

Reducción de las interferencias en los inversores de frecuencia



Autor: Francesc Daura Luna, Ingeniero Industrial. Director de la Consultoría Leedeo Engineering

Los inversores de frecuencia son equipos de potencia que, si no se instalan correctamente, pueden causar interferencias electromagnéticas (EMI) y afectar el buen funcionamiento de equipos sensibles cercanos. Estos problemas de EMI se pueden reducir gracias al buen diseño interno del propio inversor y la correcta instalación de su cableado en la máquina o sistema, desde el punto de vista electromagnético a alta frecuencia.

Se presentan cuatro métodos para reducir las EMI de los inversores de frecuencia y sus instalaciones. Cualquier método utilizado solo puede minimizar, pero no eliminar, las corrientes de EMI en modo común (MC) en los inversores y su efecto en los equipos industriales sensibles cercanos. Estos son los métodos que se aplican en las instalaciones de los inversores:

- Conectar correctamente la masa y la tierra a baja y a alta frecuencia
- Atenuar la generación de interferencias electromagnéticas (EMI) en su fuente
- Proteger de las EMI los equipos sensibles con blindajes
- Controlar el retorno de las EMI hacia su fuente

Las conexiones de masa y tierra a baja y a alta frecuencia

Es importante aplicar correctamente la estrategia del conexionado de las masas y la tierra de seguridad en el sistema. Las correctas conexiones a masa de las señales usando las prácticas adecuadas a baja y a alta frecuencia, reducen el efecto de las EMI de los inversores sobre los equipos cercanos.

La estrategia de las correctas conexiones de las masas y la tierra de seguridad de los equipos industriales se ha basado históricamente en la preocupación por las tierras de seguridad a baja frecuencia. La idea básica ha sido proporcionar una distribución de energía eléctrica segura, garantizando al mismo tiempo la

máxima protección contra los transitorios de tensión y manteniendo la disponibilidad de la actividad de los equipos durante los fallos de la tierra de seguridad. Sin embargo, la estrategia básica aplicada en los inversores influye en la magnitud y en la ruta de los acoplamientos de las EMI generadas por el inversor.

La figura 1 muestra los tres sistemas básicos de conexión del neutro (N) del secundario del transformador de suministro eléctrico a la tierra de seguridad. El sistema sin conexión a la tierra de seguridad (flotante) de la figura 1A tiene la ventaja de que un fallo entre fase y tierra no requiere la interrupción inmediata del suministro

de energía eléctrica. Una desventaja de este sistema es que los transitorios de tensión entre fase y tierra que llegan al primario del transformador pasan al secundario sin atenuación. Otra desventaja es que el neutro del secundario del transformador (N) está acoplado capacitivamente a tierra, lo que permite que la tensión del neutro flote hacia la tensión de fase durante los transitorios y sobrecargue el sistema de aislamiento de fase a neutro. El principal problema con un sistema de neutro flotante es que puede saltar un arco voltaico a tierra y puede causar una escalada de la tensión entre fase y tierra hasta varias veces la tensión nominal entre fase y

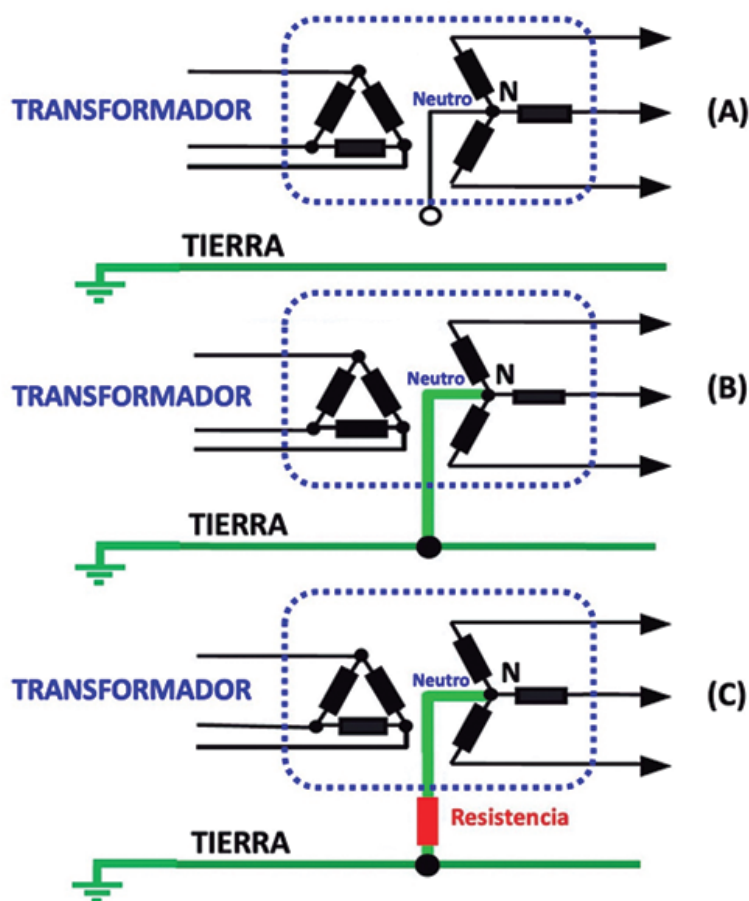


Figura 1. Sistemas básicos de la conexión del neutro (N) a tierra. (A) neutro flotante no conectado a la tierra de seguridad (acoplo capacitivo). (B) Neutro con buena conexión a tierra. (C) Neutro con una conexión a tierra con alta resistencia.

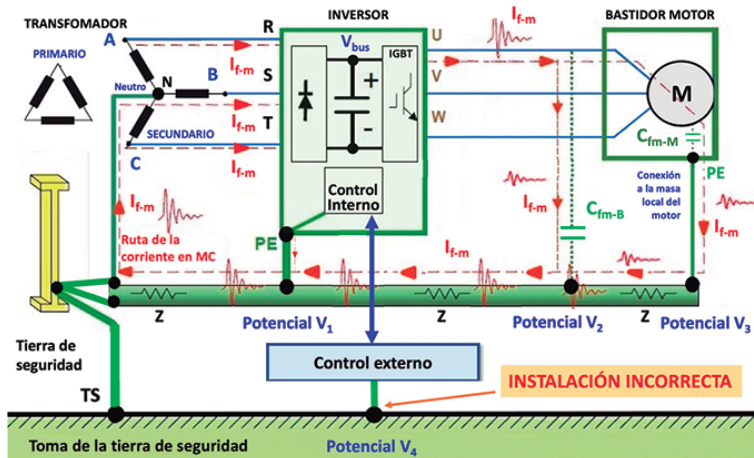


Figura 2. Rutas parásitas de circulación de las corrientes entre fase y masa en MC (I_{f-m}), en un inversor bien conectado a la tierra de seguridad (TS), pero con una instalación incorrecta del cableado del control externo en el Potencial V4. PE: Protective Earth en el inversor y el motor. Z: impedancias de la estructura de masa. C_{fm-B} : capacidad parásita entre las fases y la masa en la bandeja metálica. C_{fm-M} : capacidad entre el devanado del estator del motor y la masa del motor.

tierra. Sin embargo, con respecto a las EMI de los inversores, el circuito flotante del neutro interrumpe beneficiosamente el camino de retorno de la corriente de EMI en modo común (MC) del inversor, de regreso a su entrada (R,S,T) en la figura 2. Por lo tanto, las EMI en MC quedan reducidas sustancialmente a parte de la corriente que puede pasar a través de la capacidad parásita entre el neutro N y la tierra.

El sistema de neutro (N) con conexión a una tierra sólida de la figura 1B proporciona una mayor atenuación de los transitorios de tensión entre fase y tierra que llegan al primario del transformador, reduce la necesidad de un mejor aislamiento entre fase y neutro y elimina el problema de la escalada de tensión entre fase y tierra debido a un fallo de la conexión a tierra, ya que el neutro (N) se mantiene en el potencial de tierra. Las desventajas de este sistema es que un fallo entre fase y tierra interrumpe el suministro de energía sin previo aviso y que un fallo grave de tierra debe ser interrumpido de inmediato, lo que tiene la posibilidad de infligir más daño debido a la mayor energía que debe ser disipada. Con respecto a las EMI de los inversores, el circuito del neutro con conexión sólida a tierra completa perjudicialmente el camino de retorno de la corriente transitoria de EMI en MC, desde la salida

del inversor (U,V,W) pasando por la estructura de masa y regresando al inversor por los cables de entrada de red (R,S,T) en la figura 2. Por lo tanto, la corriente de EMI en MC es más alta en la estructura de masa con los sistemas sólidamente conectados a tierra. Sin embargo, el bucle de EMI en MC está contenido en el neutro del transformador (N) y las EMI no circulan hacia la malla de tierra, en el lado del primario del transformador.

El sistema de conexión del neutro (N) a una tierra con alta resistencia de la (figura 1C) agrega suficiente resistencia entre el neutro y la tierra para limitar la corriente de fallo a tierra al rango de 1 a 5 amperios. Aunque la tensión del neutro no se mantiene a tierra, el valor de la resistencia limita la tensión a tierra durante un fallo de tierra a niveles suficientemente bajos para evitar fallos de aislamiento. La atenuación de los transitorios de tensión entre fase y tierra en el secundario y en el primario depende del valor elegido de la resistencia. Con respecto a las EMI del inversor, la resistencia en el neutro reduce significativamente el pico de corriente de tierra en MC y proporciona la resistencia de amortiguación del circuito, ya que la resistencia ahora está en serie con el camino de retorno de las corrientes de EMI en MC hacia la entrada (R,S,T) del inversor. Por lo tanto, la diferencia de potencial en MC de

alta frecuencia se minimiza a través de la estructura de masa (diferencia de potencial entre el Potencial V_1 y el Potencial V_3) en la figura 2.

Para la determinación de las características de las medidas de protección contra los choques eléctricos en caso de defecto (contacto indirecto) y contra las sobreintensidades es preciso tener en cuenta el Reglamento de Baja Tensión en su ITC-BT-08, donde se exponen los regímenes de neutro de las instalaciones eléctricas. En la ITC-BT-08 se explica con todo detalle como se conecta a tierra el neutro del secundario del transformador de la estación transformadora de entrada en una nave industrial. Estos detalles quedan fuera del objetivo de este artículo.

La figura 2 presenta una posible instalación antigua del cableado de un inversor, que podría haberse realizado con inversores con transistores de potencia bipolares, en inversores con tiempos de conmutación t_f lentos, en los que los 3 cables de fase de salida (sin pantalla) se disponían por encima de una bandeja metálica, colocados al azar. Debido a la lenta velocidad de conmutación de los transistores de potencia bipolares, era posible no tener problemas de EMI en la masa de referencia de la instalación. Sin embargo, actualmente, los transitorios dV/dt con transistores de potencia IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) son unas 20 veces mayores (con menor t_f) a los transistores bipolares y se acoplan capacitivamente con mayores magnitudes de corriente de EMI hacia la estructura de masa. El cable de conexión a masa del bastidor del motor permite que la corriente de EMI circule hacia la estructura de masa en el Potencial V_3 . La corriente de EMI en MC, I_{f-m} , a través de las impedancias Z de la estructura de masa eleva el Potencial V_1 por encima del Potencial V_4 (Potencial $V_1 >$ Potencial V_4). Debido a la diferencia de potencial entre los Potenciales V_1 y V_4 , no se recomienda usar este método incorrecto de cableado en las instalaciones actuales, ya que las señales sensibles del equipo de control externo, que se conectan a la masa en el Potencial V_4 , cercano a la toma de tierra de seguridad (TS), verán una tensión en MC que puede provocar EMI y también su mal funcionamiento. La instalación correcta de la masa

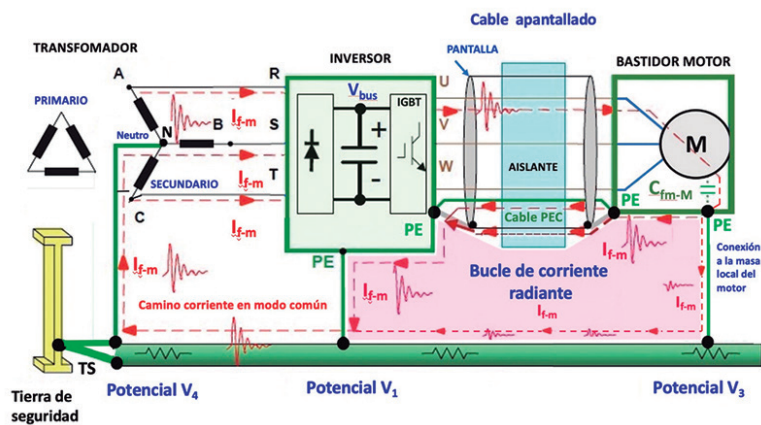


Figura 3. Instalación con bucle de corriente radiante. I_{f-m} : intensidad en MC de fase a masa, PE: Protective Earth en el inversor y el motor. Cable PEC: Parallel Earth Conductor. Z: impedancias de la estructura de masa. C_{fm-M} : capacidad entre el devanado del estator del motor y la masa del motor.

del equipo de control externo sería conectarla al Potencial V1, más cercano al punto PE (Protective Earth) del inversor. La capacidad parásita entre las fases y la masa, C_{fm-B} , también contribuye a aumentar la corriente de EMI en MC, I_{f-m} en la estructura de masa, en el Potencial V_2 .

La tierra de seguridad

La conexión del inversor a la toma de tierra de seguridad asegura que las tensiones de contacto entre las extremidades del operador humano sean suficientemente bajas, de modo que sean seguras en condiciones de fallo de la tierra de seguridad. Con el inversor en marcha la tierra de seguridad también asegura que ninguna parte metálica expuesta acumule carga eléctrica debido a las corrientes de fuga o a las corrientes de EMI de alta frecuencia que viajan a través de la estructura de masa. Las barras de masa, los paneles metálicos y las puertas de los armarios generalmente están unidas a una barra de tierra de cobre (PE) del sistema. La resistencia a tierra debe ser del orden de un ohmio o menos, aunque se podría aceptar una resistencia de hasta 25 ohmios.

Se puede lograr un buen funcionamiento de los inversores y su control externo, incluso en presencia de EMI, una vez que se comprende por donde circulan las corrientes de EMI en MC. La figura 2 muestra que gran parte de las corrientes de EMI en MC de alta frecuencia provenientes de la salida

del inversor (U,V,W) regresan a través de la conexión del punto PE del motor a la masa (Potencial V_3), pasan por la estructura de masa, y regresan a la entrada del inversor (R,S,T) pasando por el neutro N del transformador.

El requisito de conectar el bastidor del motor a tierra se cumple uniendo el punto PE del motor con un cable a la masa local, en el Potencial V_3 , que queda conectado a la tierra de seguridad (TS) a través de la estructura de masa. Los grandes motores (unos 400 kW) tienen una capacidad parásita significativa entre el bobinado del estator y el bastidor del motor, que provoca corrientes en MC apreciables. Las instalaciones con cables inversor-motor largos (>

180 m) y con motores de gran potencia pueden tener el bastidor del motor con potenciales más elevados transitoriamente, por encima del potencial cero durante la conmutación del inversor debido a que el cable de seguridad de tierra tiene una gran inductancia frente a las corrientes en MC de alta frecuencia. En este caso, o cuando existen condiciones de humedad alrededor del bastidor del motor, a veces, se usa un cable de conexión adicional desde el bastidor del motor hasta la tierra de la estructura del edificio más cercana, para asegurar una tensión de potencial de contacto segura con respecto a la tierra local en el bastidor.

Los cables apantallados

Para reducir la radiación del cable inversor-motor usualmente se selecciona un cable apantallado con los tres conductores de las fases en su interior y un cable de tierra también llamado conductor PEC (Parallel Earth Conductor) que une, junto con la pantalla, los puntos PE del inversor y el motor (figura 3). Este es el cable de conexión a tierra del punto PE del bastidor del motor que asegura un bajo potencial de contacto, es el cable conectado al Potencial V_3 local de la estructura de la masa. Como el punto PE del inversor está también unido a la estructura de masa (Potencial V_1), se cierra el circuito de un bucle radiante por el que circulan corrientes en MC. El camino formado por el punto PE del motor, el Potencial

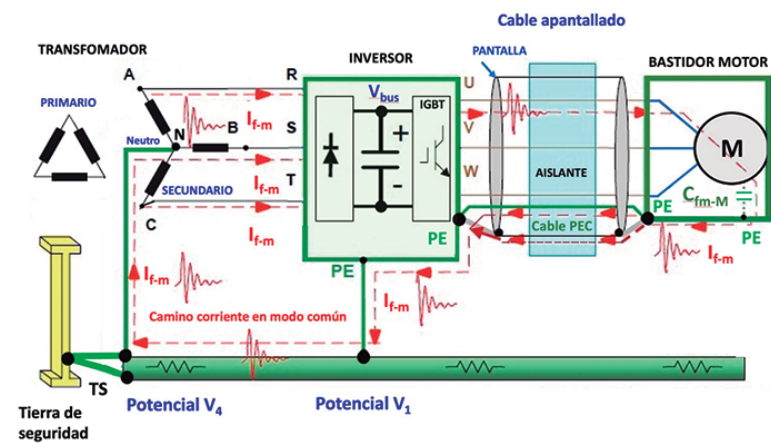


Figura 4. Instalación sin bucle de corriente radiante. I_{f-m} : intensidad en MC de fase a masa, PE: Protective Earth en el inversor y el motor. Cable PEC: Parallel Earth Conductor. C_{fm-M} : capacidad entre el devanado del estator del motor y la masa del motor.

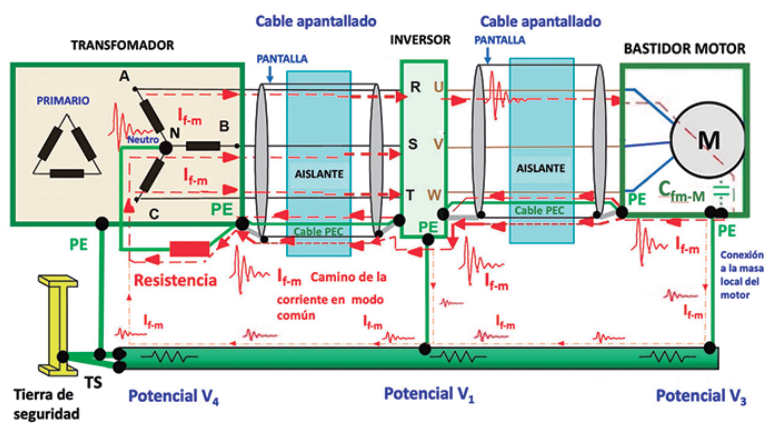


Figura 5. La mejor solución de conexionado: cable apantallado en la entrada y la salida del inversor. I_{f-m} : intensidad en MC de fase a masa, PE: Protective Earth en el inversor y el motor. Cable PEC: Parallel Earth Conductor. C_{fm-M} : capacidad entre el devanado del estator del motor y la masa del motor.

V_3 , el Potencial V_1 y el punto PE del inversor tiene una impedancia más alta que la impedancia formada por la pantalla del cable en paralelo con el conductor PEC interno al cable apantallado. Por ello circula mucha más corriente de EMI en MC por el cable apantallado que por el camino de la estructura de masa. Pero es bastante usual no tener problemas de emisiones radiadas en instalaciones realizadas de esta forma. Esto es debido a que el valor de la corriente circulante de EMI en MC por la estructura de masa es suficientemente pequeño y la radiación del bucle debido a estas corrientes es baja. Es evidente que si el cable inversor-motor se dispone cerca, tocando, la estructura de masa, la altura entre el cable y la masa será mínima y el área del bucle radiante será mínima. Si no se cumpliera esta regla, el bucle podría ser demasiado grande y podría dar problemas, aunque las corrientes de EMI fueran bajas.

En la figura 4, no existe la conexión del punto PE del bastidor del motor a la tierra local en el Potencial V_3 . Ello hace desaparecer el bucle de corriente radiante. La conexión a tierra del bastidor del motor, obligatoria por seguridad, se realiza a través del conductor PEC, interno al cable apantallado. En este caso, toda la corriente de EMI en MC retorna por el cable apantallado, circulando principalmente por el conductor PEC y en menor medida por la pantalla ($Z_{PANTALLA} > Z_{PEC}$). Para evitar tener el

bucle radiante, es necesario mantener el bastidor del motor aislado eléctricamente de la tierra local.

Cuando se desea proteger los conductores de red de CA de las EMI externas al inversor, se puede usar un cable apantallado en la entrada de red de CA del inversor para minimizar la captación de EMI externas. La figura 5 muestra que gran parte de la corriente de EMI en MC de alta frecuencia, procedente de la salida del inversor (U,V,W), regresa por la pantalla y el conductor PEC del cable apantallado y, en menor medida, por el cable de masa del motor (Potencial V_3) y por la estructura de masa, de regreso hacia el punto PE del inversor. Sin los medios de derivación de la alta frecuencia internos del inversor, la misma corriente de EMI en MC circulará por la pantalla y el conductor PEC del cable apantallado de la entrada de red de CA (R,S,T) del inversor y por el cable de masa de entrada, de regreso a la tierra del transformador de origen, donde la corriente en MC encuentra una ruta de regreso al inversor, por cualquiera de los cables de fase de entrada de la red de CA del inversor.

Esta instalación, usando cable apantallado tanto en la entrada de red de CA como en la salida del inversor, es la mejor solución para tener una buena instalación de conexionado del inversor, bien protegida contra EMI externas. Aunque es una buena solución, es poco usual verla aplicada en la industria.

Atenuación de la generación de EMI en su fuente

Las EMI del inversor se eliminan mejor si se atenúan directamente en su fuente, antes de que lleguen a la estructura de la masa/tierra de la instalación y tome múltiples rutas parásitas de alta frecuencia, que son difíciles de encontrar en las instalaciones. La experiencia demuestra que solo la atenuación de las corrientes de EMI en MC asegura tener instalaciones correctas, sin problemas de EMI.

Tiempo de conmutación

Hay un primer parámetro que no podemos modificar a nivel de la instalación externa del inversor. Se trata del tiempo de conmutación de los transistores de potencia por diseño del inversor. Este tiempo de conmutación, t_r , solo se puede modificar cambiando la tecnología de los transistores de potencia. Actualmente, el 90% de los inversores usan transistores IGBT, con t_r de unos 100 a 200 ns. Este tiempo determina el ancho de banda de las EMI. Simplificadamente, el ancho de banda se puede estimar usando $AB = 0,35 / t_r$, con t_r en ns y AB en GHz. Así, por ejemplo, para $t_r = 100$ ns, $AB = 0,0035$ GHz = 3,5 MHz.

Disminución de la frecuencia portadora

La selección de una frecuencia portadora, f_p más baja no cambia la corriente de pico de las EMI en MC, pero reduce la magnitud RMS (Root Mean Square) de la corriente de EMI en MC circulando en la estructura de masa. Una frecuencia portadora más baja tampoco afecta al ancho de banda del espectro radiado. Es mucho más crítico el tiempo de conmutación t_r de los transistores del puente de potencia del inversor, porque el tiempo t_r determina la frecuencia más alta del espectro, como se ha visto en el párrafo anterior.

Choque en modo común

Disponer una ferrita (o más) como un choque en MC rodeando los tres conductores de las fases de salida del inversor es altamente efectivo para

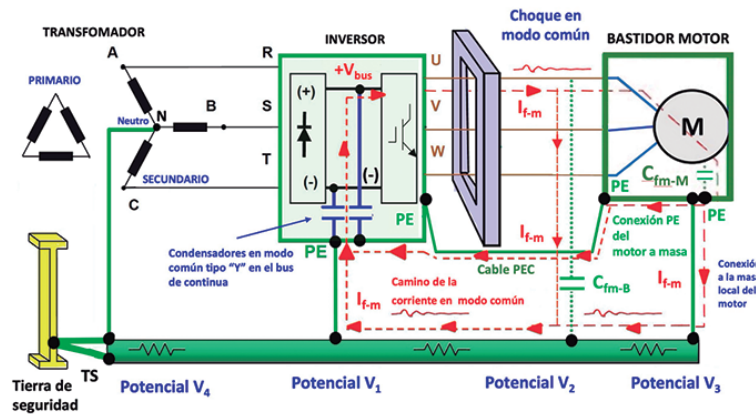


Figura 6. Usando un choque en modo común se atenúan las EMI en modo común a alta frecuencia. I_{f-m} : intensidad en MC de fase a masa, PE: Protective Earth en el inversor y el motor. Cable PEC: Parallel Earth Conductor. C_{f-m-B} : capacidad parásita entre las fases y la masa en la bandeja metálica. C_{f-m-M} : capacidad entre el devanado del estator del motor y la masa del motor.

reducir las EMI en MC. En la figura 6 el choque en MC añade inductancia a las tres fases de salida del inversor (U, V, W). Si los conductores de las fases son flexibles, se pueden dar de 2 a 4 vueltas al núcleo del choque. Si los conductores no son flexibles, se pueden añadir de 2 a 4 ferritas rodeando las tres fases.

Las rápidas transiciones de tensión dV/dt de los impulsos PWM de salida entre las fases no cambian cuando se agrega un choque en MC. Los picos de corriente de fase y los dV/dt entre las fases no se alteran porque son señales en modo diferencial (MD). Sin embargo, la magnitud y los tiempos de conmutación de los transitorios di/dt de la corriente de EMI en MC entre fase y masa se reducen sustancialmente, debido a que el choque en MC actúa como una alta inductancia

(alta impedancia) para los transitorios dV/dt entre fase y masa.

Si no se usa un choque en MC, puede haber una gran tensión instantánea en MC a través de la estructura de masa, debido a los altos di/dt y a la alta magnitud del pico de la corriente de EMI en MC, que interactúa con la inductancia parásita y con la resistencia en alterna debida al efecto pelicular en la estructura de masa. Añadiendo un choque en MC, la magnitud de la corriente de masa y el transitorio de corriente di/dt son más bajos y reducen las diferencias de potencial a través de la estructura de la masa. Como resultado, es posible el funcionamiento del inversor sin errores en el control externo y en los equipos sensibles separados, ya que se reducen las tensiones en MC entre ellos.

Los choques en MC en los cables de alimentación de red de CA del equipo de control externo también pueden reducir las EMI, si no es posible tener una separación con los conductores no apantallados de salida (U,V,W) del inversor (si no se usa un cable apantallado). Los choques en MC también son beneficiosos para reducir las EMI en los cables de señal y de comunicaciones del equipo de control externo del inversor. El choque en MC alrededor del cable y la pantalla del equipo de control externo reduce la corriente de EMI en MC instantánea inducida en los cables de señal debido a las diferencias instantáneas de las tensiones en MC.

Protección de los equipos sensibles con blindajes

Cuando se debe usar un cable apantallado para el cable inversor-motor, es conveniente seleccionar el cable más adecuado. La figura 7 muestra tres tipos de cable apantallado con tres niveles de prioridad en su uso:

Cable de prioridad 1: Es la mejor opción. Este cable tiene tres conductores de masa que están distribuidos equilibradamente entre los conductores de las tres fases a 120°. Este cable no introduce desequilibrio de fase. Este tipo de cable tiene la prioridad 1 de uso porque da como resultado las corrientes en MC mínimas.

Cable de prioridad 2: este cable tiene un solo conductor de masa ubicado en el centro entre los conductores de las tres fases a 120°. Aunque

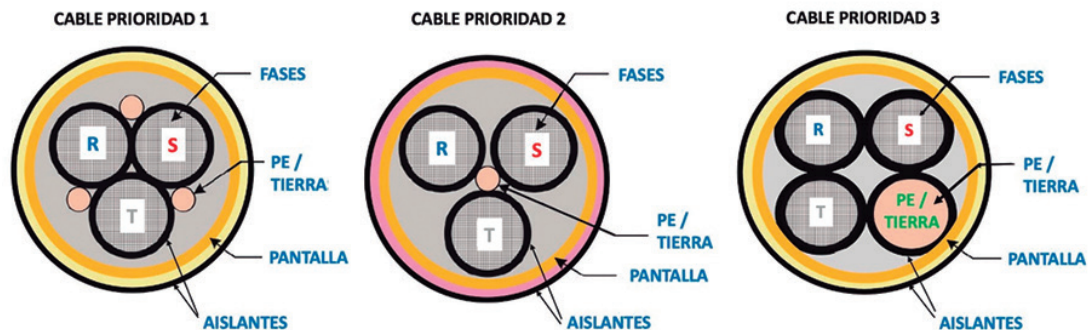


Figura 7.

Prioridad 1: cable apantallado simétrico equilibrado con 3 conductores de fase más 3 conductores de tierra (3 + 3).

Prioridad 2: cable apantallado simétrico equilibrado con 3 conductores de fase más 1 conductor de tierra (3 + 1).

Prioridad 3: cable apantallado asimétrico no equilibrado con 3 conductores de fase más 1 conductor de tierra (3 + 1).

en la figura se muestra centrado, es difícil asegurar que el conductor de tierra está ubicado exactamente en el centro a lo largo de toda su longitud. Ello causa alguna pequeña asimetría.

Cable de Prioridad 3: Este cable es asimétrico y tiene efectos electromagnéticos desequilibrados. En este cable hay un desequilibrio de fase, independientemente del cuidado que se tome durante la instalación de sus conexiones. Es desaconsejable usarlo, sobre todo si debe ser muy largo. Da como resultado, corrientes en MC más elevadas con respecto a los tipos de cable anteriores debido a su desequilibrio de impedancias internas.

En los tres casos, el aislante recomendado en estos cables, fabricados especialmente para conectar inversores con motores, es el XLPE (polietileno reticulado), que es mejor que el PVC (policloruro de vinilo). El XLPE es un material termoestable, frente al PVC que es termoplástico. Considerando la alta tensión de más de 1.300V que deben soportar estos cables, el XLPE es mejor que el PVC, para evitar su destrucción debida al efecto corona. La descarga por efecto corona es debida al intenso campo eléctrico alrededor de los conductores, que ioniza el aire dentro del cable, provocando la descarga. Estas descargas dañan el cable, degradando el material aislante y dañando la pantalla del cable.

Las EMI conducidas

Otro paso en la mitigación de las EMI es controlar el camino de las EMI conducidas. Esto se realiza desviando las EMI de la estructura de masa de referencia de los equipos sensibles.

Las emisiones electromagnéticas de los cables de salida (U,V,W) de los inversores contienen varias componentes de frecuencia. Hay una componente de campo eléctrico emitida radialmente desde los cables, que se debe a las componentes de los tiempos de conmutación dV/dt y a la tensión de la frecuencia portadora de la modulación PWM. Hay una componente de campo magnético emitida circularmente desde los cables, que es de baja frecuencia y es debida a la frecuencia fundamental de salida del inversor. También contiene una componente de campo magnético de frecuencia media, debida a la co-

rriente de la frecuencia portadora, y contiene unas componentes de campo eléctrico y campo magnético de alta frecuencia, debidas a los transitorios de corriente di/dt conducidos en MC por los cables de alimentación. Por último, también contiene corrientes de onda viajeras en MD y en MC presentes en los cables. La frecuencia portadora y las componentes de conmutación dV/dt desde la fuente de alimentación conmutada interna, también pueden ser conducidas por estos cables. Las emisiones de campo eléctrico y magnético emitidas por los cables de red suministro de CA, conectados a la entrada (R,S,T) del puente trifásico de diodos del inversor no son tan elevadas como en los cables de salida (U,V,W) del inversor.

Las reglas básicas de reducción de EMI, como agrupar los cables de salida (U,V,W) y la masa para reducir el acoplamiento eléctrico y magnético externo con otros equipos y separar los cables de control de los cables de potencia de salida, para evitar los altos transitorios dV/dt son una buena práctica para reducir el problema del acoplamiento capacitivo. También es básico disponer todos los cables cerca de la estructura de la máquina o chasis, que forma parte de la estructura de masa, que está conectada a la tierra de seguridad.

Control del retorno de las EMI hacia su fuente

Las EMI en MC que regresan a la masa (PE) del inversor deben ser

redirigidas lejos de la estructura de masa, de la tierra de seguridad y de las líneas eléctricas de suministro de CA con un filtro de red o con un transformador de aislamiento en la entrada del inversor (R,S,T).

Filtro de entrada

Un filtro de red dispuesto en la entrada del inversor (figura 8) reduce las emisiones conducidas y la magnitud de los transitorios I_{f-m} a valores muy bajos en la tierra conectada al circuito del neutro (N) del transformador y en las líneas eléctricas de 50 Hz. Los condensadores del tipo "Y", de alta frecuencia (C_y) en el filtro de red, conectados entre las fases y la masa desvían los transitorios I_{f-m} lejos de la resistencia de conexión a tierra del neutro y lejos de las líneas de 50 Hz. Los transitorios I_{f-m} regresan a las entradas del inversor (R, S, T). Las inductancias en serie (L_f) presentan una alta impedancia en la entrada del filtro y reducen aún más la posibilidad de que los transitorios I_{f-m} circulen hacia las líneas eléctricas de la red pública de CA o hacia el neutro en el transformador. En la anterior figura 6, los condensadores en MC tipo "Y" agregados en el inversor, conectados desde el (+) y el (-) del bus de continua a masa, actúan como condensadores de derivación de alta frecuencia que desvían las corrientes transitorias I_{f-m} de regreso al bus de corriente continua del inversor, lejos de la entrada de la tierra y de las líneas de la red eléctrica de CA.

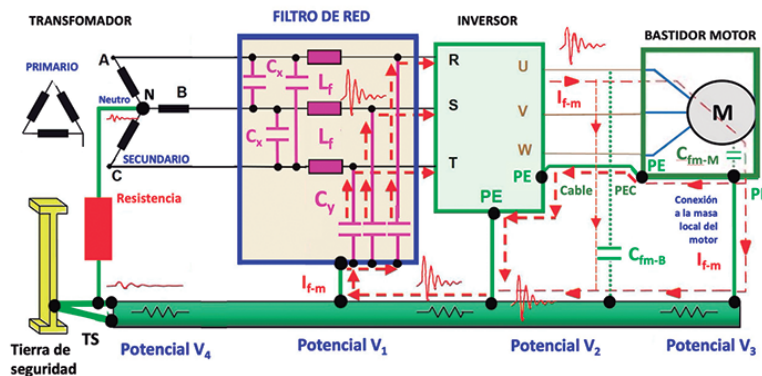


Figura 8. Uso de un filtro de red en la entrada del inversor. I_{f-m} : intensidad en MC de fase a masa, PE: Protective Earth en el inversor y el motor. Cable PEC: Parallel Earth Conductor. C_{fm-B} : capacidad parásita entre las fases y la masa en la bandeja metálica. C_{fm-M} : capacidad entre el devanado del estator del motor y la masa del motor.

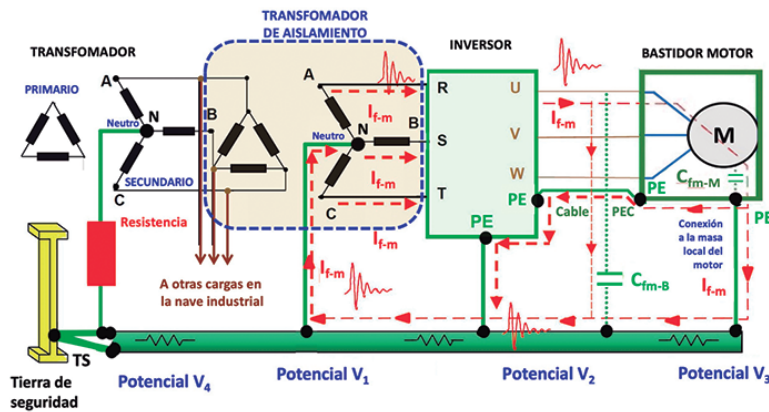


Figura 9. Uso de un transformador de aislamiento en la entrada del inversor. I_{f-m} : intensidad en MC de fase a masa, PE: Protective Earth en el inversor y el motor. Cable PEC: Parallel Earth Conductor. C_{fm-B} : capacidad parásita entre las fases y la masa en la bandeja metálica. C_{fm-M} : capacidad entre el devanado del estator del motor y la masa del motor.

Transformador de aislamiento

El uso de un transformador de aislamiento bien conectado a la estructura de masa, ubicado lo más cerca posible de la entrada del inversor, elimina totalmente el problema de las EMI en MC en las líneas de alimentación del transformador principal de la instalación industrial, como se muestra en la figura 9. Los transitorios I_{f-m} que regresan a la masa (PE) del inversor están limitados para circular solo por el circuito del neutro del transformador de aislamiento y no por el circuito del neutro del transformador de la planta industrial. El transformador de aislamiento también evita que la corriente I_{f-m} de alta frecuencia pase a través del resto de la estructura de la tierra del sistema eléctrico de la planta y reduce el efecto de las EMI en MC en otros equipos industriales cercanos.

Filtros de salida

Si se agregan inductancias en las fases de salida del inversor se reducirá la corriente transitoria de pico I_{f-m} a niveles más bajos, pero estas inductancias tendrán un gran tamaño, alto costo, peso y la penalización de la caída de tensión en la salida, perdiendo potencia en el motor. Sin embargo, las inductancias en las fases de salida reducen las corrientes acopladas capacitivas entre fase y masa y entre fases, de modo que se eliminan todos los picos transitorios di/dt de corriente de fase.

Filtrado general

La figura 10 muestra un resumen de los filtros de entrada y los filtros de salida, que opcionalmente se pueden añadir a un inversor dependiendo de su instalación, de la longitud del cable inversor-motor y de los tipos de cable a utilizar.

La figura 11 presenta una tabla donde dependiendo de la longitud del cable inversor-motor propone añadir o no un filtro en la salida (U,V,W) del inversor de tipo dV/dt o senoidal.

La norma IEC TS 60034-25:2014, citada en la tabla, describe las características de rendimiento de corriente alterna en máquinas eléctricas para

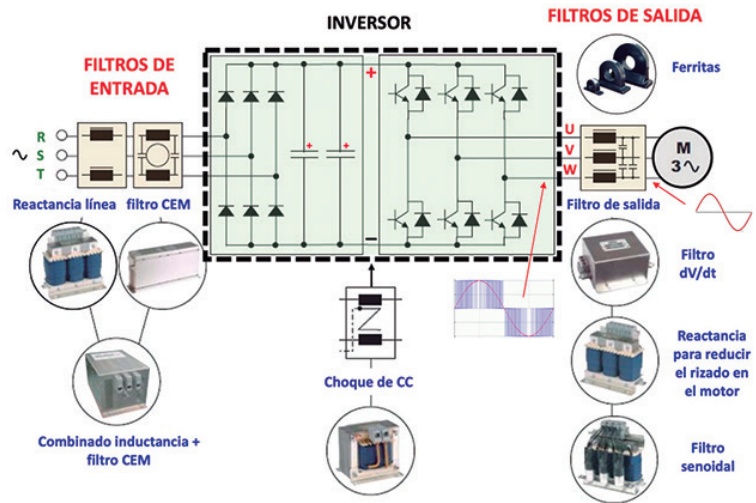


Figura 10. diversas soluciones de filtrado en la entrada, en el bus de corriente continua y en la salida del inversor.

Longitud del cable de motor (cable sin apantallar)	Motor conforme con la norma IEC60034-25	Motor NO conforme con la norma IEC60034-25
1 m < Lm < 50 m	No requiere precauciones adicionales	Filtro dV/dt
50 m < Lm < 100 m	No requiere precauciones adicionales	Filtro senoidal
100 m < Lm < 300 m	No requiere precauciones adicionales	Filtro senoidal
300 m < Lm < 500 m	Filtro dV/dt	Filtro senoidal
500 m < Lm < 1000 m	Filtro senoidal	Filtro senoidal

Figura 11. Filtros a añadir a la salida del inversor, en función de la longitud del cable inversor-motor. La norma IEC TS 60034-25: 2014 describe las características de rendimiento de corriente alterna de máquinas eléctricas para su uso en suministros de convertidores.


su uso junto con inversores. También especifica los parámetros de la interfaz y las interacciones entre la máquina eléctrica y el inversor, incluida la guía de instalación, como parte de un sistema de accionamiento de potencia.

Con cualquier longitud de cable, si aplicamos un filtro senoidal, podremos instalar un cable sin apantallar. Ello nos permitirá alimentar motores para bombas sumergidas sin necesidad de usar un cable apantallado.

No obstante, se debe tener en cuenta que un filtro senoidal solo filtra en modo diferencial, no en modo común.

Conclusiones

Se han presentado diversas metodologías para mitigar las interferencias electromagnéticas en la instalación de los inversores de frecuencia. No es suficiente tener un buen inversor, conforme a la directiva de CEM,

cumpliendo con toda la normativa. Es necesario comprender como se debe realizar una correcta instalación del cableado desde el punto de vista electromagnético. No es suficiente preparar una buena instalación pensando en los 50 Hz de red. Además se debe prever que por esta instalación circularán corrientes y tensiones de alta frecuencia, del orden de los MHz. Solo de esta forma evitaremos tener problemas con las interferencias electromagnéticas. 

REFERENCIAS

- Bodgan M. Wilamonski, J. David Irwin, "The industrial Electronics Handbook, Power Electronics and Motor Drives" CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011
- Gary L. Skibinsky, Russell J. Kirkman, Dave Schelgel, "EMI Emissions of Modern PWM AC Drives", Rockwell Automation, December 1999
- Jaroslaw Luszcz, "motor Cable Effect on the Converter-Fed AC motor Common Mode Current", Gdansk University, 2012
- D. Zhao J.A. Ferreira, H. Polinder, A. Roc'h, and F.B.J. Leferin, "Investigation of EMI Noise Transfer Characteristic of Variable Speed Drive System", Delft University of Technology, 2006
- Adam Kempinski, Robert Smolenski, Ryszard Strzelecki, "Common Mode Current Paths and Their Modeling in PWM Inverter-Fed Drives", University of Zielona Gora, 2002
- Min Zhang, "Demystifying EMC in an Electric Vehicle's Drive Unit", Interference Technology, 2020
- Francesc Daura Luna "El cable entre el inversor y el motor según la CEM". Revista Española de Electrónica, Junio 2020, www.cemdal.com
- Francesc Daura Luna "Las interferencias en los inversores de frecuencia", Revista Española de Electrónica, Octubre 2020, www.cemdal.com
- Francesc Daura Luna, curso "Diseño de máquinas y sus instalaciones y la compatibilidad electromagnética", www.cemdal.com
- Francesc Daura Luna, "El conductor PEC/PEN/CPN y la CEM", Post de diciembre de 2017, www.cemdal.com

leedeo
ENGINEERING
www.leedeo.es

 **CEMDAL**
www.cemdal.com

CONTACTO:
Francesc Daura
fdaura@cemdal.com
Avda. de la Vía Augusta, 15-25
Building B1, 2nd floor
08174, Sant Cugat 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**.