

Preestudio para el desarrollo de un equipo de calentamiento por inducción.

Mariano Cuenca Alba, Ingeniero Técnico Telecomunicación e-Segainvex, Universidad Autónoma de Madrid.

Objetivos:

Se pretende estudiar la fabricación de un equipo de calentamiento por inducción, para utilizar en sistemas de crecimiento de cristales, como medio para fundir los cristales a crecer, el sistema debe ser capaz de alcanzar entorno a 1700°C.

1. Introducción y fundamentos:

Sistemas de producción de calor:

-Efecto Joule, es el efecto calentamiento que se produce cuando una corriente atraviesa una resistencia. Dentro de este efecto, se incluye también el calentamiento producido por las corrientes de inducción, que se producen en el interior de un conductor cuando es introducido en un campo magnético variable.

-Perdidas por histéresis que se producen en el interior de sustancias ferromagnéticas, cuando son sometidas a un campo magnético variable, son proporcionales al volumen de materia introducido en el campo magnético.

-Calentamiento de moléculas dipolares por medio de microondas, se produce en materiales no conductores, que contengan moléculas dipolares a las cuales se pueda hacer vibrar.

-Calentamiento dieléctrico, se produce en el interior de sustancias dieléctricas cuando son sometidas a campos eléctricos.

El método que hemos venido utilizando hasta ahora, ha sido el del efecto Joule directo, aplicando tensión a una resistencia, normalmente de Kanthal capaz de resistir las altas temperaturas necesarias para esta aplicación. En este caso seguiremos utilizando el efecto Joule para producir calor, pero en este caso lo haremos produciendo directamente corrientes de inducción en la sustancia a fundir o en el crisol que la contiene.

1.1 Introducción al calentamiento por inducción.

La explicación teórica del calentamiento por inducción se hace por la aplicación de las leyes de la inducción (ley de Faraday y ley de Ampere) y como ya mencionábamos en el párrafo anterior del efecto Joule.

En primer lugar tenemos que si aplicamos una corriente a un conductor, este genera un campo magnético que cuya distribución viene dada por la ley de Ampere.

$$Ni = \oint \vec{H} d\vec{l} = HI$$

Donde i es la corriente que circula por el conductor, N es el número de espiras, l la longitud del circuito y H el campo magnético.

Si la corriente que aplicamos al conductor es variable en el tiempo, el campo que se genera, también lo es y por tanto generará un flujo magnético cambiante. Aplicando la ley de Faraday en un conductor sometido a un flujo magnético variable se generará una fuerza electromotriz cuyo valor es:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\phi}{dt}$$

Donde \mathcal{E} es la fem inducida, N el número de espiras y ϕ el flujo del campo magnético.

Esta fuerza electromotriz inducida en el interior de conductor, generan una corriente (corriente de inducción ó corriente de Foucault) que son la responsable del calentamiento, por efecto Joule:

$$P = i^2 R_{eq}$$

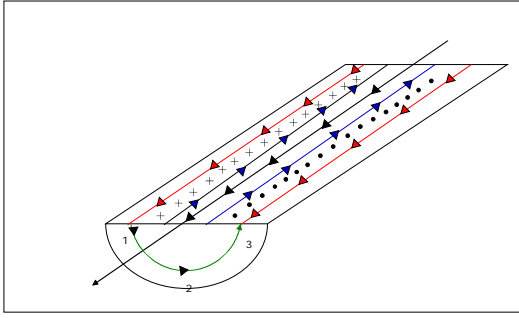
Donde P es la potencia disipada en la resistencia equivalente R_{eq} por la que circula la corriente i .

Todo este entramado es equivalente al funcionamiento de un transformador, en el cual el primario es nuestra bobina de inducción, y el secundario es el elemento a calentar, que es equivalente a una sola espira, cerrada con una resistencia, que es la resistencia equivalente.

1.2 Calculo de la resistencia equivalente.

Como hemos visto, un elemento de calculo fundamental en este sistema es la resistencia equivalente, para el calculo de esta, debemos recurrir al efecto pelicular "Skin effect".

Si resolvemos las ecuaciones del campo en el interior del conductor, veremos que la corriente en el conductor solo circula por la superficie, esto es debido a que la corriente principal en el interior del conductor, genera un campo magnético variable en su seno, el campo magnético sigue la trayectoria marcada como 1,2,3 y en una mitad del conductor es entrante y en la otra saliente, este campo magnético, produce una corrientes de inducción que tienen el mismo sentido en la parte exterior y contrario en la interior, como consecuencia de esto, la corriente en el centro del conductor se anula y se refuerza en los bordes. El flujo neto de corriente solo se produce en la superficie del conductor.



Para el estudio de este efecto, introducimos un nuevo factor, que es la profundidad de penetración, que es aquella profundidad a la que el campo magnético se atenúa $1/e$, y es la zona en la que se concentra el 63% de la corriente y el 87% de la potencia que se disipa.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}}$$

Donde ω es la frecuencia angular, σ es la conductividad y μ la permeabilidad magnética. A partir de aquí, aplicando las ecuaciones anteriores y la geometría de la pieza, obtenemos la Req de la pieza a calentar, y podemos deducir, cual es la mejor geometría y frecuencias, para producir el calentamiento.

Podemos resumir de la siguiente manera:

- Las bobinas con mayor número de espiras transfieren mas energía.
- La energía disipada, aumenta con la resistividad del material, así la energía disipada aumenta con la temperatura (dentro del margen de la temperatura de Curie), porque también aumenta la resistividad.
- La disminución de la profundidad de penetración hace aumentar la energía disipada, por eso para calentar materiales con una elevada conductividad, hay que aumentar la frecuencia con objeto de disminuir la profundidad de penetración. También podemos observar una caída brusca de la potencia disipada cuando se alcanza la temperatura de Curie, puesto que cae la permeabilidad magnética y por tanto aumenta la profundidad de penetración.

1.3 Equipos para calentamiento por inducción.

Un sistema de calentamiento por inducción consta de los siguiente elementos:

-Una fuente de alimentación que genera las corrientes de alta frecuencia.

-Un sistema de adaptación de la carga, encargado de acoplar la impedancia de la bobina a la fuente de alimentación.

-Bobina de inducción, situada alrededor del objeto a calentar y se

encarga de generar el campo magnético necesario.

-Sistema de refrigeración de la bobina. Cuando las potencias manejadas son muy altas, el calentamiento producido en el cobre por efecto Joule es considerable, produciendo una aumento en la resistividad del cobre que dificulta el funcionamiento del circuito. Por ello las bobinas se fabrican huecas de manera que se pueda hacer circular agua por el interior y así refrigerar la bobina, además hay que tener en cuenta la profundidad de penetración, antes mencionada, la cual hacer que disminuya drásticamente la superficie útil del cobre.

-Un sistema de control del proceso, que se encarga del control de la temperatura y potencia suministrada, así como del correcto acoplamiento de la carga.

P (Kw)	F(Khz)	Aplicación	Tecnología
1-200	2-20	Fusión	Tiris/trans
25-10000	0.1-10	Fusión industria	Tir/trans
5-5000	0.25-10	Forja	Trans/valvulas
5-500	2-250	Temple	Trans/válvulas
50-1000	50-500	Soldadura	Trans/válvulas
1-400	200-1000	Especiales	Trans/valvulas

2. Conceptos básicos sobre inversores resonantes paralelo.

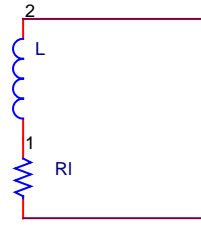
2.1 Introducción.

Como bien es sabido, la carga que presenta una bobina a nuestro generador, es inductiva, y por lo tanto resulta difícil aplicar potencia sobre ella, además por el teorema de Everitt sabemos que para producir la máxima transferencia de energía a un circuito la carga debe de esta acoplada, es decir la impedancia de salida la fuente y la impedancia que presenta la carga, debe ser complejas conjugadas, o iguales en el caso de cargas puramente resistivas. Para la realización del acoplamiento, tenemos dos posibilidades: acoplamiento paralelo, ó acoplamiento serie.

2.2 Circuito resonante paralelo.

Lo que hacemos en este caso es poner en paralelo con la bobina un condensador, tal que su frecuencia de resonancia coincida con la frecuencia de trabajo de nuestro circuito.

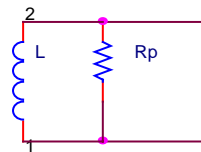
El circuito equivalente de la bobina tiene una resistencia en serie con ella que es debida a la resistencia del tubo con el que está construida, en este modelo podemos definir el Q de la bobina como:



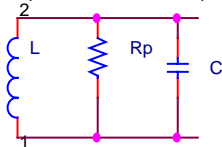
$$Q = \frac{\omega L}{Rl}$$

y que podemos convertir en un modelo paralelo con la siguiente formula:

$$R_p = RlQ^2$$



Ahora a este circuito le incluimos un condensador en paralelo con lo que obtenemos:



$$Fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Analizando el comportamiento de este circuito obtenemos:

- El circuito se comporta como resistivo puro a la frecuencia de resonancia.
- A frecuencias por debajo de la de resonancia del circuito se comporta como una bobina.
- A frecuencias superiores a la de resonancia el circuito se comporta como un condensador.
- A la frecuencia de resonancia la corriente de la bobina es Q veces la de entrada.

Por tanto como hemos visto, el circuito efectúa una amplificación de la corriente por un factor Q produciéndose las grandes corrientes que necesitamos para producir el calentamiento.

Como el Q depende la calidad de la bobina, de la ESR de los condensadores, nos interesa seleccionar estos componentes de la mayor calidad posible con objeto de aumentar el Q al máximo y por tanto la corriente de inducción.

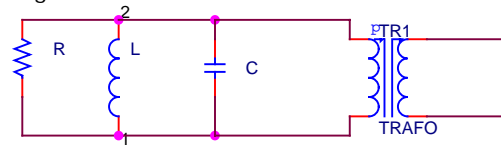
Por otro lado ya hemos visto que la Req que presenta la pieza a calentar debe ser lo más grande posible a fin de aumentar la potencia disipada, pero además, porque esta resistencia tiende a bajarnos el Q y con este la corriente.

2.3 Transformadores en circuitos resonantes paralelo.

En algunas ocasiones resulta necesario colocar un transformador en los circuitos resonantes, las razones para esto, pueden ser dos:

2.3.1 Transformadores de aislamiento.

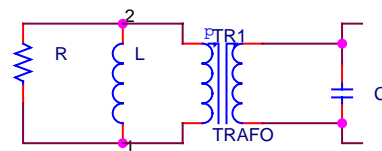
Este tipo de transformadores se colocan en paralelo con todo el circuito resonante y por tanto solo manejan potencia activa, se colocan para conseguir aislamiento galvánico y de paso si es necesario adaptar la resistencia de la carga.



2.3.2 Transformadores de adaptación.

Se coloca entre el condensador y la bobina, su misión es adaptar la impedancia de la bobina. Este transformador maneja potencia reactiva, también hay que tener en cuenta que las grandes corrientes que circulan por la bobina circulan también por el transformador.

El diseño de este tipo de transformador resulta complicado por las elevadas corrientes que manejan, Q veces la corriente de entrada y además por trabajar con potencias reactivas.



3. Caracterización de las fuentes.

El generador con el que se produce la potencia para atacar al conmutador que excita al circuito resonante, puede ser de dos tipos:

Cuando el circuito resonante que se utiliza es de tipo serie se utiliza una fuente de tensión para la excitación, hay que tener en cuenta que la carga que presenta un resonante paralelo fuera de la resonancia tiende a un circuito abierto, por lo cual deberemos excitar con una fuente de tensión.

Cuando el circuito que utilizamos es paralelo, la impedancia que presenta fuera de resonancia tiende al cortocircuito por lo cual la fuente debe ser un generador de corriente, esto aporta la ventaja de que el circuito se encuentra auto protegido contra cortocircuitos.

4. Circuito de control.

El circuito de control es el encargado de generar las tensiones de puerta para el disparo de los conmutadores, además, debe de ser capaz de mantener el circuito lo más cerca posible de la resonancia, controlar el nivel de potencia necesario y proteger la circuitería de cortocircuitos y funcionamiento sin carga.

En general son bastante parecidos a los circuitos utilizados en conmutación de inversores resonantes paralelo, con la salvedad de que además deben de controlar la frecuencia de funcionamiento.

Para controlar la frecuencia, generalmente se utiliza un medidor de fase más un VCO, capaz de realizar el seguimiento de la frecuencia, formando un PLL.

5. Consideraciones prácticas.

5.1 La bobina.

En la fabricación de la bobina hay que tener en cuenta que la potencia que se disipa en ella es bastante elevada, en un circuito típico trabajando a frecuencia de red para 5Kw tendremos que la fuente debe ser capaz de suministrar aproximadamente 16Amperios, que multiplicado por el Q de nuestro circuito se convierten en 160Amperios, y aunque pueda parecer que basta con aumentar el diámetro del tubo, las cosas no son tan simples.

En una bobina típica de 5 espiras de tubo de 6 mm de diámetro, para hacer una bobina de 60mm de diámetro y 60 mm de altura nos da una profundidad de penetración de 0.4 mm y por tanto la resistencia de pérdidas de la bobina es de 5mΩ, que con los 160 amperios son 128Wattios, potencia nada despreciable y que hay que disipar, puesto que además la resistividad del cobre aumenta con la temperatura y se incrementa la potencia.

Hay que utilizar bobinas de tubo de cobre de gran diámetro, el grueso de la pared importa poco, puesto que como hemos visto la profundidad de penetración suele ser muy baja.

5.2 Condensadores.

Las consideraciones que hemos hecho en la bobina podemos trasladarlas casi directamente a los condensadores, la corriente que circula por la bobina se genera en el condensador y esto hace que sean iguales.

El factor determinante en el caso de el condensador es su ERS, puesto que en esta se va a disipar la potencia, un buen condensador, tiene una ESR típica a la frecuencia de trabajo de 60mΩ lo cual se traduciría en 1500W , potencia excesiva que nos indica que hay que recurrir a colocar entre 10 y 20 condensadores de muy buena calidad en paralelo para poder reducir el nivel de potencia a niveles razonables, aun así con resistencias de 3 mΩ seguimos teniendo una potencia de 75W lo cual nos lleva a diseñar un sistema para refrigerar los condensadores. Existen fabricantes de condensadores específicos para estas aplicaciones, dotados de entradas para poder refrigerarlos por agua.

5.3 Conmutadores

Su selección aunque crítica es más simple puesto que tenemos un amplio surtido de transistores donde elegir. Tenemos dos elecciones posibles, transistores IGBT y MOS en cualquiera de las dos opciones tenemos suficiente surtido donde elegir, en los MOS tenemos además la posibilidad de poderlos poner en paralelo sin demasiada

dificultad, con lo cual bajamos su resistencia de conducción y la potencia disipada.

Aun así y teniendo un rendimiento típico de un 85% estaríamos hablando de disipar 750W en los transistores, por lo cual sería interesante incluirlos en el sistema de refrigeración líquida.

5.4 Transformador

Si nuestro sistema puede conseguir aislamiento galvánico mecánicamente (protección directa de la bobina), podemos mediante una adecuada selección de los valores prescindir de él, por lo cual no lo tendremos en consideración.

5.5 Refrigeración.

Tal como hemos señalado en los párrafos anteriores, si sumamos la potencia total a disipar en forma de calor tenemos aproximadamente unos 1000W lo cual nos conduce a un sistema de refrigeración en circuito cerrado, con un radiador, bomba y depósito de expansión, además de la circuitería necesaria para hacerlo funcionar.

6. Conclusiones

La mayoría de los circuitos utilizados en la actualidad para calentamiento por inducción son convertidores estáticos cuya carga es un circuito resonante paralelo. Para aplicaciones de alta frecuencia, los conmutadores más utilizados con transistores MOS. Este tipo de inversores al estar alimentados en corriente, están especialmente indicados para alimentar cargas de bajo valor óhmico, como las que presentan las aplicaciones de alta frecuencia, que generalmente presenta baja inductancia.

La frecuencia de funcionamiento depende de lo que queramos calentar, a altas frecuencias se produce un calentamiento superficial, si lo que queremos es producir un calentamiento interno, debemos trabajar a frecuencias bajas.

Si la sustancia a calentar es un metal de gran conductividad y baja permeabilidad la frecuencia necesaria para calentarlo se eleva considerablemente con el fin de conseguir una resistencia equivalente elevada.

Los rendimientos obtenidos al calentar metales como cobre, aluminio etc., caen drásticamente incluso por debajo del 35% solo en el circuito resonante. Se deben utilizar bobinas de gran número de espiras con objeto de aumentar el campo magnético producido y aprovechando el efecto transformador, que la corriente en la bobina sea menor que la corriente en la pieza a calentar, hay que tener en cuenta que las propiedades del cobre de la bobina son similares a las del elemento a calentar y si hacemos circular la misma corriente por los dos disiparemos potencia similares.

Si lo que queremos calentar son compuesto iónicos y óxidos la conducción en este tipo de

materiales es fuertemente dependientes de la temperatura y por tanto necesitamos conocer las propiedades concretas de los elementos a calentar.

References

Design method of an optimal induction heater capacitance for maximum power dissipation and minimum power loss caused by ESR. IEEE

Coil design and fabrication: basic design and modifications. Heat treating/June 1988.

Induction heating system topology review. FAIRCHILD

Physical modelling of systems involving electromagnetic heating of materials. IEEE transactions on education.

A comparison of load commutated inverter systems for induction heating and melting applications. IEEE transaction on power electronics.

Análisis y diseño de inversores resonantes para calentamiento por inducción. Tesis doctoral. UPV.

Controlling the axial temperature gradient in inductively heated Czochralski systems. Cryst. Res. Technol.

Power consumption of skull melting I y II. Cryst Res Technol.