

Un enfoque mejorado para la conexión de variadores de velocidad y motores eléctricos

por Heu Vang y Marco Chiari

Resumen del artículo

Cuando se conectan motores eléctricos a variadores de velocidad deben tomarse algunas precauciones. La longitud del cable de motor puede crear sobretensiones transitorias en el terminal del motor. Este fenómeno ocasiona un envejecimiento prematuro del aislamiento del devanado del motor y, si el sistema no se diseñó adecuadamente, terminará provocando fallos en el motor. Los usuarios finales y consultores tienden a subestimar este problema y por ello no aplican las buenas prácticas del sector y omiten la especificación de medidas correctivas adecuadas. Este White Paper contiene recomendaciones para evitar esta situación potencialmente problemática.

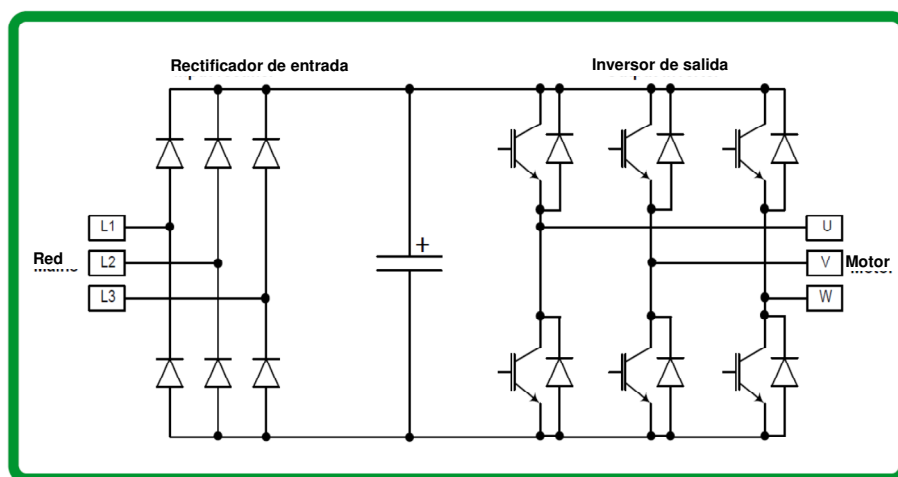
Introducción

La flexibilidad de control, la eficiencia energética y la reducción de costes de mantenimiento son algunos de los beneficios mejor documentados de los variadores de velocidad en entornos industriales. Sin embargo, en instalaciones con cables de gran longitud para la conexión de los variadores de velocidad a los motores puede acelerarse el deterioro del aislamiento del devanado del motor, lo que conducirá a que el propio motor falle. Para comprender los riesgos asociados y las distintas soluciones disponibles para hacer frente a esta situación, en primer lugar es necesario entender las características técnicas de los motores y variadores de velocidad.

Dentro del variador de velocidad se realiza la conversión de la tensión de alimentación de corriente alterna (CA) a corriente continua (CC) mediante el uso de un rectificador. La energía de CC contiene ondulaciones o rizado de tensión que se suavizan mediante condensadores de filtrado. Esta sección del variador de velocidad suele denominarse enlace de CC. La tensión de CC resultante es posteriormente convertida de nuevo en CA (ver **Figura 1**). Esta conversión se realiza habitualmente mediante dispositivos electrónicos de potencia como transistores IGBT, utilizando una técnica denominada modulación de ancho de pulso (PWM). Se efectúa una activación y desactivación alternativa de la tensión de salida a alta frecuencia, a la vez que se controla la duración (o anchura) del pulso para que se aproxime a una forma de onda senoidal. Los avances en la tecnología de componentes de potencia han permitido un incremento en la frecuencia de conmutación y la reducción de las pérdidas de energía. Los transistores IGBT se emplean habitualmente en situaciones caracterizadas por frecuencias de conmutación de hasta 16 kHz y frecuencias de salida del motor de hasta 1 kHz.

Figura 1

Esquema básico de un variador de frecuencia conectado a un motor



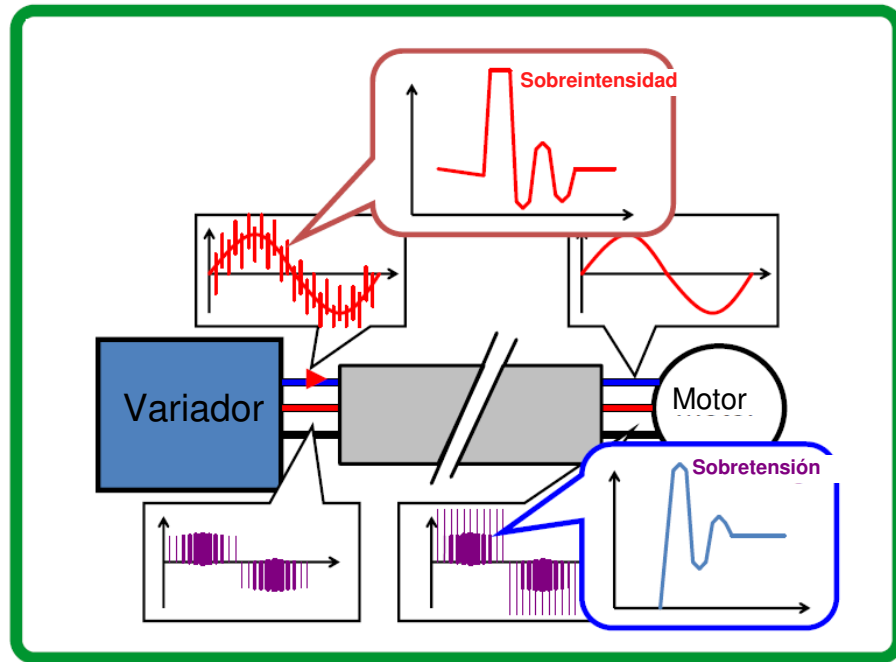
En la mayoría de situaciones, cuanto mayor sea la frecuencia de conmutación menor será el rizado de la intensidad de salida del motor. Para compensar las pérdidas, los IGBT realizan la conmutación a gran velocidad (hasta 1 μ s). La combinación entre esta alta velocidad de conmutación y la utilización de cables de gran longitud entre el variador de velocidad y el motor genera una sobretensión transitoria en la conexión con el terminal del motor. De hecho, esta sobretensión puede llegar a duplicar la tensión suministrada normalmente por el variador al bus de CC (ver **Figura 2**). Este fenómeno puede provocar daños en el devanado del motor.

La sobretensión siempre se produce en el terminal del motor. A continuación se muestran ejemplos del impacto que puede tener la generación de sobretensión y sobreintensidad sobre el sistema:

- **Efectos sobre el variador de velocidad** – El riesgo principal de una situación de sobreintensidad para el variador de velocidad es un fallo por cortocircuito (SCF). El pico de intensidad producido por la conmutación puede ser registrado por los sensores de intensidad del variador y provocar un fallo inesperado. Otra consecuencia de los picos de intensidad capacitiva es un aumento de la temperatura del IGBT proporcional a la frecuencia de conmutación. Este exceso de temperatura reduce la vida útil del variador de velocidad.

Figura 2

El impacto de los cables de motor de gran longitud puede manifestarse en situaciones de sobreintensidad y sobretensión



- **Efectos sobre el armario eléctrico** – Las anomalías resultantes de las interacciones entre el motor y los cables de gran longitud generan la recirculación de corrientes de alta frecuencia a tierra y pueden interferir con dispositivos conectados a la misma red. Una consecuencia habitual de este fenómeno es el disparo de los relés de protección diferencial situados aguas arriba del variador. Las corrientes de alta frecuencia que circulan a través del cable de motor también generan emisiones radiadas que pueden interferir con dispositivos electrónicos situados en las inmediaciones del cable.
- **Efectos sobre el motor** – Las condiciones de sobretensión en el terminal del motor pueden producirse entre dos espiras del motor y generar una descarga parcial y el envejecimiento prematuro del aislamiento del devanado del motor. Esto puede conducir al fallo completo del motor. Debe considerarse que la sobretensión máxima admisible depende de la clase del aislamiento del motor (ver **Figura 4**).

Los usuarios finales y consultores tienden a subestimar este tipo de fenómenos y por ello omiten la especificación de medidas correctivas adecuadas. Aunque permita obtener ahorros a corto plazo evitando el coste adicional de dispositivos suplementarios y opciones de protección, a largo plazo este diseño inadecuado conducirá a la avería del motor o a la interrupción imprevista de las aplicaciones. En aplicaciones críticas como una planta de abastecimiento de agua o una central eléctrica, este nivel de riesgo resulta inaceptable.

Efectos secundarios de los cables de motor de gran longitud

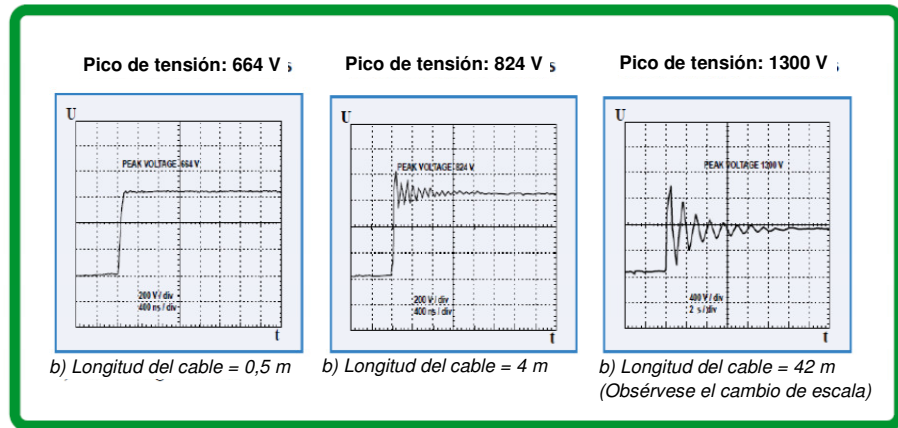
En aplicaciones estándar, se generarán situaciones de sobretensión si el cable de motor excede los 10 metros (32 ft) de longitud. Cuanto más largo sea el cable de motor, mayor será la sobretensión generada (ver **Figura 3**)¹. La utilización de cables apantallados amplificará este efecto negativo. Sin embargo, la sobretensión se ve limitada al doble de la tensión del bus de CC.

El tiempo de subida de tensión en la salida del variador, normalmente denominado dV/dt , genera mayores picos de intensidad transitorios cuanto mayor sea la frecuencia de conmutación. Esto es consecuencia de la capacitancia parasitaria, efecto que se produce cuando dos conductores con potenciales diferentes, como el motor y el cable de motor, se encuentran físicamente próximos uno del otro. Esto hace que resulten afectados por el campo electromagnético del otro conductor y almacenen cargas eléctricas opuestas como un condensador. Estas intensidades transitorias incrementan las pérdidas del variador de velocidad, del motor y del cable.

¹ GAMBICA Association for Instrumentation, Control and Automation, *GAMBICA Technical Report N°1, Second Edition "Variable Speed Drives and Motors, Motor Insulation Voltage Stresses under PWM Inverter Operation"*.

Figura 3

Cuanto mayor sea la longitud de los cables entre el variador y el motor mayor será el pico de tensión en el terminal del motor.

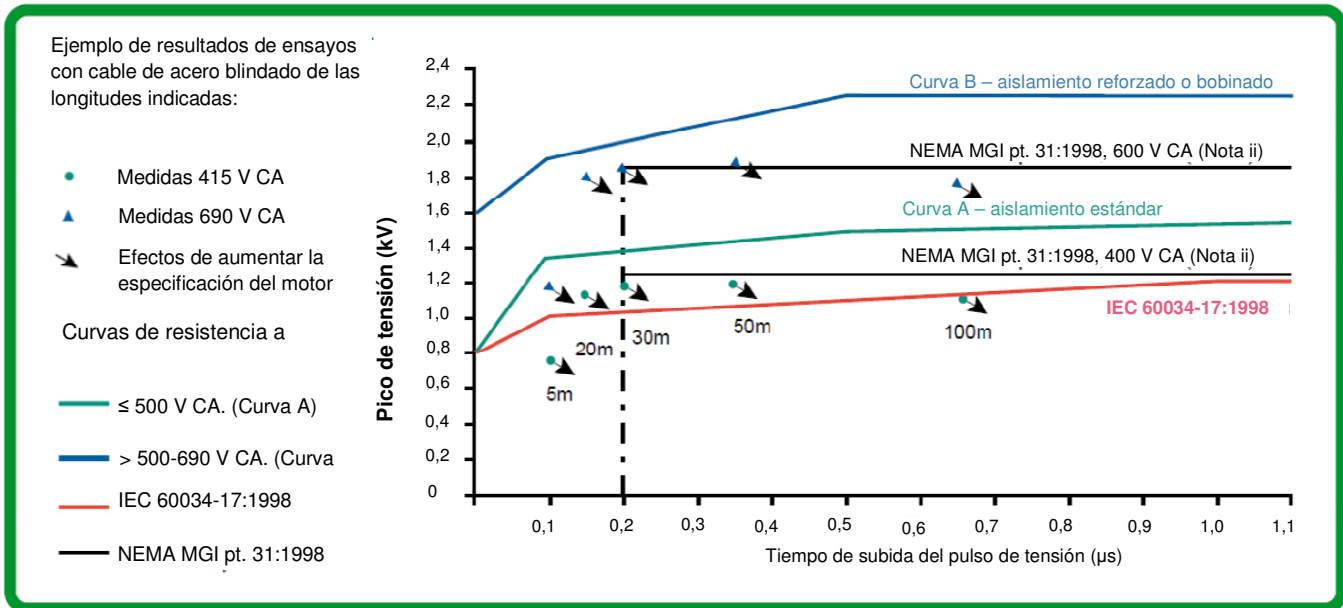


Las normas IEC y NEMA, las especificaciones técnicas y las directrices de uso más habitual para tensiones e intensidades admisibles para distintos tipos de motor se detallan en la **Figura 4**². La sobretensión máxima admisible depende de la clase de aislamiento del motor. Las normas IEC y NEMA relevantes incluyen:

- IEC 60034-17 - Límites de longitud de cables para motores de uso general alimentados por convertidores de frecuencia, motores de 500 V.
- IEC 60034-25 - Límites para motores con convertidores de frecuencia: curva A para motores de 500 V y curva B para motores de 690 V.
- NEMA MG1 - Motores alimentados por inversor con fines específicos.

Figura 4

Límites de longitud de cables para diferentes tipos de motor



Para aplicaciones críticas, deberá especificarse un motor IEC60034-25 clase B o NEMA 600 V. Para reducir el riesgo de fallos del motor cuando se utiliza en combinación con un variador de velocidad, se recomienda un motor IEC60034-25 clase B o NEMA 400 V.

El desgaste de los cojinetes del motor es otro efecto secundario del empleo de variadores de velocidad. Esto se debe a la tensión de modo común generada por el inversor del variador de velocidad (ruido inducido en el cable como resultado de la conmutación) y genera intensidades de alta frecuencia en los

² GAMBICA Association for Instrumentation, Control and Automation, *GAMBICA Technical Report N°1, Second Edition "Variable Speed Drives and Motors, Motor Insulation Voltage Stresses under PWM Inverter Operation"*.

cojinetes del motor. Dependiendo del tipo de motor, y de si el cojinete está aislado o no, pueden producirse tres tipos distintos de bucles de intensidad de modo común en el motor:

1. Un bucle entre los estatores, los devanados y el eje del motor. En este caso la corriente inductiva circula en torno al cojinete dos veces.
2. Un bucle debido a la capacitancia entre el devanado y el eje del motor conectado a tierra por la carga. Este fenómeno puede producirse cuando la puesta a tierra del bastidor no se ha realizado correctamente. La intensidad capacitiva de pulsos circula hasta el cojinete del lado del variador.
3. Un bucle debido a la capacitancia entre el bastidor, el devanado del rotor, el bastidor y el cojinete. En este caso, el bastidor está conectado a tierra correctamente y la intensidad en el cojinete es un porcentaje de la tensión de modo común. La presencia de corriente en el cojinete se produce debido a una descarga electrostática capacitiva.

Medidas preventivas

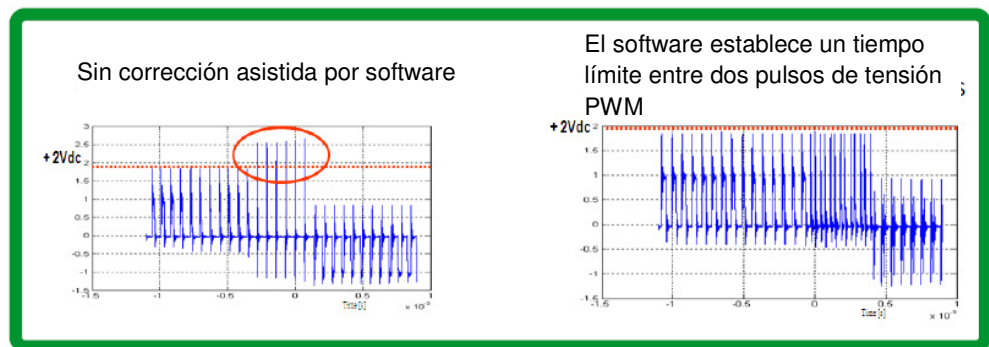
Para limitar el impacto de las sobretensiones y picos de intensidad debería estudiarse el conjunto de opciones disponibles. La viabilidad de cada una de ellas dependerá del entorno de la aplicación.

Protección mediante software

Algunos variadores de velocidad integran software preconfigurado que aumentan la fiabilidad de la solución. Estos variadores de velocidad modernos siempre integran una función de control de motor que imposibilita la "doble transición". Este efecto se produce cuando una fase del motor cambia de CC de signo negativo a CC de signo positivo exactamente al mismo tiempo que otra fase cambia de signo positivo a signo negativo.

Figura 5

Impacto del software en la prevención de una situación de doble transición.



Un pulso PWM demasiado corto en relación a la constante de tiempo del cable puede provocar la superposición de dos oscilaciones, lo que genera una sobretensión superior al doble de la tensión del bus de CC. La tecnología de variadores de velocidad de última generación evita la aparición de situaciones de superposición de reflexiones de tensión estableciendo un tiempo mínimo entre dos pulsos de tensión PWM (ver **Figura 5**). Pese a que el establecimiento de este límite de tiempo empeora ligeramente el rendimiento del variador de velocidad (-3% de par), en condiciones normales el rendimiento general del sistema no se ve afectado.

Reactancia de salida

Las reactancias de salida compensan los cambios rápidos en intensidad y se instalan generalmente en los equipos de accionamiento de motores para limitar la intensidad de arranque. Pueden utilizarse como elemento de protección para los variadores de frecuencia y motores. En esencia, la combinación entre una reactancia de motor y la capacitancia parásita del cable de motor reducirá los valores de dV/dt y los picos de tensión. Este efecto dependerá del tipo y longitud del cable. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que teóricamente las reactancias podrían ampliar la duración de rebasamiento (cuando una señal electrónica excede su objetivo) si se selecciona una reactancia de salida inadecuada.

Filtro de salida dV/dt

Los filtros de salida dV/dt son la solución más rentable para garantizar la protección del motor y reducir el impacto de las sobreintensidades sobre los variadores de velocidad. Estos filtros reducen los valores de dV/dt y minimizan así el efecto de las sobretensiones y capacitancias de fuga entre fases y entre

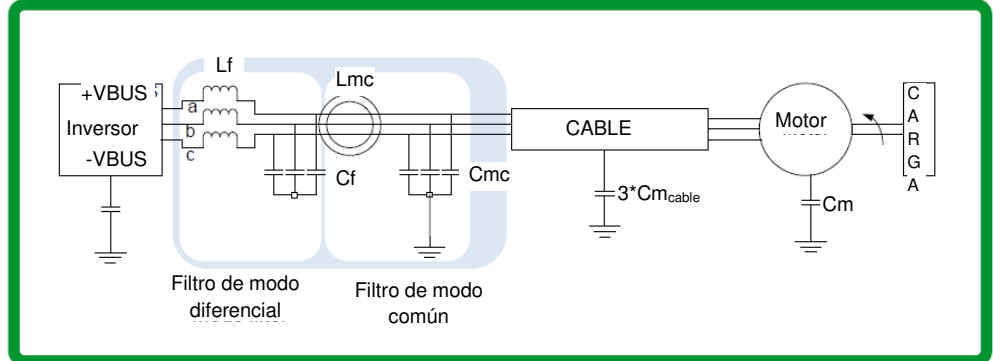


Figura 6

Diagrama del modo de funcionamiento de un filtro senoidal

fase y tierra. También proporcionan flexibilidad, ya que pueden emplearse con la mayoría de motores y cualquier cable (independientemente de su tipo o longitud) sin problemas. Se recomienda utilizar este método si se desconocen las especificaciones de un motor particular.

Filtro senoidal

El diseño específico de un filtro de paso bajo (un filtro electrónico que deja pasar las señales de baja frecuencia y reduce la amplitud de las señales cuya frecuencia supera el umbral de corte), denominado filtro senoidal, permite desviar las intensidades de alta frecuencia. El resultado es que la forma de onda de la tensión en el terminal del motor se convierte en puramente senoidal. El filtro senoidal diferencial permite una completa supresión del efecto de las sobretensiones, y reduce las interferencias de compatibilidad electromagnética (CEM).

Si el filtro senoidal se asocia a un filtro de modo común, es posible eliminar la presencia de corriente en los cojinetes del motor (ver **Figura 6**) y reducir la transmisión de perturbaciones CEM conducidas a la red eléctrica. La combinación de estos dos tipos de filtro representa la solución más sólida para evitar problemas con la conexión de variadores de velocidad y motores. Esta solución también resulta muy rentable si se emplea un cable de motor de gran longitud, ya que no requiere emplear cables apantallados.

Ejemplos de aplicación

Algunas áreas de aplicación están más expuestas a los efectos directos de los fenómenos derivados de la utilización de cables de gran longitud que otras. Por ejemplo, en aplicaciones de izado los motores pasan gran parte de su vida útil en modo de frenado. La energía de frenado es transmitida por los diodos de libre circulación de vuelta al enlace de CC, generando un incremento del 15-20% en la tensión del enlace de CC (y, por lo tanto, un incremento en el pico máximo de tensión del motor).

El efecto es similar al de aumentar la tensión de alimentación en un 20%. En estos casos, una aplicación de 400 V debe tratarse como si estuviese recibiendo 480 V. En aplicaciones en las que varios motores funcionen en paralelo, la longitud apropiada de los cables debe calcularse en base a la suma de todos los cables. Por ejemplo, si tres motores en paralelo están conectados a un único variador de velocidad mediante un cable de 20 metros (66 ft) cada uno, la longitud total a considerar no serán 20 metros, sino 60 metros (197 ft). Deberán tomarse las precauciones adecuadas para proteger el variador de velocidad frente a disparos intempestivos.

Nota: Cuando se calculen longitudes de cables con el propósito de garantizar la protección frente a situaciones de sobretensión, la longitud de los cables apantallados se considerará como el doble de la longitud de los cables sin apantallar. Por ejemplo, un cable apantallado de 100 metros de longitud real pasará a considerarse como equivalente a un cable estándar de 200 m de longitud a efectos de estos cálculos.

Tabla 1

Las medidas preventivas recomendadas dependerán de las características del motor y de la longitud del cableado

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 (66 ft) < Lm < 50 m (164 ft)	No requiere precauciones adicionales	Filtro dV/dt
50 m (66 ft) < Lm < 100 m (328 ft)	No requiere precauciones adicionales	Filtro senoidal
100 m (328 ft) < Lm < 300 m (984 ft)	No requiere precauciones adicionales	Filtro senoidal
300 m (328 ft) < Lm < 500 m (984 ft)	Filtro dV/dt	Filtro senoidal
500 m (328 ft) < Lm < 1000 m (984 ft)	Filtro senoidal	Filtro senoidal

Conclusión

Cuando se emplean variadores de velocidad asociados a motores, la combinación de transistores de conmutación rápida y cables de motor de gran longitud puede generar picos de tensión que pueden llegar a duplicar la tensión del bus de CC. En casos extremos, un nivel tan elevado de picos de tensión podría ocasionar un envejecimiento prematuro del aislamiento del devanado del motor, lo que puede provocar un fallo general del motor. Para garantizar que la vida útil del motor no se vea reducida, pueden adoptarse algunas medidas sencillas:

- Especificación de un motor diseñado para aplicaciones con variadores de velocidad (se recomienda IEC60034-25 B o NEMA 400 V)
- Especificación de un variador de velocidad que integre software para la supresión de la superposición de reflexiones de tensión
- Reducir en lo posible la distancia entre el motor y el variador de velocidad
- Utilizar cables no apantallados siempre que sea posible
- Reducir la frecuencia de conmutación del variador de velocidad (se recomienda una reducción hasta 2,5 kHz)

Si se siguen estas sencillas recomendaciones, es posible utilizar un cable de 300 metros (984 ft) de longitud (o menos) sin necesidad de ninguna opción adicional. Para cables de más de 300 metros (984 ft) de longitud, se recomienda utilizar un filtro de salida dV/dt o un filtro senoidal, dependiendo de las circunstancias. Si se desconoce el nivel de aislamiento del motor (por ejemplo, en aplicaciones de modernización), o si los motores no cumplen los requisitos de las normas aplicables, se recomienda utilizar un filtro de salida dV/dt o un filtro senoidal, dependiendo de la longitud del cable de motor.



Acerca de los autores

Heu Vang es Ingeniero Senior de Conversión de Energía en Schneider Electric. Posee un doctorado en Ingeniería Eléctrica por el INSA de Lyon, Villeurbanne, Francia. Es el jefe del equipo de diseño de sistemas de conversión de energía en los centros de accionamientos de Schneider Electric en Francia y Japón.

Marco Chiari es Especialista Senior en Variadores de Velocidad en la División Industrial de Schneider Electric. Posee una licenciatura en Ingeniería de Software por el Politecnico di Milano. Cuenta con años de experiencia en aplicaciones industriales, especialmente en sistemas de automatización mediante variadores de velocidad. Ha participado en proyectos de redes de automatización industrial mediante bus de campo de la UE. Es el Presidente de Gimelec, una asociación industrial francesa de fabricantes de equipos eléctricos centrada en la gestión inteligente de la energía.