

El choque en modo común y las EMI

Artículo cedido por Cemdal



www.cemdal.com



Autor: Francesc Daura Luna, Ingeniero Industrial. Director de la Consultoría CEMDAL, Representante de Austria Mikro Systeme (ams AG) para España y Portugal. www.cemdal.com fdaura@cemdal.com

Un problema frecuente de compatibilidad electromagnética (CEM) es tener excesivas corrientes en modo común en los conductores. Estos problemas pueden surgir a nivel de tarjeta de circuito impreso, a nivel de cableado interno y externo del equipo o a nivel de la instalación de un sistema en general. Las interferencias electromagnéticas (EMI) en modo común son debidas muchas veces a razones poco evidentes como la masa ruidosa del circuito, los acoplamientos por capacidades parásitas, la falta de desacoplo suficiente en la alimentación, o a desequilibrios en los caminos de las señales diferenciales en las fuentes de alimentación conmutadas, etc. Se trata pues de circuitos parásitos que no son evidentes, al no quedar reflejados en los esquemas. Pero debemos tener en cuenta que siempre existen en mayor o menor medida.

Una de las técnicas más efectivas para controlar las corrientes en modo común es el uso de choques en modo común (CMC). En el mundo de la radio, a este componente también se le llama BALUN ("BALANCED-UNbalanced transformer").

Una ventaja de los CMC es que presentan una alta impedancia en serie a las corrientes de interferencia en modo común en el circuito y esta impedancia no afecta a la señal funcional diferencial. La figura 1 muestra el sentido de las corrientes en modo



Figura 2. Choques en modo común: trifásico y monofásico con bobinados separados.

diferencial (MD) y en modo común (MC) en un CMC. En un CMC, las señales deseadas en MD pasan sin ser atenuadas al no tener apenas impedancia en MD, mientras que las EMI en MC quedan atenuadas al presentar una alta impedancia en MC.

Para obtener una alta efectividad del CMC es necesario tener alta permeabilidad en un núcleo. Los valores típicos de permeabilidad relativa del núcleo son del orden de 2000 para aplicaciones de baja frecuencia y de

100 a 200 para aplicaciones de alta frecuencia. Esta alta permeabilidad resulta en una alta inductancia. Es posible obtener valores de atenuación de 80 a 100 dB más allá de la frecuencia de corte del choque.

La principal ventaja del CMC es su capacidad para atenuar las altas frecuencias, sin afectar prácticamente a las señales en modo diferencial. Además de su uso en filtros monofásicos también se pueden usar en filtros trifásicos con tres devanados en el

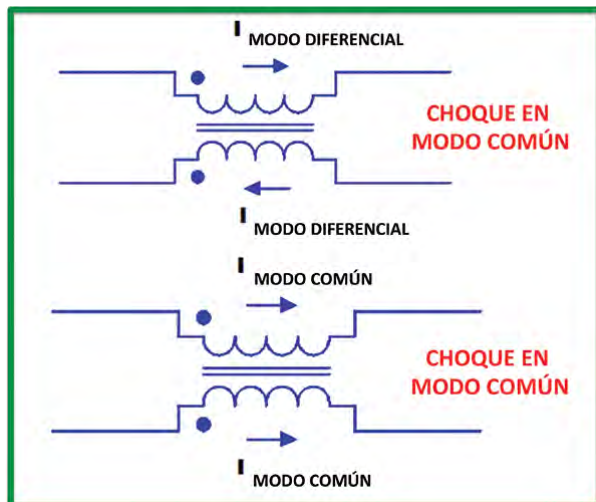


Figura 1. Corrientes en modo diferencial y en modo común en un choque en modo común.

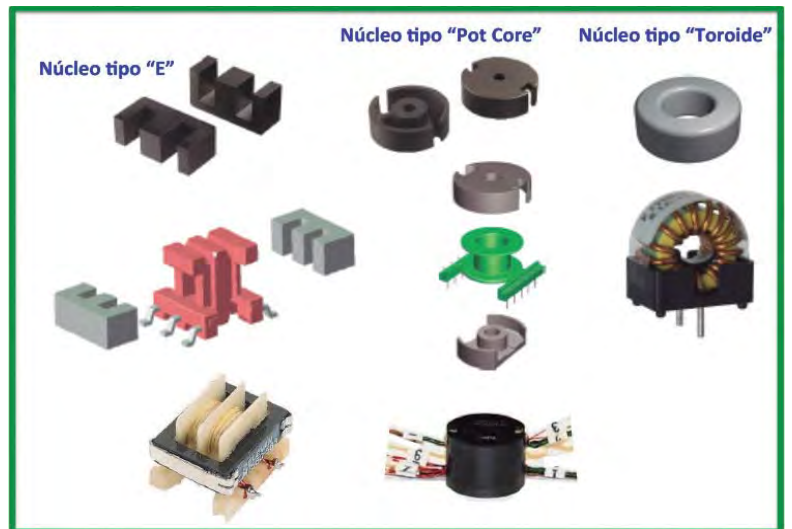


Figura 3. Varios tipos de núcleos y sus montajes correspondientes.

CARACTERÍSTICA	NÚCLEO "POT"	NÚCLEO "E"	TOROIDAL
COSTE DEL NÚCLEO	ALTO	BAJO	MUY BAJO
COSTE DE LA BOBINA	BAJO	BAJO	ALTO
FLEXIBILIDAD DEL BOBINADO	BUENA	EXCELENTE	ACEPTABLE
DISIPACIÓN DE CALOR	BAJA	EXCELENTE	BUENA
NIVEL DE APANTALLADO	EXCELENTE	BAJO	BUENO

Figura 4. Características de los núcleos más comunes.

mismo núcleo (figura 2). Estos dos choques tienen bobinados separados. Otra ventaja del CMC es su capacidad de dejar pasar la corriente continua sin tener el riesgo de tener saturación, gracias a la cancelación del flujo de corriente inducido en modo diferencial.

Esto no sucede en los transformadores de aislamiento. En los CMC también tiene importancia el modo diferencial debido a las imperfecciones en la simetría de los devanados.

Usualmente, los tipos de núcleo más usados en la realización de CMC son los núcleos toroidales, núcleos de tipo "E" y los núcleos tipo "pot core". La figura 3 muestra estos núcleos y su montaje.

La figura 4 muestra una tabla comparativa de las características principales de estos tres tipos de núcleo más usados. Las ferritas proporcionan alta permeabilidad hasta una frecuencia de corte en el entorno de los kHz a los MHz. Por encima de la frecuencia de corte el efecto de atenuación es fuertemente reforzado por la pérdida magnética. El diseñador del filtro tiene que lidiar con grandes tolerancias de los materiales de hasta un 25%.

Igual que ocurre en los transformadores de aislamiento, la capacidad parásita limita las prestaciones a alta frecuencia. Los CMC también pueden ser susceptibles a las interferencias debido a campos magnéticos externos, aunque en menor medida en comparación a transformador de aislamiento.

La capacidad parásita

Todo CMC tiene unos elementos parásitos cuyo circuito equivalente se presenta en la figura 5. En serie con cada bobina tenemos una resistencia en serie parásita que es muy baja ($R_1 = R_2 = R$) y entre la entrada y la salida del CMC existe una capacidad parásita C. La impedancia de carga Z_{MC} es la impedancia en MC del cable y la tensión V_{MC} es la tensión de EMI en el cable.

En este circuito equivalente, Z_{MC} no es la impedancia en MD. Se trata de la impedancia del cable actuando como una antena y puede variar entre 35 y 350 Ω . La capacidad parásita C es la suma de capacidades parásitas entre espiras en las bobinas y entre los terminales de entrada y salida del CMC. Esta capacidad parásita es inherente a su construcción.

Para no aumentar su valor, no conviene "acercar" las islas de conexión de la entrada y la salida. Para ello no conviene trazar estas islas demasiado grandes, para mantener su distancia entre la entrada y la salida del CMC lo más grande que sea posible. Conviene considerar el valor de esta capacidad parásita cuando el choque se usa a altas frecuencias (> 10 MHz).

Las pérdidas de inserción del choque se definen como el ratio de la corriente en MC sin el choque con respecto la corriente en MC con el choque. En la misma figura 5 se presenta la ecuación de sus pérdidas de inserción.

Las pérdidas de inserción por encima de los 70 MHz no varían mucho con el valor la impedancia del choque. Sin embargo, varían considerablemente en función del valor de la capacidad parásita. Es difícil obtener pérdidas de inserción de más de 12 dB a frecuencias por encima de los 30 MHz.

Los choques en MC en los filtros de red

Un aspecto importante en el diseño de los filtros para la reducción de las EMI es la determinación de las pérdidas de inserción necesarias en el rango de frecuencias por debajo de las frecuencias de las EMI. Se debe tener en cuenta para la determinación de la inductancia nominal de un CMC la temperatura de funcionamiento deseada y su influencia en la permeabilidad relativa inicial.

La inductancia de fuga también debe ser tenida en cuenta con el fin de evitar la saturación y para la atenuación de la interferencia en modo diferencial.

El diseño de un filtro de red se realiza siempre en secciones en modo común (MC) y secciones en modo diferencial (MD). Una parte vital del filtro en modo común es el CMC (se deben añadir los condensadores "Y" a tierra).

Su gran ventaja, en comparación con las inductancias en MD es que se pueden tener valores muy altos de inductancia en un pequeño núcleo magnético.

Una de las principales consideraciones de diseño en un CMC es su inductancia de fuga, es decir, su inductancia en MD. El método práctico del cálculo de la inductancia de fuga es asumir que es un 2% de la inductancia en MC. Las medidas reales muestran que la inductancia de fuga puede variar entre 0,5% y 4% de la inductancia en MC. Este considerable margen de error puede ser significativo cuando se desea realizar un diseño óptimo de un choque en modo común.

Los filtros están diseñados con secciones en MC y en MD preferible-

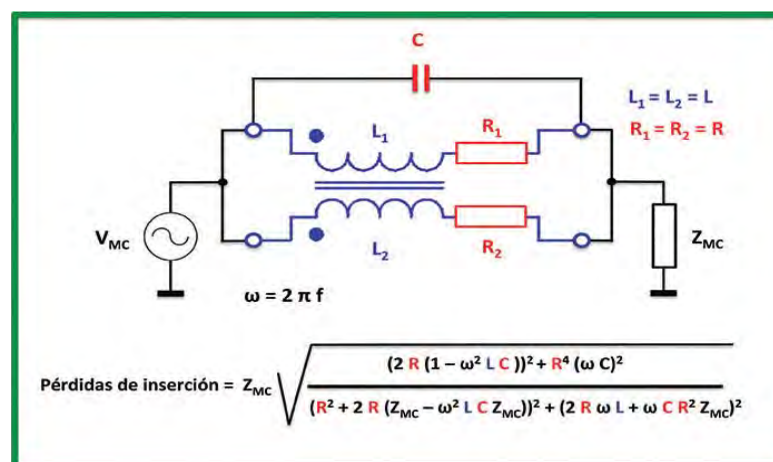


Figura 5. Circuito equivalente de un choque en modo común con sus resistencias R_1 y R_2 y capacidad C parásitas y la ecuación de sus pérdidas de inserción.

mente independientes. Sin embargo, las secciones no son verdaderamente independientes debido a que el CMC puede tener una significativa inductancia en MD. Esta inductancia en MD puede modelarse como un inductancia discreta en MD.

Para aprovechar las ventajas de la inductancia en MD en el diseño del filtro, las dos secciones no deben diseñarse de forma simultánea. Es mejor diseñarlas de forma secuencial.

En primer lugar conviene diseñar el filtro en MC y luego debe ser medido mediante el uso de una red separadora del modo diferencial y del modo común (DMRN). Con ella se puede medir separadamente el ruido en MC y en MD.

Cuando un filtro en MC se diseña para limitar el ruido en MD, se debe medir igualmente el ruido sumado en MC y en MD. Dado que la componente de EMI en MC debe estar por debajo de los límites, las emisiones que están por encima de los límites son en MD, atenuadas por la inductancia de fuga en MD del filtro en MC. En las fuentes de alimentación de baja potencia, la inductancia en MD en el CMC puede ser suficiente para solucionar los problemas de las emisiones en MD, porque éstas tienen una baja impedancia en su generador, por lo que incluso pequeñas cantidades de inductancia son suficientemente eficaces. Tener solo una poca inductancia en MD puede ser muy útil, pero tener demasiada inductancia en MD puede provocar la saturación del núcleo.

Importancia de la inductancia de fuga

¿Qué causa la inductancia de fuga en un CMC? Un núcleo toroidal con un devanado estrechamente enrollado sobre su circunferencia contiene todo el flujo magnético dentro del "núcleo" de su estructura, incluso si el núcleo fuera aire.

Si, por otro lado, la bobina no se enrolla sobre su completa circunferencia o si no se enrolla cerca del núcleo, entonces el flujo magnético puede salir del núcleo.

Este efecto es proporcional al tamaño relativo de la separación abierta que queda en el bobinado y a la permeabilidad magnética del material del núcleo.

Un CMC tiene los dos devanados dispuestos de manera que las corrientes circulantes por el núcleo en direcciones opuestas provocan en un campo magnético H neto igual a cero.

En los filtros de red, por razones de seguridad (aislamiento), los núcleos no se devanan de forma bifilar, y no se tienen dos separaciones demasiado grandes en el bobinado. Esta disposición física da lugar automáticamente a un flujo magnético de fuga o disperso que indica que el campo H realmente no es cero en todos los puntos, como se preveía.

La inductancia de fuga de un CMC es equivalente a una inductancia en MD. De hecho, el flujo magnético asociado con la inductancia en MD debe abandonar el núcleo en algún punto. En otras palabras, las líneas de flujo magnético se cierran fuera del núcleo, en vez de cerrarse en el toroide.

Si el núcleo tiene una cierta inductancia en MD, la corriente en MD causa una variación de flujo en el núcleo.

Si esta variación de flujo es demasiado alta, el núcleo se satura. Esta saturación deja la inductancia en MC esencialmente con un valor equivalente a la inductancia de una bobina con núcleo de aire.

Las emisiones en MC estarán, pues, a un nivel tan alto equivalente a como si el CMC no estuviera en el circuito. La variación del flujo en el núcleo en MC causada por las corrientes en MD es:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{L_{MD} \cdot (dl_{MD} / dt)}{n} \quad (1)$$

donde:

- $d\phi / dt$ es la variación de flujo en el núcleo
- L_{MD} es la inductancia medida en MD
- dl_{MD} / dt es el pico de corriente en MD
- n es el número de vueltas o espiras en el choque en MC

Dado que es deseable evitar la saturación en el núcleo, manteniendo B_{total} inferior a B_{sat} , el criterio es:

$$I_{MD} < \frac{AB_{max}n}{L_{MD}} \quad (2)$$

Donde,

- I_{MD} es el pico de corriente en MD
- A es el área de la sección del núcleo
- n es el número de vueltas o espiras en el choque en MC
- B_{max} es el máximo cambio de flujo
- L_{MD} es la inductancia en MD del núcleo

La inductancia en MD del núcleo puede ser medida cortocircuitando los extremos de un lado juntos y luego midiendo la inductancia de los otros dos extremos.

Los choques en MC funcionan bien porque la permeabilidad en MC, μ_{MC} es varios órdenes de magnitud mayor que la permeabilidad en MD, μ_{MD} y porque las corrientes en MC son normalmente pequeñas. Para aumentar la inductancia en MC mientras se minimiza la inductancia en MD, es preferible usar núcleos con una sección transversal más grande en lugar de utilizar más espiras. Al usar un núcleo más grande de lo necesario, se añade una significativa inductancia en MD en el choque en MC.

Dado que el flujo en MD (flujo disperso) sale del núcleo, puede producirse una emisión radiada significativa. Especialmente en el caso de filtros dentro de los equipos, esta radiación puede acoplarse internamente, provocando el aumento de las emisiones conducidas.

Detección de la saturación con una LISN

La detección de la saturación del núcleo en un CMC (total o parcial) es a veces difícil. Una simple prueba puede mostrar el nivel de atenuación del filtro en MC. La atenuación está afectada

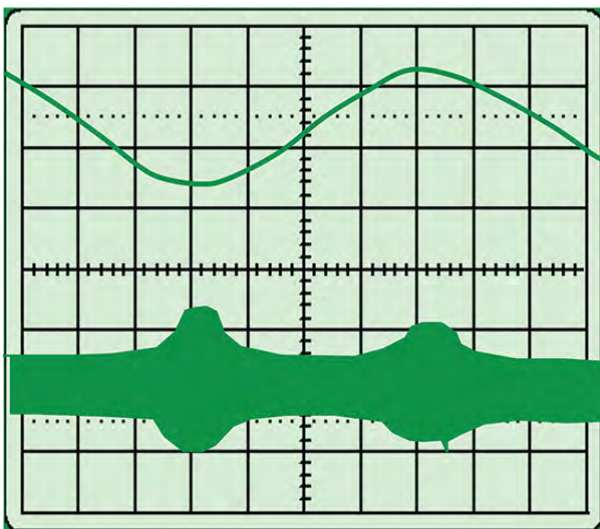


Figura 6. Oscilograma del factor de degradación de un choque en modo común debido a las corrientes de 50 Hz.

tada por una disminución en la inductancia causada por la corriente de 50 Hz. La prueba requiere un osciloscopio y una red separadora de los modos común y diferencial (DMRN: "Differential Mode Rejection Network"). En primer lugar, la tensión de red se controla por el canal A del osciloscopio. Durante el pico de corriente de la red se prevé una disminución de la eficacia del filtro. Las entradas de la DMRN se conectan a las dos salidas (L1 y L2) de la red de estabilización de impedancia de línea (LISN: "Line Impedance Stabilization Network"). La salida del MC de la DMRN se debe terminar con una resistencia de 50 ohmios y se conecta al canal B del osciloscopio. Cuando el CMC funciona en su región lineal, las emisiones medidas en el canal B no deben aumentar en más de 6 a 10 dB durante el aumento de la corriente. La figura 6 muestra la pantalla del osciloscopio de esta configuración de prueba.

La traza inferior son las emisiones en MC; la traza superior es la tensión de la línea de red de 50 Hz. Durante los períodos del pico de tensión de la línea, el puente rectificador está polarizado directamente y conduce la corriente de carga del condensador grande (C) de entrada de la fuente de alimentación en MC (figura 7(a)).

Si el CMC llega a la saturación, las emisiones durante el pico de entrada se incrementarán. Si el CMC llega a una alta saturación, las emisiones estarán prácticamente en el mismo nivel que sin filtro, es decir, fácilmente 40 dB o 60 dB más altas. Por ello, se debe evitar la saturación.

Esto se puede interpretar de otra manera. El valor mínimo de las emisiones (durante los períodos de corriente nula en la línea) es equivalente a la eficacia del filtro con una corriente de polarización nula. El ratio entre el pico máximo de emisión y el pico mínimo de emisión (el factor de degradación), es una medida del efecto de la corriente de la línea en la eficacia del filtro. Un alto factor de degradación sugiere un menor uso del núcleo en relación al uso inicial. Si se observa un "factor de degradación natural" del orden de 2 a 4 es un buen filtro. Dos fenómenos contribuyen a este factor de degradación. En primer lugar, hay una disminución en la inductancia causada por las corrientes de carga a 50 Hz. En segundo lugar, el puente

rectificador (figura 7(a)) se polariza con las corrientes directa e inversa de la senoide de 50 Hz.

El esquema equivalente para las emisiones en MC (figura 7(b)) consta de una fuente de tensión con una impedancia del orden de los 200 pF, equivalentes a la impedancia del diodo rectificador y la impedancia en modo común de la LISN. Mientras el puente está polarizado, hay un divisor de tensión entre la impedancia del generador y impedancia en MC de la LISN de 25 ohmios.

Cuando el puente está polarizado inversamente, el divisor de tensión se produce entre la impedancia del generador, la capacidad del puente rectificador y la LISN. Cuando la capacidad del diodo inverso del puente es baja, ésta contribuye al filtrado de las emisiones en MC. Cuando el puente rectificador está polarizado directamente, el puente no tiene influencia en el filtrado de las emisiones en MC. Debido a esta división de tensión, se espera obtener un factor de degradación natural del orden de 2. Los valores reales pueden variar considerablemente en función de los valores reales de la impedancia del generador y de la capacidad del diodo inverso.

Detección de la saturación con sondas de corriente

Se puede usar otra técnica similar para detectar la saturación de un CMC. La técnica se emplea como sigue. Se utilizan dos sondas de corriente. Con una sonda de corriente de baja frecuencia se controla la corriente de

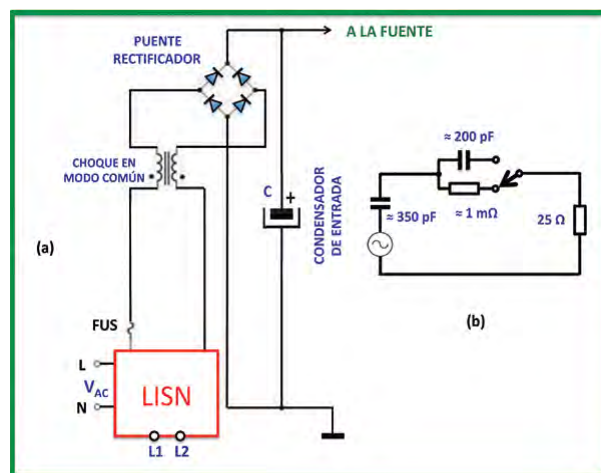


Figura 7. (a) circuito de entrada de una fuente de alimentación. (b) circuito equivalente .

entrada de la línea de 50 Hz y con otra sonda de alta frecuencia se mide solo la corriente de las emisiones en MC.

Un problema potencial con el uso de sondas de corriente es que el rechazo de la corriente en MD depende mucho de la simetría del devanado en el núcleo. Con una cuidadosa colocación del hilo, se puede obtener aproximadamente un rechazo de corriente en MD de 30 dB. Incluso con este rechazo, el nivel de la corriente en MD puede exceder el nivel de la corriente en MC.

Se puede utilizar una técnica para superar este problema, usando un filtro de paso alto con una frecuencia de corte de 6 kHz en serie con el osciloscopio. Éste se debe terminar con 50 ohmios. Para medir las emisiones en MC, la sonda de corriente se sujeta alrededor de estos cables, que llevan corrientes de línea muy pequeñas.

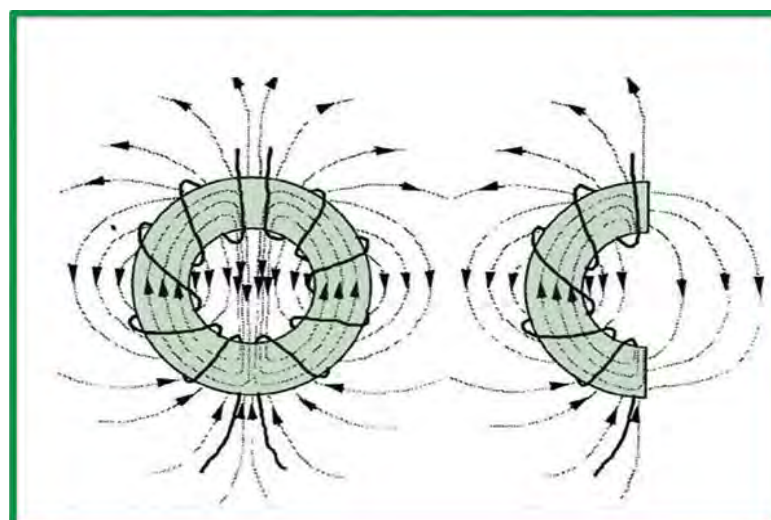


Figura 8. Líneas del flujo en modo diferencial en un choque en modo común.

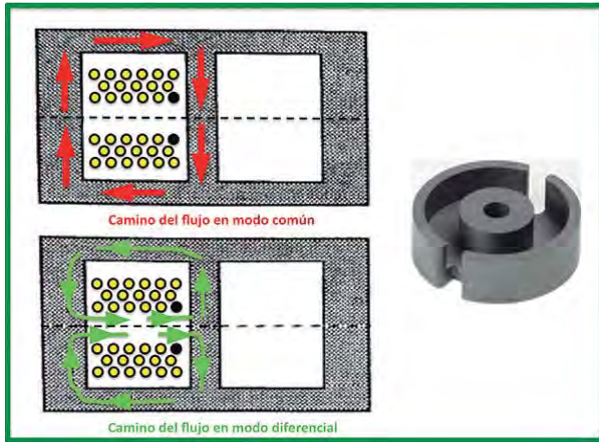


Figura 9. Caminos del flujo en modo común en un choque con núcleo tipo "pot core".

El flujo magnético en CMC y en MD

Una forma fácil de entender el funcionamiento de un CMC, se puede explicar así: los campos de ambos lados del núcleo se anulan y no hay flujo magnético para saturar el núcleo. Pero no es físicamente del todo exacto. Se debe considerar el siguiente argumento basado en las ecuaciones de Maxwell:

- Dado que una densidad de corriente produce un campo magnético H, se debe concluir que otra corriente cercana no puede cancelar o evitar la presencia de un campo H.

- Otra corriente cercana puede causar una alteración las líneas de campo magnético.

- En el caso específico de un CMC toroidal, la densidad de corriente en MD que se encuentra en cada lado se supone que es igual y opuesta. Por lo tanto, el campo H resultante debe sumar cero alrededor de la circunferencia del núcleo, pero no fuera del núcleo.

El núcleo actúa como si se hubiera roto por la mitad entre las dos bobinas. Cada bobina genera su campo magnético en cada mitad del toroide ($dH/dt = 0$). Implica que los campos deben cerrarse sobre sí mismos a través del aire circundante. La figura 8 es un dibujo de las líneas de flujo de las corrientes en MD en un CMC.

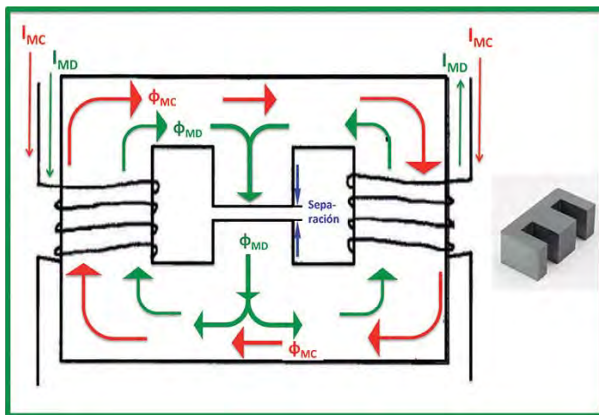


Figura 10. Caminos del flujo magnético en modo común (MC) y en modo diferencial (MD) en un coque con núcleo tipo "E". La separación central controla la inductancia L_{DM} .

La estructura del núcleo tipo "pot-core"

Para implementar un diseño de choque en MC eficaz, debe solucionarse el problema de la radiación causada por el flujo disperso del núcleo. Los métodos para superar este problema de la radiación incluyen contener el flujo en MD (flujo disperso) dentro de la estructura magnética del núcleo (núcleo tipo "pot-core": figura 9) o proporcionar un camino de alta permeabilidad para el flujo en MD (núcleo tipo "E": figura 10).

Cuando se utiliza un núcleo tipo "pot-core" para construir una inductancia o choque en MC, se utilizan dos bobinas. La Figura 9 muestra las líneas de flujo en MC. También muestra las líneas de flujo en MD para la misma configuración.

Tener en cuenta que en un primer nivel, todo el flujo está contenido dentro del núcleo. Con esta configuración,

la longitud del espacio de aire desde la superficie externa en la columna central del núcleo determina la reluctancia neta.

La reducción de la reluctancia del camino en MD aumenta la inductancia en MD. La principal ventaja de esta implementación de un choque MC es la propiedad inherente de ser un núcleo "auto blindado".

Estructura del núcleo tipo E

Otra forma de CMC, más fácil de construir que un núcleo toroidal, pero que tiene más radiación que un núcleo "pot-core", es el núcleo tipo "E", como se muestra en la figura 10, donde se muestra que el flujo en MC enlaza ambas bobinas sobre las columnas externas. Para lograr una alta permeabilidad, no debería haber ningún espacio de aire en las columnas externas. El flujo en MD, por otro lado, une las columnas externas y la columna central. La permeabilidad de la trayectoria en MD puede ser controlada por la distancia de aire en la columna central. El centro de la columna central es el área primaria de radiación.

Los choques con devanado bifilar

Las estructuras de los CMC según su tipo de bobinado se pueden dividir en los siguientes dos tipos: bobinado separado o con bobinado bifilar. Un CMC con devanado bifilar tiene menor inductancia en MD (menor impedancia en MD), mayor acoplo capacitivo entre primario y secundario, en comparación a un CMC con devanados separados. Sus aplicaciones más usuales son: líneas de datos, USB, Fire-wire, CAN, líneas de medición y líneas de sensores en general. En cambio, las aplicaciones de los CMC con devanados separados son: filtros de red, filtros de salida de fuentes de alimentación conmutadas, CMC para la red eléctrica y también líneas de medición.

La figura 11 muestra como se conectan los CMC con devanado separado y con devanado bifilar. La figura 12 presenta la inductancia de fuga (L_f) (inductancia en MD) como porcentaje de la inductancia en modo común (L_{MC}). En el caso del devanado separado, la inductancia de fuga llega a ser del 0,5% al 4% de la inductancia

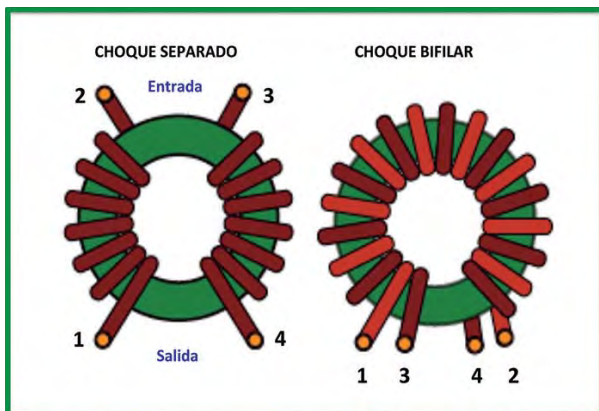


Figura 11. Conexión de un choque en modo común: con devanado separado o con devanado bifilar.

en MC, lo cual ayuda en el filtros de red, por ejemplo. Si el devanado es bifilar, la inductancia de fuga solo llega a ser del 0,1% al 1% de la inductancia en MC, lo que es bueno para evitar la deformación de las formas de onda de las señales deseadas de datos que se desea filtrar de las perturbaciones de EMI.

Hasta hace poco el uso de cables blindados era la principal forma de prevenir la transmisión de datos de las perturbaciones de EMI externas. Una solución más económica es el uso de líneas de transmisión simétricas. En éstas, las líneas de pares trenzados se utilizan en conjunción a un CMC con bobinado bifilar con la línea de datos con muy buena simetría. Las principales ventajas son los bajos requisitos de espacio, incluso con altos valores de inductancia usados para suprimir las EMI en MC. Esto se logra mediante el uso de los devanados bifilares, al tener unas excelentes características de simetría en comparación a los bobinados separados. Esto da lugar a una muy baja inductancia parásita en MD, una característica que es muy deseable para lograr una baja atenuación de la señal de datos en MD.

Las características de frecuencia y de impedancia de un CMC con una estructura de bobinado separado y un CMC con una estructura de bobinado bifilar se muestran en la figuras 13 y 14. Las corrientes de modo diferencial son las componentes de señal que están destinadas para la transmisión. Las corrientes con amplitudes iguales fluyen en direcciones opuestas, los campos eléctricos radiados tienen direcciones opuestas y se anulan entre sí.

Aunque los dos conductores tienen espacio en medio en el circuito impre-

so real, la mayoría de los campos magnéticos generados serán cancelados. Como resultado, los campos eléctricos radiados serán relativamente pequeños. Las corrientes de modo común son corrientes con la misma amplitud que fluyen en la misma dirección.

Son corrientes innecesarias que son causadas por el acoplamiento entre los cables y la masa debido a la capacidad parásita o a la inducción electromagnética. A pesar de que son muy pequeñas, en comparación con las corrientes de modo diferencial, causan grandes campos eléctricos radiados debido a que fluyen en un bucle grande. No es exagerado decir que la principal causa de emisión de ruido es debida a las corrientes de modo común.

En un CMC con una estructura de devanado bifilar, el acoplamiento entre los dos hilos es alta y la impedancia en modo diferencial es pequeña. Los CMC con esta estructura son adecuados para líneas de transmisión de señal de alta velocidad, ya que no afectan a las formas de onda de las señales transmitidas.

Conclusiones

Los choques en modo común se usan para atenuar las corrientes ruidosas en modo común. Se usan en filtros de red con devanados separados y en filtros de datos con devanados bifilares. Los núcleos más usados para la realización de CMC son los toroidales, los de tipo "pot-core" y los de tipo "E". En un CMC, las señales deseadas en MD pasan sin ser atenuadas al no tener apenas impedancia en MD, mientras que las EMI en MC quedan atenuadas al presentar una alta impedancia en MC. 📌

REFERENCIAS

- Mark J. Nave, "A Novel Differential Mode Rejection Network for Conducted Emissions Diagnostics", IEEE 1989 National Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1989.
- Dennis Nielsen, Ole Cornelius Thomsen, Michael A. E. Andersen, "Separation of common and differential mode conducted emission: Power combiner/splitters", ICREPQ, Santiago de Compostela, 2012.
- Mark J. Nave, "Power Line Filter Design for Switched-Mode Power Supplies", Van Nostrand Reinhold, 1991.
- Henry W. Ott, *Electromagnetic Compatibility engineering*, 2009, John Wiley & Sons
- Documentación sobre filtros de TDK
- Documentación general sobre filtros de EMIKON (www.emikon.com)

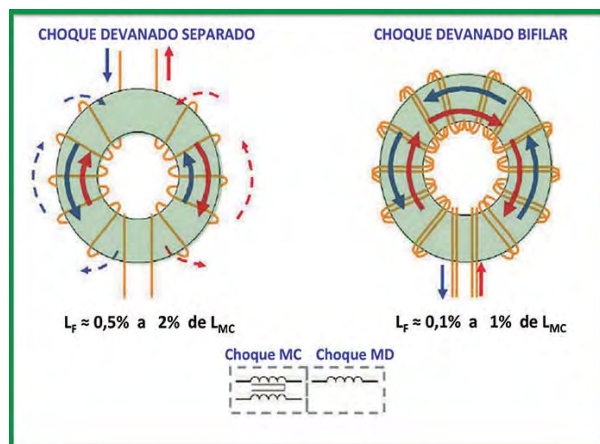


Figura 12. Inductancia de fuga (L_f) (inductancia en MD) como porcentaje de la inductancia en modo común (L_{MC}).

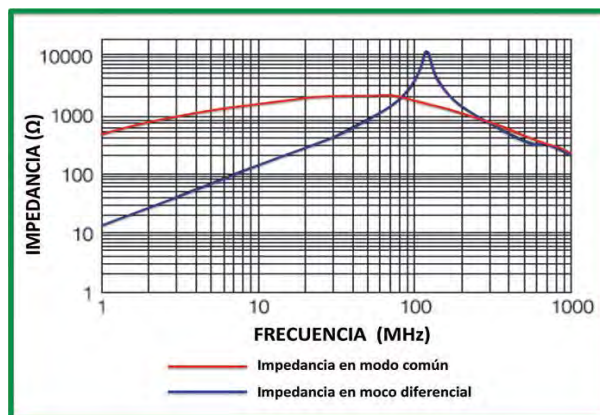


Figura 13. Impedancias de un choque en modo común con devanado separado.

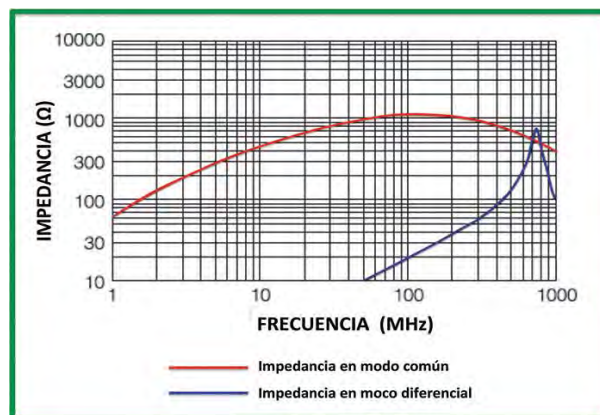


Figura 14. Impedancias de un choque en modo común con devanado bifilar.