

Dimensionnement optimal d'une architecture d'électronique de puissance pour le chauffage par induction impulsif. Application au contrôle non destructif par thermographie infrarouge.

Antoine TEKIELI¹, Olivier GHIBAUDO¹, Laurent MOREL², Charles JOUBERT²

¹ Université Paris-Saclay, CEA, List, F91120 Palaiseau, France

² Université Claude Bernard Lyon 1, Ampère, UMR5005, INSA Lyon, École Centrale de Lyon, CNRS, Villeurbanne, F-69100, France

RESUME – Le procédé de chauffage par induction couplé à la thermographie infrarouge est un moyen de détecter des défauts de manière non destructive dans l'industrie de production des matériaux métalliques. Cependant à l'heure actuelle, les systèmes utilisés pour la chauffe par induction dans le cadre de la thermographie active n'ont pas été conçus pour cette utilisation et ne répondent donc pas correctement aux spécificités de celle-ci. La performance de ce contrôle est étroitement liée au régime transitoire lié à l'électronique de puissance utilisée dans les générateurs par induction, ce qui fait l'objet de ces travaux. Ce papier propose donc d'étudier trois topologies de chauffe par induction dans le cadre de la thermographie pour connaître les spécificités de chacune d'un point de vue électronique de puissance.

Mots-clés – chauffage par induction ; thermographie infrarouge ; courants de Foucault ; électronique de puissance ; contrôle non destructif.

1. INTRODUCTION

1.1. Thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est un procédé de contrôle non destructif (CND) permettant de détecter des défauts dans des composants en observant leurs rayonnements infrarouges proportionnel à leurs températures. Deux principaux types de thermographie existent : active et passive [1]. La thermographie passive consiste à observer la différence de température entre l'environnement et le composant. La thermographie active, quant à elle, consiste à chauffer le composant de manière externe et à observer la variation de température du composant de manière spatiale et temporelle. Différentes méthodes de chauffage sont utilisées en fonction des matériaux à chauffer, de leur géométrie et des défauts à détecter. Il est possible notamment de citer les méthodes de chauffe par radiation avec des lampes flash ou des lampes halogènes, qui sont le plus souvent utilisées pour les matériaux non conducteurs d'électricité [2]. Il est aussi possible de citer la méthode de chauffe par ultrasons, qui consiste à chauffer les composants grâce à une excitation mécanique via des ultrasons [3]. La méthode de chauffe traitée par nos travaux est celle par induction. Lorsque l'on chauffe un composant par induction, des courants de Foucault se forment à la surface de celui-ci, ce qui permet une chauffe homogène. Si une fissure est présente, les courants contournent la fissure du fait de sa conductivité électrique plus faible. Cela crée donc une diminution de la chauffe au niveau de la fissure et une augmentation sur les bords, comme illustré sur la Figure 1.

1.2. Chauffage par induction dans le cadre industriel à haute température

Maîtrisée et utilisée dans le domaine industriel depuis de nombreuses années, la chauffe par induction est un procédé qui

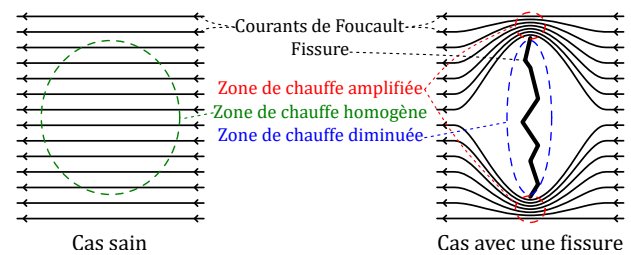


FIG. 1. Illustration du principe de la thermographie par induction

consiste à appliquer un champ magnétique alternatif aux composants à chauffer. Ce champ magnétique induit des courants de Foucault dans le composant qui chauffent une pièce grâce à l'effet de Joule. Ce procédé permet de faire chauffer des pièces de plusieurs centaines de degrés en l'espace de quelques secondes. Les puissances de l'ordre de 10kW au MW et leurs durées (quelques secondes à quelques minutes) impliquent que l'inducteur doit être refroidi. Ce refroidissement est le plus souvent réalisé en faisant circuler un liquide de refroidissement, le plus souvent de l'eau dans l'inducteur. Cela a pour conséquence de fixer un certain diamètre des tubes de l'inducteur, donc de limiter le foisonnement en spires donc son inductance. Ce refroidissement a aussi pour conséquence l'augmentation de la masse et du volume du système, ce qui implique une immobilisation de celui-ci.

1.3. Chauffage par induction dans le cadre de la thermographie infrarouge pour le CND

Dans le cadre de la thermographie, la chauffe par induction n'a pas les mêmes besoins que dans le cadre de la chauffe industrielle. En effet, l'augmentation de température recherchée n'est que de l'ordre du degré et les durées sont de l'ordre de la dizaine de millisecondes. Ces durées de chauffe plus courtes permettent une meilleure détection des défauts [1] et l'augmentation de température doit rester faible pour ne pas dégrader les propriétés des matériaux. Un effet positif de ce changement est qu'il n'est alors plus forcément nécessaire de refroidir l'inducteur. Cependant, il est nécessaire d'étudier les origines des phénomènes transitoires afin de les minimiser. En effet, bien que les transitions d'une dizaine de millisecondes n'aient que peu d'influence sur une chauffe de plusieurs secondes, lorsque la chauffe ne dure que quelques dizaines de millisecondes, il est nécessaire que le transitoire lui-même soit d'un ordre de grandeur inférieur à la milliseconde.

Dans le cadre de l'usine du futur, la technique de contrôle non destructif par thermographie infrarouge à chauffage inductif

connaît un essor industriel important, pour le contrôle de pièces métalliques en alternative aux contrôles avec chimie tel que le ressuage et la magnétoscopie pour la détection de défauts sub-millimétrique de type fissures. Des récents travaux de Tranta [4] soulignent l'importance d'adapter et d'optimiser le chauffage par induction pour améliorer la performance de détection de petits défauts surfaciques et sous-surfaciques. Le régime transitoire présent lors d'une chauffe par induction en forme d'onde crête de courte durée ($<100\text{ms}$) possède une incidence néfaste sur le contraste thermique de détection de défauts. Ce phénomène est simulé de manière phénoménologique et analytique dans les travaux de [4] sur des cas pédagogiques de type chauffage de pièce plane semi-infini, en prenant en compte les limitations en vitesse de montée linéaire ou exponentielle des fronts montants des crêteaux d'excitation, comme visible sur la Figure 2.

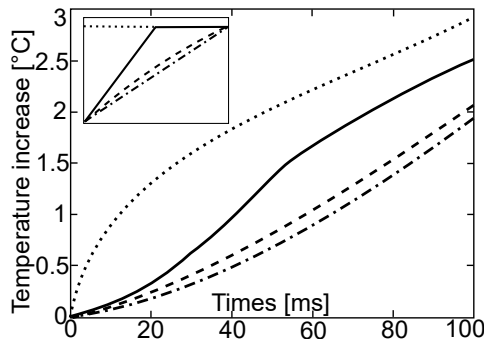


FIG. 2. Simulation analytique de la température en surface d'une plaque semi-infinie chauffée par induction, avec visualisation de l'influence de la vitesse du front montant du crêteau, extrait de [4].

Le volume de matière chauffée est également bien différent. Là où, dans le cadre industriel, l'objectif est de chauffer l'intégralité ou du moins une grande partie du composant. En thermographie il est nécessaire d'avoir une grande densité de pixels pour pouvoir détecter des défauts micrométriques, donc le champ de vision de la caméra est très restreint. L'objectif est donc de ne chauffer que la petite surface observée, d'une taille de quelques centimètres carrés maximum, sur une profondeur de quelques millimètres. Cela implique que pour traiter l'intégralité du composant, il faut soit déplacer l'inducteur, soit déplacer le composant. Par conséquent, il est intéressant que l'inducteur puisse être déplacé facilement, notamment pour les composants volumineux.

1.4. Etat de l'art et dimensionnement des générateurs par induction dans le cadre d'un chauffage impulsif

A notre connaissance, aucun convertisseur conçu spécifiquement pour la thermographie par induction n'existe sur le marché. Il existe néanmoins des systèmes commerciaux pour la thermographie infrarouge, mais ces systèmes sont le plus souvent des convertisseurs conçus pour la chauffe industrielle, interfacés au reste du système de thermographie. La conception d'un système spécifique à la thermographie permettrait d'alléger les systèmes de chauffe, d'adresser le marché de contrôle portable en maintenance, et d'augmenter les performances de détection de défauts.

Bien que les conséquences thermiques du chauffage inductif transitoire soient simulées dans les travaux de [4], les causes racines de ces phénomènes transitoires sont peu étudiées au sein de la communauté du contrôle non destructif car la majorité des générateurs de puissance utilisés sont adaptés à une chauffe par induction conventionnelle sur des longues durées supérieures à quelques centaines de millisecondes. La plupart des générateurs du commerce sont basés sur des structures en ponts en H à transistors IGBT, comme illustré sur la Figure 3, débitent une puissance active de l'ordre 5-20 kW, pour une bande passante autour

de 10-100 kHz, et refroidis à eau. Leur régime transitoire est de l'ordre de 10-30 ms, comme visible sur la Figure 4 ; il s'explique par l'architecture d'électronique de puissance utilisée et le choix des composants actifs et passifs tel que l'utilisation de transformateur élévateur de courant. Cette conception n'est pas optimisée dans le cas d'un chauffage par induction impulsif, d'une durée inférieure à 30 ms.

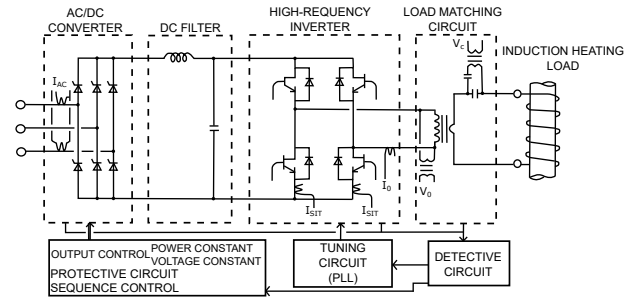


FIG. 3. Architecture classique d'un onduleur à résonance utilisé pour le chauffage par induction industrielle, avec asservissement en fréquence et puissance, extrait de [5].

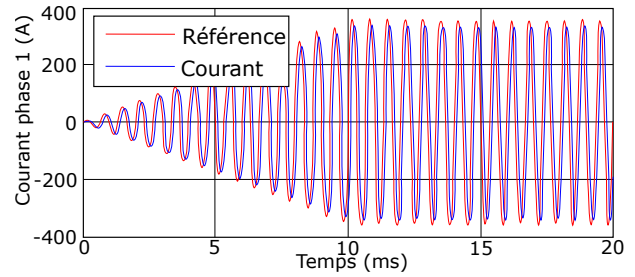


FIG. 4. Exemple de la forme d'onde simulé du courant dans un inducteur de chauffe par induction, extrait de [6].

Or, au sein d'une autre communauté, celle de la génération de force de Lorentz pour le formage et durcissement des matériaux, des impulsions électromagnétiques nettement plus brèves et intenses sont utilisées dans les travaux de Chazottes-Leconte [7]. Il s'agit de la décharge d'un banc de condensateurs dans un circuit RLC, l'énergie électrique libérée est de l'ordre de 1 à 12 kJ, l'impulsion unique est délivrée par un courant crête de 50 kA pour une puissance crête de 1 GW d'une durée de 30 μs à travers un petit inducteur en cuivre faiblement inductif (250 μH).

1.5. Dimensionnement en puissance et énergie

A mi-chemin entre ces deux communautés, le travail proposé dans cet article expose la démarche de dimensionnement optimal d'un prototype de chauffage par induction impulsif. Ce dimensionnement s'effectue par l'intermédiaire de la simulation du circuit électrique équivalent, d'une puissance comprise entre 10-20 kW, d'une durée de 20 ms, d'énergie libérée de 200-400 Joules. La finalité est d'une part d'améliorer le contraste de détection de petits défauts par thermographie infrarouge inductive en réduisant le régime transitoire, et d'autre part de concevoir un démonstrateur compact et portable pour répondre au besoin du marché du contrôle non destructif robotisé. L'efficacité du système de chauffage est traitée d'abord à travers le choix des composants de puissance, et ensuite par le caractère minimaliste de l'architecture en réduisant le nombre de composants et en éliminant leur refroidissement actif.

Les futures générations de dispositifs de stockage d'énergie privilégieront probablement les super-condensateurs en raison de leur capacité spécifique supérieure, de leur longue durée de vie, de leur sécurité, de leur taux de charge-décharge rapide, de leurs excellentes caractéristiques de conduction électrique

(faible résistance série), de leur densité de puissance élevée et de leur faible coût. Les condensateurs, en particulier à base de films minces métallisés, sont également envisagés et simulés, bien que leur énergie massique soit plus faible, mais leur constante de temps de décharge bien plus rapide. Les grandeurs d'intérêt tel que les variations temporelles de tension et courant aux bornes de la charge inductive, $\frac{dV}{dt}$ et $\frac{dI}{dt}$, sont extraites des simulations et permettront de choisir les composants les plus avantageux. Le régime d'oscillation apériodique, à résonance naturelle ou à commutations forcées, est également étudié, et la discussion portera sur l'avantage ou non d'introduire un ou plusieurs transistors de puissance, parmi les dernières générations de matériaux semi-conducteurs à large bande interdite, comme illustré sur la Figure 5. L'influence d'un transformateur élévateur de courant sur le régime transitoire est également simulé et discuté.

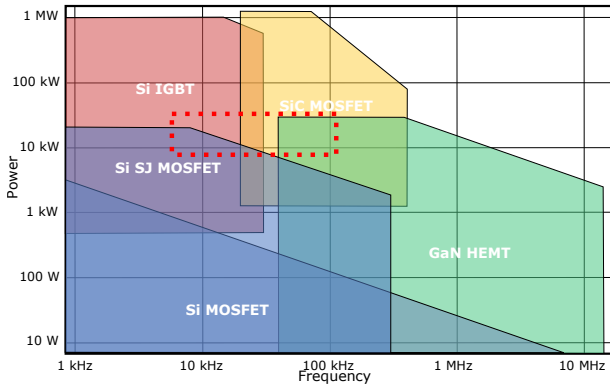


FIG. 5. Régimes de fréquence et de puissance pour différentes technologies de transistors de puissance, le besoin pour le chauffage inductif impulsif est délimité par le rectangle rouge discontinu. Extrait de [8].

2. TOPOLOGIES UTILISÉES

Différentes topologies de systèmes de chauffe par induction vont être présentées pour pouvoir ensuite étudier les avantages et les inconvénients de chacune.

2.1. Inducteur et Condensateur

Une des topologies les plus simples consiste à mettre en série l'inducteur avec un condensateur et l'onduleur, afin de travailler à la résonance. Comme visible sur la Figure 6.

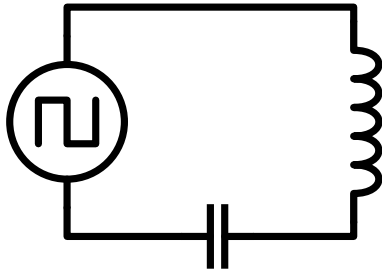


FIG. 6. Topologie avec inducteur et condensateur

2.2. Inducteur et Condensateur au secondaire d'un transformateur

La topologie la plus utilisée [9] [10] est celle ayant un transformateur élévateur de courant à la sortie de l'onduleur, comme visible sur la Figure 7.

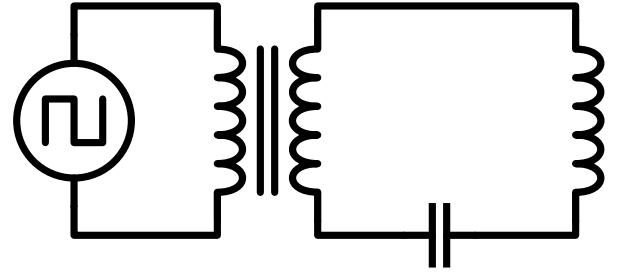


FIG. 7. Topologie avec inducteur et condensateur au secondaire d'un transformateur

2.3. Inducteur et Condensateur au primaire d'un transformateur

Une autre topologie pouvant être utilisée [11] est la même que la précédente mais en plaçant cette fois le condensateur au primaire du transformateur, comme visible sur la Figure 8.

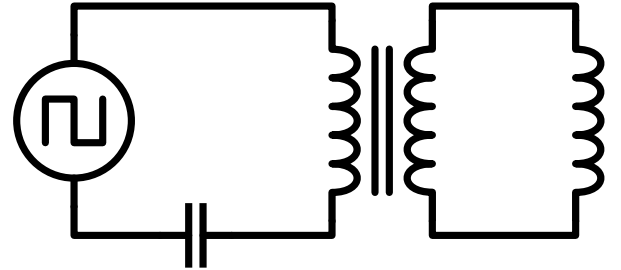


FIG. 8. Topologie avec inducteur et condensateur au primaire d'un transformateur

3. PRÉSENTATION DES MODÈLES UTILISÉS DANS LES SIMULATIONS

Pour étudier ces topologies, des simulations de celles-ci ont été réalisées sous le logiciel LTSpice. Chacun des modèles utilisés pour les différents composants est décrit dans la suite.

3.1. Inducteur et Pièces à chauffer

La modélisation la plus fidèle qui peut être faite de l'inducteur et de ses interactions avec la pièce consiste en deux inductances magnétiquement L_i et L_p couplées. L'une est court-circuitée par une résistance R_p représentant le composant à chauffer et l'autre est mise en série avec une résistance R_i pour représenter sa résistance interne, comme visible sur la Figure 9.

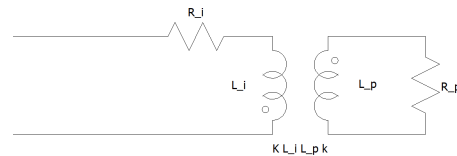


FIG. 9. Modèle complet de l'inducteur et de la pièce

Cette modélisation est satisfaisante en terme de fidélité mais a comme principal désavantage d'avoir cinq paramètres différents à identifier. Or il est possible de simplifier le modèle en calculant une résistance et une inductance équivalente, comme montrée avec les équations (1), (2).

$$R_{ieq} = R_i + \frac{R_p L_p L_i k^2 \omega^2}{R_p^2 + L_p^2 \omega^2} \quad (1)$$

$$L_{ieq} = L_i - \frac{R_p L_p L_i k^2 \omega^2}{R_p^2 + L_p^2 \omega^2} \quad (2)$$

On utilisera donc le modèle plus simple d'une résistance en série avec une inductance, comme visible sur la Figure 10. L'obtention des valeurs R_{ieq} et L_{ieq} se fera via des mesures de l'impédance de l'ensemble (inducteur + pièce) à la fréquence de travail souhaitée.

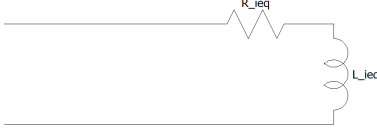


FIG. 10. Modèle simplifié de l'inducteur et de la pièce

Ici deux inducteurs différents sont utilisés, les deux ont des noyaux en "C" en poudre de fer compactée. Ces noyaux à perméabilité magnétique modérée $\mu_r = 125$ possèdent une forte induction à saturation $J_{sat} = 1,8T$, donc une faible distorsion harmonique pour les applications de puissance à moyenne fréquence (1-200kHz). De plus, la géométrie en "C" est recherchée pour concentrer les lignes de champ sur la zone inspectée par la camera infrarouge. Le premier inducteur, à gauche sur la Figure 11, possède 27 spires et ses paramètres seront utilisés pour la topologie sans transformateur. Le deuxième inducteur, à droite sur la Figure 11, possède lui 5 spires et ses paramètres seront utilisés pour les topologies avec transformateur. Ces inducteurs ont été conçus en parallèle du transformateur avec comme objectif que l'impédance à la résonance vue par l'onduleur soit similaire pour les montages avec et sans transformateur. Ce qui équivaut à ce que la résistance équivalente R_{ieq} avec l'inducteur à 27 spires soit la plus proche possible de celle avec l'inducteur à 5 spires multipliée par le carré du rapport du transformateur. La plaque utilisée comme pièce de chauffe et visible sur la Figure 11 est une plaque d'acier ferromagnétique.



FIG. 11. Photo des deux inducteurs et de la plaque en acier ferromagnétique à chauffer

Les mesures d'impédance des deux inducteurs avec la plaque à chauffée sont visibles sur les Figures 12 et 13. Cela nous permet de connaître R_{ieq} et L_{ieq} à rentrer dans la simulation en fonction de la fréquence souhaitée.

3.2. Transformateur

La modélisation et la caractérisation du transformateur qui sont utilisées sont celles présentées dans [12], et visible la Figure 14. Cette méthode de caractérisation a comme avantage de prendre en compte les différentes inductances du primaire et du secondaire et les fuites. Elle est aussi simple à réaliser, en ne nécessitant que 3 mesures au pont d'impédance, deux au primaire avec le secondaire court-circuité puis ouvert et une au secondaire avec le primaire ouvert.

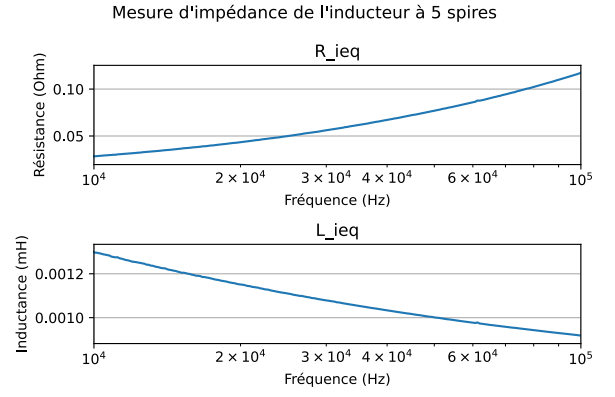


FIG. 12. Mesure d'impédance de l'inducteur à 5 spires

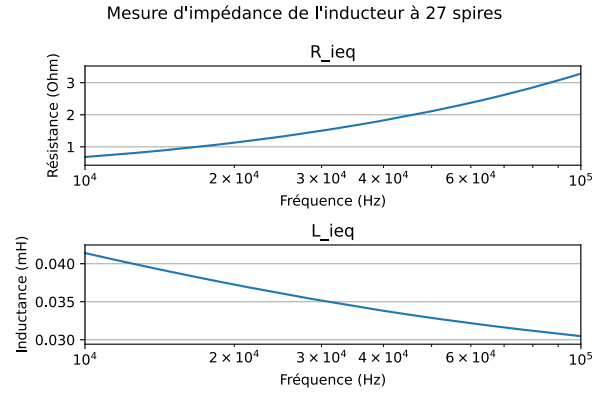


FIG. 13. Mesure d'impédance de l'inducteur à 27 spires

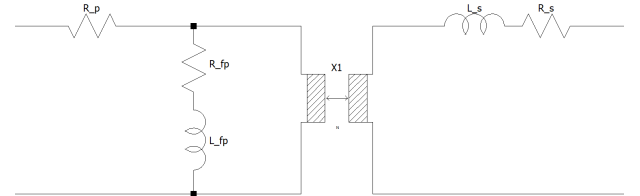


FIG. 14. Modèle du transformateur

Le transformateur utilisé est visible sur la Figure 15. Il possède 30 spires au primaire, à gauche, et 6 spires au secondaire, à droite, donc un rapport de 1/5. Son noyau est réalisé avec la même poudre de fer compacté que les inducteurs.

La caractérisation du transformateur à l'impédancemètre nous fournit les valeurs suivantes :

- $N = 0.2$
- $R_p = 60.2m\Omega$
- $R_{fp} = 121.0m\Omega$
- $L_{fp} = 149.9\mu H$
- $R_s = 7.53m\Omega$
- $L_s = 0.24\mu H$

3.3. Condensateur

Pour les trois topologies, différents condensateurs doivent être utilisés pour avoir la résonance à la fréquence voulue.

Pour la topologie sans transformateur, la valeur du condensateur est calculée pour la résonance grâce à la formule 3.

$$C = \frac{1}{L_{ieq} \times \omega^2} \quad (3)$$



FIG. 15. Photo du transformateur

Les fréquences d'intérêt pour la chauffe par induction sur des matériaux ferromagnétiques vont de 20kHz à 30kHz , les valeurs de capacité sont donc comprises entre $1,7\mu\text{F}$ et $0,8\mu\text{F}$.

Pour la topologie avec le condensateur au secondaire du transformateur, la valeur du condensateur est calculée grâce à la formule 4.

$$C = \frac{1}{(L_{ieq} + L_s) \times \frac{\omega^2}{N^2}} \quad (4)$$

Les valeurs de capacité sont comprises entre $46\mu\text{F}$ et $20\mu\text{F}$.

Pour la topologie avec le condensateur au primaire du transformateur, la valeur du condensateur est calculée grâce à la formule 5.

$$C = \frac{1}{\frac{L_{fp} \times (L_{ieq} + L_s) \times \frac{1}{N^2}}{L_{fp} + (L_{ieq} + L_s) \times \frac{1}{N^2}} \times \omega^2} \quad (5)$$

Les valeurs de capacité sont comprises entre $2,2\mu\text{F}$ et $1,0\mu\text{F}$.

Les condensateurs utilisés sont des condensateurs à films métallisés supportant une tension alternative de 760V . Pour leur résistance en série, il sera approximé qu'elle est inversement proportionnelle à la capacité du condensateur (association parallèle de couches minces pour augmenter la capacité d'un condensateur). La valeur de base sera la mesure réalisée sur un des condensateurs utilisés, $R = 7.21\text{m}\Omega$ pour un condensateur de $C = 849\text{nF}$. Ce qui donne donc l'équation (6).

$$R = \frac{6,12 \times 10^{-9}}{C} \quad (6)$$

Avec R en Ω et C en F .

3.4. Onduleur

L'onduleur sera modélisé par une source de tension alternative avec un motif rectangulaire de tension maximum V_{cc} et de tension minimum $-V_{cc}$, où V_{cc} est la tension du bus continue.

4. RÉSULTATS

Pour ces simulations, la fréquence de résonance est réglée à $f_{res} = 20\text{kHz}$ et la tension du bus continue est fixée à $V_{cc} = 30\text{V}$.

4.1. Comparaison des puissances apparentes

La conception des inducteurs et du transformateur a été faite avec pour objectif d'avoir des impédances à la résonance vue

par l'onduleur similaires, pour comparaison des résultats à iso-impédance de charge. Il est nécessaire de vérifier si cela est bien le cas en comparant les puissances apparentes à la sortie de l'onduleur.

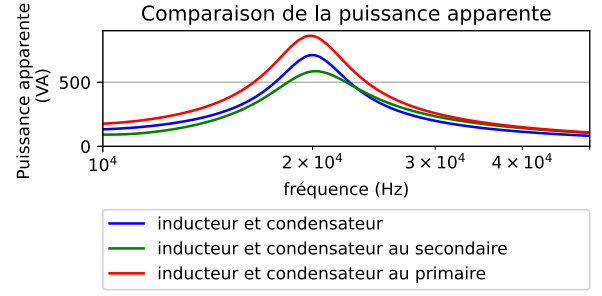


FIG. 16. Comparaison de la puissance apparente

Comme visible sur la Figure 16, les fréquences apparentes sont bien du même ordre de grandeur, entre 585VA et 715VA . Les différences n'étant pas négligeables (18%), pour normaliser les comparaisons, il faudra utiliser des valeurs absolues ou des rapports. Si cela est impossible, les comparaisons seront effectuées en vérifiant que le résultat est suffisamment important pour ne pas être liée à cette différence.

4.2. Comparaison des facteurs de puissance

Un critère intéressant pour comparer les différentes topologies est de comparer le rapport entre la puissance active consommée par l'inducteur moins les pertes joules au sein de l'inducteur, pour ne garder que la puissance permettant de chauffer la pièce, et la puissance apparente fournie par l'onduleur.

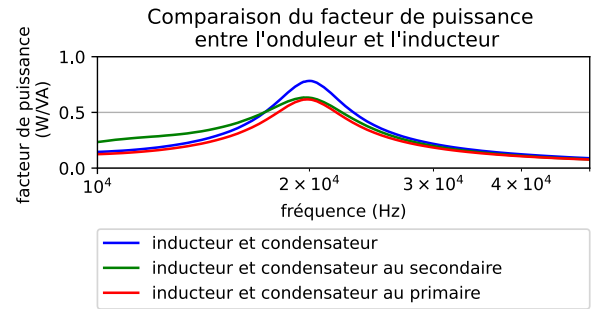


FIG. 17. Comparaison du facteur de puissance entre l'onduleur et l'inducteur

Comme visible sur la Figure 17, la topologie ayant le meilleur facteur est celle sans transformateur. Cela s'explique facilement par le fait que retirer le transformateur permet de retirer les pertes qui lui sont associées.

4.3. Comparaison des topologies avec et sans transformateur

L'objectif principal du transformateur est d'augmenter le courant dans l'inducteur. Cette augmentation de courant est bien présente, comme visible sur la Figure 18.

Cette augmentation de courant vient aussi avec une augmentation des pertes joules par spire dans l'inducteur, comme visible sur la Figure 19. Cette augmentation implique la nécessité d'un refroidissement de l'inducteur si les puissances de chauffe augmentent trop.

4.4. Comparaison des topologies avec condensateur au primaire ou au secondaire

La modification du positionnement du condensateur a pour principal impact la variation de la tension et du courant dans le condensateur, comme visible sur les Figures 20 et 21.

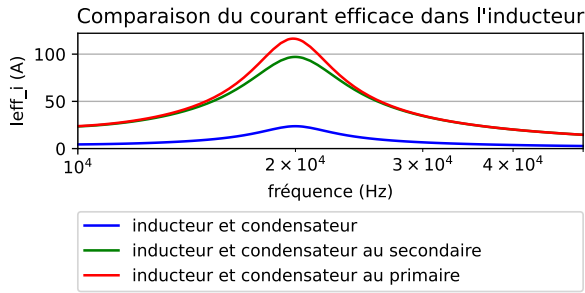


FIG. 18. Comparaison du courant efficace dans l'inducteur

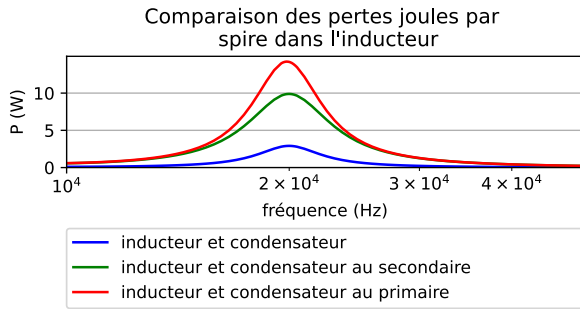


FIG. 19. Comparaison des pertes joules par spire dans l'inducteur

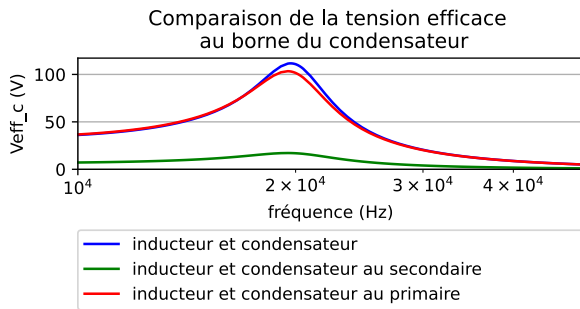


FIG. 20. Comparaison de la tension efficace aux bornes du condensateur

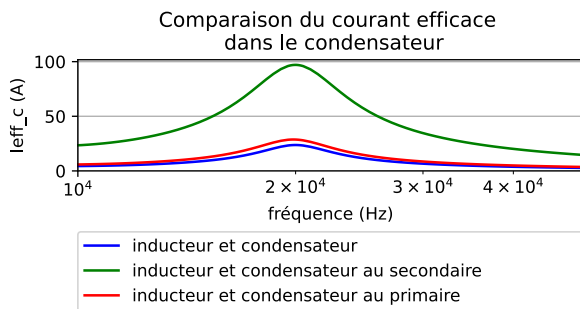


FIG. 21. Comparaison du courant efficace dans le condensateur

Ces variations de tension et de courant max sont à prendre en compte lors du choix de la topologie, notamment pour le choix de la technologie du condensateur et son dimensionnement.

4.5. Temps de réponse

Comme expliqué précédemment, il est important que le temps de réponse soit bien inférieur au temps de chauffe. Dans notre contexte de la chauffe par induction, les temps de chauffe étant de l'ordre de la dizaine de millisecondes, il est donc important d'avoir un temps de réponse inférieur à la milliseconde. Le temps de transitoire est calculé en prenant le temps de réponse à 95% de l'enveloppe du courant dans l'inducteur (Tr_{95}).

Le temps de réponse est similaire sur les 3 topologies comme visible sur la Figure 22.

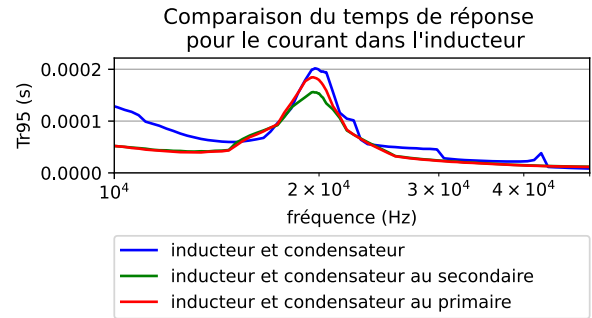


FIG. 22. Comparaison du temps de réponse pour le courant dans l'inducteur

5. SYNTHÈSE

Topologie	Inducteur et Condensateur	Inducteur et Condensateur au secondaire d'un transformateur	Inducteur et Condensateur au primaire d'un transformateur
Facteurs de puissance	$0,78 \frac{W}{VA}$	$0,63 \frac{W}{VA}$	$0,62 \frac{W}{VA}$
$I_{eff\text{inducteur}}$	2,9A	9,9A	14,2A
$I_{eff\text{condensateur}}$	23,7A	97,0A	28,7A
$V_{eff\text{condensateur}}$	111,4V	17,1V	103,4V

Topologie	Inducteur et Condensateur	Inducteur et Condensateur au secondaire d'un transformateur	Inducteur et Condensateur au primaire d'un transformateur
Facteurs de puissance	$0,78 \frac{W}{VA}$	$0,63 \frac{W}{VA}$	$0,62 \frac{W}{VA}$
$I_{eff\text{inducteur}}$	moyen	élevé	élevé
$I_{eff\text{condensateur}}$	moyen	élevé	moyen
$V_{eff\text{condensateur}}$	élevé	faible	élevé

En termes d'efficacité énergétique, la comparaison du facteur de puissance montre que la topologie sans transformateur est préférable. Elle est aussi préférable en termes d'encombrement et de complexité. Cependant, en termes de puissance apparente générée, aucune des trois topologies ne se distinguent significativement.

6. CONCLUSION

Dans le cadre du chauffage par induction optimal pour l'application de contrôle non destructif par thermographie infrarouge, l'étude de trois topologies électriques a permis de mettre en évidence les différentes contraintes de chacune d'entre elles, notamment les contraintes de tension et de courant sur le condensateur pour les topologies avec transformateur, et pour les topologies sans transformateur, les contraintes sur la valeur de l'inductance de l'inducteur. Les résultats montrent que bien que courante à l'heure actuelle, les topologies avec transformateur semblent peu justifiées pour une application en thermographie par chauffage inductif, car amenant une complexité, un encombrement et des pertes sans bénéfices pour cette application. Il sera intéressant dans des prochaines études de trouver une méthode générique à tout système de chauffe par induction permettant de choisir quelle topologie est la plus adaptée, en fonction de l'inducteur et de la tension disponible en entrée.

7. RÉFÉRENCES

- [1] Zhu, Yong-Kai, Gui-Yun Tian, Rong-Sheng Lu, et Hong Zhang. 2011. « A Review of Optical NDT Technologies ». *Sensors* 11 (8) : 7773-98. <https://doi.org/10.3390/s110807773>.
- [2] Azizinasab, Bahadin, Reza P. R. Hasanzadeh, Saeid Hedayatrasa, et Mathias Kersemans. 2022. « Defect Detection and Depth Estimation in CFRP Through Phase of Transient Response of Flash Thermography ». *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 18 (4) : 2364-73. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3101492>.
- [3] Huang, Junke, Qin Wei, Lijun Zhuo, Jianguo Zhu, Chaoyi Li, et Zhufeng Wang. 2023. « Detection and Quantification of Artificial Delaminations in CFRP Composites Using Ultrasonic Thermography ». *Infrared Physics & Technology* 130 (mai) :104579. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2023.104579>.
- [4] B. Oswald-Tranta, A. Hackl, P. Lopez de Uralde Olavera, E. Gorostegui-Colinas, A. Rosell. (2022). « Calculating probability of detection of short surface cracks using inductive thermography ». *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 21(2), 82–101.
- [5] H. Fujita, H. Akagi, « Control and performance of a pulse-density-modulated series-resonant inverter for corona discharge process », *IEEE Industry Applications Conference*, 1998
- [6] J. Egalon, « Commande d'une alimentation multi-bobines à caractère robuste pour chauffage par induction industriel », thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2013
- [7] A. Chazottes-Leconte et al., « Développement d'un dispositif de mise en compression de surface par impulsion électromagnétique », *Symposium de génie électrique (SGE 2018)*, Nancy, France
- [8] M. Buffolo et al, « Review and Outlook on GaN and SiC Power Devices : Industrial State-of-the-Art, Applications, and Perspectives ». in *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 71, no. 3, pp. 1344-1355, March 2024
- [9] Sawant, R. R., N. S. Chame, et N. K. Rana. 2006. « A New Hybrid Power Control Technique for Induction Vessel Heating System ». In 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology, 1424-29. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2006.372560>.
- [10] Paul, Arun Kumar. 2021. « Structured Protection Measures for Better Use of Nanocrystalline Cores in Air-Cooled Medium-Frequency Transformer for Induction Heating ». *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 68 (5) : 3898-3905. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2984978>.
- [11] DEVELEY, Gérard. 2000. « Chauffage par induction électromagnétique : principes ». *Techniques de l'Ingénieur*. 10 février 2000.
- [12] Beauvillain, M Pierre, M Francis Piriou, M Bruno Allard, M Jean-Pierre Keradec, M Gérard Meunier, M Hervé Stephan, et M Robert Perret. 2007. « Elaboration sans prototypage du circuit équivalent de transformateurs de type planar ».