

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 18.12.15.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 23.06.17 Bulletin 17/25.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : Se reporter à la fin du
présent fascicule

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : ELECTRICITE DE FRANCE Société
anonyme — FR, INSTITUT NATIONAL POLYTECH-
NIQUE DE TOULOUSE Etablissement public — FR et
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTI-
FIQUE - CNRS - Etablissement public — FR.

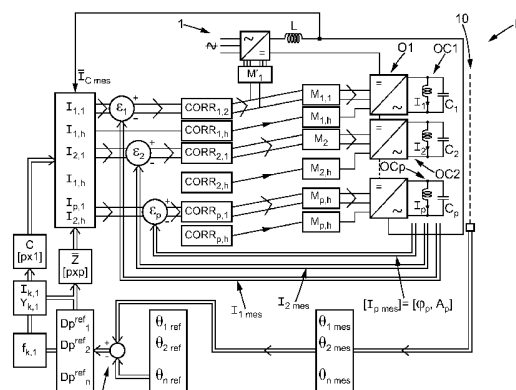
72 Inventeur(s) : PATEAU OLIVIER, MAUSSION PAS-
CAL et SOULEY MADOUYOU ABDOL MAJID.

73 Titulaire(s) : ELECTRICITE DE FRANCE Société ano-
nyme, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE
TOULOUSE Etablissement public, CENTRE Natio-
nal de la Recherche Scientifique - CNRS -
Etablissement public.

74 Mandataire(s) : CABINET PLASSERAUD.

54 PROCEDE D'OPTIMISATION DE CHAUFFAGE PAR INDUCTION.

57 Le procédé de chauffage par induction est mis en œuvre dans un dispositif de chauffage d'une pièce métallique, et comprend des inducteurs (Ind1, Ind2,..., Indp) couplés magnétiquement alimentés par des onduleurs (O1, O2,..., Op) et forme un circuit oscillant (OC1, OC2,..., OCp). Chaque onduleur est commandé par des unités de commande (M1, 1 Mp,h) de façon à faire varier l'amplitude et la phase du courant traversant l'inducteur correspondant pour chaque harmonique considéré. Le procédé comprend les étapes consistant à comparer un profil de température effectif à un profil de température de référence, et calculer un profil de densité de puissance de référence que le dispositif de chauffage doit injecter dans ladite pièce à partir de courants cibles que doivent délivrer les onduleurs et en prenant en compte les harmoniques des courants traversant les inducteurs. Les courants traversant les inducteurs (le fondamental comme les harmoniques que l'on souhaite considérer) sont comparés aux dites valeurs cibles et des écarts de courants à corriger sont déterminés pour envoyer des instructions de correction en fonction desdits écarts de courants.



PROCEDE D'OPTIMISATION DE CHAUFFAGE PAR INDUCTION.

La présente invention est relative à un procédé d'optimisation de chauffage par induction et notamment à un procédé d'optimisation de chauffage par induction mis en œuvre dans un dispositif comprenant des inducteurs couplés magnétiquement. Par couplage magnétique, on entend que les inducteurs produisent entre eux des inductions mutuelles.

Plus particulièrement, l'invention se rapporte à un procédé d'optimisation de chauffage par induction mis en œuvre dans un dispositif de chauffage d'une pièce, mais également à un dispositif de chauffage par induction et à un ensemble de chauffage.

Il est connu de l'art antérieur différentes solutions visant à chauffer par induction une pièce. Les techniques les plus classiques de chauffage par induction connues mettent en œuvre des configurations qui sont satisfaisantes lorsque les pièces à chauffer sont toujours de même nature et de mêmes dimensions.

Toutefois, de telles techniques de chauffage ne permettent pas de contrôler de façon fine des profils de chauffage sur des pièces ayant des formes et des dimensions différentes et/ou complexes et/ou variables au cours du temps

Des technologies connues permettent d'avoir un contrôle du chauffage par zone de puissance injectée, mais le contrôle du profil de température dans les zones chauffées reste lié à la conception géométrique des bobines et à leur mode d'alimentation, principalement par la variation d'amplitude des courants que l'on y injecte. La détermination de ces courants et la régulation qui en découle est fortement tributaire du couplage magnétique existant entre les bobines du fait des inductions mutuelles, chaque bobine alimentée ayant une influence sur toutes les autres. Le couplage magnétique rend le contrôle du profil de température de la pièce chauffée extrêmement délicat, sans compter qu'il peut avoir des répercussions néfastes sur les générateurs de fréquence, par exemple une casse de composants.

Une solution pour pallier ces problèmes est par exemple de minimiser les interactions magnétiques mutuelles entre les inducteurs, soit en

les éloignant soit en les blindant avec des culasses magnétiques pour canaliser le flux soit en les occultant avec des écrans magnétiques dans lesquels vont se développer des courants induits. Toutefois, cette solution ne permet pas d'obtenir un chauffage de pièces avec une précision et une finesse importante.

- 5 Elle nécessite de plus l'ajout de pièces supplémentaires volumineuses et coûteuses (culasses et écrans) ainsi que les dispositifs de motorisation et de contrôle pour assurer leur déplacement afin d'adapter le profil de densité de puissance à la pièce à chauffer.

Le contrôle de la répartition du champ magnétique et de la densité
10 de puissance injectée dans la pièce peuvent ainsi par exemple être réalisés par l'utilisation d'actionneurs mécaniques. Une utilisation complexe de formes d'inducteurs peut également être envisagée pour effectuer ce contrôle de la répartition du champ magnétique et de la densité de puissance injectée dans une pièce à chauffer par induction. Toutefois, de tels moyens entraînent un
15 temps de réponse particulièrement long, notamment lorsque, dans le processus industriel, un changement des formes des pièces et/ou des dimensions des pièces à chauffer est réalisé. Ainsi, de telles lignes de production ne permettent pas de s'adapter de façon rapide à un fonctionnement continu ni à un changement de position ou de format des
20 pièces à chauffer, et d'adapter en fonction de ce changement le profil de température désiré. De plus, des pertes supplémentaires sont induites dans les organes mécaniques qui peuvent s'échauffer et les forces électromagnétiques en présence peuvent provoquer des vibrations sur ces pièces.

La publication WO2011048316 de la demanderesse décrit un
25 exemple d'un procédé tel que précédemment décrit, qui remédie aux désavantages précités. Plus précisément, cette publication divulgue un procédé de chauffage dans lequel le chauffage par induction est mis en œuvre dans un dispositif comprenant des inducteurs couplés magnétiquement et qui permet de s'affranchir de toutes pièces mécaniques de réglage de sorte à éviter les pertes
30 induites dans ces pièces mécaniques et de sorte à simplifier la mise en œuvre du chauffage de la pièce. En l'espèce le procédé décrit dans la publication WO2011048316 a permis de prendre en compte les nombreux couplages, d'une part entre les différents inducteurs et d'autre part entre les inducteurs et

la pièce à chauffer, pour permettre de contrôler avec une bonne précision le profil de température généré par les inducteurs. Le procédé décrit dans WO2011048316 permet également l'ajustement du chauffage à différents profils de température recherchés en temps réel, en agissant sur la commande d'onduleurs alimentant les inducteurs et sans avoir besoin d'ajuster la structure des inducteurs. Le procédé décrit dans la demande WO2011048316 apporte satisfaction. Toutefois, dans un souci de s'adapter à de nouvelles configurations d'inducteurs qui conduisent à des couplages plus forts entre la charge et les inducteurs d'une part et afin d'optimiser l'efficacité énergétique d'autre part, il existe le besoin de développer un nouvel outil qui permet une meilleure adaptabilité. En effet, des couplages plus forts entre la charge et les inducteurs peuvent entraîner des fortes perturbations des courants dans les inducteurs alimentés avec des onduleurs de tension ou de courant. Ces fortes perturbations viennent perturber la commande des onduleurs et des inducteurs et par conséquence la qualité du chauffage de la pièce.

La présente invention a notamment pour but de pallier ces inconvénients.

A cet effet, l'invention concerne un procédé d'optimisation de chauffage par induction mis en œuvre dans un dispositif de chauffage d'une pièce, le dispositif comprenant des inducteurs couplés magnétiquement, chaque inducteur étant alimenté par un onduleur de tension ou de courant qui lui est propre et associé à un condensateur pour former un circuit oscillant, lesdits circuits oscillants possédant sensiblement la même fréquence de résonance, chaque onduleur étant commandé par une unité de commande de façon à faire varier l'amplitude et la phase du courant traversant l'inducteur correspondant, le dispositif comprenant en outre des moyens de détermination dudit courant ainsi que des moyens de détermination d'un profil de température effectif de ladite pièce chauffée, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

- a. on compare ledit profil de température effectif à un profil de température de référence, et on calcule un profil de densité de puissance de référence que le dispositif de chauffage doit injecter dans ladite pièce pour atteindre ledit profil de température de référence ;

b. on calcule des courants cibles appropriées pour injecter dans ladite pièce ledit profil de densité de puissance de référence par :

- la connaissance de fonctions images vectorielles représentatives des relations liant les densités de courant créées par les inducteurs aux courants traversant les inducteurs de sorte à déterminer les valeurs de l'amplitude des courants, et de la phase des courants des inducteurs,
- la connaissance d'une matrice d'impédances déterminée par la connaissance des relations électromagnétiques liant lesdits inducteurs entre eux et à ladite pièce,
- la valeur des condensateurs des circuits oscillants,
- l'identification et la détermination des amplitudes et de la phase des harmoniques du courant délivré par chaque onduleur de sorte à contrôler le fondamental et les harmoniques du courant dans l'alimentation d'un inducteur par son onduleur associé,

c. on détermine les courants traversant les inducteurs pour les comparer aux dites valeurs cibles et déterminer des écarts de courants à corriger, et on envoie aux dites unités de commande des instructions de correction en fonction desdits écarts de courants afin de commander les onduleurs de façon à corriger les courants traversant les inducteurs pour la fréquence fondamentale ainsi que pour les harmoniques.

Grâce à ces dispositions, on vient commander les harmoniques des courants aux bornes des inducteurs de sorte à améliorer les performances des inducteurs. En effet, la maîtrise des harmoniques du courant aux bornes des inducteurs permet d'envoyer aux bornes des inducteurs un signal moins perturbé et donc avec moins de distorsions. En outre, le procédé selon l'invention permet une plus grande adaptabilité.

Dans des modes de réalisation préférés de l'invention, on peut éventuellement avoir recours en outre à l'une et/ou à l'autre des dispositions suivantes.

Selon une réalisation, les harmoniques du courant délivré par chaque onduleur sont optimisés de sorte à améliorer la qualité du chauffage par induction.

Selon une réalisation, on calcule la capacité électrique des condensateurs pour compenser l'énergie réactive portée par les fondamentaux des courants des inducteurs en fonction de la connaissance des relations électromagnétiques liant lesdits inducteurs entre eux.

5 Selon une réalisation, lors de l'étape b), on utilise en outre des fonctions images vectorielles représentatives des relations liant les densités de courant créées par les inducteurs aux courants traversant les inducteurs pour chaque harmonique considéré du courant de sorte à obtenir les valeurs des amplitudes du courant et de la phase des courants des inducteurs.

10 Selon une réalisation, lors de l'étape b) les valeurs cibles sont calculées par la connaissance de la matrice d'impédances déterminée par la connaissance des relations électromagnétiques liant lesdits inducteurs entre eux et à ladite pièce pour le fondamental du courant et la connaissance des matrices d'impédances pour chaque harmonique h considéré.

15 Selon une réalisation, on identifie et on détermine les amplitudes et les phases des harmoniques de rang i , avec i allant de 2 à n , le nombre n étant un entier naturel à déterminer. Par exemple, les harmoniques de rang 2, 3, 4, 5, 6, 7, ..., 10 peuvent être considérées. Dans des variantes de réalisation, les harmoniques de rang 3, 5 et 7 peuvent être considérées. .

20 Selon une réalisation, on détermine les capacités des condensateurs et on associe une matrice d'impédance à un vecteur des capacités.

 Selon une réalisation, une modulation de largeur d'impulsions est réalisée par insertion d'angles supplémentaires afin de supprimer les harmoniques de rang supérieur ou égal à deux des courants traversant les
25 inducteurs.

 Selon une réalisation, des harmoniques de rang supérieur à deux des courants traversant les inducteurs sont supprimés.

 Selon une réalisation, le fondamental du courant délivré par chaque onduleur est contrôlé.

30 Selon une réalisation, un signal carré peut être utilisé.

 La présente invention concerne également un dispositif de chauffage par induction comprenant :

- des inducteurs couplés magnétiquement, chaque inducteur étant associé à un

condensateur pour former un circuit oscillant, lesdits circuits oscillants possédant au moins approximativement la même fréquence de résonance ;

- des onduleurs alimentant chacun un inducteur qui lui est propre, chaque onduleur étant commandé par une unité de commande de façon à faire varier l'amplitude et la phase du fondamental et des harmoniques du courant traversant l'inducteur correspondant ;

et comprenant en outre :

- des moyens de détermination du courant fondamental et des harmoniques des courants traversant les inducteurs ainsi que des moyens de détermination d'un profil de température effectif d'une pièce chauffée par le dispositif ;
- des moyens de comparaison dudit profil de température effectif par rapport à un profil de température de référence ;
- des moyens de calcul d'un profil de densité de puissance de référence que le dispositif de chauffage doit injecter dans ladite pièce pour atteindre ledit profil de température de référence;
- des moyens de calcul, basés sur la connaissance d'une matrice des impédances, de courants cibles que doivent délivrer les onduleurs afin que les courants des inducteurs et leurs harmoniques atteignent des valeurs cibles appropriées pour injecter dans ladite pièce ledit profil de densité de puissance de référence;
- des moyens de comparaison des courants traversant les inducteurs par rapport aux dites valeurs cibles, aptes à déterminer des écarts de courants à corriger, et des moyens de traitement desdits écarts de courants aptes à générer des instructions de correction envoyées aux dites unités de commande pour commander les onduleurs de façon à corriger les courants traversant les inducteurs.

Selon une réalisation, les inducteurs présentent des culasses magnétiques de canalisation du flux magnétique.

- La présente invention concerne enfin un ensemble de chauffage par induction comprenant un dispositif de chauffage par induction tel que précédemment décrit et une pièce chauffée par le dispositif de chauffage par l'intermédiaire du procédé de chauffage décrit plus haut.

Selon une réalisation, la pièce chauffée est métallique. Selon une

réalisation, la pièce chauffée comprend un métal ferromagnétique. Toutefois, dans des variantes de réalisation, la pièce chauffée n'est pas forcément métallique. Par exemple la pièce chauffée peut être uniquement conductrice de l'électricité et par suite réceptive au chauffage par induction.

5

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront au cours de la description suivante d'une de ses formes de réalisation, donnée à titre d'exemple non limitatif, en regard des dessins joints.

Sur les dessins :

10

- les figures 1A à 1E représentent schématiquement différents exemples d'ensembles de chauffage par induction pour lesquelles le procédé de chauffage selon l'invention peut être mis en œuvre ;

- la figure 2 représente schématiquement un exemple d'inducteur comportant une culasse magnétique,

15

- la figure 3 représente schématiquement un premier mode de réalisation d'un dispositif de chauffage par induction mettant en œuvre un procédé de chauffage, dans lequel les harmoniques des courants sont supprimés de sorte à réduire les perturbations du courant dans les inducteurs ;

20

- la figure 4 représente un signal carré permettant l'élimination de deux harmoniques et le contrôle du fondamental pour la mise en œuvre du procédé selon le premier mode de réalisation

25

- la figure 5 représente schématiquement un dispositif de chauffage par induction mettant en œuvre un procédé de chauffage selon un deuxième mode de réalisation, dans lequel les harmoniques des courants sont utilisés afin d'améliorer la qualité du chauffage de la pièce et d'augmenter le rendement global du système ;

- la figure 6 représente un logigramme d'optimisation mis en œuvre dans le deuxième mode de réalisation du procédé selon l'invention ;

30

- la figure 7 représente schématiquement la superposition des effets des harmoniques à partir des courants inducteurs dans le procédé d'optimisation selon le premier mode de réalisation

- la figure 8 représente schématiquement la superposition des effets des harmoniques à partir des courants onduleurs dans le procédé

d'optimisation selon le deuxième mode de réalisation.

Sur les différentes figures, les mêmes références désignent des éléments identiques ou similaires.

Les figures 1A à 1E représentent des exemples non limitatifs de dispositifs de chauffage dans lesquelles le procédé selon l'invention peut être mis en œuvre. Par exemple, la figure 1A concerne une configuration de disque métallique 10 chauffé par flux transverse à l'aide de trois couples de bobines jumelles Ind1, Ind2, Ind3. La figure 1B représente un dispositif de chauffage par induction similaire à celui de la figure 1A pour le chauffage d'une tôle 11 qui est mobile lors du procédé de chauffage par induction. La figure 1C représente schématiquement un deuxième exemple de dispositif de chauffage par induction, appliqué au chauffage d'une barre métallique 12 qui est mobile au cours du procédé de chauffage par induction. La figure 1D représente schématiquement un troisième exemple de dispositif de chauffage par induction, appliqué au chauffage d'une tôle 13 qui est entraînée en translation par exemple lors du chauffage par induction. La figure 1E représente schématiquement un quatrième exemple de dispositif de chauffage par induction, appliqué au chauffage d'une tôle 13 qui peut être également entraînée en translation par exemple lors du chauffage par induction.

La pièce chauffée par le dispositif de chauffage par induction D est une pièce 10, 11, 12, 13 métallique ou non. Plus précisément la pièce chauffée est conductrice de l'électricité et donc réceptive au chauffage par induction. La pièce chauffée peut être, comme représenté sur les figures 1A à 1E une tôle comprenant une épaisseur sensiblement constante ou non et sensiblement plane, une barre ou un tube s'étendant selon une direction longitudinale avec une section ouverte ou fermée, constante ou variable. Toutefois, dans des variantes de réalisation la pièce à chauffer peut présenter des formes plus complexes, par exemple avec des portions coudées. La pièce est chauffée par zones.

Comme représenté sur les figures 1A à 1E, le dispositif de chauffage D comprend plusieurs inducteurs Ind1, Ind2, Ind3. Le dispositif de chauffage peut comprendre deux, trois, quatre, cinq, six ou plus inducteurs Ind1, Ind2, ..Indp. Dans la description qui suit, il est considéré que le dispositif de

chauffage comprend p inducteurs $Ind_1, \dots, Ind_p$, avec p un nombre entier strictement supérieur à 1, par exemple avec p égale à 3.

Chaque inducteur $lind_1, \dots, Ind_p$ est traversé par un courant $I_1, \dots, I_p$ (visible sur les figures 3 et 5). Le courant $I_1, \dots, I_p$ traversant les inducteurs $lind_1, \dots, Ind_p$ peut être décomposé par séries de Fourier en un courant fondamental $I_{1,1}, \dots, I_{p,1}$ et une pluralité de courants harmoniques $I_{1,h}, \dots, I_{p,h}$ (avec h la fréquence harmonique ou l'ordre d'harmonique considéré). Les courants harmoniques sont dus au mode de commande des onduleurs (notamment aux courants carrés générés par les onduleurs) et/ou à la présence de dispositifs magnétiques non linéaires (culasses magnétiques, pièces chauffées ferromagnétiques) dans le réseau du dispositif de chauffage. On parlera notamment d'harmoniques d'ordre h , avec h pouvant être un chiffre pair ou impair. Dans une variante de réalisation, on peut considérer les harmoniques à la fois paires et impaires. Dans une autre variante, seules les harmoniques d'ordre impair peuvent être considérées. En général une harmonique d'ordre 1 correspond à un fondamental. Aussi, dans le reste de la description, sauf si spécifiquement mentionné, le terme « fondamental » correspond à l'harmonique d'ordre 1 et le terme « harmoniques » correspond à des harmoniques d'ordre strictement supérieur à 1. Tel que schématiquement représenté sur les figures 3 et 5, chaque inducteur $Ind_1, \dots, Ind_p$ peut être associé à un condensateur $C_1, \dots, C_p$ connecté en parallèle dans le cas d'onduleurs de courant. Toutefois, la présente invention peut aussi être mise en œuvre avec des onduleurs de tension. Dans le cas d'onduleurs de tension, les condensateurs sont en série avec les inducteurs.

Chaque couple inducteur-condensateur forme un circuit oscillant $OC_1, \dots, OC_p$. Les circuits oscillants $OC_1, \dots, OC_p$ peuvent être chacun sensiblement à la même fréquence de résonance. Les circuits oscillants $OC_1, \dots, OC_p$, et par conséquent les inducteurs $Ind_1, \dots, Ind_p$ sont alimentés par des onduleurs $O_1, \dots, O_p$. Plus précisément, chaque circuit oscillant $OC_1, \dots, OC_p$ est alimenté par un onduleur $O_1, \dots, O_p$ correspondant. La pluralité d'onduleurs est en l'occurrence reliée à une unique source 1 continue. Les onduleurs $O_1, \dots, O_p$ peuvent être soit des onduleurs de courant soit des onduleurs de tension.

Chaque onduleur $O_1, \dots, O_p$ peut comprendre des interrupteurs

électroniques bidirectionnels. Comme visible sur les figures 3 et 5, chaque onduleur $O_1, \dots, O_p$ est commandé par une unité de commande, également appelée modulateur $M_{p,h}$ avec p le nombre d'onduleurs et h le nombre d'harmoniques qui sont contrôlées. Plus précisément, à chaque onduleur peut correspondre une pluralité de modulateurs. Ainsi, le premier onduleur O_1 est commandé par une pluralité de modulateurs $M_{1,1}, \dots, M_{1,h}$. De façon similaire, le deuxième modulateur est commandé par une pluralité de modulateurs $M_{2,1}, \dots, M_{2,h}$. Il en est de même pour l'ensemble des onduleurs $O_1, \dots, O_p$ du dispositif. Chaque modulateur conçoit des ordres de commande des interrupteurs sous la forme d'impulsions, et le décalage dans le temps de ces ordres permet par exemple de faire varier l'amplitude $A_{1,1}, \dots, A_{p,h}$ et la phase $\varphi_{1,1}, \dots, \varphi_{p,h}$ du courant traversant l'inducteur correspondant pour le courant fondamental $I_{1,1}, \dots, I_{p,1}$ et pour les harmoniques du courant $I_{1,h}, \dots, I_{p,h}$ que l'on souhaite considérer. La variation de l'amplitude du courant considérée en sortie de chaque onduleur $O_1, \dots, O_p$ s'effectue par modulation de largeur d'impulsions et notamment en introduisant un angle de décalage sur le signal généré par le modulateur commandant le courant considéré (fondamental du courant ou harmonique h du courant) de l'onduleur $O_1, \dots, O_p$. Le décalage peut aussi bien se faire en retard ou en avance par rapport au signal de commande de l'onduleur d'un autre inducteur pris comme référence.

Afin de déterminer et contrôler en temps réel la densité de puissance à injecter dans la pièce chauffée, des moyens de détermination des paramètres d'amplitude et de phase des courants traversant les inducteurs peuvent être prévus. Ainsi, il est possible de corriger la commande des onduleurs en temps réel par les modulateurs $M_{1,1}, \dots, M_{p,h}$.

Ces moyens de détermination des paramètres d'amplitude et de phase des courants traversant les inducteurs fournissent ces paramètres à des unités comparatrices $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_p$. Les moyens de détermination des paramètres d'amplitude et de phase sont par exemple notamment des transformateurs de courant disposés chacun en série avec un inducteur. Toutefois, dans des variantes de réalisation d'autres moyens peuvent être envisagés.

En outre, des moyens de détermination d'un profil de température effectif $\Theta_{1mes}, \Theta_{2mes}, \dots, \Theta_{nmes}$ de la pièce à chauffer sont prévus. Par exemples

des thermocouples peuvent être envisagés et disposés sur une pluralité n de zones chauffées et les températures $\Theta_{1\text{mes}}, \Theta_{2\text{mes}}, \dots, \Theta_{n\text{mes}}$ de chaque zone peuvent être ainsi mesurées. En variante, des caméras thermiques peuvent être utilisées. La mesure de température peut également être réalisée de façon indirecte par calculs par exemple si les zones de la pièce où la température est à mesurer sont difficiles d'accès ou confinées.

Le profil de température peut être déterminé en continu pendant la chauffe et être régulièrement ou de façon continue comparé à un profil de température de référence $\Theta_{1\text{ref}}, \Theta_{2\text{ref}}, \dots, \Theta_{n\text{ref}}$ correspondant au profil final de chauffe souhaité pour la pièce. Le profil final de chauffe souhaité pour la pièce à chauffer peut être préalablement enregistré par un manipulateur ou autre dans une mémoire.

La comparaison entre le profil de chauffe de référence $D_{\text{pref}1}, \dots, D_{\text{pref}n}$ (aussi appelé profil de chauffe théorique) et le profil de chauffe mesuré $D_{\text{mes}1}, \dots, D_{\text{mes}n}$ est effectuée par un comparateur. Le résultat est traité par un calculateur. Le calculateur peut par exemple consister en une mémoire dans laquelle est rentré un tableau de profils précalculés de densité de puissance de référence correspondants à différents profils de température effectifs pour une ou plusieurs configurations de pièces et un ou plusieurs profils de densité de puissance de référence. Le calculateur calcule, à partir des équations connues de la chaleur et ou à partir d'équations simplifiées, le profil de densité de puissance de référence $D_{\text{pref}1}, \dots, D_{\text{pref}n}$ que le dispositif de chauffage doit injecter dans la pièce pour atteindre le profil de température de référence $\Theta_{1\text{ref}}, \Theta_{2\text{ref}}, \dots, \Theta_{n\text{ref}}$.

A partir du profil de référence $D_{\text{pref}1}, \dots, D_{\text{pref}n}$ que le dispositif de chauffage doit injecter dans la pièce pour atteindre le profil de température de référence $\Theta_{1\text{ref}}, \Theta_{2\text{ref}}, \dots, \Theta_{n\text{ref}}$, un calculateur établit des courants cibles $I_{\text{ref}1,1}, \dots, I_{\text{ref}p,h}$ que doivent délivrer les onduleurs afin que les courants aux bornes des inducteurs atteignent des valeurs cibles appropriées pour injecter dans la pièce à chauffer le profil de densité de puissance de référence. Ces valeurs cibles appropriées $I_{\text{ref}1,1}, \dots, I_{\text{ref}p,h}$ vont être déterminées en prenant en compte non seulement le courant fondamental (aussi appelé harmonique d'ordre un) du courant délivré par l'onduleur mais également les harmoniques du courant. En

effet, la prise en compte uniquement du fondamental du courant ne permet pas d'obtenir un profil de chauffe fin, à cause de fortes distorsions. Toutefois, la prise en compte des harmoniques du courant assure un réglage plus précis. Des unités comparatrices comparent les paramètres des courants mesurés pour le fondamental et pour les harmoniques aux valeurs cibles $I_{ref1,1}, \dots, I_{refp,h}$ et détermine les écarts entre ces deux grandeurs. Des unités de traitement $CORR_{1,1}, \dots, CORR_{p,h}$ des paramètres d'amplitude et de phase de ces courants de correction (pour le fondamental de chacun des courants et pour les harmoniques considérés de chacun des courants) génèrent des instructions de correction envoyées aux modulateurs pour commander les onduleurs de façon à corriger les amplitudes et le déphasage pour le fondamental et pour les harmoniques considérés des courants traversant les inducteurs.

Plus particulièrement, la prise en compte des harmoniques du courant, ou encore la maîtrise des harmoniques du courant, pour améliorer ou affiner le profil de chauffe de la pièce à chauffer par le dispositif de chauffage peut être réalisée de deux manières. La première manière est représentée schématiquement sur la figure 3 tandis que la deuxième manière est représentée schématiquement sur la figure 5.

De façon générale, les calculs utilisés et grandeurs mises en jeu pour réaliser le procédé d'optimisation de chauffage par induction se basent notamment sur les équations connues et simplifiées ou non de la chaleur (non reproduites ici) et utilisent également des fonctions $f_{k,h}$ dites fonctions images des densités de courant en fonction de la position des points de la pièce chauffée par le dispositif de chauffage D. Les fonctions images $f_{k,h}$ donnent les répartitions de puissance des induits par des inducteurs de courant unitaire pour chaque fréquence fondamentale et éventuellement pour chaque harmonique pour obtenir les valeurs des courants en amplitude. Ces fonctions images sont définies notamment dans la publication WO2011048316 pour le fondamental.

Selon un premier mode de réalisation, les courants cibles sont calculés en cherchant à éliminer les harmoniques du courant.

Plus précisément, le principe de ce premier mode de réalisation consiste en la détermination des formes des signaux carrés qui permettent

d'éliminer les amplitudes des harmoniques du courant H_n de la série de Fourier (ou en d'autres termes, pour chaque inducteur et pour chaque harmonique $A_{1,h}, \dots, A_{p,h}$, avec h strictement supérieur à un). La détermination des formes des signaux carrés suppose l'insertion d'angles supplémentaires lors de la correction du courant qui correspond à une modulation de largeur d'impulsion. La décomposition en série de Fourier de la tension par exemple aux bornes des inducteurs peut s'écrire :

$$V = \sum_{n=1}^{\infty} H_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

Avec :

V : Tension aux bornes des inducteurs ;

H_n : amplitude des harmoniques

φ_n : phase des harmoniques

ω : pulsation du fondamental

Le réglage des amplitudes H_n des harmoniques implique qu'il y ait autant d'angles sur le quart de période que d'harmoniques à contrôler lorsque l'on considère la source de tension ou de courant (définie ci-avant) constante. Les angles sont déterminés en résolvant l'équation suivante :

$$H_n = \frac{4E}{n\pi} \sum_{k=1}^M (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k)$$

Avec :

E : la tension aux bornes des onduleurs ;

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_M < \frac{\pi}{2}$$

M : le nombre d'harmoniques que l'on souhaite contrôler.

Afin d'obtenir un profil de chauffe de la pièce qui soit particulièrement fin, le fondamental du courant doit être contrôlé en même temps que l'élimination des harmoniques du courant les plus gênantes.

Par exemple, afin de simplifier le système, mais également parce que ce sont les harmoniques qui génèrent le plus de perturbations, on peut choisir

de maîtriser (et donc, dans le premier mode de réalisation d'éliminer) uniquement les harmoniques de rang 3 et 5. En outre, la valeur du fondamental peut être imposée par le biais d'un paramètre m . A priori, les valeurs des harmoniques, dans ce premier mode de réalisation, ne sont pas connues.

5 On peut écrire, l'équation suivante :

$$\begin{cases} f1 = \cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) = m \\ f2 = \cos(3\alpha_1) - \cos(3\alpha_2) + \cos(3\alpha_3) = 0 \\ f3 = \cos(5\alpha_1) - \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) = 0 \end{cases}$$

Avec :

m : paramètre pour imposer la valeur du fondamental.

10 La figure 4 représente un exemple de signal utilisé pour le contrôle du fondamental d'un courant et l'élimination de deux harmoniques.

Par exemple, pour un onduleur de tension, le paramètre m est calculé par l'équation suivante qui met en relation les fondamentaux des tensions à obtenir aux bornes des onduleurs et la source de tension continue :

$$m_i = \frac{V_{ond_i}}{4E/\pi}$$

15

Avec :

i : le nombre d'onduleurs.

20 Les valeurs de m sont nécessairement inférieures à 1 car on ne peut disposer d'angles correspondant à un fondamental plus grand qu'il ne l'aurait été dans le cas d'un signal en pleine onde. Les valeurs de m sont par ailleurs toujours positives.

Par suite, on peut écrire :

$$0 < m_i < 1$$

25 Les valeurs des condensateurs du système sont invariables (ou inchangées) car on impose les mêmes fondamentaux des courants dans les inducteurs. Le temps de commutation min doit être également défini. La

contrainte supplémentaire :

$$\alpha_2 - \alpha_1 > \min$$

Et

$$\alpha_3 - \alpha_2 > \min$$

5 peut être imposée avec min un angle qui par exemple peut être de 5°.

A partir de la connaissance des condensateurs et autres paramètres fixes ou fixés et des équations ci-dessus, il est possible de calculer les angles de commande pour commander les onduleurs du dispositif de sorte que les harmoniques de rang 3 et 5 (H3, H5) soient nulles.

10

En particulier, la matrice d'impédances du système pour la configuration de chauffage envisagée, afin de refléter l'état magnétique du système pour une géométrie donnée doit être déterminée. En particulier cette détermination est possible, en temps réel, sans connaissance préalable sauf le nombre de lignes et de colonnes de la matrice d'impédances. Les équations qui suivent sont données, à titre d'exemple, pour un dispositif de chauffage comprenant trois inducteurs. Toutefois, dans des variantes de réalisation, les dispositifs de chauffage peuvent comprendre plus de trois inducteurs.

15

L'équation matricielle générale du système, en ne considérant que le courant fondamental, peut s'écrire :

20

$$\underline{V} = \underline{Z} \cdot \underline{I}$$

Avec :

$\underline{V}$: Tensions sinusoïdales aux bornes des inducteurs ;

$\underline{I}$: Courants dans les enroulements des inducteurs

$\underline{Z}$: matrice d'impédance du système pour le courant fondamental.

25

Dans le cas présent, pour le courant fondamental, la matrice peut s'écrire sous la forme :

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11}(\omega) & Z_{12}(\omega) & Z_{13}(\omega) \\ Z_{21}(\omega) & Z_{22}(\omega) & Z_{23}(\omega) \\ Z_{31}(\omega) & Z_{32}(\omega) & Z_{33}(\omega) \end{bmatrix}$$

Ou encore :

$$Z = \begin{bmatrix} R_{11} + jL_{11}\omega & R_{12} + jL_{12}\omega & R_{13} + jL_{13}\omega \\ R_{21} + jL_{21}\omega & R_{22} + jL_{22}\omega & R_{23} + jL_{23}\omega \\ R_{31} + jL_{31}\omega & R_{32} + jL_{32}\omega & R_{33} + jL_{33}\omega \end{bmatrix}$$

Avec :

5

L_{mm} : inductance propre de chaque inducteur

$L_{mn} = L_{nm}$: inductances mutuelles entre inducteurs

R_{mm} : résistances propre de chaque inducteur

$R_{mn} = R_{nm}$: résistances équivalente due aux courants induits.

10 Avec la connaissance des relations électromagnétiques entre les bobines et la pièce à chauffer, et notamment des fonction $f_{k,1}$ définies ci-dessus pour le fondamental, il est possible de procéder au calcul des courants de référence du courant fondamental à injecter dans chacune des bobines afin d'obtenir le chauffage désiré.

15 Ce premier mode de réalisation peut être en particulier appliqué pour le chauffage de pièces métalliques non magnétiques (en d'autres termes des pièces ne comportant pas de matériau magnétiques). Toutefois, des pièces non métalliques mais conductrices d'électricité peuvent également être envisagées, comme mentionné précédemment. En outre, les inducteurs ne
20 présentent pas de culasses magnétiques. La mise en œuvre du procédé selon le premier mode de réalisation, à savoir la suppression des harmoniques, peut avoir lieu selon les quatre étapes suivantes.

Dans une première étape, les températures effectives Θ_{1mes} , Θ_{2mes} , Θ_{nmes} mesurées de la pièce sont comparées avec les valeurs de température de référence Θ_{1ref} , Θ_{2ref} , ... Θ_{nref} , de sorte à déterminer la carte des densités de

puissance à injecter dans la pièce.

Les températures effectives Θ_{1mes} , Θ_{2mes} , ... Θ_{nmes} peuvent être mesurées, comme précédemment décrit par une caméra thermique ou par des thermocouples ou encore par d'autres moyens de mesure de température d'une pièce connus.

Dans une deuxième étape, on utilise les fonctions de forme $f_{k,1}$ donnant les répartitions de puissance induits par des inducteurs de courant unitaire pour obtenir les valeurs des courants en amplitude ($I_{1,1}$, ..., $I_{p,1}$) et en phase ($\varphi_{2,1}$, ..., $\varphi_{p,1}$) des inducteurs Ind1 à Indp. La connaissance de la matrice d'impédance Z1 et des condensateurs permet de déterminer les courants de référence du courant fondamental au niveau des onduleurs O1 à Op.

Dans une troisième étape, il est déterminé, pour chaque onduleur O1, ... Op, les courants harmoniques $I_{ond_k,h}$ et leur phase pour chaque harmonique h, avec h strictement supérieur à 1. A titre d'exemple non limitatif, h peut être égal à trois et cinq, ou plus et/ou avec des harmoniques paires.

Dans une quatrième étape, la comparaison entre les courants de référence du fondamental des inducteurs et ceux réellement mesurés permet de calculer les informations de correction des ordres de pilotage des différents onduleurs pour la fréquence fondamentale (ordres $M_{k,1}$) ainsi que pour les harmoniques (ordres $M_{k,h}$).

On effectue ainsi autant de calculs de correction qu'il y a d'harmoniques à contrôler. Le nombre d'harmoniques à contrôler peut varier en fonction de la finesse souhaitée du profil de température. En l'espèce, le contrôle (et donc la suppression) des harmoniques d'ordre 3 et 5 permet d'affiner le profil de température de façon particulièrement satisfaisante.

Ainsi, on compense les harmoniques, par exemple d'ordres 3 et 5 par réglage des angles de commande des onduleurs.

Comme visible sur la figure 3, le profil de référence D_{pref1} , ... D_{prefn} est associé d'une part aux fonctions de forme $f_{k,1}$ donnant les répartitions de puissance induits par des inducteurs de courant unitaire et d'autre part à la matrice d'impédances $Z_1, \dots, Z_h$. Les capacités des condensateurs $C_1, \dots, C_p$

sont calculées et on obtient ainsi les courants cibles à injecter dans la pièce. Les fondamentaux des courants cibles sont comparés aux courants mesurés puis envoyés vers des unités de traitement $CORR_{1,1}, \dots, CORR_{p,h}$. Les courants harmoniques sont également envoyés vers des unités de traitement

5 $CORR_{1,1}, \dots, CORR_{p,h}$ correspondantes. Les unités de traitement envoient les données aux modulateurs $M_{1,1}, \dots, M_{1,h}$ qui commandent les onduleurs $O_1, \dots, O_p$.

Dans un deuxième mode de réalisation, les harmoniques sont contrôlées et utilisées pour affiner le profil de température et améliorer la qualité du chauffage et le rendement global du système. Ce mode de

10 réalisation peut être appliqué à des onduleurs de courant ou de tension. En outre, ce mode de réalisation permet notamment le chauffage par induction de pièces métalliques en matériaux comportant des métaux ferromagnétiques, comme par exemple, à titre non limitatif, fontes et aciers. Le procédé permet également d'être utilisé avec des dispositifs comprenant des inducteurs qui

15 présentent des culasses magnétiques 20 de canalisation du flux magnétique, tel que représenté sur la figure 2. En effet, les culasses magnétiques et/ou les métaux ferromagnétiques génèrent également des courants harmoniques dans les inducteurs qui peuvent venir perturber le signal de commande et l'identification et la commande des harmoniques permettent de gérer ces

20 signaux perturbateurs.

Comme précédemment mentionné, l'onduleur peut être un onduleur de courant ou un onduleur de tension. Par exemple, l'onduleur peut être un onduleur de tension ou de courant trois phase, et par suite avec trois inducteurs. Toutefois, un onduleur de tension ou de courant n phases, par suite

25 avec un dispositif comportant n inducteurs pourrait être également utilisé.

Par analogie à l'écriture de la densité de courant totale induite dans la matière, il est possible d'écrire le courant total induit par les composantes de rang m (On considère notamment toutes les harmoniques contrôlées, impaires ou paires). La résultante des contributions de toutes les harmoniques est donnée par

30 l'équation suivante :

$$\bar{J}^m(r, I_1^m, I_2^m, \varphi_{21}^m, I_3^m, \varphi_{31}^m) \\ = \sum_{i=1}^3 [f_{iR}^m(r) * I_{iR}^m - f_{iI}^m(r) * I_{iI}^m] + \sum_{i=1}^3 [f_{iR}^m(r) * I_{iI}^m + f_{iI}^m(r) * I_{iR}^m]$$

Avec :

$\bar{I}_i^m$: 'Harmonique de rang m du courant de l'inducteur i ,

f_{iR}^m et f_{iI}^m : composantes réelles et imaginaires des fonctions de distribution des

5 courants induits dans la matière.

Le vecteur des courants des inducteurs correspondant aux harmoniques de rang m est noté $X^m = I_1^m, \varphi_{11}^m, I_2^m, \varphi_{21}^m, I_3^m, \varphi_{31}^m$.

La démarche sous-jacente de ce deuxième mode de réalisation consiste
10 à déterminer les courants I_1^m, I_2^m, I_3^m des inducteurs, ainsi que leurs phases respectives $\varphi_{11}^m, \varphi_{21}^m$ et φ_{31}^m . Les amplitudes des courants et leurs phases sont calculées pour l'atteinte d'un profil de température de référence $\Theta_{1ref}, \Theta_{2ref}, \dots, \Theta_{nref}$.

Le calcul des courants des inducteurs passe par l'écriture de la fonction
15 à optimiser qui consiste en la superposition des termes à chaque fréquence multiple de la fréquence principale FP. La fréquence principale FP est par exemple de 1500 Hertz. De façon non limitative, il est possible par exemple de se limiter à la connaissance des fonctions de distribution des courants induits pour les harmoniques de rang 1 (correspondant au fondamental), de rang 3, de
20 rang 5 et de rang 7. Toutefois, la présente invention est envisagée avec la connaissance des fonctions de distribution des courants induits pour les harmoniques de rang 1 (fondamental), de rang 2 et jusqu'au rang n.

Les courants des trois inducteurs sont décomposés en parties réelles et
25 imaginaires pour chacune des fréquences multiples de la fréquence principale FP (correspondant au fondamental) selon l'équation suivante (dans l'équation suivante, à titre d'exemple non limitatif le nombre d'harmonique m est limité à 1, 3, 5 et 7, toutefois l'homme du métier comprendra que le nombre d'harmoniques peut être supérieur à 7, notamment peut être n, avec n un entier naturel quelconque) :

$$\bar{J}_{tot}(r, I_1, \varphi_1, I_2, \varphi_2, I_3, \varphi_3) = \bar{J}^{h1} + \bar{J}^{h3} + \bar{J}^{h5} + \bar{J}^{h7} = \sum_{m=1}^7 (J_R^m + j * J_I^m)$$

Avec :

$$J_R^m = \sum_{i=1}^3 (f_{iR}^m(r) * I_{iR}^m - f_{iI}^m(r) * I_{iI}^m) \Big|_{m=1,3,5,7}$$

5

$$\bar{J}_R^m = \sum_{i=1}^3 (f_{iR}^m(r) * I_{iR}^m - f_{iI}^m(r) * I_{iI}^m) \Big|_{m=1,3,5,7}$$

Où :

$\bar{J}_R^m$: partie réelle du courant induit par les harmoniques de rang m des courants des inducteurs

10 $\bar{J}_I^m$: partie imaginaire du courant induit par les harmoniques de rang m des courants des inducteurs.

La puissance à injecter caractérisant la rapidité et le profil de chauffage, est imposée en calculant la densité de courant de consigne correspond à l'équation suivante (dans l'équation suivante, à titre d'exemple non limitatif le nombre d'harmonique m est limité à 7, toutefois l'homme du métier comprendra que le nombre d'harmoniques peut être supérieur à 7, notamment peut être n, avec n un entier naturel quelconque et n'est pas limité à la valeur 7) :

15

$$J_{tot_cons}^2 = \sum_{m=1}^7 [(J_R^m)^2 + (J_I^m)^2] = Dp(r)_{cons} / \rho$$

20 Avec :

$Dp(r)_{cons}$: densité de puissance de référence aux abscisses r,

ρ : résistivité du matériau supposée uniforme en tout point considéré de la pièce chauffée.

La fonction à optimiser est ainsi la suivante :

25

$$F(r, X) = \left| \frac{J_{tot}(r, X) - J_{tot_cons}(r)}{J_{tot_cons}(r)} \right|$$

Cette fonction est à optimiser pour le fondamental et chaque harmonique h d'ordre 2 à n .

La solution $X = (I_1^m, \varphi_1^m, \dots, I_n^m, \varphi_n^m)$ est calculée pour l'obtention d'une distribution fixée par une valeur de référence, des courants induits en tout point de la pièce chauffée selon des étapes d'optimisation, notamment selon les

étapes d'optimisation représentées par le logigramme de la figure 6.

En particulier, selon le logigramme représenté sur la figure 6, on assigne différentes valeurs à X de sorte à comparer pour ces différentes valeurs les fonctions F afin de trouver la solution optimale $X = (I_1^m, \varphi_1^m, \dots, I_n^m, \varphi_n^m)$ pour laquelle la fonction F , en valeur absolue, est la plus importante. En d'autres termes, par récurrence on calcule la valeur de X qui permet d'optimiser la fonction F . Plus précisément, le logigramme représenté sur la figure 6 permet de générer N vecteurs parmi lesquels est choisi celui qui offre la plus faible erreur du courant total induit par rapport à la valeur de référence.

On s'intéresse alors aux profils homogènes de densité obtenus dans différentes conditions.

Bien que le principe soit générale, les figures 7 et 8 représentent un exemple limité aux harmoniques impaires de rang 3, 5 et 7 de superposition des effets harmoniques à partir des courants inducteurs. La première colonne représente les fonctions de distribution des courants induits, la deuxième colonne la superposition des effets des harmoniques et la troisième colonne donne le calcul des températures.

Dans un premier cas, les signaux peuvent avoir la même origine. Dans ce cas, il y a un démarrage simultané de tous les signaux à l'instant $t=0$. Cela revient à considérer pour variables, seulement les amplitudes des harmoniques et imposer un zéro aux phases. Les contraintes imposées peuvent alors être écrites (dans l'équation suivante, à titre d'exemple non limitatif le nombre d'harmoniques m est limité à 1, 3, 5 et 7, toutefois l'homme du métier comprendra que le nombre d'harmoniques peut être supérieur à 7, notamment

peut être n , avec n un entier naturel quelconque) :

$$\begin{cases} \varphi_{11}^m = \varphi_{21}^m = \varphi_{31}^m = 0 \\ X = I_1^m, I_2^m, I_3^m \\ m = h1, h3, h5, h7 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 < I_1^m < 1000 \\ m = h1, h3, h5, h7. \end{cases}$$

Dans un deuxième cas, les phases des signaux sont libres. Les contraintes imposées peuvent alors être écrites (dans l'équation suivante, à titre d'exemple non limitatif le nombre d'harmonique m est limité à 1, 3, 5 et 7, toutefois l'homme du métier comprendra que le nombre d'harmoniques peut être supérieur à 7, notamment peut être n , avec n un entier naturel quelconque) :

$$\begin{cases} X = I_1^m, I_2^m, I_3^m, \varphi_{11}^m, \varphi_{21}^m, \varphi_{31}^m \\ m = h1, h3, h5, h7 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 < I_1^m < 1000 \\ -90^\circ < \varphi_2^m < 90^\circ \\ m = h1, h3, h5, h7 \end{cases}$$

Dans un troisième cas, les phases des signaux sont liées et référencées au courant de l'onduleur 1 à chaque fréquence. Ce cas consiste à imposer les phases $\varphi_1^m = 0$ et à écrire (dans l'équation suivante, à titre d'exemple non limitatif le nombre d'harmoniques m est limité à 1, 3, 5 et 7, toutefois l'homme du métier comprendra que le nombre d'harmoniques peut être supérieur à 7, notamment peut être n , avec n un entier naturel quelconque) :

$$\begin{cases} X = I_1^m, I_2^m, I_3^m, \varphi_{11}^m, \varphi_{21}^m, \varphi_{31}^m \\ m = h1, h3, h5, h7 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 < I_1^m < 1000 \\ -90^\circ < \varphi_2^m < 90^\circ \\ m = h1, h3, h5, h7 \end{cases}$$

A partir des données qui précèdent, il est possible de déterminer par calcul que l'adjonction d'harmoniques améliore la précision du profil de chauffe à condition de régler leurs déphasages respectifs, ce qui complexifie l'optimisation. Le troisième cas notamment avec l'insertion de déphasages entre les fondamentaux et entre fondamentaux et harmoniques permet d'améliorer sensiblement la précision théorique du profil de chauffe. Toutefois, le troisième cas induit aussi une augmentation des pertes par commutation des onduleurs.

La figure 8 représente une vue générale des étapes utilisées dans le deuxième mode de réalisation pour les harmoniques 2 à n du courant et pour le

fondamental. La deuxième colonne regroupe les matrices d'impédance, la troisième colonne les fonctions de distribution des courants induits, la quatrième colonne la superposition des effets des harmoniques et la dernière colonne le calcul des températures.

- 5 En partant de la connaissance des harmoniques des courants dans chaque inducteur, il est possible de remonter aux courants $\bar{I}_{ond_i}^m$ des onduleurs. Les composantes harmoniques des courants des onduleurs permettent de calculer les angles de commande pour le courant fondamental, pour les harmoniques de 2 à n. On écrit :

$$10 \quad \bar{I}_{ond_i} = \sum_{m=1}^n \bar{I}_{ond_i}^m$$

$$\bar{V}_{ik}^m = \bar{Z}_{ik}^m * \bar{I}_{ik}^m$$

$$\bar{Z}_{ii}^m = R_{ii}^m + j * \omega L_{ii}^m$$

Avec

$\bar{I}_{ond_i}$: courant de l'onduleur modulé par largeur d'impulsions

- 15 $\bar{V}_{ik}^m$: terme de couplage de l'inducteur i et k à la fréquence $m * f$,

f : la fréquence du fondamental,

$\bar{Z}_{ii}^m$: impédance propre de l'inducteur i en présence du matériau à chauffer

- 20 Dans une première étape et pour un onduleur de courant, les condensateurs placés en parallèle (comme représenté sur la figure 5) avec les inducteurs sont calculés. Bien entendu, dans le cas d'onduleurs de tension, les condensateurs sont en série et non en parallèle. Ces condensateurs sont calculés pour une compensation globale de l'énergie réactive portée par les fondamentaux des courants des inducteurs. Il faut à ce niveau, prendre en
- 25 compte l'ensemble des échanges existants entre les inducteurs. L'écriture matricielle où l'on retrouve les termes, $\bar{Z}_{ii}^{h1}$, $\bar{Z}_{ik}^{h1}$ et $\bar{Z}_{ii}^{h1}$, caractérise ces échanges à la fréquence principale (en l'occurrence par exemple 1500 Hz) et permet de calculer les capacités des condensateurs.

Les tensions $\bar{V}_i^{h1}$ sont calculées par l'équation

$$30 \quad [\bar{V}_i^{h1}] = [\bar{Z}^{h1}] * [\bar{I}_i^{h1}]$$

Les condensateurs sont calculés par l'équation :

$$C_i = \frac{\text{imag}[\bar{V}_i^{h1} * (\bar{I}_i^{h1})^*]}{\omega(\bar{V}_i^{h1})^2}$$

Les courants des onduleurs sont calculés à partir des courants inducteurs par la relation qui fait intervenir la tension de l'onduleur suivante :

$$5 \quad \bar{I}_{ond_i}^m = j * C_i \omega * \bar{V}_{ond_i}^m + \bar{I}_i^m$$

Avec :

$$\bar{V}_{ond_i}^m = \bar{Z}_{ii}^m * \bar{I}_i^m + \bar{Z}_{ik}^m * \bar{I}_k^m + \bar{Z}_{il}^m * \bar{I}_l^m$$

m= 1 à n

- 10 Le calcul des angles de commande suppose la résolution sur chaque phase du système d'équations (dans l'équation suivante, à titre d'exemple non limitatif le nombre d'harmoniques est limité à 1, 3, 5 et 7, toutefois l'homme du métier comprendra que le nombre d'harmoniques peut être supérieur à 7, notamment peut être n, avec n un entier naturel quelconque) :

$$15 \quad \begin{cases} \cos(1 * \alpha_1) - \cos(1 * \alpha_2) + \cos(1 * \alpha_3) - \cos(1 * \alpha_4) = p_1 \\ \cos(3 * \alpha_1) - \cos(3 * \alpha_2) + \cos(3 * \alpha_3) - \cos(3 * \alpha_4) = p_3 \\ \cos(5 * \alpha_1) - \cos(5 * \alpha_2) + \cos(5 * \alpha_3) - \cos(5 * \alpha_4) = p_5 \\ \cos(7 * \alpha_1) - \cos(7 * \alpha_2) + \cos(7 * \alpha_3) - \cos(7 * \alpha_4) = p_7 \end{cases}$$

Les valeurs p_i sont caractéristiques des amplitudes des harmoniques et liées au courant de la source qui constitue également une variable.

- 20 Le paramètre p est calculé par l'équation qui met en relation les harmoniques des courants des onduleurs à obtenir, en fonction de la source de courant continue qui les alimente :

$$p_m = \frac{I_{ond_i}^m}{\left(\frac{4Is}{\pi}\right)}$$

Avec :

i : 'indice de l'onduleur,

Is : valeur de la source de courant,

- 25 m : rang de l'harmonique.

L'équation ci-dessus s'applique à la variante de réalisation avec des onduleurs de courant. Le même principe s'applique pour des onduleurs de tension.

Les équations qui précèdent peuvent être implémentées et mises en œuvre dans le procédé d'optimisation de chauffage selon le deuxième mode de réalisation qui comporte les étapes suivantes.

5 Dans une première étape, on compare les températures mesurées avec les valeurs de référence et on détermine la carte des densités de puissance à injecter dans la pièce.

Dans une deuxième étape, on utilise les fonctions de forme $f_{k,h}$ donnant les répartitions de puissance induites par des inducteurs de courant unitaire et pour chaque fréquence fondamentale ou harmonique pour obtenir les valeurs
10 des courants en amplitude $(I_{1,1}, \dots, I_{p,1}), (I_{1,h}, \dots, I_{p,h})$ et en phase $(\varphi_{2,1}, \dots, \varphi_{p,1}), (\varphi_{1,h}, \dots, \varphi_{p,h})$ des inducteurs Ind_1 à Ind_p .

Dans une troisième étape, la connaissance de la matrice d'impédances Z_1 et des condensateurs permet de déterminer les courants de référence du courant fondamental au niveau des onduleurs O_1 à O_p . La connaissance des
15 matrices d'impédances Z_h , avec h égale à 2, 3, 4...n (3, 5, 7 par exemple), et des condensateurs permettent de déterminer les courants de référence du courant harmonique de rang h au niveau des onduleurs O_1 à O_p .

Dans une quatrième étape, la comparaison entre les courants de référence des inducteurs et ceux réellement mesurés (obtenue par
20 décomposition en série de Fourier) permet de calculer les informations de correction des ordres de pilotage des différents onduleurs pour la fréquence fondamentale (ordres $M_{k,1}$) ainsi que pour les harmoniques (ordres $M_{k,h}$).

La boucle de rétroactions du deuxième mode de réalisation, illustrée sur
25 la figure 5, est en partie semblable à celle du premier mode de réalisation. Le profil de référence $D_{pref1}, \dots, D_{prefn}$ est associé d'une part aux fonctions de forme $f_{k,1}$ donnant les répartitions de puissance induites par des inducteurs de courant unitaire et d'autre part à la matrice d'impédances $Z_1, \dots, Z_h$. Les capacités des condensateurs $C_1, \dots, C_p$ sont calculées et on obtient ainsi les
30 courants cibles à injecter dans la pièce. Les fondamentaux des courants cibles sont comparés aux courants mesurés puis envoyés vers des unités de

traitement $CORR_{1,1}, \dots, CORR_{p,1}$. Les courants harmoniques sont également envoyés vers des unités de traitement $CORR_{1,h}, \dots, CORR_{p,h}$ correspondantes. Les unités de traitement envoient les données aux modulateurs $M_{1,1}, \dots, M_{p,h}$ qui commandent les onduleurs $O1, \dots, Op$. En outre, pour les courants harmoniques, on associe aux profils de référence $D_{pref1}, \dots, D_{prefn}$ les fonctions de forme $f_{k,h}$ donnant les répartitions de puissance induits par des inducteurs de courant unitaire pour les harmoniques. A partir de la matrice d'impédances Z_h et du calcul du vecteur des capacités C , on obtient pour les harmoniques les courants cibles $I_{p,h}$. Ces valeurs sont envoyées vers les modulateurs $M_{p,h}$.

Ainsi, la stratégie de pilotage des onduleurs par modulation de largeur d'impulsions permet de définir complètement les ordres de pilotage par la fourniture de deux paramètres seulement pour chaque harmonique qu'on souhaite contrôler.

L'ensemble de chauffage par induction comprenant un dispositif de chauffage par induction tel que précédemment mentionné et une pièce forme un système permettant de s'adapter aux contraintes industrielles de façon rapide et en continu.

REVENDECATIONS

1. Procédé d'optimisation de chauffage par induction mis en œuvre dans un dispositif de chauffage (D) d'une pièce (10), le dispositif comprenant des inducteurs (Ind1, Ind2, ..., Indp) couplés magnétiquement, chaque inducteur étant alimenté par un onduleur de tension ou de courant (O1, O2, ..., Op) qui lui est propre et associé à un condensateur ($C_1, C_2, \dots, C_p$) pour former un circuit oscillant, lesdits circuits oscillants possédant sensiblement la même fréquence de résonance, chaque onduleur (O1, O2, ..., Op) étant commandé par une unité de commande ($M_{1,1}, \dots, M_{p,h}$) de façon à faire varier l'amplitude ($A_{1,1}, \dots, A_{p,h}$) et la phase ($\varphi_{1,1}, \dots, \varphi_{p,h}$) du courant ($I_1, \dots, I_p$) traversant l'inducteur correspondant, le dispositif (D) comprenant en outre des moyens de détermination dudit courant ($I_1, \dots, I_p$) ainsi que des moyens de détermination d'un profil de température effectif ($\Theta_{1mes}, \Theta_{2mes}, \dots, \Theta_{nmes}$) de ladite pièce chauffée (10), ledit procédé comprenant les étapes suivantes :
- a. on compare ledit profil de température effectif ($\Theta_{1mes}, \Theta_{2mes}, \dots, \Theta_{nmes}$) à un profil de température de référence ($\Theta_{1ref}, \Theta_{2ref}, \dots, \Theta_{nref}$), et on calcule un profil de densité de puissance de référence ($D_{pref1}, D_{pref2}, \dots, D_{prefn}$) que le dispositif de chauffage doit injecter dans ladite pièce pour atteindre ledit profil de température de référence ($\Theta_{1ref}, \Theta_{2ref}, \dots, \Theta_{nref}$) ;
 - b. on calcule des courants cibles ($I_{ref1}, I_{ref2}, \dots, I_{refp}$) appropriées pour injecter dans ladite pièce ledit profil de densité de puissance de référence ($D_{pref1}, D_{pref2}, \dots, D_{prefn}$) par :
 - la connaissance de fonctions images vectorielles ($f_{k,1}, \dots, f_{k,h}$) représentatives des relations liant les densités de courant créées par les inducteurs aux courants traversant les inducteurs de sorte à déterminer les valeurs de l'amplitude des courants ($I_{1,1}, \dots, I_{p,h}$), et de la phase des courants ($\varphi_{1,1}, \dots, \varphi_{p,h}$) des inducteurs (Ind1, Ind2, ..., Indp),
 - la connaissance d'une matrice d'impédances (Z_1, Z_h) déterminée par la connaissance des relations électromagnétiques liant lesdits inducteurs entre eux et à ladite pièce,
 - la valeur des condensateurs ($C_1, \dots, C_p$) des circuits oscillants,

- l'identification et la détermination des amplitudes et de la phase des harmoniques du courant ($I_{\text{ond}_k, h}$) délivré par chaque onduleur (O1, O2, ..., Op) de sorte à contrôler le fondamental et les harmoniques du courant dans l'alimentation d'un inducteur (Ind1, Ind2, ...Indp) par son onduleur (O1, O2, ..., Op) associé,
 - c. on détermine les courants traversant les inducteurs pour les comparer aux dites valeurs cibles et déterminer des écarts de courants à corriger, et on envoie aux dites unités de commande des instructions de correction en fonction desdits écarts de courants afin de commander les onduleurs de façon à corriger les courants traversant les inducteurs pour la fréquence fondamentale ainsi que pour les harmoniques.
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les harmoniques du courant délivré par chaque onduleur (O1, O2, ..., Op) sont optimisés de sorte à améliorer la qualité du chauffage par induction, et dans lequel, on calcule la capacité électrique ($C_1, \dots, C_p$) des condensateurs pour compenser l'énergie réactive portée par les fondamentaux des courants des inducteurs ($I_{1,1}, \dots, I_{p,1}$) en fonction de la connaissance des relations électromagnétiques liant lesdits inducteurs entre eux.
3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, dans lequel lors de l'étape b), on utilise en outre des fonctions images vectorielles ($f_{k, h}$) représentatives des relations liant les densités de courant créées par les inducteurs aux courants traversant les inducteurs pour chaque harmonique considérée du courant de sorte à obtenir les valeurs des amplitudes du courant ($I_{1, h}, \dots, I_{p, h}$) et de la phase des courants ($\varphi_{1, h}, \dots, \varphi_{p, h}$) des inducteurs (Ind1, Ind2, ..., Indp).
4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel lors de l'étape b) les valeurs cibles ($I_{p, \text{href}}$) sont calculées par la connaissance de la matrice d'impédances (Z_1) déterminée par la connaissance des relations électromagnétiques liant lesdits inducteurs (Ind1, Ind2, ..., Indp) entre eux et à ladite pièce (10) pour le fondamental du courant et la connaissance des matrices d'impédance (Z_h) pour chaque harmonique que l'on souhaite contrôler.
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications

précédentes, dans lequel on détermine les capacités des condensateurs (C_1 , C_2 , ... C_p) et on associe la matrice d'impédances (Z_1 , Z_h), à un vecteur des capacités.

5 6. Procédé selon la revendication 1, dans lequel une modulation de largeur d'impulsions est réalisée par insertion d'angles supplémentaires afin de supprimer des harmoniques de rang supérieur ou égale à deux des courants traversant les inducteurs (I_1 , ... I_p), dans lequel des harmoniques de rang supérieur ou égal à 2 sont supprimées par un signal carré, et dans lequel le fondamental du courant délivré par chaque onduleur (O_1 , ... O_p) est contrôlé
10 par le même signal carré.

7. Dispositif de chauffage par induction comprenant:
- des inducteurs ($Ind1$, $Ind2$, ..., $Indp$) couplés magnétiquement, chaque inducteur ($Ind1$, $Ind2$, ..., $Indp$) étant associé à un condensateur (C_1 , C_2 , ... C_p) pour former un circuit oscillant, lesdits circuits oscillants possédant au moins
15 approximativement la même fréquence de résonance;
- des onduleurs (O_1 , O_2 , ..., O_p) alimentant chacun un inducteur ($Ind1$, $Ind2$, ..., $Indp$) qui lui est propre, chaque onduleur (O_1 , O_2 , ..., O_p) étant commandé par une unité de commande ($M_{p,h}$) de façon à faire varier l'amplitude et la phase du fondamental et des harmoniques du courant traversant l'inducteur
20 correspondant ;

comprenant en outre :

- des moyens de détermination du courant fondamental et des harmoniques des courants traversant les inducteurs $Ind1$, $Ind2$, ..., $Indp$) ainsi que des moyens de détermination d'un profil de température effectif d'une pièce
25 chauffée par le dispositif ;
- des moyens de comparaison dudit profil de température effectif par rapport à un profil de température de référence ;
- des moyens de calcul d'un profil de densité de puissance de référence que le dispositif de chauffage doit injecter dans ladite pièce pour atteindre ledit profil
30 de température de référence;
- des moyens de calcul, basés sur la connaissance d'une matrice des impédances (Z_1 , Z_h), de courants cibles (I_{ref1} , I_{ref2} , ... I_{refp}) que doivent délivrer les onduleurs (O_1 , ... O_p) afin que les courants des inducteurs et leurs

harmoniques atteignent des valeurs cibles appropriées pour injecter dans ladite pièce ledit profil de densité de puissance de référence;

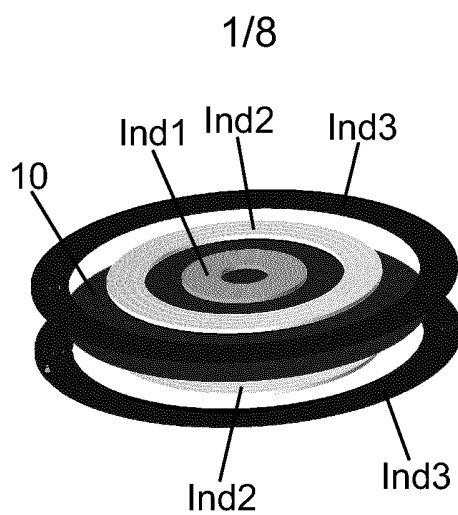
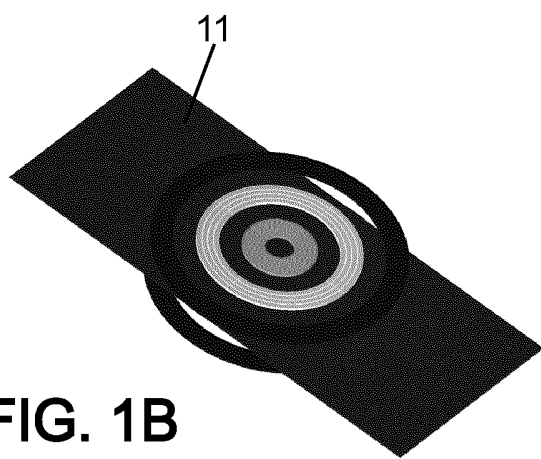
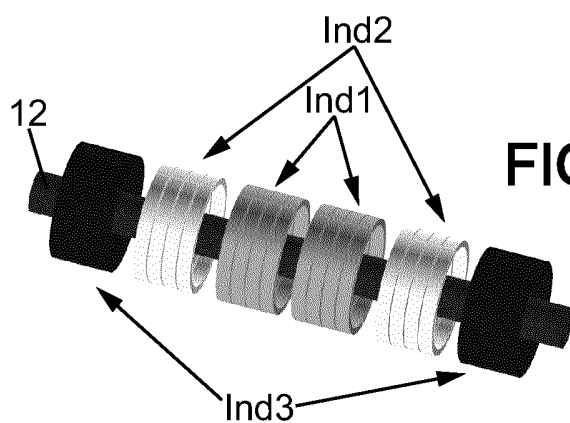
- des moyens de comparaison des courants traversant les inducteurs par rapport aux dites valeurs cibles, aptes à déterminer des écarts de courants à corriger, et des moyens de traitement desdits écarts de courants aptes à générer des instructions de correction envoyées aux dites unités de commande pour commander les onduleurs de façon à corriger les courants traversant les inducteurs.

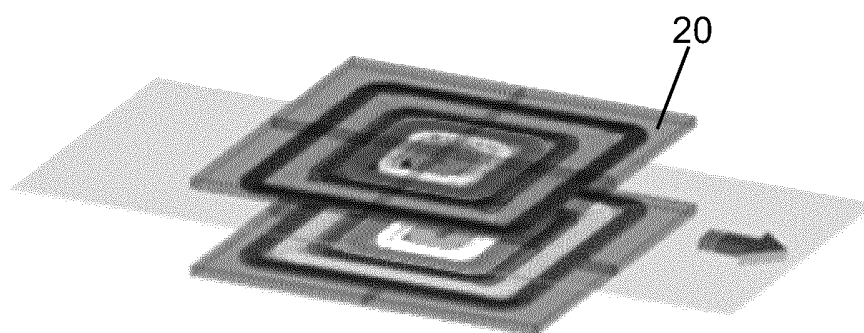
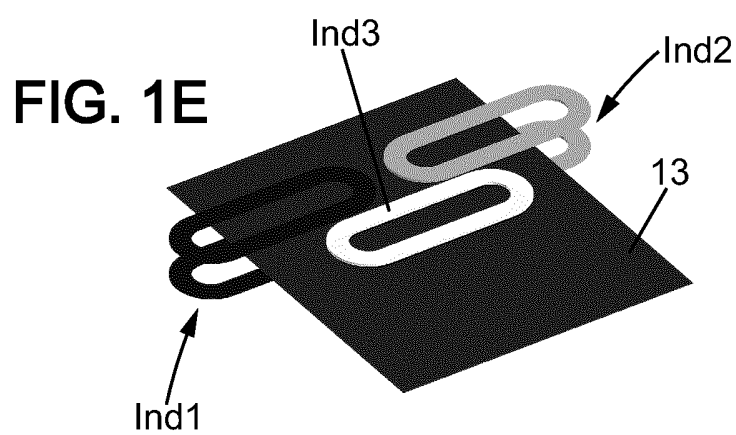
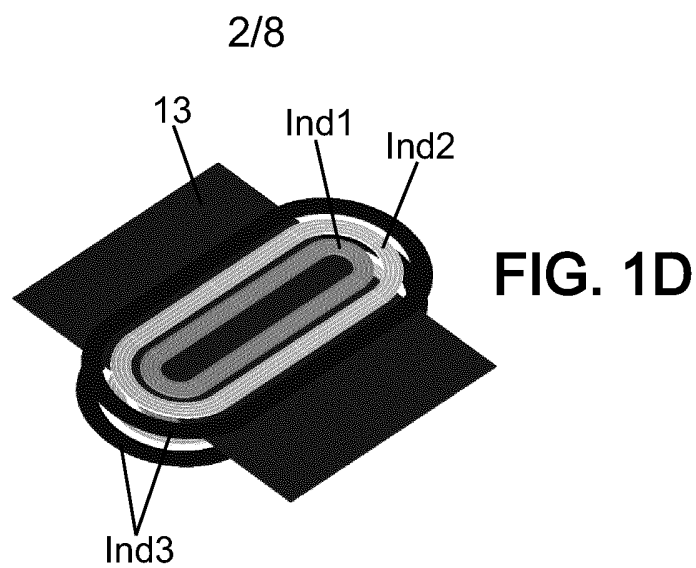
8. Dispositif de chauffage par induction selon la revendication 7, dans lequel les inducteurs (Ind1, Ind2, ..., Indp) présentent des culasses magnétiques de canalisation du flux magnétique.

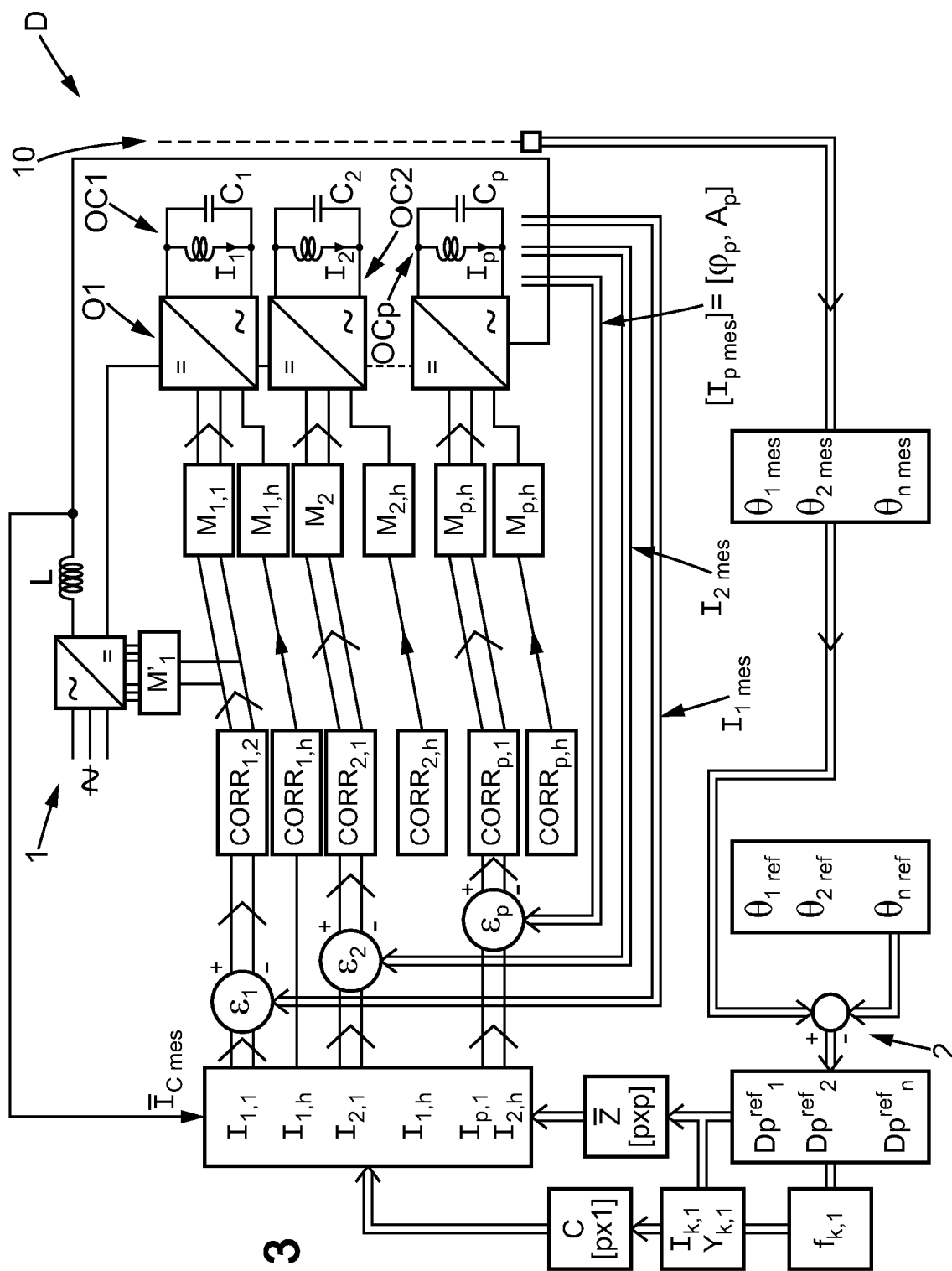
9. Ensemble de chauffage par induction comprenant un dispositif de chauffage (D) par induction selon la revendication 7 ou 8 et une pièce (10) chauffée par le dispositif de chauffage (D) par le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, ladite pièce chauffée étant conductrice d'électricité.

10. Ensemble de chauffage selon la revendication 9, dans lequel la pièce (10) est métallique.

11. Ensemble selon la revendication 10, dans lequel la pièce chauffée comprend un métal ferromagnétique.

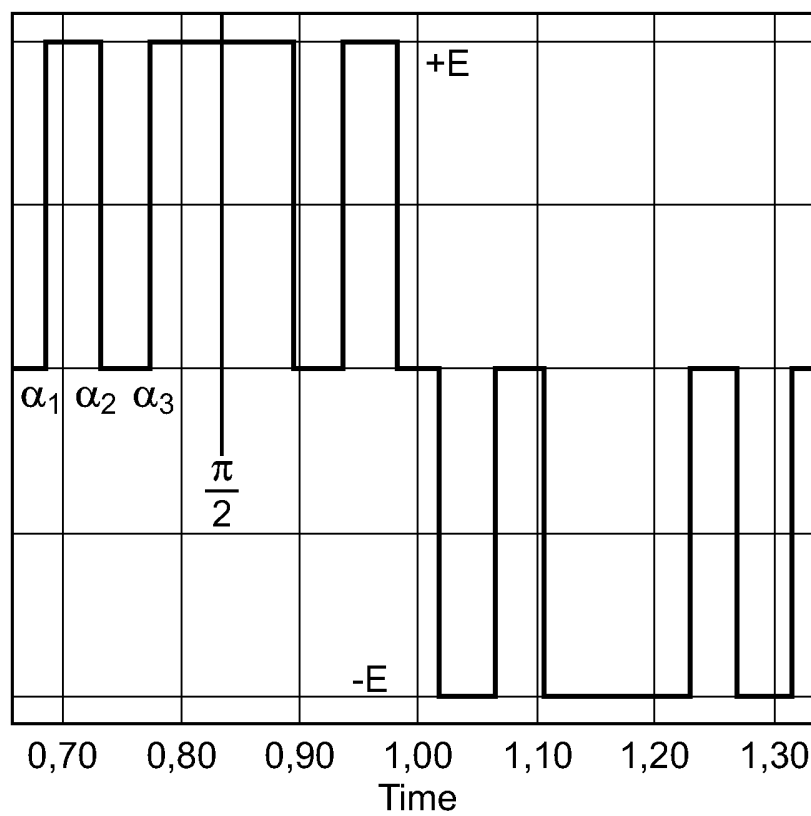
**FIG. 1A****FIG. 1B****FIG. 1C**

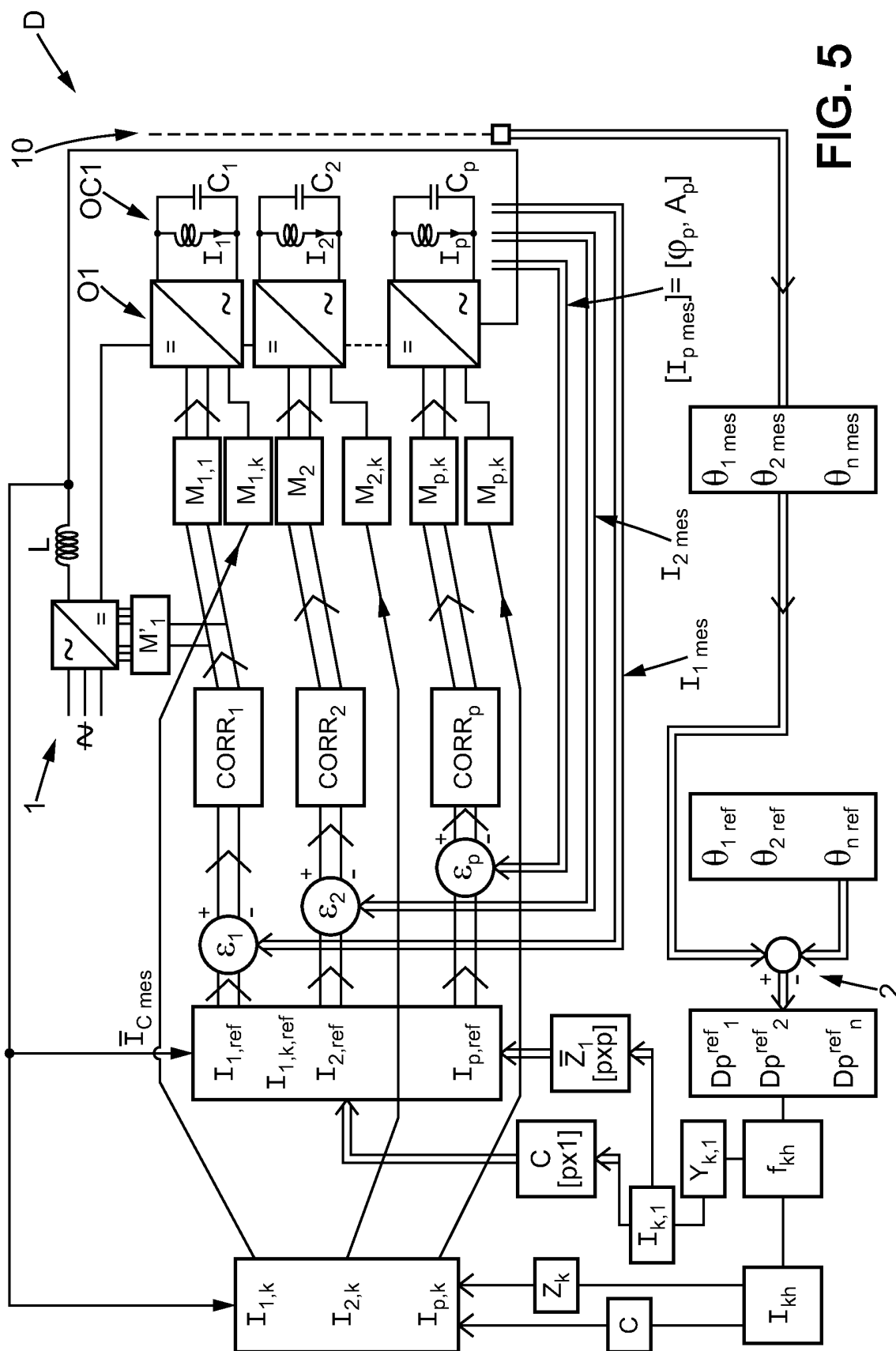




4/8

Vond

**FIG. 4**



6/8

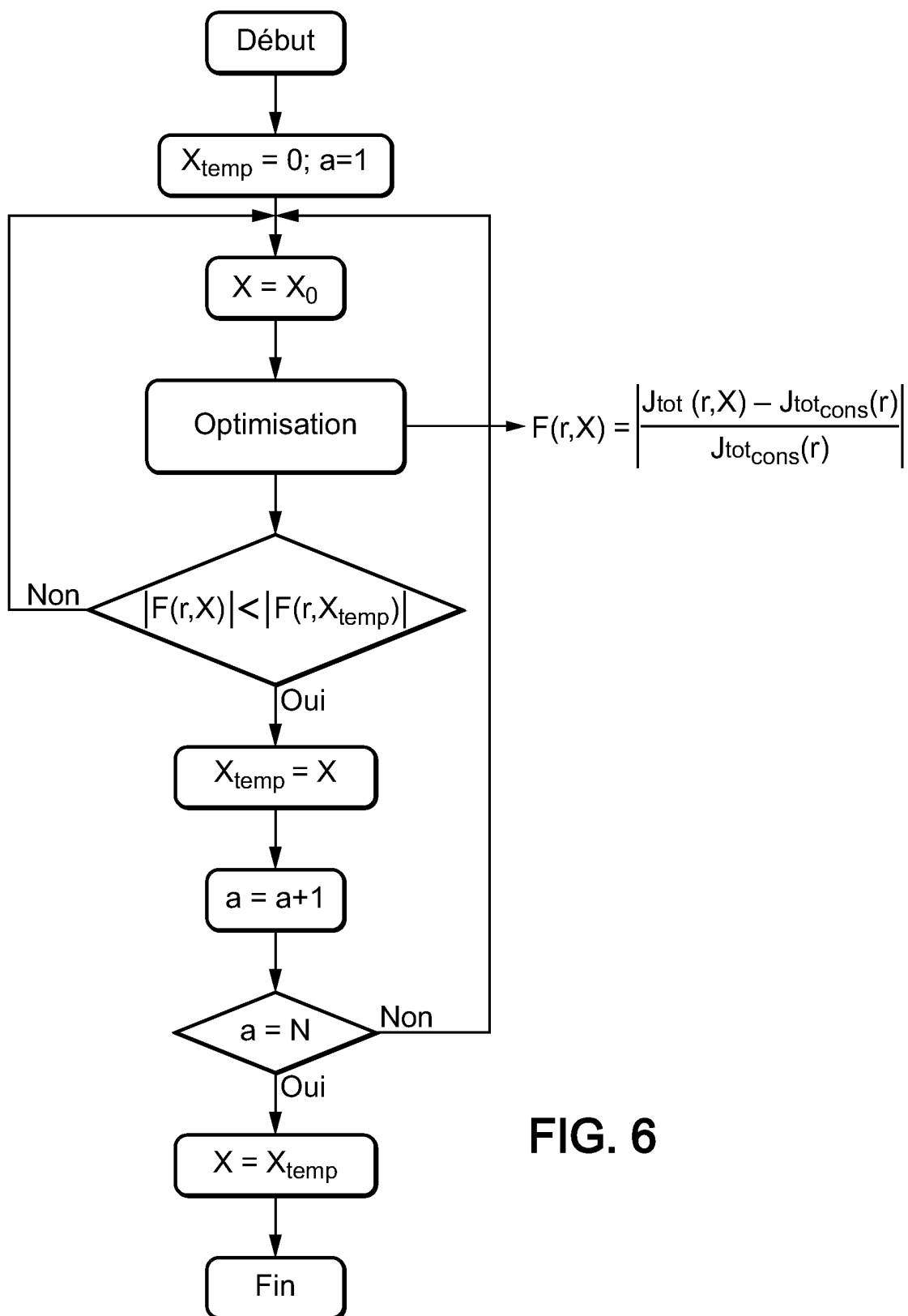


FIG. 6

7/8

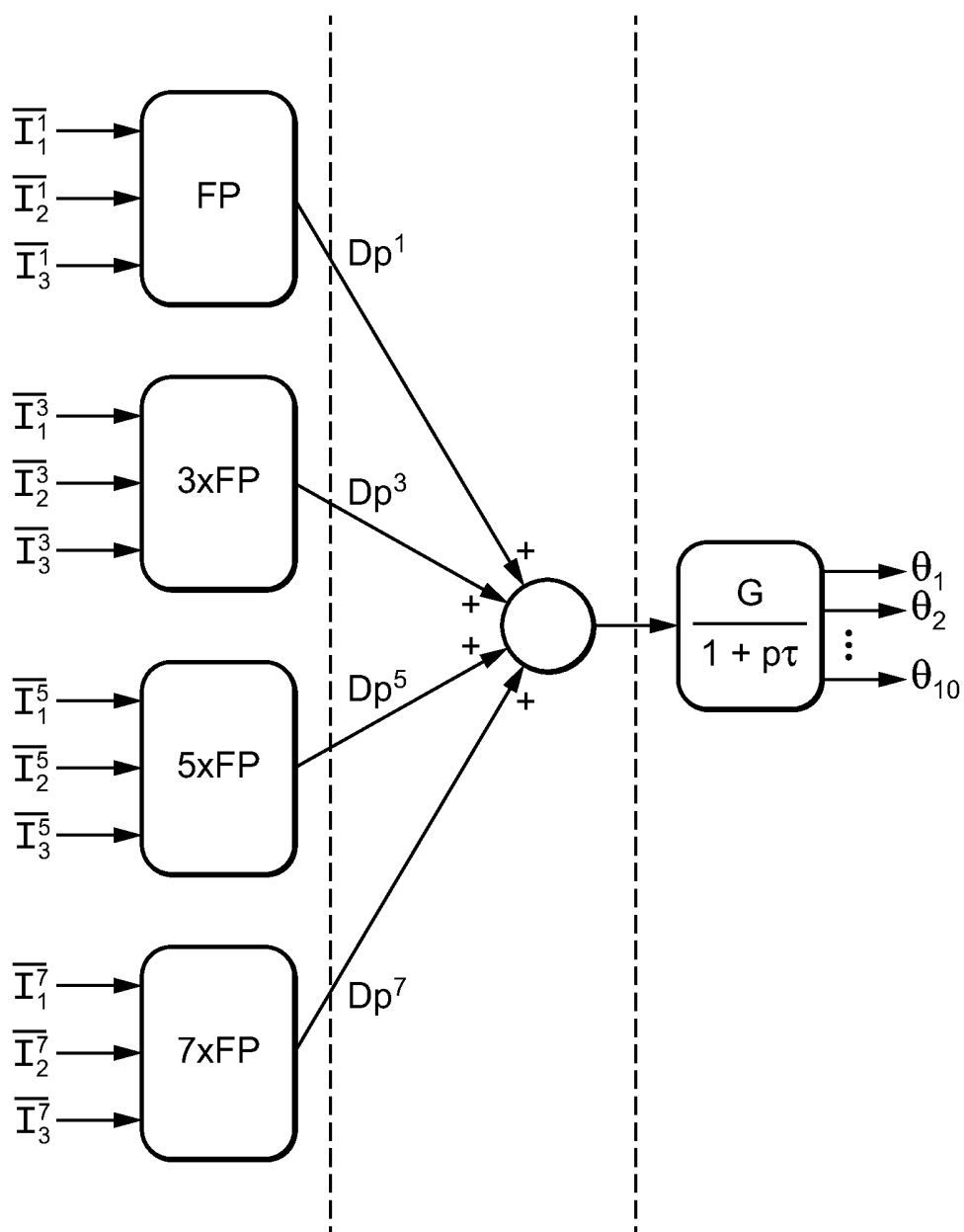
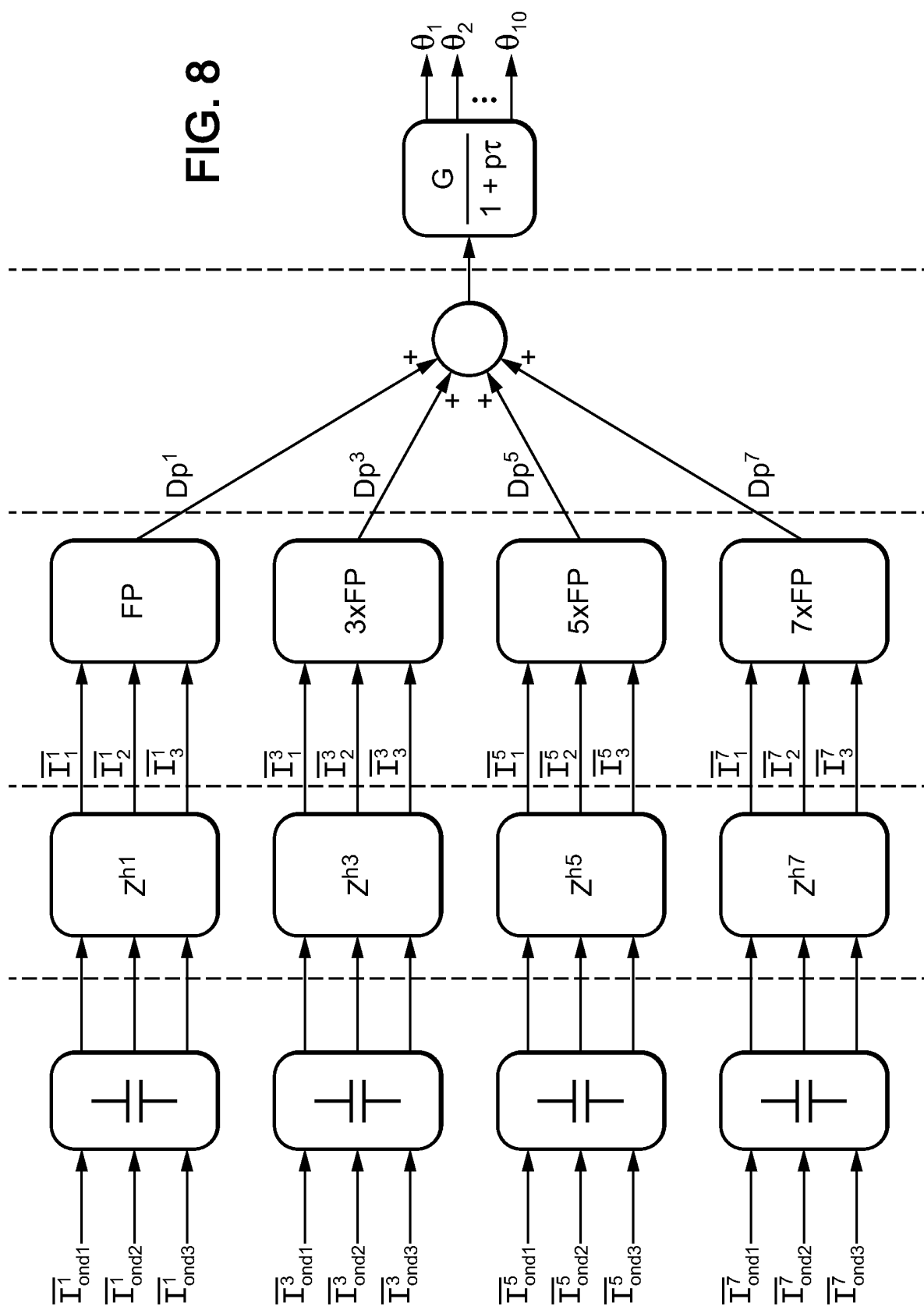


FIG. 7

8/8

FIG. 8





RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 818122
FR 1562824

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
Y	WO 2011/048316 A1 (ELECTRICITE DE FRANCE [FR]; CENTRE NAT RECH SCIENT [FR]; TOULOUSE INST) 28 avril 2011 (2011-04-28) * page 1, ligne 3 - ligne 7 * * page 2, ligne 17 - page 3, ligne 12; revendication 1 * * page 3, ligne 18 - ligne 19; revendication 2 * * page 4, ligne 10 - ligne 11; revendication 7 * * page 4, ligne 14 - page 5, ligne 7; revendication 9 * * page 11, ligne 14 - ligne 18 * -----	1-11	H05B6/06
Y	WO 2005/008876 A2 (UNIV TEXAS [US]; DIONG BILL M [US]) 27 janvier 2005 (2005-01-27) * page 10, ligne 13 - page 18, ligne 2; figures 1,2,6,9 * -----	1-11	
Y	EP 2 571 331 A1 (ELECTROLUX HOME PROD CORP [BE]) 20 mars 2013 (2013-03-20) * alinéa [0001] * * alinéa [0003] * * alinéa [0005] - alinéa [0007] * * alinéa [0014] * * alinéa [0030] * * alinéa [0033] - alinéa [0034] * -----	1-11	
A	US 2006/076338 A1 (KAGAN VALERY [US]) 13 avril 2006 (2006-04-13) * alinéa [0002] * * alinéa [0004] - alinéa [0007] * * alinéa [0011] * * alinéa [0037] * * alinéa [0125] - alinéa [0133] * ----- -/--	1-11	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H05B
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
20 juillet 2016		Barzic, Florent	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 818122
FR 1562824

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	US 5 465 203 A (BHATTACHARYA SUBHASHISH [US] ET AL) 7 novembre 1995 (1995-11-07) * colonne 14, ligne 57 - ligne 63 * * colonne 15, ligne 33 - ligne 42 * -----	2	
A	WO 97/49168 A1 (WISCONSIN ALUMNI RES FOUND [US]) 24 décembre 1997 (1997-12-24) * page 36, ligne 13 - ligne 15 * -----	2	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
20 juillet 2016		Barzic, Florent	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE**RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1562824 FA 818122**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **20-07-2016**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2011048316 A1	28-04-2011	AU 2010309618 A1	17-05-2012
		CA 2778379 A1	28-04-2011
		CN 102668692 A	12-09-2012
		EP 2491760 A1	29-08-2012
		ES 2535092 T3	05-05-2015
		FR 2951606 A1	22-04-2011
		JP 5553904 B2	23-07-2014
		JP 2013508908 A	07-03-2013
		KR 20120083475 A	25-07-2012
		RU 2012120692 A	27-11-2013
		SI 2491760 T1	31-07-2015
		US 2012199579 A1	09-08-2012
		WO 2011048316 A1	28-04-2011
WO 2005008876 A2	27-01-2005	US 2005065901 A1	24-03-2005
		WO 2005008876 A2	27-01-2005
EP 2571331 A1	20-03-2013	AU 2012307521 A1	20-02-2014
		CN 103797894 A	14-05-2014
		EP 2571331 A1	20-03-2013
		US 2014319127 A1	30-10-2014
		WO 2013037791 A1	21-03-2013
US 2006076338 A1	13-04-2006	AT 452525 T	15-01-2010
		BR PI0606517 A2	30-06-2009
		CA 2592673 A1	10-05-2007
		CN 101112123 A	23-01-2008
		EP 1943879 A1	16-07-2008
		JP 2009518778 A	07-05-2009
		KR 20080072524 A	06-08-2008
		US 2006076338 A1	13-04-2006
		WO 2007053583 A1	10-05-2007
US 5465203 A	07-11-1995	AU 7108694 A	17-01-1995
		CA 2161139 A1	05-01-1995
		US 5465203 A	07-11-1995
		WO 9501002 A1	05-01-1995
		ZA 9404240 B	21-02-1995
WO 9749168 A1	24-12-1997	AU 3573097 A	07-01-1998
		EP 0906654 A1	07-04-1999
		US 5731965 A	24-03-1998
		WO 9749168 A1	24-12-1997