

# Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica  
Enero/Junio 1996 VOLUMEN 6 N° 1



# INGENIERIA

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica  
Volumen 6, Enero/Junio 1996 Número 1

## DIRECTOR

Rodolfo Herrera J.

## CONSEJO EDITORIAL

Víctor Hugo Chacón P.

Ismael Mazón G.

Domingo Riggioni C.

## CORRESPONDENCIA Y SUSCRIPCIONES

Editorial de la Universidad de Costa Rica  
Apartado Postal 75  
2060 Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
San José, Costa Rica

## CANJES

Universidad de Costa Rica  
Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información  
Unidad de Selección y Adquisiciones-CANJE  
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
San José, Costa Rica

### Suscripción anual:

Costa Rica: ₡ 1 000,00

Otros países: US \$ 25,00

### Número suelto:

Costa Rica: ₡ 750,00

Otros países: \$ 15,00



Edición aprobada por la Comisión Editorial de la Universidad de Costa Rica  
© 1998 EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
Todos los derechos reservados conforme a la ley  
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
San José, Costa Rica.

INGENIERIA

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica  
Volumen 1, Número 1, Enero-Junio 1991

Revisión Filológica: *Lorena Rodríguez*

Diseño Gráfico, Diagramación y Control de Calidad:  
*Unidad de Diseño Gráfico de Revistas*  
Oficina de Publicaciones

DIRECTOR

Rodolfo Herrera J.

CONSEJO EDITORIAL

Víctor Hugo Chacón P.  
Ismael Mazón G.  
Domingo Riggioni C.

*Impreso en la Oficina de Publicaciones  
de la Universidad de Costa Rica*

CORRESPONDENCIA Y SUSCRIPCIONES

Editorial de la Universidad de Costa Rica  
Apartado Postal 75  
2000 Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
San José, Costa Rica

CARLES

Revista  
620.005  
I-46i Ingeniería / Universidad de Costa Rica. —  
Vol. I, no. 1 (ene./jun. 1991). — San José, C. R. : Editorial  
de la Universidad de Costa Rica, 1991. — (Oficina de Publicaciones  
de la Universidad de Costa Rica)  
v. : il  
Semestral.  
1. Ingeniería - Publicaciones periódicas.

CCC/BUCR—250



## FUNDAMENTOS DE TRANSFORMADORES MATRICIALES

Emilio Alpízar Villegas

### SUMMARY

This article describes the matrix transformer, used in switched mode power supplies, and its fundamental characteristics. It is also given its operation and fabrication principle.

### RESUMEN

En este artículo, se describe el transformador matricial utilizado en fuentes conmutadas, así como sus características fundamentales, su principio de operación y su construcción.

### 1. INTRODUCCION

Las características de operación del transformador en una fuente conmutada dependen de la topología del circuito de dicha fuente. Por ejemplo, el transformador en el convertidor tipo *buck*, o en el tipo *boost*, no requiere almacenar energía, pues el inductor del filtro cumple como almacenador. Sin embargo, en la topología *flyback*, el transformador debe transferir y almacenar energía al mismo tiempo. Además de estas características, se requiere una baja reactancia de dispersión y seguir las tendencias de miniaturización actuales que exigen un volumen pequeño para todos los componentes de la fuente conmutada.

El transformador matricial ha sido ideado para resolver algunos de los inconvenientes del transformador convencional, cuando se utiliza en las fuentes conmutadas. En los transformadores convencionales la alta reactancia de dispersión, el gran volumen ocupado y la alta temperatura que se concentra en un solo punto del núcleo [4,5] son problemas inherentes a su diseño y construcción. Si, además, se requiere utilizar relaciones de transformación fraccionarias, la reactancia de fuga se incrementará. Otro inconveniente que dificulta la

producción en serie del transformador convencional es cuando se requiere usar números fraccionarios de vueltas por bobina. Al usar un secundario de una vuelta, por ejemplo, para una salida de 5 voltios, no se obtienen relaciones de transformación precisas para otros voltajes que no sean 5 V, aunque sí permite la relativa ventaja de que en el primario se tenga un número mínimo de vueltas. Un problema surge cuando la densidad de flujo en estos transformadores debe bajarse, normalmente, con el propósito de reducir las pérdidas en el núcleo para altas frecuencias. Hay que tomar en cuenta que para una determinada potencia de salida, la ventana para acomodar las bobinas debe ser suficientemente grande para dar cabida un gran número de conductores que deben ser de calibre suficiente para reducir pérdidas. Todas estas características de los transformadores convencionales hacen difícil su aplicación cuando se trata de reducir el tamaño de los dispositivos en que se aplican y, especialmente, para el caso de las fuentes conmutadas.

Los inconvenientes apuntados hacen necesaria la búsqueda de otras soluciones. Tomando en cuenta lo anterior, el transformador matricial se puede considerar como un paso significativo

en la solución de muchos de los problemas cuando se utilizan en fuentes conmutadas con modulación de ancho de pulso (PWM). Su aplicación incrementa drásticamente la densidad de potencia y la eficiencia de estas fuentes hasta hacerlas competitivas, incluso, con las fuentes resonantes, que han sido desarrolladas, en principio, para resolver algunos de los problemas mencionados aquí.

### EL TRANSFORMADOR MATRICIAL Y SUS FUNDAMENTOS TEORICOS

Existen dos tipos fundamentales de transformadores matriciales, a saber, los compuestos por elementos discretos y aquellos en los que el núcleo es uno solo, de geometría tal, que permite la existencia de micronúcleos bien enlazados magnéticamente para formar la matriz respectiva. Se habla de matriz, debido a que la configuración y arreglo de los componentes semeja una matriz con sus columnas y filas. También se les puede dar otras formas (de marco entre otras) pero el resultado obtenido es el de la combinación de las relaciones individuales de los elementos de la matriz.

#### Descripción del transformador matricial

El transformador matricial consiste en un arreglo de dos o más núcleos magnéticos bobinados e interconectados entre sí que se comportan como una sola estructura magnética. Cada uno de estos elementos es, en sí mismo, un transformador convencional. En la Figura N° 1, se muestra uno de estos elementos en una relación de transformación uno a uno. Obsérvese que se tiene un número mínimo de vueltas en el primario (una) y también una vuelta en el secundario. Usando varios de estos elementos e interconectándolos apropiadamente, se pueden obtener diferentes relaciones de transformación y características para la matriz resultante.

Como ya se dijo existen, fundamentalmente, dos tipos de transformadores matriciales. Uno formado por núcleos individuales (de forma toroidal

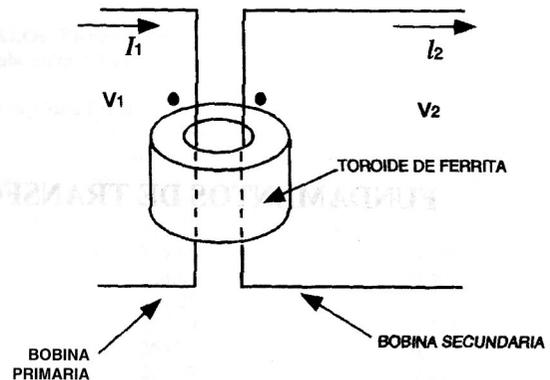


Fig. 1. Elemento simple de relación 1:1.

generalmente) y el otro que consiste en un núcleo integrado de material magnético (i.e una barra de ferrita con perforaciones) en el que no se distinguen, físicamente, sus elementos.

#### Matriz de núcleos individuales

En los arreglos con núcleos individuales, cada elemento está formado por un pequeño núcleo, usualmente uno más toroides, en los cuales se devanan dos juegos, de una o más vueltas de alambre, que corresponden, respectivamente, al primario y al secundario.

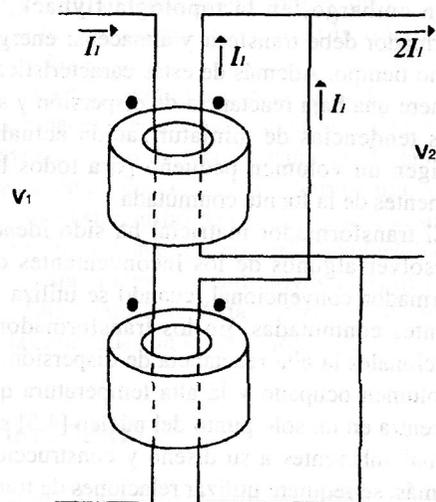


Fig. 2. Matriz de dos elementos. Relación 2:1.

En la Figura N° 2, se muestra un arreglo de dos elementos con una relación de transformación de 2:1, pero no se muestran las interconexiones. Cada elemento podría ser muy simple o tan complejo como otro transformador matricial. Todos los elementos se interconectan para obtener una relación total de transformación que depende de la relación individual y de la forma como son interconectados (en serie, en paralelo o en cualquier combinación serie paralelo). Por ejemplo, en la Figura N° 2, la relación total es de 2:1 porque los dos elementos (de relación 1:1) tienen sus primarios en serie y sus secundarios en paralelo.

Al observar esta figura, se pueden hacer anotaciones que parecen obvias pero que ayudarán a comprender el funcionamiento de este transformador:

1. La bobina primaria (de una sola espira) pasa a través de los dos elementos formando una serie. La corriente primaria es entonces, la misma en los dos elementos.
2. El secundario cuenta con dos alambres en paralelo, por lo que el voltaje en los dos elementos es el mismo.
3. Por la ley de Faraday, el voltaje por vuelta es el mismo para todas las bobinas acopladas por el flujo en el núcleo. Esto implica que la caída de tensión es la misma para el primario y para el secundario (se desprecia la caída debida a las inductancias propias de cada bobina). Al tenerse dos elementos, el voltaje primario es igual al doble del voltaje secundario, o sea:

$$V_p = 2V_s$$

4. Si se desprecia la corriente de magnetización, por Lenz, la cantidad de ampere-espiras neta en cualquier transformador es cero. Esto implica que la corriente del primario y la de cada secundario son iguales. Al tenerse dos bobinas secundarias, la corriente de salida en el secundario es el doble de la corriente en el primario, esto es:

$$I_s = 2I_p$$

Cualquiera de las dos relaciones anteriores determina que la relación de transformación en el transformador de la Figura N° 2 es de 2:1. No obstante la simplicidad mencionada del transformador

matricial, hay ciertas condiciones que deben cumplirse para que un arreglo de elementos sea un transformador matricial válido:

1. En cada elemento, la suma de los amperios-vuelta debe ser cero.
2. En cada elemento, la tensión por vuelta deben ser igual en todas las bobinas.
3. La corriente debe ser igual en todas las partes de cada circuito serie.
4. El voltaje a través de cualquier circuito en paralelo debe ser el mismo.

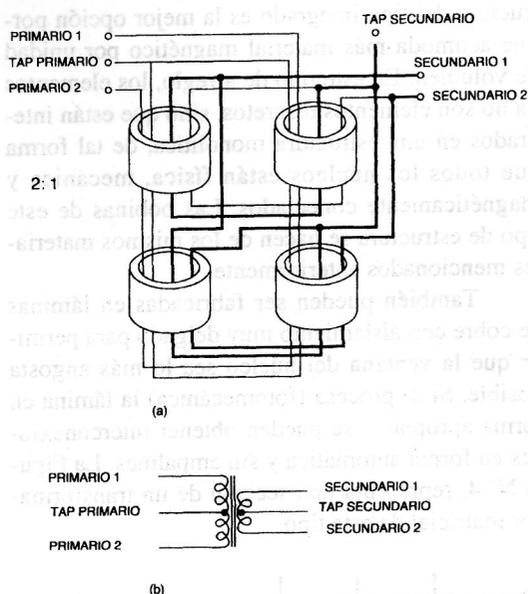


Fig. 3. Transformador con derivaciones: (a) Matriz 2x2 con relación 2:1, (b) Representación esquemática.

Físicamente, las bobinas y las interconexiones se construyen de alambre magnético convencional (sección circular o cuadrada), Litz o lámina de cobre con aislamiento. Debido a la gran variedad de posibilidades de interconexión, este tipo de transformador permite diferentes opciones de transformación, incluyendo relaciones fraccionales y derivaciones tanto en el primario como en el secundario (Ver Figura #3).

La altura de la estructura resultante en este tipo de arreglos, estará limitada por la altura de los componentes individuales. Si se tuviera una

restricción de altura, podrían utilizarse varios toroides de menor tamaño, lo que aumentaría las longitudes en las interconexiones y, a mayor longitud de estas, se tendrían mayores pérdidas. Esto significa que estas estructuras también tienen algunas limitaciones en cuanto a altura y a pérdidas se refiere.

### Matriz con núcleos integrados

Este tipo de transformador se utiliza para obviar los problemas de alto perfil que podrían provocar los arreglos de elementos individuales. Si la altura es una restricción importante, una estructura del tipo integrado es la mejor opción porque acomoda más material magnético por unidad de volumen. En este tipo de arreglo, los elementos ya no son elementos discretos, sino que están integrados en una estructura monolítica, de tal forma que todos los núcleos están física, mecánica y magnéticamente conectados. Las bobinas de este tipo de estructura se hacen de los mismos materiales mencionados anteriormente.

También pueden ser fabricadas en láminas de cobre con aislamiento muy delgado para permitir que la ventana del núcleo sea lo más angosta posible. Si se procesa (fotomecánica) la lámina en forma apropiada, se pueden obtener interconexiones en forma automática y sin empalmes. La Figura N° 4, representa una sección de un transformador matricial de este tipo.

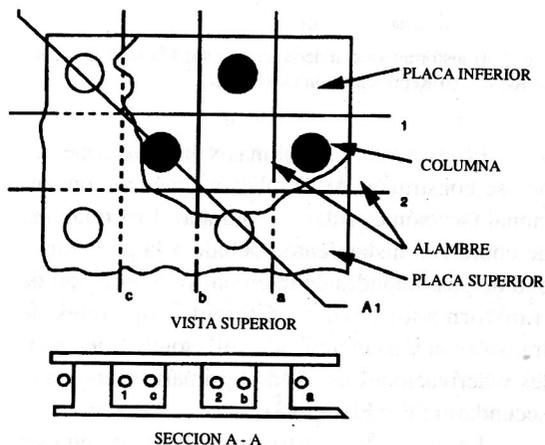


Fig. 4. Transformador Matricial de Núcleos Integrados.

La altura total de una estructura de este tipo no puede reducirse por debajo de un determinado nivel porque se requiere mantener buenas propiedades mecánicas que son determinadas por la fragilidad de la ferrita usada en el núcleo. Esta aparente desventaja no es un problema. La altura de la ventana, generalmente, produce un mínimo tal que las dimensiones de las columnas y de las placas pueden tener un espesor suficiente. Por otro lado, este tipo de estructura produce un mejor aislamiento a la interferencia de radiofrecuencia, da más estabilidad mecánica y provee un perfil muy bajo.

### Algunas aplicaciones

Los transformadores matriciales son aplicables a todas las topologías de convertidores de potencia conocidas. La configuración de la Figura N° 2 es apropiada para usarse en un convertidor buck-derivado o en un flyback. Para el caso del flyback se deben usar toroides de permeabilidad controlada (powder toroids) en lugar de los de ferrita de alta permeabilidad. Para una topología push-pull se puede aplicar la configuración de la Figura N° 3. Los detalles de diseño y aplicación de transformadores se pueden encontrar en las referencias [3,4].

### CONCLUSIONES

Con la tecnología matricial para el diseño y construcción de transformadores, se hace posible tener un primario de una sola vuelta. Como la inductancia de fuga de un transformador es proporcional al número de vueltas al cuadrado, un transformador con una sola vuelta en el primario, naturalmente tendrá una mucho menor inductancia de fuga que su similar de construcción convencional.

Las dimensiones de las fuentes conmutadas pueden ser reducidas drásticamente con el uso de los transformadores matriciales, por cuanto estos son aptos para operar a altas frecuencias y tienen perfiles adecuados para reducir el volumen total ocupado.

**BIBLIOGRAFIA**

1. E. Alpizar, K.D.T. Ngo, and J.K. Watson, "Development and Characterization of a Low-Profile Matrix Transformer", *High Frequency Power Conversion Conference*, Santa Clara, CA, pp.174-183, May 1990.
2. E. Herbert, "Flat Matrix Transformers, U.S. Patent #4,655,357.
3. Edward Herbert, K.Kit Sum, Design and Application of Matrix Transformers and Inductors. *Fourth International High Frequency Power Conversion Conference*, Naples FL, May 15-18, 1989.
4. G.C. Chryssis, *High-Frequency Switching Power Supplies Theory and Design*, 2ed, Mc Graw-Hill Inc., New York, 1989.
5. C. Wm. T. McLyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, Marcel Dekker Inc., New York, 1988.