

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 535 092**

51 Int. Cl.:

H05B 6/02 (2006.01)

H05B 6/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.10.2010 E 10785478 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.01.2015 EP 2491760**

54 Título: **Procedimiento de calentamiento por inducción implementado en un dispositivo que comprende unos inductores acoplados magnéticamente**

30 Prioridad:

19.10.2009 FR 0957321

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

05.05.2015

73 Titular/es:

**ELECTRICITÉ DE FRANCE (33.3%)
22-30 Avenue de Wagram
75008 Paris, FR;
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (CNRS) (33.3%) y
INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE
TOULOUSE (33.3%)**

72 Inventor/es:

**PATEAU, OLIVIER;
NEAU, YVES;
LEFEVRE, YVAN;
LADOUX, PHILIPPE;
MAUSSION, PASCAL y
MANOT, GILBERT**

74 Agente/Representante:

VEIGA SERRANO, Mikel

ES 2 535 092 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de calentamiento por inducción implementado en un dispositivo que comprende unos inductores acoplados magnéticamente

5

Sector de la técnica

La presente invención se relaciona con un procedimiento de calentamiento por inducción implementado en un dispositivo de calentamiento de una pieza metálica tal como una chapa o una barra, comprendiendo el dispositivo unos inductores acoplados magnéticamente. Por acoplamiento magnético, se entiende que los inductores producen entre ellos inducciones mutuas.

10

Estado de la técnica

Las técnicas más clásicas de calentamiento por inducción implementan unas configuraciones que son satisfactorias cuando las piezas a calentar son siempre de la misma naturaleza y de las mismas dimensiones. Pero la industria exige cada vez más flexibilidad y productividad. Solicitan a las líneas de producción adaptarse en funcionamiento continuo al cambio de la posición o del formato de las piezas a calentar, y adaptar en función de este cambio el perfil de temperatura deseado.

15

20

Unas tecnologías conocidas permiten tener un control del calentamiento por zona de potencia inyectada, pero el control del perfil de temperatura en las zonas calentadas permanece ligado a la concepción geométrica de las bobinas y a su modo de alimentación, principalmente mediante la variación de la amplitud de las corrientes que se le inyectan. La determinación de estas corrientes y la regulación derivada de ella son fuertemente dependientes del acoplamiento magnético existente entre las bobinas debido a las inducciones mutuas, teniendo cada bobina alimentada influencia sobre todas las demás. El acoplamiento magnético convierte al control del perfil de temperatura de la pieza calentada en extremadamente delicado, sin contar con que puede tener unas repercusiones nefastas sobre los generadores de frecuencia, por ejemplo una rotura de los componentes.

25

30

La solicitud de patente WO 00/28787 A1 describe un sistema para calentar una pieza metálica tubular mediante unas bobinas de inducción alimentadas por medio de un circuito de interrupción de tipo regulador unido a una fuente de alimentación de tipo ondulator. Un circuito de control permite variar la duración de la potencia inyectada por la fuente de alimentación a cada bobina con el fin de calentar de modo diferenciado diferentes zonas de la pieza metálica a la vista de un perfil de temperatura buscado. La inyección de potencia en una bobina se efectúa por tanto en "todo o nada", es decir que se puede impedir en un ciclo correspondiente a varios periodos de la señal del ondulator. Este sistema presenta sin embargo unos inconvenientes, y en particular permite controlar solamente la potencia media producida por cada bobina sin que sea posible controlar con precisión el perfil de temperatura generado por las bobinas en la pieza calentada. Además, surge de este documento que la conexión de las bobinas y de los ondulator debe definirse en cierta medida en función de la carga y del perfil de temperatura a alcanzar. Por otro lado, este documento no menciona los acoplamientos magnéticos entre los circuitos ni la manera de superarlos o de tenerlos en cuenta.

35

40

La presente invención se dirige a resolver estos inconvenientes y a proporcionar un procedimiento de calentamiento que tenga en cuenta los numerosos acoplamientos, por un lado entre los diferentes inductores y por otro lado entre los inductores y la pieza a calentar, para permitir controlar con una buena precisión el perfil de temperatura generado por los inductores. La invención se dirige en particular a poder ajustar el calentamiento con diferentes perfiles de temperatura buscados en tiempo real, actuando sobre el control de los ondulator que alimentan los inductores y sin tener necesidad de ajustar la estructura de los inductores.

45

50

Objeto de la invención

Con este fin, la invención tiene por objetivo un procedimiento de calentamiento por inducción implementado en un dispositivo de calentamiento de una pieza metálica, comprendiendo el dispositivo unos inductores acoplados magnéticamente, siendo alimentado cada inductor mediante un ondulator que le es propio y asociado a un condensador para formar un circuito oscilante, teniendo dichos circuitos oscilantes aproximadamente al menos la misma frecuencia de resonancia, estando controlado cada ondulator por una unidad de control de manera que varíe la amplitud y la fase de la corriente que atraviesa el inductor correspondiente, comprendiendo el dispositivo además unos medios de determinación de dicha corriente así como unos medios de determinación de un perfil de temperatura efectivo de dicha pieza metálica, comprendiendo dicho procedimiento las etapas siguientes:

55

60

- a) se compara dicho perfil de temperatura efectivo con un perfil de temperatura de referencia, y se calcula un perfil de densidad de potencia de referencia que el dispositivo de calentamiento debe inyectar en dicha pieza para alcanzar dicho perfil de temperatura de referencia;
- b) a partir de una matriz de impedancias, determina mediante el conocimiento de las relaciones electromagnéticas que vinculan dichos inductores entre sí y a dicha pieza y mediante el conocimiento de funciones de imágenes vectoriales representativas de las relaciones que vinculan las densidades de corriente

65

creadas por los inductores con las corrientes que atraviesan los inductores, se calculan unas corrientes objetivo que deben suministrar los onduladores con el fin de que las corrientes de los inductores alcancen unos valores objetivo apropiados para inyectar en dicha pieza dicho perfil de densidad de potencia de referencia;

5 c) se determinan las corrientes que atraviesan los inductores para compararlas con dichos valores objetivo y determinar unas desviaciones de corriente a corregir, y se envían a dichas unidades de control unas instrucciones de corrección en función de dichas desviaciones de corriente con el fin de controlar los onduladores de manera que corrijan las corrientes que atraviesan los inductores.

10 Gracias a estos dispositivos, se obtiene un control preciso del perfil de temperatura aplicado a la pieza calentada, lo que es ideal para calentar con un mismo dispositivo varias piezas de tamaño y de naturalezas diferentes.

En unos modos de realización preferidos de un procedimiento de calentamiento según la invención, se ha recurrido principalmente a una u otra de las disposiciones siguientes:

15 se determinan las capacidades de dichos condensadores, y se asocia dicha matriz de impedancias a un vector de las capacidades;

se determina un valor inicial de dicha matriz de impedancias para una temperatura media inicial dada de dichos inductores y de dicha pieza, posteriormente se determina a intervalos variables o periódicos la matriz de impedancias modificada para al menos un valor incrementado de dicha temperatura media, y se utiliza dicha matriz de impedancias modificada para recalcular dichos valores objetivo;

20 después de haber efectuado sucesivamente las etapas (a) y (b) se efectúa al menos una vez la etapa (c) para disminuir dichas desviaciones de corriente a corregir, posteriormente se reiteran al menos una vez las etapas (a), (b) y (c) actualizando dicho perfil de temperatura efectivo mediante unas mediciones de temperatura en diferentes zonas calentadas de la pieza;

25 para la determinación mediante cálculo de dichos valores objetivo en la etapa (b), gracias al conocimiento de dichas funciones de imágenes vectoriales, se calculan unas funciones imagen de las densidades de potencia según las características espaciales de las zonas de la pieza en las que dichas densidades de potencia se inyectan, y se calcula un vector optimizado de las corrientes objetivo a determinar minimizando la diferencia entre cada una de dichas funciones imagen de las densidades de potencia y una función de densidad de potencia de referencia que corresponde a dicho perfil de densidad de potencia de referencia;

30 se toma como ondulator de referencia un ondulator que tenga, con respecto a los otros onduladores, la corriente más alta en el caso de un ondulator de corriente o la tensión más alta en el caso de un ondulator de tensión, y se introducen unos ángulos de desfase en los controles de los otros onduladores con respecto a un ángulo de control en el ondulator de referencia;

35 se regula el ondulator de referencia con una relación cíclica igual a $2/3$, con el fin de disminuir las perturbaciones armónicas creadas por este ondulator sobre sus vecinos;

se regula el valor eficaz de la corriente en dicho ondulator de referencia actuando sobre una alimentación continua que alimenta los onduladores.

40 La invención tiene también por objetivo un dispositivo de calentamiento por inducción que comprende:

unos inductores acoplados magnéticamente, estando asociado cada inductor a un condensador para formar un circuito oscilante, teniendo dichos circuitos oscilantes al menos aproximadamente la misma frecuencia de resonancia;

45 unos onduladores alimentan cada uno un inductor que le es propio, estando controlado cada ondulator mediante una unidad de control de manera que varíe la amplitud y la fase de la corriente que atraviesa el inductor correspondiente;

caracterizado por que comprende además:

50 unos medios de determinación de las corrientes que atraviesan los inductores así como unos medios de determinación de un perfil de temperatura efectivo de una pieza metálica calentada por el dispositivo;

unos medios de comparación de dicho perfil de temperatura efectivo con respecto a un perfil de temperatura de referencia;

55 unos medios de cálculo de un perfil de densidad de potencia de referencia que el dispositivo de calentamiento debe inyectar en dicha pieza para alcanzar dicho perfil de temperatura de referencia;

unos medios de cálculo, basados en el conocimiento de una matriz de impedancias, de corrientes objetivo que deben suministrar los onduladores con el fin de que las corrientes de los inductores alcancen unos valores objetivo apropiados para inyectar en dicha pieza dicho perfil de densidad de potencia de referencia;

60 unos medios de comparación de las corrientes que atraviesan los inductores con respecto a dichos valores objetivo, adecuados para determinar unas desviaciones de corriente a corregir, y unos medios de tratamiento de dichas desviaciones de corriente adecuados para generar unas instrucciones de corrección enviadas a dichas unidades de control para controlar los onduladores de manera que corrijan las corrientes que atraviesan los inductores.

65 En unos modos de realización preferidos de un dispositivo de calentamiento según la invención, se ha recurrido principalmente a una u otra de las disposiciones siguientes:

se alimenta a los onduladores mediante una misma alimentación de fuente de corriente o fuente de tensión, y dichos medios de comparación de dichas corrientes determinadas que atraviesan los inductores comprenden unas unidades comparadoras que reciben cada una unos parámetros determinados de una corriente que atraviesa un inductor y unos parámetros de los valores objetivo correspondientes y estando conectada cada una a una unidad de tratamiento de dichas desviaciones de corriente, recibiendo además una de dichas unidades comparadoras unos parámetros representativos de que se suministra dicha alimentación y estando adaptada su unidad de tratamiento asociada para generar unas instrucciones de regulación enviadas a dicha alimentación de manera que modifique la corriente o la tensión que suministra.

Descripción de las figuras

Surgirán otras características y ventajas de la descripción a continuación de ejemplos no limitativos de modos de realización, en referencia a las figuras en las que:

- La figura 1 representa esquemáticamente un primer ejemplo de dispositivo de calentamiento por inducción en el que se puede implementar el procedimiento de calentamiento según la invención, aplicado al calentamiento de un disco metálico fijo.
- La figura 2 representa esquemáticamente un modelizado del sistema de tres inductancias acopladas de la figura 1, visto desde la alimentación.
- La figura 3 representa esquemáticamente el dispositivo de calentamiento por inducción de la figura 1, aplicado al calentamiento de una chapa que se desplace.
- La figura 4 representa esquemáticamente un segundo ejemplo de dispositivo de calentamiento por inducción, aplicado al calentamiento de una barra metálica que se desplace.
- La figura 5 representa esquemáticamente un tercer ejemplo de dispositivo de calentamiento por inducción, aplicado al calentamiento de una chapa que se desplace.
- La figura 6 representa esquemáticamente un cuarto ejemplo de dispositivo de calentamiento por inducción, aplicado al calentamiento de una chapa que se desplace.
- La figura 7 representa esquemáticamente una función imagen de la densidad de potencia calculada a partir de un vector optimizado de las corrientes que permite minimizar la diferencia entre dicha función y una función de referencia de densidad de potencia.
- La figura 8 representa esquemáticamente un primer modo de realización de un dispositivo de calentamiento por inducción según la invención en el que la alimentación de los onduladores es una fuente de corriente.
- La figura 9 representa esquemáticamente un segundo modo de realización de un dispositivo de calentamiento por inducción según la invención en el que la alimentación de los onduladores es una fuente de tensión.

Descripción detallada de la invención

En la figura 1, el dispositivo de calentamiento mostrado en el ejemplo se refiere a una configuración de disco metálico amagnético calentado mediante flujo transversal con la ayuda de tres acoplamientos de bobinas gemelas, lo que tiene la ventaja de conservar el aspecto asimétrico del problema. Con el fin de asegurar la simetría del conjunto del sistema, cada bobina colocada de un lado del disco se conecta en serie con su bobina gemela de la otra cara para formar un único inductor. De esta manera, el sistema es invariante por rotación. Además, con el fin de trabajar con la hipótesis de linealidad, se considera que los materiales electromagnéticos del sistema tienen una permeabilidad constante y unitaria. Cada inductor es alimentado por un ondulator que le es propio de tipo serie (ondulator de tensión) o de tipo paralelo (ondulator de corriente).

En la figura 2, el modelizado del sistema bajo la forma de inductancias acopladas permite representar las diferentes interacciones existentes. Este modelizado permite igualmente el estudio de la alimentación eléctrica en los inductores y el cálculo de los valores de las corrientes que es necesario inyectar.

Es necesario determinar la matriz de impedancias del sistema para cada configuración de calentamiento que se diseña, con el fin de reflejar el estado magnético y eléctrico del sistema para una geometría dada. La dimensión N de la matriz viene dada por el número de inductores, en este caso N=3.

La matriz de impedancias debe ser completa para tener en cuenta todos los efectos de acoplamiento. La determinación de esta matriz puede ser compleja, se pueden implementar varios medios analíticos o numéricos, o unas mediciones en línea y continuas mediante inyección de señales particulares.

Modelizada de ese modo, la ecuación general del sistema se puede escribir:

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

\underline{V} : Tensiones sinusoidales en los bornes de los inductores;

\underline{I} : Corrientes en los arrollamientos de los inductores;

\underline{Z} : Matriz de impedancias del sistema.

En nuestro caso, la matriz Z se puede escribir en la forma:

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

5

o incluso:

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

- 10
- L_{mm} : representa la inductancia propia de cada inductor;
 - $L_{mn} = L_{nm}$: representa las inductancias mutuas entre inductores;
 - R_{mm} : representa las resistencias propias de cada inductor;
 - $R_{mn} = R_{nm}$: representa las resistencias equivalentes debidas a las corrientes inducidas.

15 Con el conocimiento de las relaciones electromagnéticas entre las bobinas y la pieza a calentar, es posible proceder al cálculo de las corrientes a inyectar en cada una de las bobinas con el fin de obtener el calentamiento deseado.

20 Se ha de tomar nota de que diferentes configuraciones o métodos clásicos de cálculo tratan de minimizar los términos del acoplamiento no diagonales con el fin de eludir los problemas vinculados a las interacciones entre las bobinas. Además, para numerosos casos en los que los acoplamientos son reducidos, las resistencias propias de cada inductor son frecuentemente grandes frente a las resistencias equivalentes debidas a las corrientes inducidas. Los métodos clásicos utilizan de ese modo una matriz simplificada, es decir no completa, que conserva solamente los términos diagonales. Esto implica una regulación simplificada del calentamiento, pero en detrimento del control preciso del perfil de temperatura y de la flexibilidad de la instalación, en particular en la zona situada bajo las bobinas. Por el contrario, la presente invención tiene en cuenta la matriz de impedancias del sistema completa con el fin de mejorar la determinación de las corrientes a inyectar en las bobinas y por tanto mejorar el control del perfil de temperatura de la pieza calentada.

30 En el ejemplo descrito, se tienen tres inductores alimentados por tres fuentes de corriente diferentes. La determinación de las corrientes a inyectar en cada bobina se convierte en determinar cinco variables incógnita, sirviendo la fase de la corriente en el inductor Ind1 de referencia y no siendo por lo tanto una incógnita. En efecto, para una chapa dada que constituye la pieza a calentar, las incógnitas son:

- I_1 : valor eficaz de la corriente en el inductor Ind1, corriente que se tiene en cuenta como referencia de fase;
- 35 • I_2 y φ_2 : valor eficaz de la corriente en el inductor Ind2, y desfase de esta corriente con respecto a I_1 ;
- I_3 y φ_3 : valor eficaz de la corriente en el inductor Ind3, y desfase de esta corriente con respecto a I_1 .

40 Se comprende de lo que antecede que con la matriz de impedancias completa tenida en cuenta en la presente invención, el control del perfil de temperatura de la pieza calentada se debe efectuar no solamente controlando las amplitudes de las corrientes en los inductores sino también controlando los desfases de estas corrientes relativamente entre sí, lo que implica que cada ondulator está controlado de manera que pueda variar la amplitud y la fase de la corriente que atraviesa el inductor correspondiente.

45 A la vista de las relaciones que anteceden, el vector de las incógnitas se puede escribir entonces:

$$X = \{I_1, I_2, \varphi_2, I_3, \varphi_3\}^T \quad (1)$$

50 No es posible determinar fácilmente estas incógnitas mediante los métodos de resolución habituales. En efecto, con la excepción de casos muy simples, la formulación analítica que vincula los datos geométricos, las corrientes eléctricas en los inductores, el reparto espacial del campo electromagnético y la densidad de potencia en todos los puntos es casi imposible con tantas variables. Los programas clásicos de cálculo de campo basados en unas técnicas digitales de división del campo de estudio en mallas elementales permiten conocer el reparto del campo magnético, y en consecuencia calcular las densidades de potencia en las piezas conductoras en función de las corrientes inyectadas en los inductores. En nuestro caso, se plantea una problemática inversa, puesto que se trata de saber si existe uno o varios valores del vector x que permitan obtener un perfil de densidad de potencia deseado en la pieza.

Mediante la aplicación de la ecuación del calor, es bien conocido que la densidad de potencia inyectada Dp en una

pieza conductora da una buena imagen del comportamiento térmico del producto calentado. Por ejemplo, en el caso de calentamiento estático en el que la velocidad de desplazamiento del material tratado es nula, el conocimiento de la temperatura instantánea T del material tratado necesita clásicamente la resolución temporal de una forma simplificada de la ecuación del calor:

5

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) + Dp$$

ρ : representa la masa volumétrica;

10 C_p : representa la capacidad térmica másica;

λ : representa la conductividad térmica.

15 La resolución de esta ecuación implica una integración en tiempo real, lo que no es muy difícil. Además, en el caso de un calentamiento "flash", es decir si el tiempo de calentamiento es pequeño de tal manera que se puede desprestigiar la difusión térmica del calor en el seno del material durante esta duración, la expresión se simplifica aún de la siguiente manera:

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = Dp \quad (2)$$

20

Se obtiene por tanto una expresión simplificada clásica que permite vincular la densidad de potencia inyectada Dp y la elevación de la temperatura. De ese modo, a partir del perfil térmico deseado para la pieza calentada, se obtiene el perfil de densidad de potencia buscado.

25 En el ejemplo con referencia a la figura 1, el sistema es invariante siguiendo el eje de revolución del disco en la chapa y en el grosor de la chapa. Se tiene en cuenta por tanto una única dimensión del disco, a saber la dirección radial de la zona considerada del disco. Para la determinación del vector x de las incógnitas, se sabe que la densidad de potencia siguiendo el radio de la zona considerada se calcula mediante la ecuación siguiente:

30 $Dp(r,x) = \frac{1}{\sigma} |\underline{J}|^2$, es decir: $Dp(r,x) = \frac{1}{\sigma} (J_R^2(r,x) + J_I^2(r,x)) \quad (3)$

en la que σ representa la conductividad eléctrica, \underline{J} representa el vector de densidad de corriente definido sobre el radio r en la pieza, $J_R(r,x)$ y $J_I(r,x)$ representan las componentes real e imaginaria de este vector en función del radio de la zona considerada.

35

El sistema tomado como ejemplo es completamente lineal, es decir en particular sin materiales ferromagnéticos ni histéresis. Se puede por tanto aplicar el teorema de superposición de las fuentes para cada una de las alimentaciones de los tres inductores. Se observará que un principio similar se puede implementar en un sistema no lineal. Se obtienen así unas funciones imagen de las densidades de corriente en función del radio r de la zona anular considerada del disco calentado, siendo representativa cada función imagen f_k de la relación que vincula la densidad de corriente $J_k(r)$, creada por el inductor, a la corriente I_k que alimenta este inductor. Estas funciones imagen son vectoriales y tienen unas componentes real e imaginaria, definidas de la manera siguiente:

40

$$f_{kR}(r) = \frac{J_{kR}(r)}{I_k} \quad f_{kI}(r) = \frac{J_{kI}(r)}{I_k}$$

45

Al final, en nuestro ejemplo de tres inductores, el cálculo vectorial de la densidad total de corriente inducida en la zona anular de radio r del disco se puede expresar así:

$$\underline{J}(r,x) = \sum_{k=1}^3 (f_{kR}(r) + j f_{kI}(r)) \cdot I_k \cdot \mathbf{e}^{j\theta_k}$$

50

con $j^2 = -1$, es decir:

$$\underline{J}(r,x) = \sum_{k=1}^3 (f_{kR}(r) + j f_{kI}(r)) \cdot (I_{kR} + j I_{kI})$$

55 de donde

$$\underline{J}(r,x) = \underbrace{\sum_{k=1}^3 (f_{kR}(r) \cdot I_{kR} + f_{kI}(r) \cdot I_{kI})}_{J_R(r,x)} + \underbrace{\sum_{k=1}^3 (f_{kR}(r) \cdot I_{kI} + f_{kI}(r) \cdot I_{kR})}_{J_I(r,x)}$$

lo que se puede escribir también

5
$$\underline{J}(r,x) = J_R(r,x) + jJ_I(r,x) \quad (4)$$

Se obtiene por lo tanto una relación entre el vector de densidad de corriente inducida en la zona considerada de la pieza y los vectores de las corrientes en los inductores. Por una parte con la matriz de impedancias que vincula las magnitudes eléctricas entre inductores, y por otra parte las funciones imagen de las densidades de corriente en la pieza, se dispone de ese modo de todas las informaciones necesarias para el cálculo del vector de las incógnitas x a partir de un perfil de densidad de potencia determinado. Se observará que se puede hacer intervenir también en el cálculo al vector de los condensadores, es decir el vector de las capacidades de los circuitos oscilantes, puesto que estas capacidades no son generalmente rigurosamente iguales debido a las tolerancias de fabricación y que pueden derivar un poco. Para el cálculo, se podrán utilizar unos programas de resolución de ecuaciones con derivadas parciales, con diversas técnicas numéricas posibles tales como los elementos finitos, las diferencias finitas, los volúmenes finitos, las integrales frontera, los elementos de circuitos parciales o cualquier otra técnica del mismo género.

Este método se ha descrito para un ejemplo dado de un sistema magnéticamente acoplado relativamente simple, pero se puede trasladar sin embargo a cualquier sistema más complejo y no simétrico. El número de bobinas no está limitado y se pueden diseñar diversas formas y configuraciones de las bobinas o de las piezas a calentar, como los ejemplos visibles en las figuras 3 a 6.

Una vez que se determina la función imagen de la densidad de corriente, la función imagen de la densidad de potencia $Dp(r,x)$ se determina mediante las relaciones de las ecuaciones (3) y (4) anteriores. Es ventajoso además optimizar mediante el cálculo el vector de las incógnitas x . El problema de optimización consiste en calcular un vector optimizado x que permita minimizar la diferencia entre la función imagen de la densidad de potencia y una función densidad de potencia de referencia $Dp^{ref}(r)$ que corresponde a un perfil de densidad de potencia de referencia que se busca para inyectar en el disco metálico. Esta función de densidad de potencia de referencia toma como ejemplo un valor constante si se busca una homogeneidad de temperatura en el disco. Es posible sin embargo tener una función no constante con el fin de obtener unos perfiles particulares de calentamiento. Con el aparellaje de la figura 1, el presente solicitante ha realizado los ensayos con diferentes funciones de densidades de potencia de referencia correspondientes por ejemplo a unos perfiles sinusoidales o triangulares en la dirección radial del disco, y los resultados son muy satisfactorios.

La optimización consiste por tanto en minimizar la función $g(r,x) = |Dp(r,x) - Dp^{ref}(r)|$ mientras se fijan unos límites altos y bajos X_i^H y X_i^B sobre las incógnitas buscadas. Esto permite eliminar entre otras las soluciones aberrantes o que no tienen realidad física. La formulación del problema de optimización se convierte por tanto de minimizar $g(r, X)$ con $x = \{x_1, \dots, x_n\}^T$ y $x_i \in [X_i^B, X_i^H]$, $i=1, \dots, n$.

Tras la resolución del problema, se obtiene un vector optimizado x que contiene todas las amplitudes de los vectores de las corrientes en los inductores y sus fases respectivas, para el disco metálico dado. Uno de los resultados para un ejemplo de disco de 650 mm de diámetro, con una referencia de densidad de potencia $|Dp^{ref}| = 10 \text{ MW/m}^3$, da una desviación relativa máxima del 3% sobre la función imagen de la densidad de potencia tal como se ha representado $Dp(r,x)$ en la figura 7.

Este método de resolución puede ser ampliado fácilmente con el fin de tener en cuenta varias dimensiones del disco, por ejemplo tres si además del radio se tiene en cuenta la posición angular y el grosor del material de la zona considerada, mientras se tiene en cuenta igualmente la igualdad de la compensación reactiva necesaria en los bornes de cada bobina para que los tres circuitos oscilantes oscilen a unas frecuencias muy próximos. Se pasaría así de un vector de cinco incógnitas a un vector de dieciocho incógnitas, sin cambiar el sistema físico.

El método explicado anteriormente para la determinación del vector optimizado x se utiliza ventajosamente en el procedimiento de calentamiento por inducción según la invención, pudiendo implementarse este procedimiento en particular en uno u otro de los dispositivos de calentamiento representados en las figuras 8 y 9.

En la figura 8 se representa esquemáticamente un primer modo de realización de un dispositivo de calentamiento por inducción según la invención, en el que la alimentación 1 de los onduladores es una fuente de corriente continua.

El dispositivo de calentamiento comprende unos inductores $Ind_1, Ind_2, \dots, Ind_p$, acoplados magnéticamente, estando alimentado cada inductor mediante un ondulator de corriente O_1, O_2, \dots, O_p , que le es propio y asociado a un condensador C_1, C_2, \dots, C_p , para formar un circuito oscilante OC_1, OC_2, \dots, OC_p . Los onduladores de corriente se

ponen en serie con la alimentación 1. Cada ondulator comprende generalmente unos interruptores electrónicos bidireccionales, y está controlado mediante una unidad de control también denominada modulador M_1, M_2, \dots, M_p . Cada modulador concibe unas órdenes de control de los interruptores bajo la forma de impulsos, y el desfase entre los tiempos de estas órdenes permite hacer variar la amplitud A_1, A_2, \dots, A_p , y la fase $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$, de la corriente I_1, I_2, \dots, I_p , que atraviesa el inductor correspondiente. La variación de la amplitud de la fundamental de la corriente en la salida de cada ondulator se efectúa introduciendo un ángulo de desfase sobre la señal generada por el modulador que controla el ondulator. Eligiendo un ondulator de referencia como se explica más adelante, los ángulos de desfase sobre los otros ondulators se pueden introducir con respecto a un ángulo de control en el ondulator de referencia. El control sobre el ondulator de referencia se puede efectuar por ejemplo con una relación cíclica igual a $2/3$ es decir un ángulo de control de 30° .

Los circuitos oscilantes poseen al menos aproximadamente la misma frecuencia de resonancia, lo que permite maximizar la eficacia de la inducción puesto que los inductores trabajan sensiblemente a esta frecuencia, y permite también disminuir las pérdidas en los ondulators. Las señales periódicas de control de los ondulators generados por los moduladores tienen por tanto sensiblemente la misma frecuencia. Para hacer variar la fase $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ de una corriente I_1, I_2, \dots, I_p , que atraviesa un inductor, es suficiente desfasar en el tiempo la señal de control del ondulator correspondiente, es decir aplicar un mismo desfase temporal a la totalidad de las órdenes de control de los interruptores del ondulator. El desfase se puede realizar también en retardo o en avance con respecto a la señal de control del ondulator de otro inductor tomado como referencia.

Para controlar en tiempo real la densidad de potencia a inyectar en la pieza calentada con el fin de alcanzar el perfil de temperatura buscado, es necesario prever unos medios de determinación de los parámetros de amplitud y de fase de las corrientes que atraviesan los inductores con el fin de poder corregir el control de los ondulators. Se prevén unos medios de determinación de los parámetros de amplitud y de fase de las corrientes I_1, I_2, \dots, I_p , de los inductores, no representados en la figura, para proporcionar estos parámetros a unas unidades comparadoras $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p$. Estos medios de determinación pueden consistir por ejemplo en unos transformadores de corriente dispuestos cada uno en serie con un inductor, pero se pueden concebir otros medios. Se puede medir por ejemplo la corriente activa suministrada por el ondulator al circuito oscilante, y calcular la corriente en el inductor con la ayuda de los parámetros de inductancia y de capacidad.

Se prevén además unos medios de determinación de un perfil de temperatura efectivo de la pieza metálica calentada 10, no representados en la figura, disponiendo por ejemplo unos termopares sobre un número n de zonas calentadas y recogiendo las temperaturas $\theta_{1 \text{ med}}, \theta_{2 \text{ med}}, \dots, \theta_{n \text{ med}}$, medidas. Se pueden determinar también estas temperaturas utilizando una cámara térmica, o incluso proceder mediante unos cálculos a partir de las corrientes inducidas si, por ejemplo, unas zonas calentadas están demasiado confinadas para una medición directa.

El perfil de temperatura efectivo se determina por ejemplo continuamente durante el calentamiento y se compara regularmente con un perfil de temperatura de referencia $\theta_{1 \text{ ref}}, \theta_{2 \text{ ref}}, \dots, \theta_{n \text{ ref}}$, correspondiente al perfil final de calentamiento deseado para la pieza y previamente introducido en una memoria. Esta comparación se efectúa mediante un comparador 2, que puede integrar dicha memoria. El resultado se trata mediante un calculador que, a partir de una ecuación deducida de la ecuación del calor y eventualmente simplificada, la ecuación (2) anterior, calcula el perfil de densidad de potencia de referencia $Dp^{\text{ref}}_1, Dp^{\text{ref}}_2, \dots, Dp^{\text{ref}}_n$ que el dispositivo de calentamiento debe inyectar en la pieza para alcanzar el perfil de temperatura de referencia. El calculador puede consistir en una memoria en la que se reintroduce una tabla de perfiles precalculados de densidad de potencia de referencia correspondientes a diferentes perfiles de temperatura efectivos para una o varias configuraciones de piezas y uno o varios perfiles de densidad de potencia de referencia.

Un calculador establece unas corrientes objetivo que deben suministrar los ondulators con el fin de que las corrientes de los inductores alcancen unos valores objetivo apropiados $I_{1 \text{ ref}}, I_{2 \text{ ref}}, \dots, I_{p \text{ ref}}$, para inyectar en la pieza el perfil de densidad de potencia de referencia. Este cálculo utiliza la matriz de impedancias Z con las funciones imágenes vectoriales f_k y preferiblemente el vector de las capacidades de los circuitos oscilantes, definidos anteriormente. Las unidades compradoras $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p$ comparan los parámetros de las corrientes medidas o calculadas $I_{1 \text{ med}}, I_{2 \text{ med}}, I_{p \text{ med}}$, de los inductores con los valores objetivo $I_{1 \text{ ref}}, I_{2 \text{ ref}}, \dots, I_{p \text{ ref}}$, y determinan las desviaciones de las corrientes $\delta I_{1 \text{ corr}}, \delta I_{2 \text{ corr}}, \dots, \delta I_{p \text{ corr}}$, a corregir, también denominadas corrientes de corrección. Unas unidades de tratamiento $\text{CORR}_1, \text{CORR}_2, \dots, \text{CORR}_p$, de los parámetros de amplitud y fase de estas corrientes de corrección generan unas instrucciones de corrección enviadas a los moduladores para controlar los ondulators de manera que corrijan las amplitudes y los desfases de las corrientes que atraviesan los inductores.

Se entiende que mediante el control de los desfases de las corrientes en los inductores, no se busca obtener un desfase nulo o constante. Se busca por el contrario utilizar los desfases como unos parámetros de regulación en tiempo real de la densidad de potencia a inyectar en la pieza calentada, lo que se convierte en posible mediante la toma en consideración de la matriz de impedancias completa como se ha explicado en lo que antecede. En otros términos, se utilizan los desfases como unos parámetros de control del perfil de temperatura. Por ejemplo, se puede prever controlar en tiempo real los desfases de las corrientes en los inductores todos los cuartos de período de las señales de control de los ondulators generadas por los moduladores, para controlar finamente la temperatura

según diferentes perfiles, por ejemplo un perfil plano, o incluso un perfil creciente o decreciente linealmente (polinomio de orden 1) o no linealmente (polinomio de orden >1).

Ventajosamente, se puede determinar un valor inicial Z_{ini} de la matriz de impedancias Z para una temperatura media inicial θ_{ini} dada de los inductores y de la pieza a calentar, posteriormente determinar a intervalos variables o periódicos la matriz de impedancias modificada $Z_{mod}(\theta)$ para al menos un valor incrementado θ_{mod} de la temperatura media θ , y se utiliza la matriz de impedancias modificada para recalcular las corrientes objetivo. En el caso de intervalos variables de muestreo, el cálculo de las corrientes objetivo se puede efectuar cada vez que la temperatura media θ medida alcanza sensiblemente un nuevo valor incrementado θ_{mod} entre una serie de valores predeterminados.

Ventajosamente, el ondulator de corriente alimenta el inductor de impedancia más reducida, por ejemplo la bobina Ind1 en el ejemplo de la figura 1, se elige como ondulator de referencia puesto que la corriente en este inductor, más grande que la de los otros inductores, se toma preferiblemente como referencia de fase. Podrá tomarse como ondulator de referencia el ondulator de corriente que tiene la corriente más alta, o el ondulator de tensión que tiene la tensión más alta en el caso en el que la alimentación 1 de los onduladores sea una fuente de tensión como se ha representado en la figura 9,. Además, el ondulator de referencia se puede regular ventajosamente con una relación cíclica de 2/3, es decir que se controla de manera que genere una onda cuadrada de 120° ON y 60° OFF por semiperiodo. Esto tiene como objetivo anular el armónico de orden 3 y sus múltiplos con el fin de disminuir las perturbaciones armónicas creadas por este ondulator sobre sus vecinos. Se entiende que la relación cíclica del ondulator de referencia no se regula necesariamente al valor de 2/3. Por ejemplo, podrá preferirse en ciertos casos un control en onda completa.

El valor eficaz de la corriente en el ondulator de referencia se podrá regular mediante la acción sobre la alimentación 1 continua en corriente o en tensión. Esto presenta la ventaja principalmente de tener un vector de incógnitas (compárese con la relación 1 anterior) en el que se ha eliminado la fase de la corriente en el inductor Ind1, lo que simplifica la obtención del vector optimizado x como en el ejemplo descrito anteriormente. Se entiende que se puede regular alternativamente el valor eficaz de la corriente en el ondulator de referencia introduciendo unos ángulos de desfase sobre el control de este ondulator. En la figura 8, que toma como referencia de fase la corriente I_1 , es ventajoso que la unidad comparadora correspondiente ε_1 reciba los parámetros de corriente I_{c_med} suministrados por la alimentación continua 1. De esta manera, la unidad de tratamiento CORR₁ asociada se adaptará para generar unas instrucciones de regulación enviadas a la alimentación 1 a través del modulador de control M'1, de manera que modifique la corriente suministrada por el ondulator O1 al circuito oscilante OC1, lo que permite controlar la amplitud de esta corriente y por tanto modificar la amplitud de la corriente I_1 en el inductor Ind1.

Para calentar una pieza metálica con el dispositivo de calentamiento descrito anteriormente, se utiliza el procedimiento que comprende las etapas siguientes:

- a) se compara el perfil de temperatura efectivo de la pieza con el perfil predeterminado de temperatura de referencia, y se calcula el perfil de densidad de potencia de referencia que el dispositivo debe inyectar en la pieza para alcanzar el perfil de temperatura de referencia;
- b) a partir de una matriz de impedancias Z del sistema, preferiblemente asociada al vector de las capacidades de los circuitos oscilantes, y mediante el conocimiento de las funciones imágenes vectoriales f_k , se calculan las corrientes objetivo que deben suministrar los onduladores con el fin de que las corrientes de los inductores alcancen unos valores objetivo apropiados para inyectar en la pieza el perfil de densidad de potencia de referencia;
- c) se determinan mediante medición o mediante cálculo las corrientes que atraviesan los inductores para compararlas con los valores objetivo de estas corrientes y determinar las desviaciones de corriente a corregir, y se envían a los moduladores las instrucciones de corrección con el fin de controlar los onduladores de manera que corrijan las corrientes.

Por supuesto, las corrientes objetivo así como las corrientes de los inductores medidas o calculadas son unos vectores de corriente, en consecuencia se tiene en cuenta no solamente la amplitud sino también la fase.

Ventajosamente, después de haber efectuado sucesivamente las etapas (a) y (b), se efectúa al menos una vez la etapa (c) para disminuir las desviaciones de las corrientes a corregir, posteriormente se reiteran al menos una vez las etapas (a), (b) y (c) actualizando el perfil de temperatura efectivo mediante unas mediciones de temperatura en diferentes zonas calentadas de la pieza.

En la figura 9 se representa esquemáticamente un segundo modo de realización de un dispositivo de calentamiento por inducción según la invención, en el que la alimentación 1 de los onduladores es una fuente de tensión continua.

El dispositivo de calentamiento es análogo al del primer modo de realización de la figura 8, pero los onduladores de corriente se ponen en paralelo con la fuente de tensión. Este modo de realización presenta ciertas ventajas, principalmente la de disminuir las pérdidas por conducción de los onduladores. Por el contrario, el parámetro de

corriente $I_{c \text{ calc}}$ representativo de la corriente que suministra la alimentación 1 al ondulator O1 se debe calcular a partir de la tensión de alimentación con la ayuda de una matriz de impedancias Z' .

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de calentamiento por inducción implementado en un dispositivo de calentamiento de una pieza metálica, comprendiendo el dispositivo unos inductores (I_{nd1} , I_{nd2} ,..., I_{ndp}) acoplados magnéticamente, siendo alimentado cada inductor mediante un ondulator ($O1$, $O2$,..., O_p) que le es propio y asociado a un condensador ($C1$, $C2$,..., C_p) para formar un circuito oscilante ($OC1$, $OC2$,..., OC_p), teniendo dichos circuitos oscilantes aproximadamente al menos la misma frecuencia de resonancia, estando controlado cada ondulator por una unidad de control ($M1$, $M2$,..., M_p) de manera que varíe la amplitud (A_1 , A_2 ,..., A_p) y la fase (φ_1 , φ_2 ,..., φ_p) de la corriente (I_1 , I_2 ,..., I_p) que atraviesa el inductor correspondiente, comprendiendo el dispositivo además unos medios de determinación de dicha corriente (I_1 , I_2 ,..., I_p) así como unos medios de determinación de un perfil de temperatura efectivo ($\theta_{1\ med}$, $\theta_{2\ med}$,..., $\theta_{n\ med}$) de dicha pieza metálica, comprendiendo dicho procedimiento las etapas siguientes:
- a) se compara dicho perfil de temperatura efectivo ($\theta_{1\ med}$, $\theta_{2\ med}$,..., $\theta_{n\ med}$) con un perfil de temperatura de referencia ($\theta_{1\ ref}$, $\theta_{2\ ref}$,..., $\theta_{n\ ref}$), y se calcula un perfil de densidad de potencia (Dp^{ref}_1 , Dp^{ref}_2 ,..., Dp^{ref}_n) de referencia que el dispositivo de calentamiento debe inyectar en dicha pieza para alcanzar dicho perfil de temperatura de referencia;
 - b) a partir de una matriz de impedancias (Z), determinada mediante el conocimiento de las relaciones electromagnéticas que vinculan dichos inductores entre sí y a dicha pieza y mediante el conocimiento de funciones de imágenes vectoriales (f_k) representativas de las relaciones que vinculan las densidades de corriente creadas por los inductores con las corrientes (I_1 , I_2 ,..., I_p) que atraviesan los inductores, se calculan unas corrientes objetivo que deben suministrar los onduladores con el fin de que las corrientes de los inductores alcancen unos valores objetivo ($I_{1\ ref}$, $I_{2\ ref}$,..., $I_{p\ ref}$) apropiados para inyectar en dicha pieza dicho perfil de densidad de potencia de referencia (Dp^{ref}_1 , Dp^{ref}_2 ,..., Dp^{ref}_n);
 - c) se determinan las corrientes ($I_{1\ med}$, $I_{2\ med}$,..., $I_{p\ med}$) que atraviesan los inductores para compararlas con dichos valores objetivo ($I_{1\ ref}$, $I_{2\ ref}$,..., $I_{p\ ref}$) y determinar unas desviaciones de corriente ($\delta I_{1\ corr}$, $\delta I_{2\ corr}$,..., $\delta I_{p\ corr}$) a corregir, y se envían a dichas unidades de control ($M1$, $M2$,..., M_p) unas instrucciones de corrección en función de dichas desviaciones de corriente con el fin de controlar los onduladores de manera que corrijan las corrientes que atraviesan los inductores.
2. Procedimiento de calentamiento según la reivindicación 1, en el que se determinan las capacidades de dichos condensadores ($C1$, $C2$,..., C_p) y se asocia dicha matriz de impedancias (Z) a un vector (C) de las capacidades.
3. Procedimiento de calentamiento según la reivindicación 1 o 2, en el que se determina un valor inicial (Z_{ini}) de dicha matriz de impedancias (Z) para una temperatura media inicial (θ_{ini}) dada de dichos inductores y de dicha pieza, posteriormente se determina a intervalos variables o periódicos la matriz de impedancias modificada ($Z_{mod}(\theta)$) para al menos un valor incrementado (θ_{mod}) de dicha temperatura media, y se utiliza dicha matriz de impedancias modificada para recalcular dichos valores objetivo ($I_{1\ ref}$, $I_{2\ ref}$,..., $I_{p\ ref}$).
4. Procedimiento de calentamiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que después de haber efectuado sucesivamente las etapas (a) y (b) se efectúa al menos una vez la etapa (c) para disminuir dichas desviaciones de corriente ($\delta I_{1\ corr}$, $\delta I_{2\ corr}$,..., $\delta I_{p\ corr}$) a corregir, posteriormente se reiteran al menos una vez las etapas (a), (b) y (c) actualizando dicho perfil de temperatura efectivo ($\theta_{1\ med}$, $\theta_{2\ med}$,..., $\theta_{n\ med}$) mediante unas mediciones de temperatura en diferentes zonas calentadas de la pieza.
5. Procedimiento de calentamiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que para la determinación mediante cálculo de dichos valores objetivo ($I_{1\ ref}$, $I_{2\ ref}$,..., $I_{p\ ref}$) en la etapa (b), gracias al conocimiento de dichas funciones de imágenes vectoriales (f_k), se calculan unas funciones imagen de las densidades de potencia ($Dp(r,x)$) según las características espaciales (r) de las zonas de la pieza en las que dichas densidades de potencia se inyectan, y se calcula un vector optimizado (x) de las corrientes objetivo a determinar, minimizando la diferencia entre cada una de dichas funciones imagen de las densidades de potencia ($Dp(r,x)$) y una función de densidad de potencia de referencia ($Dp^{ref}(r)$) que corresponde a dicho perfil de densidad de potencia de referencia (Dp^{ref}_1 , Dp^{ref}_2 ,..., Dp^{ref}_n).
6. Procedimiento de calentamiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que se toma como ondulator de referencia un ondulator ($O1$) que tenga, con respecto a los otros onduladores ($O2$,..., O_p), la corriente más alta en el caso de un ondulator de corriente o la tensión más alta en el caso de un ondulator de tensión, y se introducen unos ángulos de desfase en los controles de los otros onduladores con respecto a un ángulo de control en el ondulator de referencia.
7. Procedimiento de calentamiento según la reivindicación 6, en el que se regula el ondulator de referencia ($O1$) con una relación cíclica igual a 2/3, con el fin de disminuir las perturbaciones armónicas creadas por este ondulator sobre sus vecinos ($O2$,..., O_p).
8. Procedimiento de calentamiento según la reivindicación 6 o 7, en el que se regula el valor eficaz de la corriente en dicho ondulator de referencia ($O1$) actuando sobre una alimentación continua (1) que alimenta los onduladores ($O1$,

O2,..., Op).

9. Dispositivo de calentamiento por inducción que comprende:

5 unos inductores (Ind1, Ind2,..., Indp) acoplados magnéticamente, estando asociado cada inductor a un condensador (C1, C2,..., Cp) para formar un circuito oscilante (OC1, OC2,..., OCp), teniendo dichos circuitos oscilantes al menos aproximadamente la misma frecuencia de resonancia;
 unos onduladores (O1, O2,..., Op) que alimentan cada uno un inductor (Ind1, Ind2,..., Indp) que le es propio, estando controlado cada ondulator mediante una unidad de control (M1, M2,..., Mp) de manera que varíe la
 10 amplitud (A_1, A_2, \dots, A_p) y la fase ($\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$) de la corriente (I_1, I_2, \dots, I_p) que atraviesa el inductor correspondiente;

caracterizado por que comprende además:

15 unos medios de determinación de las corrientes (I_1, I_2, \dots, I_p) que atraviesan los inductores así como unos medios de determinación de un perfil de temperatura efectivo ($\theta_{1\text{ med}}, \theta_{2\text{ med}}, \dots, \theta_{n\text{ med}}$) de una pieza metálica calentada por el dispositivo;

unos medios de comparación de dicho perfil de temperatura efectivo ($\theta_{1\text{ med}}, \theta_{2\text{ med}}, \dots, \theta_{n\text{ med}}$) con respecto a un perfil de temperatura de referencia ($\theta_{1\text{ ref}}, \theta_{2\text{ ref}}, \dots, \theta_{n\text{ ref}}$);

20 unos medios de cálculo de un perfil de densidad de potencia de referencia ($Dp^{\text{ref}}_1, Dp^{\text{ref}}_2, \dots, Dp^{\text{ref}}_n$) que el dispositivo de calentamiento debe inyectar en dicha pieza para alcanzar dicho perfil de temperatura de referencia;

unos medios de cálculo, basados en el conocimiento de una matriz de impedancias (Z), de corrientes objetivo que deben suministrar los onduladores con el fin de que las corrientes de los inductores alcancen unos valores objetivo ($I_{1\text{ ref}}, I_{2\text{ ref}}, \dots, I_{p\text{ ref}}$) apropiados para inyectar en dicha pieza dicho perfil de densidad de potencia de referencia ($Dp^{\text{ref}}_1, Dp^{\text{ref}}_2, \dots, Dp^{\text{ref}}_n$);

25 unos medios de comparación ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p$) de las corrientes ($I_{1\text{ med}}, I_{2\text{ med}}, \dots, I_{p\text{ med}}$) que atraviesan los inductores con respecto a dichos valores objetivo ($I_{1\text{ ref}}, I_{2\text{ ref}}, \dots, I_{p\text{ ref}}$), adecuados para determinar unas desviaciones de corriente ($\delta I_{1\text{ corr}}, \delta I_{2\text{ corr}}, \dots, \delta I_{p\text{ corr}}$) a corregir, y unos medios de tratamiento (CORR₁, CORR₂,..., CORR_p) de dichas desviaciones de corriente adecuados para generar unas instrucciones de corrección enviadas a dichas unidades de control (M1, M2,..., Mp) para controlar los onduladores de manera que corrijan las corrientes que atraviesan los inductores.
 30

10. Dispositivo de calentamiento por inducción según la reivindicación 9, en el que se alimenta a los onduladores (O1, O2,..., Op) mediante una misma alimentación (1) de fuente de corriente o fuente de tensión, y en el que dichos
 35 medios de comparación de dichas corrientes determinadas ($I_{1\text{ med}}, I_{2\text{ med}}, \dots, I_{p\text{ med}}$) que atraviesan los inductores comprenden unas unidades comparadoras ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p$) que reciben cada una unos parámetros determinados ($A_1, \varphi_1; A_2, \varphi_2, \dots; A_p, \varphi_p$) de una corriente que atraviesa un inductor ($I_{1\text{ med}}, I_{2\text{ med}}, \dots, I_{p\text{ med}}$) y unos parámetros de los valores objetivo correspondientes ($I_{1\text{ ref}}, I_{2\text{ ref}}, \dots, I_{p\text{ ref}}$) y estando conectada cada una a una unidad de tratamiento (CORR₁, CORR₂,..., CORR_p) de dichas desviaciones de corriente, recibiendo además una (ε_1) de dichas unidades comparadoras unos parámetros ($I_{c\text{ med}}, I_{c\text{ calc}}$) representativos de que se suministra dicha alimentación (1) y estando
 40 adaptada su unidad de tratamiento asociada (CORR₁) para generar unas instrucciones de regulación enviadas a dicha alimentación (1) de manera que modifique la corriente o la tensión que suministra.

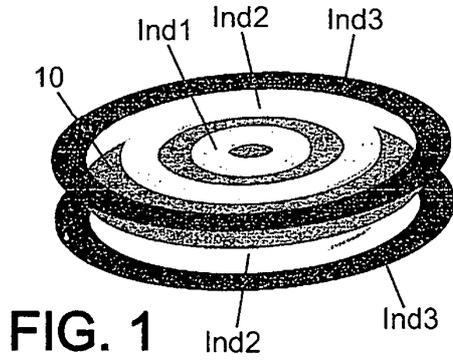


FIG. 1

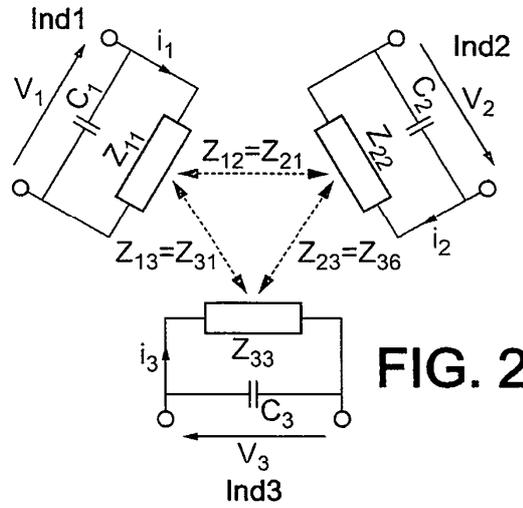


FIG. 2

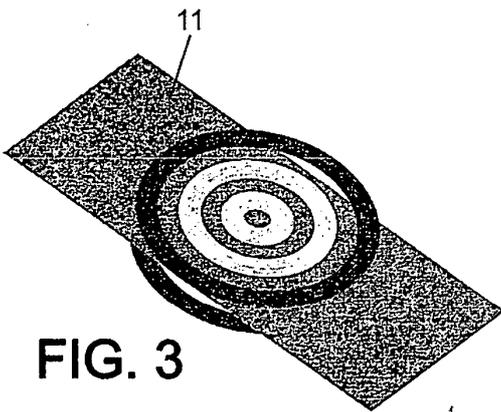


FIG. 3

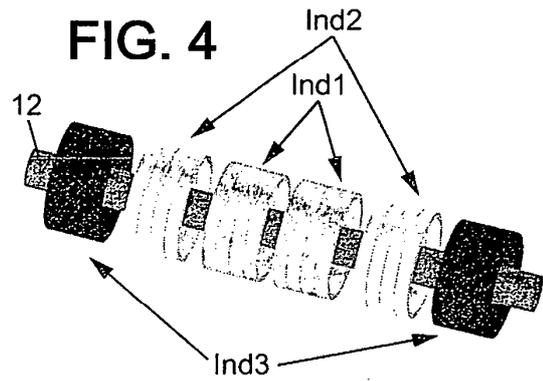


FIG. 4

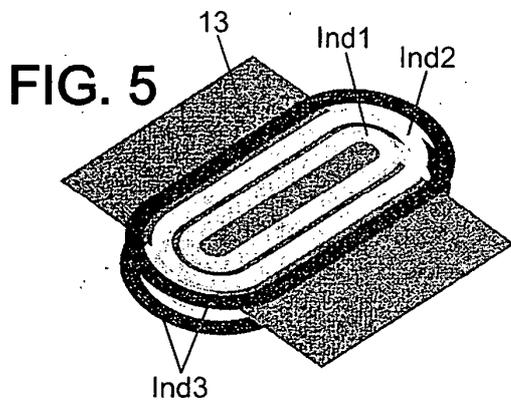


FIG. 5

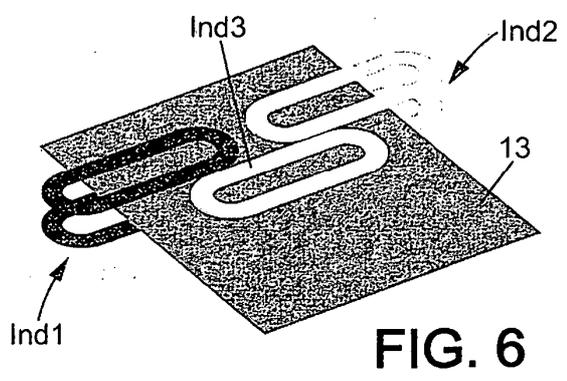


FIG. 6

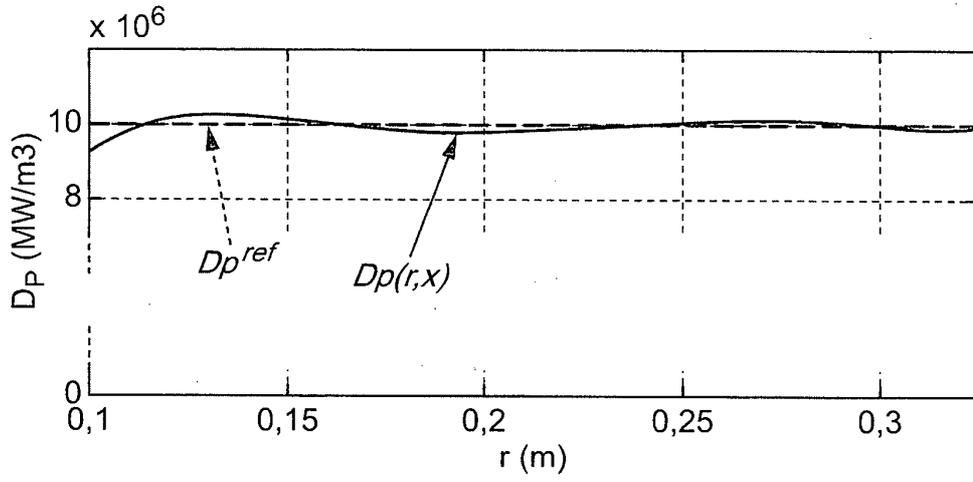
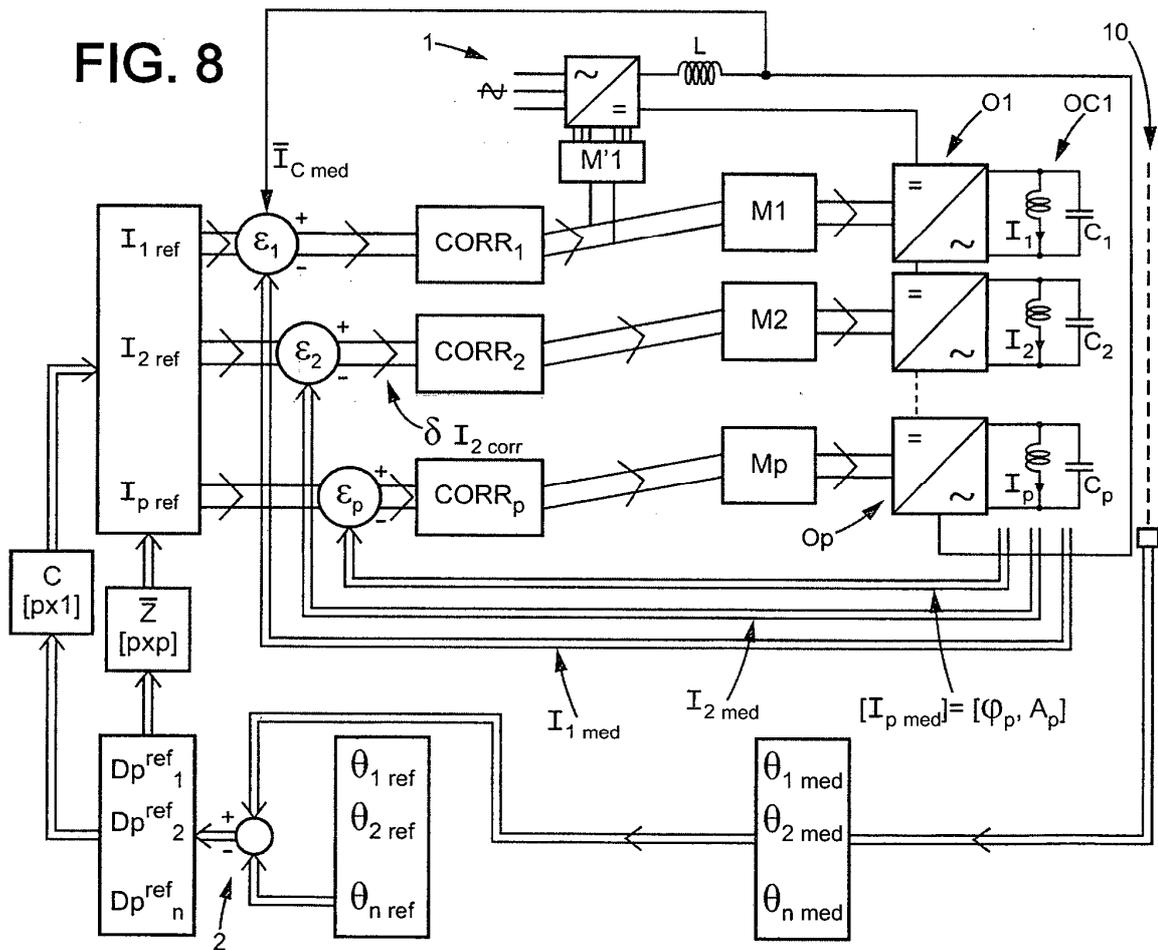


FIG. 7



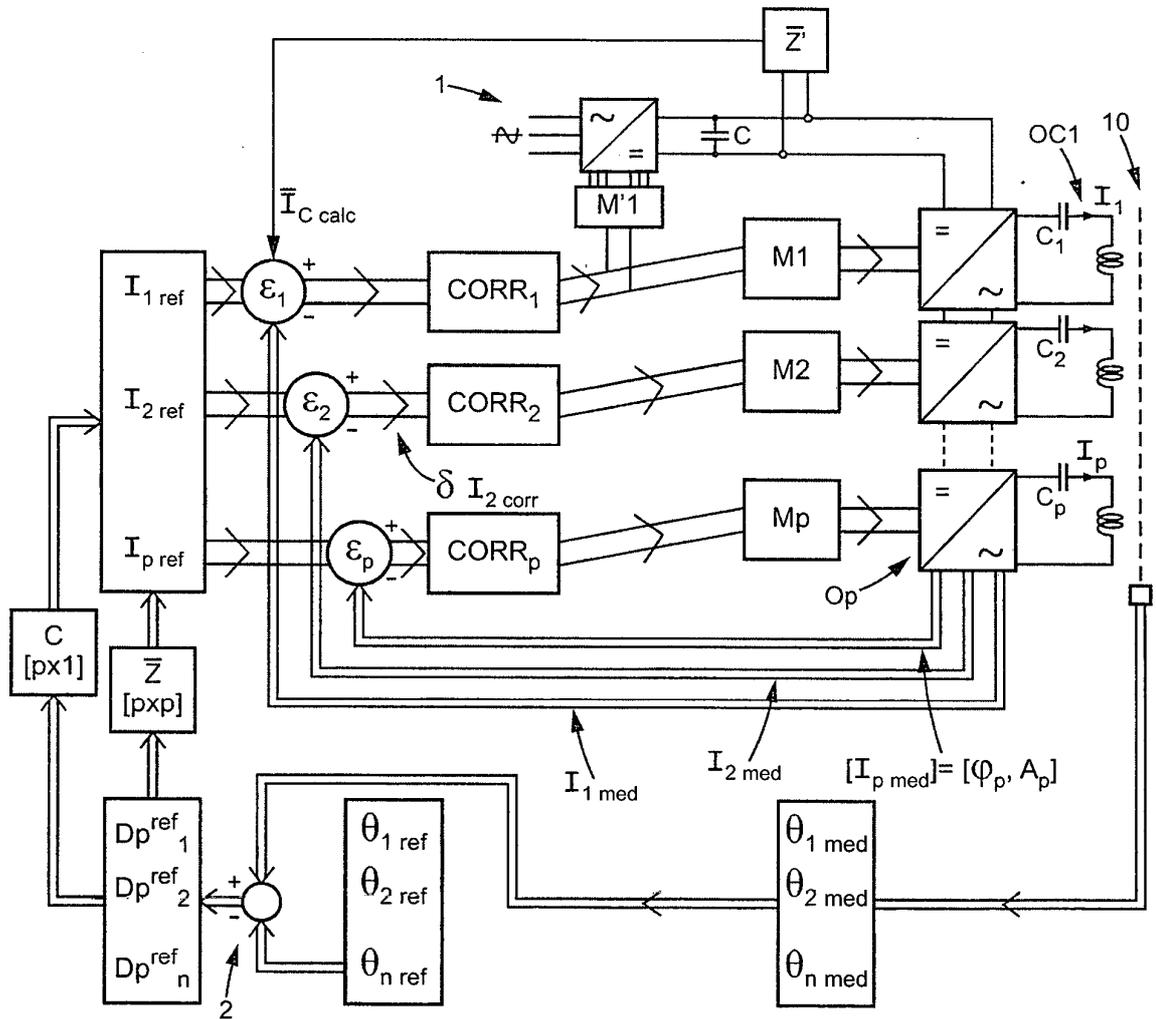


FIG. 9