

ESTUDIO DEL EMPLEO DE INVERSORES RESONANTES DE ALTA FRECUENCIA EN LA RECUPERACIÓN DE FUENTES DE SOLDADURA EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

**Jorge Luis Portal Gallardo*, Francisco Eneldo López Monteagudo,
Oscar Cruz Fonticiella y Mario Morera Hernández,
Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba.**

Recibido: Marzo/2005

Aceptado: Junio/2005

En este artículo se realiza un análisis pormenorizado de la evolución de las fuentes de soldadura. Una vez conocido el estado actual, se plantean las previsiones futuras que se esperan en este campo que tanta importancia tiene en la actualidad. Además, teniendo en cuenta los nuevos requerimientos de eficiencia y fiabilidad que se les exige a las fuentes de soldadura, es preciso analizar si la tecnología de fabricación de estas fuentes se encuentra tan madura como se dice o es preciso impulsarla más en algunos aspectos concretos de la misma.

Palabras clave: Inversores, fuentes inversoras, fuentes de soldaduras inversoras.

STUDY OF THE EMPLOYMENT OF HIGH FREQUENCY RESONANT INVERTERS IN THE RECOVERY OF WELDING SOURCES IN THE SUGAR INDUSTRY

In this article, it will be carried out an itemized analysis of the welding sources evolution. Once well-known the current state, it think about the future forecasts that are expected in this field that so much importance has at the present time. Besides, keeping in mind the new requirements of efficiency and reliability that are demanded to the welding sources, is necessary to analyze if the technology of production of these sources is as mature as it is said or it is necessary to impel it more in some concrete aspects of the same one.

Key words: Inverters, inverter sources, welding inverters sources.

INTRODUCCIÓN

El mercado de las fuentes de soldadura de mayor eficiencia, contempla la calidad de onda y el ahorro energético como respuesta a la utilización más racional y eficiente de los

recursos naturales. En las fuentes de soldadura inversoras se reduce el peso y se eleva la eficiencia en el proceso de conversión de energía contribuyendo a eliminar los defectos en las uniones soldadas, según American Welding Society.¹

Para mejorar la calidad de la forma de onda de salida tradicionalmente se han empleado métodos de modulación del ancho del pulso (PWM), los cuales demandan una alta frecuencia de conmutación de los elementos de potencia, esto hace que las pérdidas de activación y desactivación representen un % significativo de las pérdidas totales, según Herranz.² En estos inversores no se puede incrementar esta frecuencia por encima de cierto valor, mientras que con las técnicas resonantes se puede lograr una conmutación a corriente o voltaje cero.

Los inversores resonantes de alta frecuencia, y especialmente aquellos cuya fuente primaria de alimentación corresponde a una fuente de tensión, generan, según Muhammad,⁴ una onda de tensión cuadrada o cuasi-cuadrada de alta frecuencia, que posteriormente es filtrada por medio de un circuito tanque resonante para obtener una onda de alta frecuencia con bajo contenido en armónicos. Existen distintas configuraciones que permiten conmutar a corriente o tensión cero, mediante un circuito resonante LC, según Rodríguez,⁵ operando a frecuencias por encima de 20 kHz.

DESARROLLO

Fuentes de soldadura inversoras con estrategia de conmutación resonante

En las fuentes de soldadura los sistemas tradicionales emplean un transformador de baja frecuencia seguido de un puente de tiristores y una bobina de valor elevado para disminuir el rizado de la corriente del arco. El empleo de un inversor resonante permite tanto reducir el tamaño y el peso del equipo como aumentar su eficiencia. En estos equipos se obtienen eficiencias del orden del 90 %, según Malesani *et al.*³

Las fuentes inversoras se caracterizan básicamente por la calidad de su onda de salida. En este sentido se definen los parámetros siguientes:

Distorsión del armónico n:
$$D_n = \frac{V_n}{V_1}$$

Donde:

V_n y V_1 representan el valor eficaz del armónico de orden n y el valor de la onda fundamental, respectivamente.

Distorsión armónica total:

$$THD (\%) = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2 + \dots}}{V_1} \cdot 100$$

En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques de un inversor resonante, formado por cinco etapas fundamentales: Fuente primaria de corriente continua, Inversor estático de alta frecuencia, Circuito resonante, Transformador de alta frecuencia, Circuito de gobierno y control.

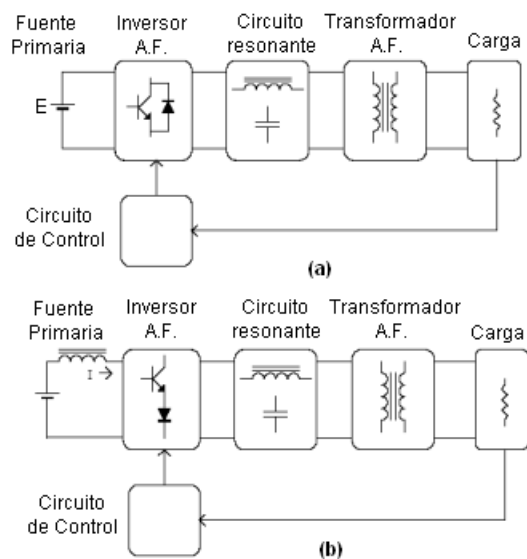


Figura 1. Diagrama de bloques de un inversor resonante: (a) Alimentado en tensión y (b) alimentado en corriente.

Los interruptores empleados deben ser bidireccionales en corriente, en el caso de inversores alimentados en tensión, y unidireccionales en corriente, en el caso de inversores alimentados en corriente (figura 1). Estos interruptores manejan la corriente ó tensión de entrada del circuito tanque, por lo que estas formas de onda serán un parámetro fundamental a la hora de calcular las pérdidas en los mismos.

El objetivo del circuito tanque resonante es filtrar la onda de salida del inversor de forma que las ondas de tensión y corriente en la carga sean prácticamente senoidales. El circuito tanque debe suministrar la corriente y tensión necesarias para la carga en régimen permanente, manejando la $I_{\text{mínima}}$ de entrada posible para así disminuir las pérdidas en los interruptores.

En ocasiones puede ser necesario el empleo de un transformador de salida por alguna de las razones siguientes:

- Disponer de aislamiento galvánico entre la entrada y la salida y evitar el peligro de descargas eléctricas a personas. Este es el caso típico de los inversores empleados en equipos de soldadura eléctrica.
- La tensión de entrada puede ser demasiado baja o demasiado alta, y es necesario elevarla o reducirla, respectivamente, para alimentar la carga en régimen permanente.

El circuito de gobierno y control realiza diversas funciones, entre las que cabe destacar las siguientes: Generación de las señales de disparo de los interruptores controlados y adaptación al terminal de control de los mismos, Regulación de alguna de las variables de control de la carga (tensión, corriente, potencia, etc.) e Implementación de protecciones (fallas en la carga, sobretensión, sobrecorriente, etc.)

Conmutación resonante serie

La característica fundamental de un circuito resonante serie formado por una bobina (L) y por un condensador (C), es permitir que tanto la tensión como la intensidad que circula por estos dispositivos adopte una evolución oscilante a lo largo del tiempo. Transcurrido el primer semiciclo, la corriente se invierte. En la figura 2, el circuito LC se conecta en serie con un transistor y una carga de valor $R_o \ll 2(L/C)^{1/2}$.

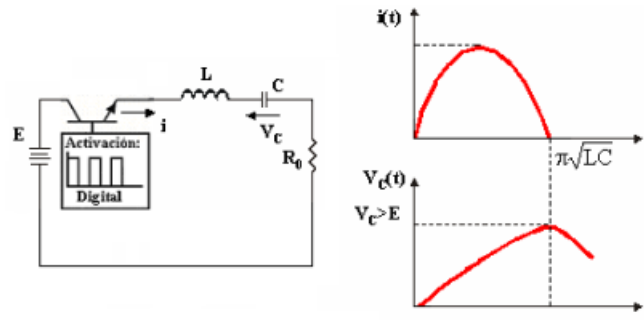


Figura 2. Circuito de conmutación forzada resonante serie

La intensidad que circula por el circuito es la misma que fluye a través de la red LC. Ésta oscilará sinusoidalmente hasta llegar a anularse. Este paso por cero, que se producirá al final del primer semiperiodo de la señal resonante, indica que en ese momento se estará en las condiciones idóneas para provocar la conmutación del transistor.

El modo de operación de este circuito es el que se describe a continuación. Cuando el transistor entre en conducción, la ecuación que define el comportamiento del circuito será:

$$E = R_o i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + V_c(t=0)$$

Resolviendo para:

$$\epsilon = \frac{R_o}{2L} \quad w_r = \sqrt{w^2 - \epsilon^2} \quad w = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Se obtiene que:

$$0 = A_2 e^{-\epsilon T_{ON}} \text{sen } w_r T_{ON} \Rightarrow T_{ON} = \frac{\pi}{w_r}$$

El proceso de conmutación por circuito resonante paralelo ayuda a minimizar las variaciones de intensidad asociadas al circuito de conmutación resonante serie. El circuito representado en la figura 3 presenta el mismo inconveniente que el circuito de conmutación por circuito resonante

serie (Ton es fijo), la única forma de controlar la tensión de salida es variando el instante de disparo.

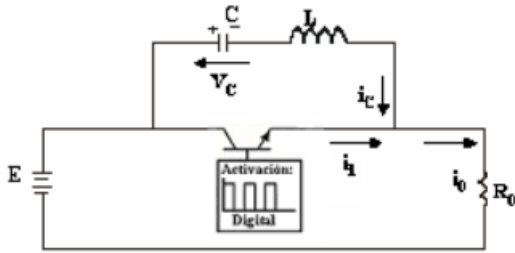


Figura 3. Circuito de conmutación resonante paralelo

El valor para Ton responde a la ecuación siguiente:

$$T_{on} = \sqrt{LC} \cdot \left(\pi + \arcsen \frac{\sqrt{L}}{R_0} \sqrt{C} \right)$$

Otro inconveniente es la considerable intensidad que circula por el semiconductor, la cual es superior al valor de intensidad que circula a través de la carga.

Convertidores quasi-resonantes y multi-resonantes

Los convertidores quasi-resonantes y multi-resonantes son configuraciones convencionales PWM en las que circuitos resonantes asociados a los conmutadores permiten conmutaciones a tensión o corriente cero. Las configuraciones básicas de los convertidores quasi-resonantes son:

- Conmutación a corriente cero (ZCS): la conmutación se realiza a corriente cero. El pico de corriente en la resonancia fluye a través del conmutador, pero la tensión en el bloqueo permanece en el mismo valor que en la configuración PWM equivalente.
- Conmutación a tensión cero (ZVS): la conmutación se realiza a tensión cero. El elemento conmutador debe soportar la tensión de pico de la resonancia en el bloqueo, pero la corriente máxima que atraviesa el conmutador en la conducción es la misma que en la

configuración PWM equivalente.

- Conmutación a tensión cero con limitación de tensión (ZVS-CV): es un caso derivado del anterior que permite la conmutación a tensión cero. Consiste en un convertidor con al menos dos conmutadores. La tensión se mantiene al mismo nivel que en la configuración PWM equivalente, pero la corriente es normalmente mayor.

Los convertidores multi-resonantes trabajan a frecuencias más elevadas que los quasi-resonantes, con condiciones de conmutación favorables para todos los elementos semiconductores.

Inversor puente completo

La configuración del inversor puente completo se muestra en la figura 4. El inversor consiste en dos brazos formados por los transistores: Q1, Q2 y Q3, Q4; los transistores trabajan en conducción o saturación, las parejas de transistores de cada brazo se encienden (ON) y apagan (OFF) simultáneamente. También, los pares se conmutan de tal manera que cuando uno de ellos está en ON, el otro está en OFF. En la figura también están incluidos los diodos de protección antiparalelos (D1, D2, D3, D4) conectados a los transistores. El uso de estos diodos es muy recomendado puesto que ellos proporcionan un camino a la corriente inversa.

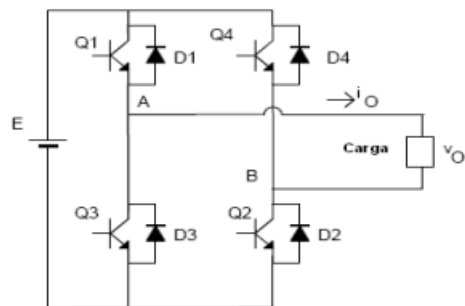


Figura 4. Circuito inversor puente completo

En las fuentes de soldadura la corriente inversa no está presente por ser el arco una carga puramente resistiva. El arco apenas se resiste al flujo de corriente y tiene componentes reactivas bajas. En el proceso de soldadura hay que tomar en consideración la componente inductiva

introducida por los conductores que conectan el inversor al electrodo y a la pieza de trabajo (la inductancia es proporcional a la longitud del cable). Así, un inductor en serie con el arco forma un modelo más exacto de la carga, como se muestra en la figura 5. Cuando la corriente “IL” fluye a través de la carga, la energía es

almacenada en la inductancia dispersa de los alambres. Cuando el inversor conmuta, la corriente “IL” cambia la dirección, pero la inductancia rechaza este cambio súbito e impulsa la corriente inversa. Si los diodos de protección no estuvieran presentes, esta corriente causaría operación indeseable de los transistores.

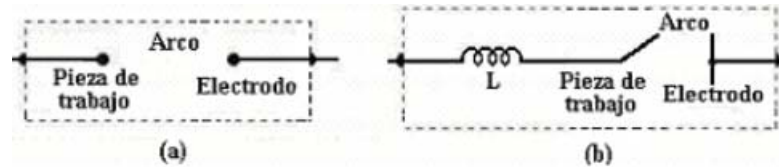


Figura 5: Modelos de la carga en fuentes de soldadura

Para reducir la corriente inversa y los efectos adversos de la conducción, la mayoría de los diseñadores usan la aproximación de “conformación” de la forma de onda de la corriente a través de un control apropiado del inversor primario. Consiste en reducir la magnitud de la corriente de carga a pocos amperes antes del cambio de su polaridad (conmutando los transistores). En este caso, recortes relativamente pequeños evitan picos de voltaje inseguros durante los intervalos en que todos los transistores se mantienen apagados. La corriente conformada permite construir perfiles de corriente muy exactos para perfeccionar el proceso de soldadura.

CONCLUSIONES

1. Debido a la mayor frecuencia de conmutación del transistor, el menor rizado de la corriente de salida y la mayor velocidad de respuesta, las fuentes transistorizadas son una mejor opción para influir en el proceso de soldadura.
2. En las fuentes de soldadura inversoras se deben colocar diodos en antiparalelos para la protección de los transistores ya que está presente el efecto inductivo asociado a los cables de soldadura.
3. La conformación de la forma de onda de la corriente ayuda a reducir el sobrevoltaje y reduce las pérdidas de conmutación, mejorando la operación de las fuentes de soldadura inversoras.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Welding Society: *Welding Handbook*, Eighth Edition, Volumen 2, 1991.
2. Herranz, A.: *Electrónica Industrial componentes circuitos y sistemas de potencia*, Editorial ETSI, Madrid, España, 1994.
3. Malesani, L. *et al.*: “Electronic welder with high-frequency resonant inverter”, IEEE IAS’93 conf. proc., pp. 1073-1080, 1993.
4. Muhammad, H.: *Electrónica de potencia. Circuitos dispositivos y aplicaciones*, Editorial Prentice Hall, México, 2004.