'incertitude dans le modèle à contrôler. Les performances des correcteurs ne doivent pas être affectées par les variations de paramètres, ni par les perturbations.

Nous proposons dans cette partie l'étude de la robustesse de la commande par réseaux de neurones vis-à-vis des perturbations affectant le courant inducteur.

Fig. 14 – Enveloppe du test de robustesse vis-à-vis d'une perturbation (de 50% à $t = 0,025$ s).

La Fig. 14 illustre le courant inducteur dans la table à induction commandé par réseau de neurones, avec présence d'une perturbation de 50% à $t = 0,025$ s. Nous constatons que cette perturbation du courant inducteur n'influe pas sur les performances de la table à induction. La grandeur à commander suit la valeur de consigne.

7. CONCLUSION

La cuisson par induction présente de nombreux avantages par rapport au mode de cuisson classique. Compte tenu de la complexité des phénomènes électromagnétiques et des contraintes imposées, l'étude d'un tel système nécessite l'utilisation d'outil de modélisation (FLUX 2D). Pour la commande de notre système nous avons appliqué une nouvelle technique de commande basée sur l'utilisation des réseaux de neurones. Les résultats obtenues, comparées à celle de la commande classique, ont montré que la commande par réseaux de neurones est plus robuste et plus performante.

Reçu le 9 octobre 2006

REFERENCES

1. J. Y Gaspard, N.Burais, B.Makloulf, *Cuisson par induction: Une nouvelle génération de système inducteur*, Congrès Européen sur les applications industrielles de l'induction, Strasbourg, 20-22 Mars, 1991.
2. Mauricio Caldora Costa, J-L Coulomb, Jean Paul Bonjiraud, *Revue internationale de génie électrique, Méthodes numériques d'analyse des champs électromagnétiques*, Numélec'2000, 4, 1-2, 2001, Gilles Cauffet.
3. S. Moiseev, H. Muraoka, M. Nakamura, A. Okuno, E. Hiraki, M. Nakaoka, *Zero voltage soft switching PWM high-frequency inverter using IGBTs for induction heated fixing roller*, IEE Proc-Electr.Power Appl., **150**, 2, March 2003.
4. Janne Nergue, J. Partanen, *Numerical Solution of 2D and 3D Induction Heating Problems with Non-Linear Material Properties Taken into Account*, IEEE Transaction on magnetique, **36**, 5, September 2000.
5. N. Burais, S. Pertoldi, J.Y Gaspard *Couplage de model pour conception d'nducteur de caisson par induction*, Numélec'97, Ecole centrale de Lyon, Mars 1997.
6. J. M. Espi, A. E. Navarro, J. Maicas, *Control circuit design of the L-LC resonant inverter for induction heating*, IEEE, Control systems magazine, Burjassol, Valencia-Spain, 2000 Lines, Leningrad, 1991.
7. S. Moiseev, H. Muraoka, Mr. Nakamura, A. Okuno, E. Hiraki, Mr. Nakaoka, *Zero voltage software switching PWM high-frequency inverter using IGBTs for induction heated fixing roller*, IEE Proc-Electr.Power Appl., **150**, 2 March 2003.

MODELLING AND NEURONAL NETWORKS CONTROL IN INDUCTION COOKING

Key words: Cooking table, Modelling FLUX 2D, Pulse amplitude modulation, Neuronal networks control.

The objective of this work is modelling by FLUX 2D and neuronal network control a high frequency resonant inverters used for induction cooking [1]. Initially the study calls upon the electromagnetic modeling, using software FLUX 2D [2], of the studied system (inductor-container) and determination of its parameters. For the stabilization of the primary current two methods of control are applied to the inverter HF and compared according to robustness of each one tests; A method Pulse Amplitude Modulation [3] with a regulator PI and a method based of the Neuronal Network control [4].