Los transformadores de aislamiento y las EMIs

Artículo cedido por Cemdal

CEMDAL
www.cemdal.com

Francesc Daura Luna, Ingeniero Industrial. Director de la Consultoría CEMDAL, Representante de Austria Mikro Sisteme (ams AG) para España y Portugal

Si la red de suministro eléctrico no fuera del todo estable, limpia de ruido y se previera la posibilidad de tener transitorios de sobretensión, perturbaciones de alta frecuencia, o continuas faltas de tensión, llegando incluso a micro-cortes frecuentes, sería muy aconsejable la instalación de varios sistemas de filtrado y protección en la entrada de un sistema o instalación. Dependiendo del tipo de perturbaciones que se prevean o se tengan, la figura 1 presenta un conjunto de protecciones a instalar en un equipo o instalación en función de la duración de la perturbación y de su amplitud. Estas perturbaciones pueden estar causadas por descargas atmosféricas, la apertura y cierre de cargas eléctricas, malas técnicas de conexión de masas y tierras, la falta de conexión a tierra, los radio transmisores potentes cercanos, etc....

Este artículo se va a centrar en los transformadores de aislamiento (TDA). Los TDA se pueden usar en múltiples aplicaciones: en la alimentación principal de energía eléctrica a 50 Hz; en los transformadores de salida en convertidores de potencia o formando parte de las fuentes de alimentación conmutadas o de instrumentos de precisión, entre otros. Todos los conceptos que aquí se a explican se pueden aplicar a todos los tipos de TDA, sin importar donde se dispongan. Aunque los TDA pueden ser más o menos grandes para circuitos de señal o de potencia, por facilidad, el artículo se centrará en los TDA monofásicos de 50 Hz dispuestos en la entrada de la alimentación del equipo. En este entorno hablaremos de la conexión a tierra. En otros entornos, los mismos efectos de la conexión a tierra en los TDA pueden ser aplicados sustituyendo la conexión a tierra por la conexión a la masa interna del equipo.

Un transformador de alimentación está construido para trabajar con tensiones alternas de 50 Hz con eficiencias cercanas al 97%. Evidentemente la eficiencia de este tipo de transformadores con perturbaciones de alta frecuencia es muy diferente,

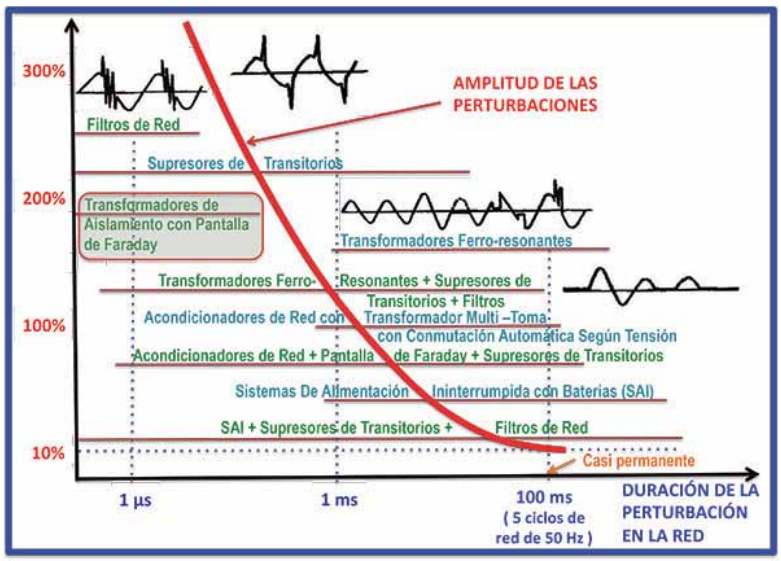

Figura 1: conjunto de protecciones contra diversos tipos de perturbación.

dado que la respuesta en frecuencia no es uniforme. Por lo tanto, la forma de onda de un impulso de interferencia se ve afectada y distorsionada al pasar por el transformador.

En los transformadores, los devanados primario y secundario están acoplados magnéticamente. Esta construcción tiene inherente el aislamiento entre el primario y el secundario. Por lo tanto todo transformador está aislado galvánicamente. El diseño de los transformadores implica una gran cercanía del primario y el secundario y por ello aparecen capacidades parásitas entre estos devanados que pueden acoplar interferencias electromagnéticas (EMIs) (figura 2). Aquí se va a ver como reducir estas capacidades parásitas y así aumentar el aislamiento entre primario y secundario de los TDA para reducir el acoplamiento de EMIs.

Los TDA típicos incorporan como mínimo una pantalla de Faraday entre ambos devanados, con el fin de desviar las EMIs que se acoplarían eléctricamente (capacitivamente) entre los devanados primario y secundario hacia la masa. El mecanismo a través del cual se produce el acoplamiento eléctrico de las EMIs es por la ca-

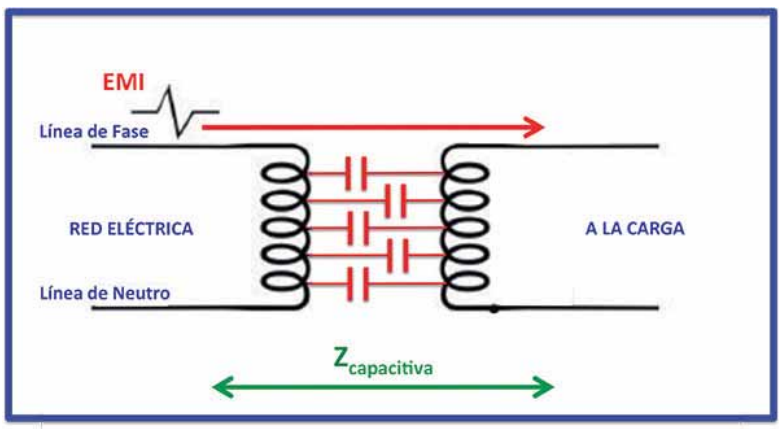

Figura 2: capacidades distribuidas parásitas entre el primario y el secundario en un transformador. Pueden acoplar interferencias.

pacidad parásita existente entre las espiras de ambos devanados en aquel transformador sin pantalla de Faraday. Esta misma capacidad limita la máxima frecuencia del paso de banda del transformador de la misma manera que el límite de baja frecuencia viene determinado por las inductancias mútuas propias del transformador. Dado que la frecuencia de la corriente excitadora crece, la reactancia causada por la capacidad entre devanados, 1 / C, tiende a desviar dichas corrientes, limitando de esta manera el rendimiento a alta frecuencia.

La pantalla de Faraday controla todo tipo de inconvenientes que podrían ser atribuidos al acoplamiento capacitivo de las EMIs a través del transformador. La inclusión de una pantalla de Faraday entre los devanados elimina la capacidad parásita entre éstos, pero también establece dos nuevas capacidades entre la pantalla y cada uno de los devanados. Dichas capacidades permiten que las corrientes de alta frecuencia fluyan hacia los sistemas de puesta a tierra, tanto del devanado primario como del secundario (figura 3).

Los transformadores y las EMIs

Los transformadores tienen la habilidad de inyectar EMIs radiadas y conducidas en un sistema. En vez de quedarse confinada en el núcleo del transformador, su radiación puede ser una fuente de EMI debido a su flujo magnético disperso. El campo magnético alrededor del transformador es direccional. Esto minimiza las EMIs hacia otros componentes, si se posiciona bien con respecto a los componentes cercanos. Una mejora es mover el transformador a una sección del equipo suficientemente alejada de los componentes sensibles; otra opción es la de diseñar un transformador con reducción de EMIs por construcción. Esto se consigue diseñando el transformador con una densidad de flujo reducida, lo cual implica un incremento del número de espiras en el transformador o un incremento del área de su núcleo. Otra solución consiste en rodear el transformador con una pantalla externa realizada con una lámina de cobre por fuera del núcleo, como una espira en cortocircuito para reducir el flujo magnético de fuga disperso. La figura 4 presenta los dos tipos básicos de pantallas en un transformador.

En casos extremos, se pueden aplicar blindajes magnéticos consistentes en una caja que rodea el transformador, captura el flujo de fuga disperso y lo manda a tierra. Esta técnica suele ser efectiva, pero también es cara porque la caja está hecha de aleaciones magnéticas. Sin embargo, cuando se requieren los mayores niveles de protección a las EMIs, el confinamiento magnético es una buena opción. La figura 5 muestra el detalle constructivo de un TDA con blindaje externo y una pantalla de Faraday. En este ejemplo, esta pantalla está realizada con un devanado de espiras en una capa. Sería mejor usar una lámina de cobre o aluminio.

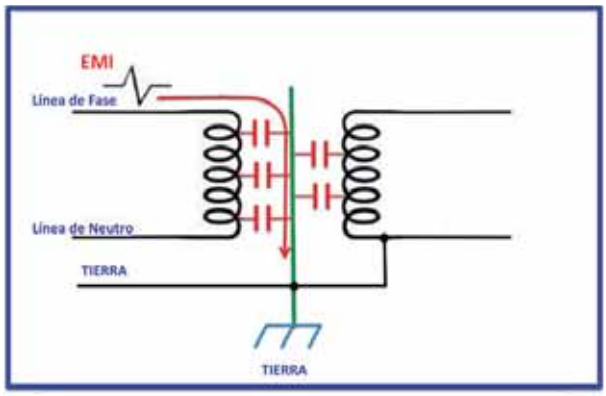

Figura 3: pantalla de Faraday conectada a tierra en un transformador de aislamiento

El aislamiento de un transformador está limitado por la resistencia en alterna del aislamiento (MΩ) entre primario y secundario a bajas frecuencias. Dicho aislamiento tiene problemas cuando se incrementa la frecuencia por encima de los 100kHz, porque la capacidad entre el primario y el secundario decrece y atenúa las EMIs tanto en MC como en modo diferencial. En un TDA típico, la capacidad de fuga fuera de la pantalla es de aproximadamente 5 pF.

Un transformador funciona de manera más eficiente a su frecuencia de diseño. Dado que la reactancia inductiva del transformador se incrementa con la frecuencia, los armónicos de más alta frecuencia y los transitorios son atenuados de manera significativa

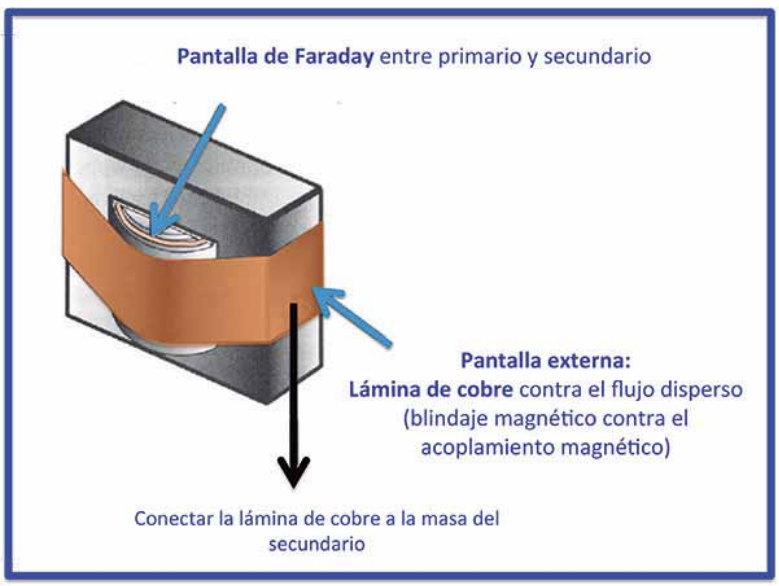

Figura 4: los dos tipos básicos de pantallas en un transformador

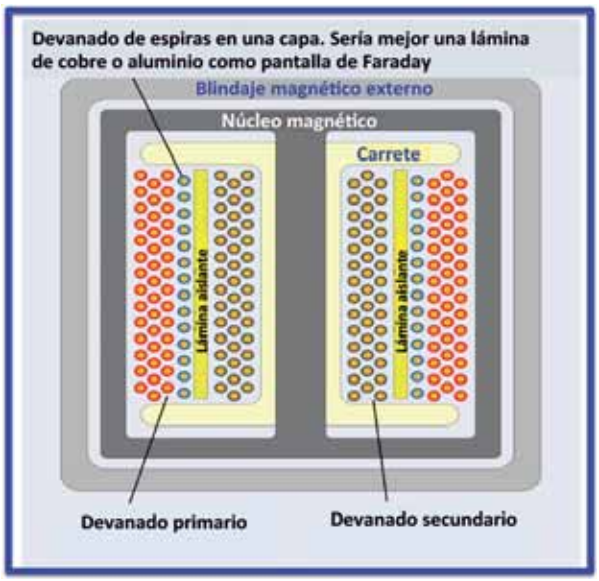

Figura 5: detalle constructivo de un transformador de aislamiento

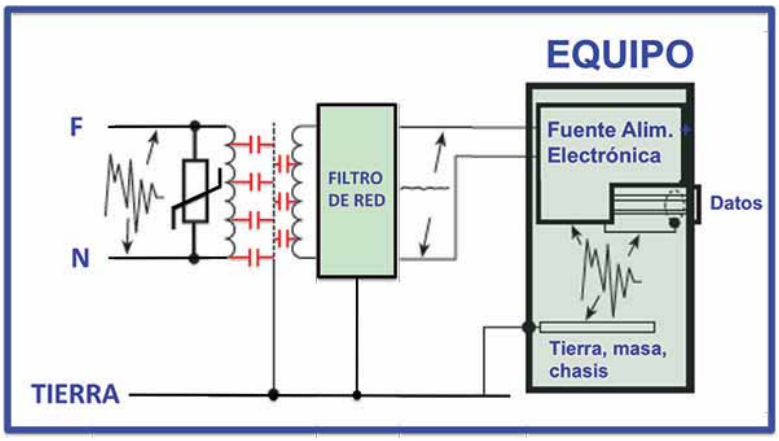

Figura 6: atenuación de las EMIs en modo diferencial gracias a una simple pantalla de Faraday complementándola con un supresor de transitorios de sobretensión (varistor o TVS) en el primario y un filtro en el secundario.

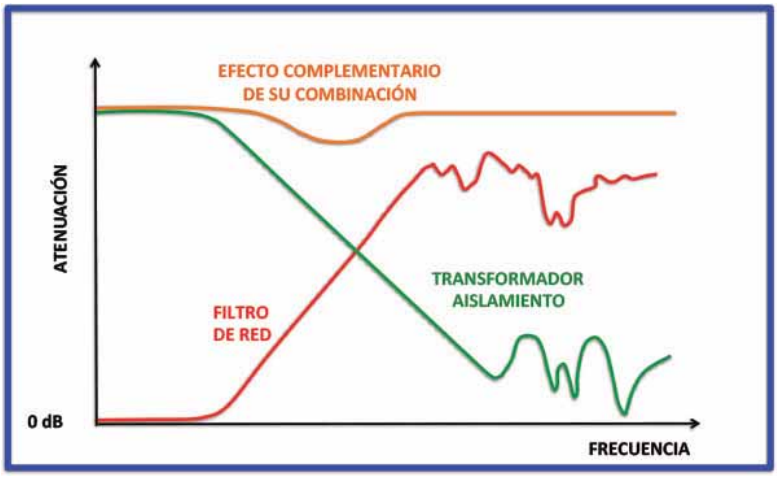

Figura 7 : efecto complementario de la combinación de un filtro de red conectado junto a un transformador de aislamiento con pantalla de Faraday

con el transformador bajo carga. Esto ocurre porque son disipados a través de la inductancia del transformador. Sin embargo, en condiciones de baja carga, la caída de tensión en su reactancia inductiva podría no proporcionar una atenuación suficiente. No obstante, no todas las EMIs problemáticas pueden ser clasificadas bajo la etiqueta de alta frecuencia. Es por eso que si las EMIs en modo diferencial aparecen como un problema en una aplicación concreta, se requerirá de algún remedio distinto al de confiar únicamente en la impedancia del TDA. Por ello, a los TDA se les añade supresión de transitorios y filtrado para solucionar problemas de EMIs de dos maneras (figura 6):

1. Limitando los transitorios de alta amplitud potencialmente dañinos, con varistores rápidos o con TVS. Con esto se consigue suprimir los transitorios en el devanado primario.
2. Filtrando la fase del secundario con su neutro obteniendo una muy baja impedancia para señales de alta frecuencia. Con ello se obtiene una gran atenuación de EMIs en modo diferencial, independientemente de la carga en el transformador. La figura 7 muestra el efecto complementario de la combinación de un filtro de red conectado junto a un transformador de aislamiento con pantalla de Faraday. Aunque los equipos normalmente ya incorporan su propio filtro de red, el TDA no es redundante, ya que complementa la acción del filtro.

La pantalla de Faraday en un transformador

En un transformador de alimentación normal, sin pantalla de Faraday, las EMIs en modo común pasan a través de las capacidades parásitas entre los devanados primario y secundario, llegando al equipo de forma indeseada (figura 8). Un TDA con una pantalla electrostática, formada por una fina lámina metálica (Cu o Al) no cerrada, separando el primario del secundario, puede cortocircuitar capacitivamente a tierra la mayoría de las EMIs en modo común que llegan al primario, evitando que éstas lleguen al equipo (figura 9). De este modo, la mayoría de los problemas de alimentación se solucionan mediante el uso de un TDA. Es importante no cortocircuitar la pantalla interna, como, por ejemplo, con la colocación de una espira dentro del transformador, porque entonces funcionaría provocando un cortocircuito.

Las capacidades parásitas representadas eléctricamente en la figuras 2 y 8 pueden ser la trayectoria de las EMIs de alta frecuencia para pasar desde el primario al secundario. Su impedancia (o reactancia capacitiva) es:

$$Zcapacitiva = \frac{1}{2\pi f C}$$

Por lo tanto, con los valores de capacidad existentes entre los devanados, y a altas frecuencias, la impedancia Zcapacitiva tiene valores muy bajos. Estas capacidades parásitas pueden reducirse instalando una pan-

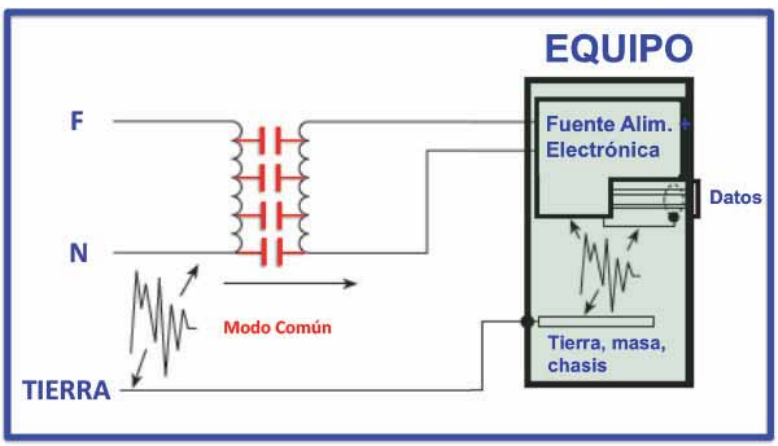

Figura 8: EMIs en modo común pasando a través de la capacidad parásita entre los devanados primario y secundario en un transformador de alimentación

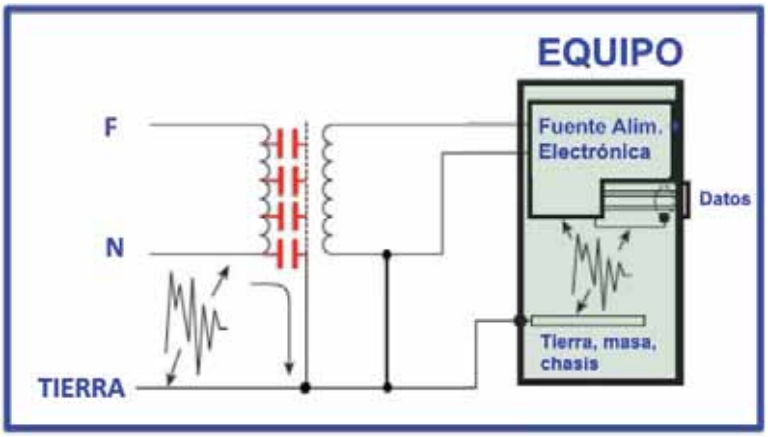

Figura 9: Atenuación de las EMIs en modo común gracias a una simple pantalla de Faraday. También se puede conectar un terminal del secundario a tierra

talla electrostática o de Faraday entre los devanados primario y secundario. El valor de la capacidad total es:

$$Ctotal = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3} + ... + \frac{1}{Cn}$$

Así, si la capacidad total disminuye, la Zcapacitiva aumenta y la trayectoria para las EMIs de alta frecuencia se ve alterada, derivando mucha parte a tierra.

Al colocar una pantalla en el transformador, aumenta la atenuación como mínimo unos 60 dB (1000 veces). Así, un impulso de 1000 voltios en el primario aparece en el secundario como 1 voltio. Este rango de atenuación depende de las frecuencias de las EMIs. Con buenos TDA, se pueden lograr atenuaciones de 120 dB a frecuencias de unos 500 kHz. Por diseño y fabricación, un buen transformador puede garantizar para una atenuación de EMIs en modo común de 60 a 120 dB entre las frecuencias de 10Hz a 1MHz y una atenuación de 45 dB de EMIs en modo diferencial (a 100 kHz).

Hay otra característica adicional de los TDA que facilitaría eliminar completamente las EMIs en modo común. Las normas de seguridad (en el Reglamento de Baja Tensión) requieren que uno de los terminales del secundario del TDA esté conectado a tierra desviando las EMIs. Esta configuración se ve en la figura 9. La impedancia cercana al cero hace que entre este terminal (neutro del secundario) y tierra no aparezca tensión en modo común en la carga. Pero, ¡cuidado! esta conexión no está permitida en los equipos médicos porque necesitan quedar flotantes para evitar problemas de corrientes de fuga que puedan afectar a los pacientes.

Un TDA permite que la conexión a tierra sea restablecida cerca del equipo. Entonces, el neutro del secundario está sólidamente referenciado a tierra a través de su unión y no a través de cualquier capacidad distribuida que pueda existir en la carga. Cualquier EMI en modo común que aparezca en el secundario tiene su corriente cortocircuitada a tierra a través de la unión neutro secundario-tierra del transformador. El núcleo (si es metálico) también se conecta a tierra, junto con el chasis metálico del equipo.

El modo común y el modo diferencial

Los transitorios en modo común (transitorios desde las líneas a tierra) son las perturbaciones más problemáticas de entre todas las que afectan a las líneas, porque son capaces de sortear los filtros de las fuentes de alimentación y de penetrar más fácilmente a través de las capacidades parásitas por efecto del acoplamiento electrostático (figura 2).

Existe otra fuente de EMIs en modo diferencial (MD) en el secundario de los transformadores y es un "atributo" de los transformadores, debido a la conversión de las EMIs en modo común (MC): las perturbaciones en MC en el primario e convierten a EMIs en MD en el secundario (figura 10). Las EMIs en MC, en las líneas de entrada del transformador aparecen por igual en las líneas de entrada del transformador con un desfase de 180º. Idealmente deberían anularse, pero la realidad es otra. En los transformadores reales, existen imperfecciones, por lo tanto aparecen discontinuidades en las capacidades y, en general, en las impedancias de los devanados, lo cual afecta a la velocidad de las EMIs viajando a través del primario y ello afecta a la distribución de las corrientes en los devanados. En consecuencia no hay una cancelación total de las perturbaciones en MC. La corriente resultante produce una diferencia de tensión entre los terminales del devanado secundario del transformador.

En caso de tener problemas con transitorios rápidos de alta frecuencia y descargas electrostáticas (ESD), la pantalla colocada entre los dos devanados no es tan efectiva a altas frecuencias debido al amplio espectro de frecuencias, sobre todo de las ESD. La atenuación de la pantalla empieza a reducirse por encima de los 30 kHz. En general, no se apan-

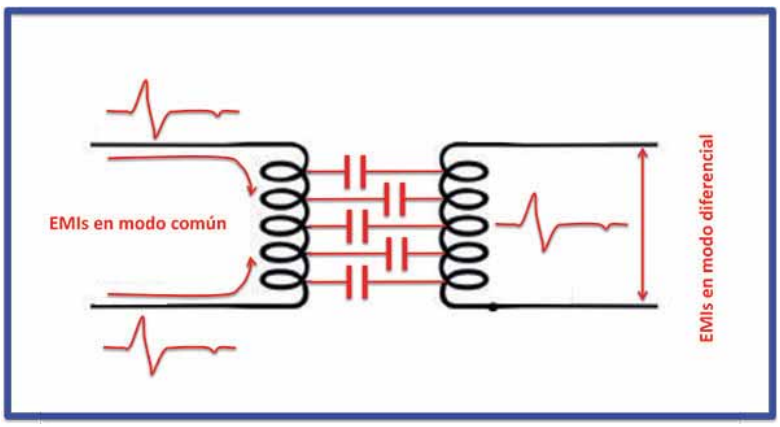

Figura 10: El transformador convierte las EMIs en modo común en EMs en modo diferencial

tallan los transformadores de alta frecuencia por su alta inefectividad causada por la relativamente gran inductancia de la conexión entre la pantalla y la tierra (o masa en el interior de los equipos).

Los transitorios en MD en el primario se transmiten al secundario principalmente por el acoplamiento magnético y la pantalla de Faraday no es tan efectiva (figura 11). En los transformadores reales, las tensiones en MC en el primario tienden a producir tensiones de MD en el secundario por el efecto de conversión de MC a MD del transformador ya comentado. Hay dos formas de eliminar estas tensiones en MD: la colocación de condensadores entre la línea de fase y el neutro en el lado del secundario que filtre las EMIs en MD; y una segunda pantalla que elimine esta conversión.

Transformadores con doble pantalla

A bajas frecuencias la solución de una pantalla es buena, pero a medias y altas frecuencias, la atenuación de las EMIs entre el primario y el secundario, tanto en MC como en MD simultáneamente, no es óptima. Dado que los dos modos están presentes a la vez, se debe usar una doble pantalla de Faraday (figura 12).

Una segunda pantalla en el devanado primario actúa como una trayectoria de baja impedancia para las EMIs de MC que viajan de una pantalla a la siguiente, eliminando la conversión de MC a MD que es inherente a los transformadores. En un TDA con 2 pantallas, la pantalla enfrentada hacia el lado del primario se conecta al neutro del primario para suprimir las EMIs en MD. La pantalla enfrentada al secundario se conecta a la tierra de referencia para suprimir las EMIs en MC. Parte del flujo de corriente en MC en el devanado primario aparece en el secundario por la acción del transformador. Ambas pantallas normalmente suministrarán 60-80 dB de atenuación de EMI en MC desde 100 Hz a 1MHz.

Transformadores con triple pantalla

Si las cargas conectadas en el secundario generan EMIs en MC, es deseable evitar su propagación a otros equipos a través de un TDA. Este camino se puede bloquear añadiendo una tercera pantalla que se conecta a uno de los polos del devanado secundario (neutro del secundario) (figura 13). En un TDA con triple pantalla, la pantalla central se conecta a tierra. Las demás pantallas se conectan al neutro del primario y del secundario respectivamente. El TDA con este conjunto de tres pantallas normalmente suministrará 65-80 dB de atenuación de EMIs en MC desde 100 Hz a 1MHz. La técnica de los tres apantallamientos reduce la capacidad por debajo de 0,009 pF, e incrementa el aislamiento por encima de los 100 MΩ.

Las perturbaciones en MD usualmente son ocasionadas por la conmutación de grandes cargas, o de condensadores que sirven para la corrección del factor de potencia. Con una triple pantalla se atenúan las perturbaciones en MC y las perturbaciones en MD del primario y del secundario. Aquí se supone que la fuente de alimentación conmutada en el equipo también genera EMIs en el secundario hacia la red y se desea atenuarlas, porque su propio filtro no es suficiente. La tercera pantalla, conectada al neutro del secundario, atenúa las EMIs en MD generadas por la fuente conmutada del equipo

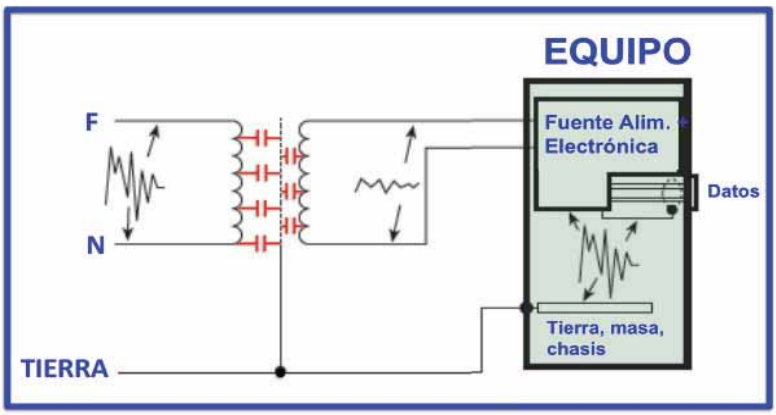

Figura 11: Atenuación de las EMIs en modo diferencial gracias a una simple pantalla de Faraday

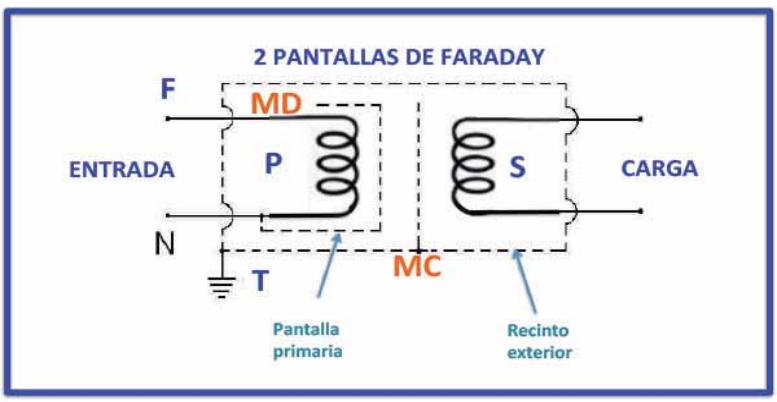

Figura 12: Transformador de aislamiento con dos pantallas de Faraday

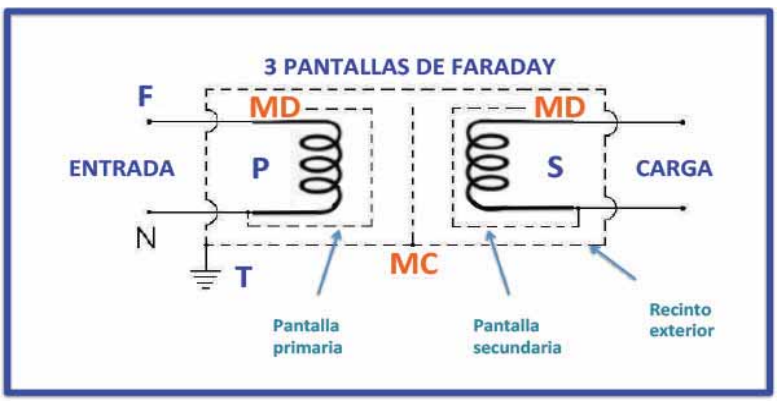

Figura 13: Transformador de ultra-aislamiento con tres pantallas de Faraday

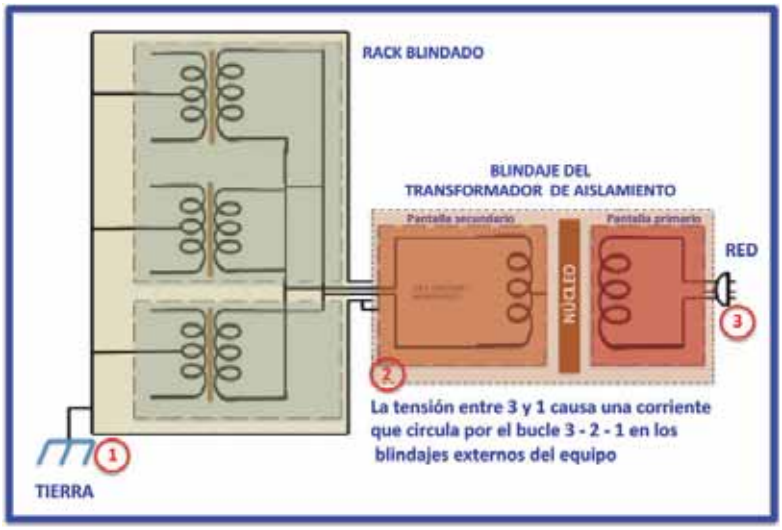

Figura 14: aplicación de un transformador de aislamiento a nivel de rack

y evita que lleguen con toda su intensidad a la red.

A los TDA con tres pantallas también se les llama transformadores de ultra-aislamiento. Tienen baja capacidad de acoplamiento y aislamiento elevado (1.000 MΩ). Estos transformadores de ultra-aislamiento se aplican en centros de cálculo, control de procesos, instrumentación electrónica, sistemas de telecomunicación, quirófanos, salas de cuidados intensivos, analizadores médicos, equipos de audio/vídeo, telemetría, sistemas de control electrónico, equipos de informática, telefonía, entre otros.

Otras aplicaciones: Instrumentación

Gracias al mayor aislamiento conseguido, los TDA se usan a menudo para proteger circuitos de alta ganancia o para evitar la aparición de caminos de EMIs en las masas en las instalaciones de instrumentación. El blindaje a nivel de instrumento es difícil y frecuentemente inefectivo. Dado que la mayoría de equipos de instrumentación disponibles en el mercado tienen una pantalla simple en sus transformadores de potencia, los diseñadores confían en que al añadir una pantalla secundaria o primaria resulte en la eliminación de los problemas de puesta a tierra del sistema. Este enfoque puede no aportar un beneficio adicional al sistema, a no ser que la arquitectura de sus masas en el instrumento sea correcta. Un TDA no es un sustituto para el blindaje general o la correcta puesta a tierra de instrumentos individuales. Si se parte de un buen diseño del sistema de masas y blindajes en un sistema de instrumentación, un TDA puede aportar una mayor atenuación de EMIs. Si el conexionado de masas no es bueno, un TDA prácticamente no hará nada.

Otras aplicaciones: A nivel de rack

Una aplicación efectiva de los TDA es su instalación en racks de equipos. Un rack actúa como una pantalla externa para instrumentos internos, sirviendo a la vez como "cero voltios de referencia" para las señales del sistema. Los TDA se usan para controlar corrientes en las pantallas y para eliminar las capacidades mútuas entre la instrumentación del rack y una conexión a tierra desconocida.

En la figura 14 se muestra una aplicación de un TDA a nivel de rack. La principal ventaja que su uso conlleva es un nivel de control mejorado sobre las corrientes en los blindajes del equipo. Cualquier diferencia de potencial entre la masa del circuito y la masa del rack causará que las corrientes fluyan en el bucle 3-2-1-3, como se indica en la figura 14. El TDA permite que estas corrientes "de tierra" sean dirigidas a través de una parte del blindaje del rack, sin afectar al funcionamiento de los circuitos sensibles y aislando estas corrientes de los conductores de referencia del equipo interno.

Conclusiones

Un TDA ayuda a mejorar la protección de un equipo contra las perturbaciones en la alimentación de un equipo o las señales que le vienen desde el exterior. Los TDA se pueden usar en múltiples aplicaciones: en la alimentación principal de energía eléctrica a 50 Hz; en los transformadores de salida en convertidores de potencia o formando parte de las fuentes de alimentación conmutadas o de instrumentos de precisión, entre otros. La respuesta en frecuencia de un transformador no es uniforme.

En los transformadores, los devanados primario y secundario están acoplados magnéticamente. El diseño de los transformadores implica una gran cercanía del primario y el secundario y por ello aparecen capacidades parásitas entre estos devanados que pueden acoplar interferencias electromagnéticas.

Los TDA típicos incorporan como mínimo una pantalla de Faraday entre ambos devanados, con el fin de desviar las EMIs que se acoplarían capacitivamente entre los devanados primario y secundario hacia la masa. El mecanismo a través del cual se produce el acoplamiento eléctrico de las EMIs es por la capacidad parásita existente entre las espiras de ambos devanados en aquel transformador sin pantalla de Faraday.

La pantalla de Faraday controla todo tipo de inconvenientes que podrían ser atribuidos al acoplamiento capacitivo de las EMIs a través del transformador.

REFERENCIAS

- *György Elmer, "Novel High Frequency Model of Transformers of Electronic Devices" , LAMBERT Academic Publishing, 2012*
- *J.Balcells / F.Daura / R.Pallàs / R.Esparza, "Interferencias Electromagnéticas En Sistemas Electrónicos", 1992, Boixareu Editores*
- *Henry W. Ott, Electromagnetic Compatibility engineering, 2009, John Wiley & Sons*
- *Ralph Morrison, "Grounding and Shielding Techniques in Instrumentation", Wiley 1986*
- *Dr. Bruce, C. Gabrielson and Mark J. Reinold, "Supprssion of Power Line Noise with Isolation Transformers", Sachs / Freeman Associates*

CEMDAL

www.cemdal.com

CONTACTO:
Francesc Daura
fdaum@cemdal.com
Taronger 12
08192, Sant Quirze del Vallès
T: 93 600 455 492

En **CEMDAL** ofrecemos servicios de consultoría de diseño óptimo en **Compatibilidad Electromagnética (CEM)**, con buenas prestaciones, calidad y costes para todos los sectores de la industria electrónica, aplicable en cualquier momento del ciclo de desarrollo de sus productos.

Nuestra experiencia en diseño, desarrollo y solución a problemas de **Compatibilidad Electromagnética** en sistemas electrónicos, nos permite ofrecer nuestros servicios a empresas que necesitan ayuda con **flexibilidad, diligencia y fiabilidad** en los resultados. **Garantizamos los resultados positivos** en las pruebas de laboratorio de **CEM**.

SERVICIOS Y SOLUCIONES A PROBLEMAS DE CEM

SERVICIO PREVENTIVO

COMPLETO: MARCADO CE

EMISIONES E INMUNIDAD