

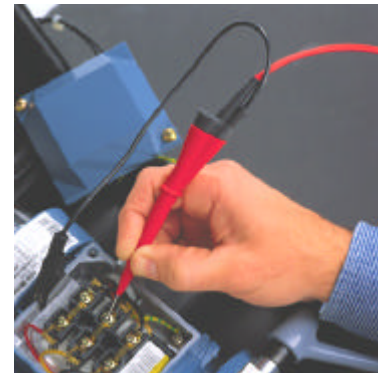
Medidas entre el motor y el variador de velocidad

Nota de aplicación

Como consecuencia del tendido de cable entre el variador de frecuencia y el motor, pueden presentarse problemas tales como la destrucción prematura de bobinados del motor, corrientes de fuga elevadas y destrucción de los cojinetes. Son problemas cada vez más importantes debido, en gran medida, a que los variadores utilizan cada vez frecuencias más elevadas.

Sobretensiones

Tal como se explica en el recuadro adjunto, los tiempos rápidos subida en los pulsos de salida del variador de velocidad, unidos a largos tendidos de cables entre el variador y el motor, originarán sobretensiones que harán que ésta se aproxime al doble de la tensión del bus de CC, ó que supere, incluso, este valor. Para analizar el alcance de este problema se hace imprescindible una herramienta gráfica, con la que poder visualizar la forma de onda de la señal, es decir, un osciloscopio.



Suponiendo que se haya identificado una verdadera sobretensión ó un problema de oscilaciones transitorias, deberá hacerse algo al respecto y actuar de inmediato. La solución más sencilla es acortar la tirada de cable. En la tabla adjunta se muestra la longitud máxima del cable antes de que la tensión de pico se haga superior a 1,15 veces la tensión del bus de c.c. (tensión "segura" mas alta del motor) para diversos tiempos de subida y coeficientes de reflexión (r_L) de 0,8 y 0,9. La tabla sólo muestra donde comienzan las sobretensiones de pico para un tiempo de subida y una longitud de los cables dados. Las sobretensiones de pico seguirán aumentando hasta casi duplicar la tensión del bus de c.c. a medida que el cable se alargue ó el tiempo de subida se haga más rápido. Las tensiones de pico pueden superar, incluso, el doble de la tensión del bus si la tensión reflejada se superpone a la oscilación transitoria existente, debido a la inductancia de fugas distribuida y la capacidad del acoplamiento.

Tiempo de subida del impulso PWM	Longitud en la que la tensión de pico es 1.15 veces superior a la tensión del bus de continua y $r_L = 0.8$	Longitud en la que la tensión de pico es 1.15 veces superior a la tensión del bus de continua y $r_L = 0.9$
0.1 ms	0.85m	0.95m
0.2 ms	1.7 m	1.9 m
0.5 ms	4.3 m	4.9m
0.7 ms	5.8m	6.7m
1 ms	8.5 m	9.5 m
1.5 ms	12.8 m	14m
2 ms	16.8m	19m
3 ms	25.3 m	29m
4 ms	33.8 m	38m
5 ms	42 m	48m
6 ms	50m	57m
7 ms	59m	67m
8 ms	67m	76m
9 ms	76m	86m
10 ms	84m	95 m

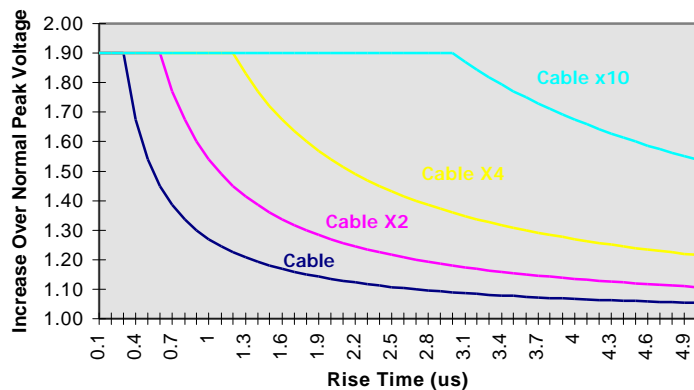
El verdadero peligro de ésta sobretensión es el daño que puede hacer a los bobinados del motor con el transcurso del tiempo, lo que puede no presentarse como problema cuando se instala por primera vez el variador de velocidad PWM. Muchos de estos variadores se instalan sin tener en cuenta los efectos de las sobretensiones producidas por un cable largo entre la salida del variador PWM y el motor. Y, puesto que la mejora del rendimiento en los variadores PWM más recientes y nuevos, se consigue haciendo mas rápidos los tiempos de subida de los pulsos de salida, esto puede empeorar aún más el problema de las sobretensiones y hacer mayor la necesidad de utilizar cableados de menor longitud.

Si el motor ya ha fallado y es necesario repararlo, se debe utilizar hilo con mejor aislamiento, como Thermalze Q^S ó TZ Q^S (de Phelps-Dodge) para rebobinar el motor. Este tipo de hilo proporciona una protección mucho mejor contra sobretensiones sin añadir espesor al aislamiento, lo que permite utilizar el mismo estator sin modificaciones. Si el motor ha sufrido daños irreparables, se debe utilizar un motor diseñado para cumplir las especificaciones NEMA MG-31 (tensión de pico sostenida no superior a 1.600 V y tiempo de subida de 0,1 µs) como motor de sustitución para aplicaciones de variadores de velocidad PWM en las que se puedan producir sobretensiones de forma sostenida.

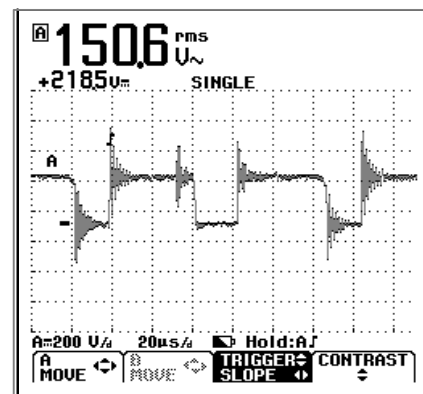
Sobreoscilaciones. Teoría

En la fabricación de los variadores PWM, se ha tendido a que el tiempo de subida de los pulsos sean lo mas cortos posible para reducir así las perdidas de conmutación y aumentar el rendimiento del variador. Sin embargo, estos tiempos cortos unidos a grandes longitudes de cables dan lugar a una falta de correspondencia de impedancias entre el motor y el cable, lo que origina ondas reflejadas u "oscilaciones transitorias", cosa que no ocurre si los tiempos de subida son suficientemente lentos, o si los cables son suficientemente cortos. El principal problema que plantean estas ondas es que el aislamiento de los bobinados del motor se puede deteriorar rápidamente. Además, se pueden desarrollar tensiones en el eje superiores a las normales que pueden dar lugar a un fallo prematuro de los rodamientos y a un ruido en modo común excesivo (corrientes de fuga), que puede interferir con señales de baja tensión y hacer que se disparen los circuitos GFI. La magnitud de la tensión que se refleja en los terminales del motor y retrocede hacia el variador de velocidad para sumarse a la tensión de pico y volver de nuevo al motor; se determina mediante el llamado coeficiente de reflexión, que va en función de la resistencia del motor; la inductancia del cable y la capacidad del cable, según se muestra en la siguiente fórmula:

$$r_L = \frac{R_M - R_C}{R_M + R_C}$$



Efecto de la subida y de la longitud de cable (x2, x4 y x10) en la magnitud de las tensiones reflejadas.



Tensiones reflejadas (sobreoscilaciones transitorias) en el pulso modulado. Gráfica tomada con Scopemeter Fluke 123

dónde r_L es el coeficiente de reflexión de la carga, R_M es la resistencia del motor y R_C es la resistencia característica del cable expresada por la siguiente fórmula:

$$R_C = \sqrt{L / C}$$

La mayoría de motores de menos de 10 CV tienen un coeficiente de reflexión r_L comprendido entre 0,9 y 1,0. Algunos motores de gran potencia pueden tener un coeficiente de reflexión r_L tan baja como 0,80, ó incluso, menos. En las curvas de la figura, se ha utilizado un coeficiente de reflexión r_L de 0,9 para su cálculo.

Hay dos fórmulas distintas para determinar la tensión de pico que se puede esperar en los terminales del motor, dependiendo de que el tiempo de tránsito del pulso, que viaja a la mitad de la velocidad de la luz, sea igual ó superior a un tercio del tiempo de subida (dv/dt) ó inferior a un tercio del tiempo de subida. Examinemos primero cómo se determina el tiempo de tránsito (t_t) en función de la longitud del cable (l_c).

$$t_t = 656 * 10^{-9} * l_c \text{ (m)}$$

Si el tiempo de tránsito del cable es inferior a un tercio del tiempo de subida, hay que utilizar la siguiente fórmula para la tensión de pico V_{pico} :

$$V_{pico} = \frac{3t_t * r_L + 1}{t_t} * V_{DCB}$$

Donde V_{DCB} es la tensión del Bus de continua.

Si el tiempo de tránsito es igual ó superior a un tercio del tiempo de subida, la parte de la primera fórmula de la tensión de pico V_{pico} no se utiliza y el valor se convierte en:

$$V_{pico} = r_L + 1 * V_{DCB}$$

Por ejemplo, con una tensión entre fases de 380 V c.a. con un bus de 513 V c.c., 15 metros de cable y $r_L = 0,9$, el efecto del cálculo de la tensión de pico se podrá ver utilizando dos tiempos de subida distintos (se considera que aproximadamente $V_{cc} = 1,35 * V_{ca}$). Con un tiempo de subida de 0,5 **ms**, el tiempo de tránsito (0,1 **ms**) es menor que un tercio del tiempo de subida (0,16 **ms**), por lo que tendremos que utilizar la primera fórmula de la tensión de pico V_{pico} que tiene en cuenta el efecto del tiempo de subida, y el cálculo se convierte en:

$$\left(\frac{0,3 * 0,9}{0,5} \right) + 1 * 513 \text{ V c.c.} = 790 \text{ V}_{pico}$$

Con un tiempo de subida de 0,1 **ms**, el tiempo de tránsito (0,1 **ms**) es mayor que un tercio del tiempo de subida (0,033 **ms**), por lo que tendremos que utilizar la segunda fórmula de la tensión de pico V_{pico} y el cálculo se convierte en:

$$(0,9 + 1) * 513 \text{ Vc.c.} = 975 \text{ V}_{pico}$$

Identificación de sobreoscilaciones

La figura 1 muestra la medida de la tensión entre fases del variador de velocidad en los terminales del motor con 2 metros de cable, mientras que la figura 2 muestra esa misma tensión con 30 metros de cable. Obsérvese la diferencia en las medidas de las tensiones de pico, que es del orden de 210 V. Obsérvese también que sólo hay una diferencia de 5V eficaces entre las dos formas de onda (los

dígitos pequeños de la pantalla). Esto significa que el voltímetro utilizado no puede detectar este problema. En cualquier caso, conviene saber que muy pocos osciloscopios son capaces de disparar con la facilidad y precisión con que lo hace el ScopeMeter 123 de Fluke para las medidas de Las figuras 1 y 2. Para otros osciloscopios, hay que utilizar el procedimiento que se describe a continuación para medir el alcance de las sobretensiones

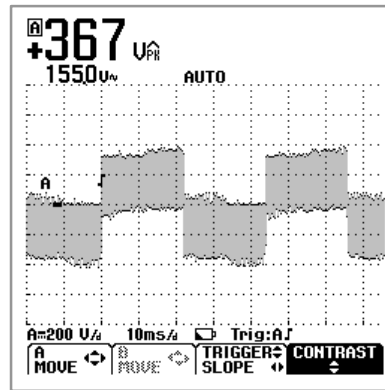


Fig 1.- Señal PWM normal . (Gráfica obtenida con Scopemeter Fluke 123).

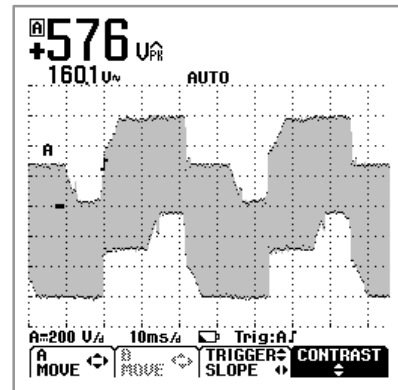


Fig 2.- Sobreoscilaciones debidas a ondas reflejadas. . (Gráfica obtenida con Scopemeter Fluke 123).

Las señales de Las figuras 3 y 4 fueron capturadas disparando sobre un sólo pulso y utilizando el modo de disparo único con cursores activados para hacer la medida de la tensión de pico a lo largo del tiempo de subida. Aunque esta medida requiere más pulsaciones de botones y dominio del osciloscopio, la

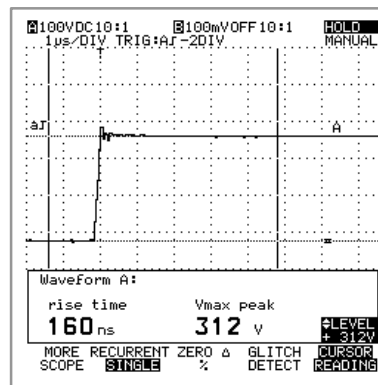


Fig 3.- Flanco de subida de pulso en variador PWM sin tensión reflejada.

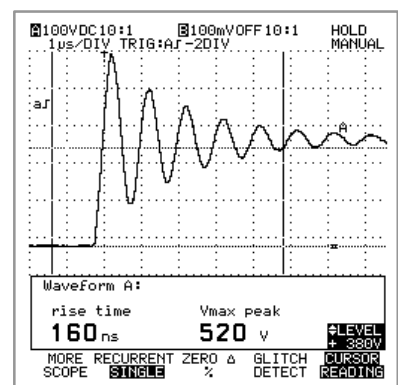


Fig 4.- Flanco de subida de pulso en variador PWM con tensión reflejada. (Sobreoscilaciones transitorias)

medida automática del tiempo de subida, puede merecer esta complicación. Reajustando manualmente, de forma periódica, el momento del disparo único, se obtiene una muestra de distintas tensiones de pico para los distintos pulsos. Además, si se aumenta lentamente la tensión de disparo se obtendrá una idea de cuál es la tensión de pico máxima cuando el osciloscopio deje de disparar.

Cuando no es posible acortar el cableado

Si no es posible acortar el cableado en la instalación de un variador del tipo PWM, puede solucionarse el problema de una de las tres maneras siguientes:

- Puede instalarse un filtro de paso bajo "adicional" externo entre los terminales de salida del inversor PWM y los cables que van al motor, como medio de aumentar el tiempo de subida de los pulsos.
- Otra posibilidad consiste en instalar un filtro adaptado a la impedancia R-C en los terminales del motor para minimizar las sobretensiones o las oscilaciones transitorias.
- En algunas aplicaciones, como en bombas sumergibles o en máquinas de taladrar, no es posible acceder a los terminales del motor y se necesitan otros métodos para minimizar las sobretensiones. Uno de ellos es instalar reactancias en serie entre los terminales de salida del inversor PWM y el cable que va al motor. Aunque ésta es una solución bastante sencilla, las reactancias pueden ser bastante grandes, voluminosas y caras para aplicaciones con motores de gran potencia.

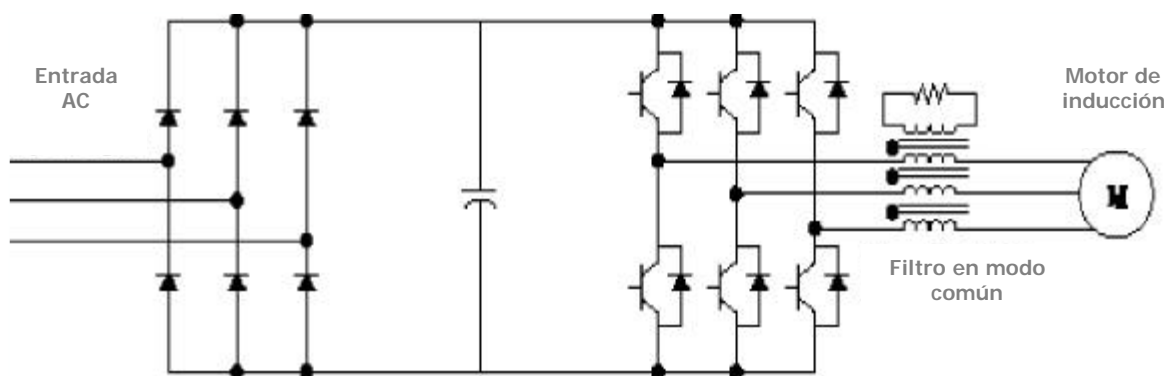


Figura.- Reactancia en modo común con resistencia de amortiguación para reducir la corrientes de fugas.

Filtro de los terminales del motor	Filtro de salida del inversor	Reactancia en serie
Conectado en paralelo a los terminales del motor	Conectado en serie a los terminales de salida del inversor PWM	Conectando en serie a los terminales de salida del inversor PWM
Diseñado de acuerdo con la impedancia característica del cable	Diseñado para aumentar el tiempo de subida (dv/dt) por encima de un valor crítico	Actúa como limitador de corriente y también aumenta el tiempo de subida
No depende de la longitud del cable	Depende de la longitud del cable	Depende de la dimensión del sistema
Las pérdidas son más ó menos fijas	Las pérdidas dependen de la potencia del motor	Las pérdidas dependen de la potencia del motor
El tamaño y el coste son más ó menos fijos	El tamaño y el coste dependen de la potencia del motor	El tamaño y el coste dependen de la potencia del motor

Todas las soluciones sugeridas anteriormente convienen que sean diseñadas e instaladas para cada aplicación por un técnico cualificado.

Nota sobre seguridad: el fenómeno de las tensiones reflejadas puede dar lugar a tensiones de pico 2 a 3 veces superiores a la tensión del bus de c.c. de 513V, ocasionando posibles sobretensiones de pico de 1000-1600V ó, incluso, superiores, dada la variación admisible en +10% de la tensión de línea. Por tanto, se recomienda que la medida de la tensión en los terminales del motor se haga con la sonda que tenga la tensión nominal más alta y durante el menor tiempo posible, en los casos en que sea probable la existencia de tensiones reflejadas.

Corrientes en rodamientos

Cuando las tensiones en el eje del motor son superiores a la capacidad de aislamiento de la grasa de los rodamientos, se producirán descargas eléctricas disruptivas hacia el exterior de los mismos que pueden originar picaduras y ranuras en las pistas de los rodamientos. Los primeros síntomas de este problema será el ruido excesivo y el sobrecalentamiento, a medida que los rodamientos comienzan a perder su forma original y que las partículas metálicas se mezclen con la grasa aumentando el rozamiento en los rodamientos. Esto puede provocar su destrucción al cabo de unos pocos meses de funcionamiento del variador de velocidad y, por tanto, tener un alto coste en reparación y tiempo.

Hay una tensión en el eje, normal e inevitable, creada entre el bobinado del estator y el eje del rotor, debida a pequeñas asimetrías del campo magnético en el entrehierro, que son

inherentes al diseño del motor. La mayoría de los motores de inducción se diseñan para que tengan una tensión máxima en el eje respecto a la tierra de la carcasa inferior a 1V eficaz.

Otras fuentes de tensión en el eje del motor proceden de fuentes electrostáticas internas, entre las que se incluyen los acoplamientos accionados por correas, el aire ionizado que pasa a través de los álabes del ventilador del rotor a la alta velocidad del aire que pasa sobre los álabes del ventilador del rotor, como ocurre en las turbinas de vapor.

Funcionando con corriente sinusoidal de 50 Hz., la tensión de fallo de los rodamientos es de 0,4 a 0,7 V, aproximadamente. Sin embargo, los flancos rápidos de las tensiones transitorias que se encuentran en los variadores PWM, hacen que el fallo de la capacidad aislante de la grasa se produzca realmente a tensiones mas altas, del orden de 8 a 15 V. Esta tensión disruptiva más alta crea descargas eléctricas disruptivas también mas altas en los rodamientos, lo que aumenta los daños en los mismos en un periodo de tiempo más breve. Las investigaciones realizadas en este campo muestran que tensiones en los ejes por debajo de 0,3 V son seguras y no alcanzan el valor necesario para que se produzcan corrientes destructivas en los rodamientos. Sin embargo, tensiones comprendidas entre 0,5 y 1,0 V pueden dar lugar a corrientes perjudiciales para los rodamientos (>3 A), y tensiones en el eje superiores a 2 V pueden destruirlos.

Al hacer esta medida con un osciloscopio hay que tener cuidado, ya que la punta de la sonda tiene que hacer contacto con el eje del motor en movimiento mientras el terminal común esta conectado a la tierra de la carcasa del motor. Puesto que las tensiones en el eje son debidas a tiempos rápidos de subida de los impulsos del variador PWM, las tensiones aparecerán como picos independientes y se deben medir utilizando un osciloscopio y no un multímetro digital. Aunque el multímetro digital tenga capacidad de detección de picos, habrá suficientes variaciones entre los picos como para hacer que la medida no sea fiable. Otro consejo para la medida es hacer la medida de la tensión entre el eje y la tierra de la carcasa después de que el motor haya alcanzado la temperatura de régimen normal, ya que es posible que las tensiones en el eje no estén ni siquiera presentes cuando el motor esta frío. La solución más sencilla a este problema es reducir la frecuencia de la portadora a menos de 10 kHz ó, de modo ideal, a 4 kHz, aproximadamente, si es posible. Si la frecuencia de la portadora ya se encuentra en esta zona, se pueden utilizar soluciones alternativas, tales como la utilización de dispositivos de conexión a tierra del eje, el aislamiento de los rodamientos, pantallas de Faraday en el motor, grasa conductora, el uso de rodamientos cerámicos o el filtrado entre el variador de velocidad y el motor.

Corrientes de fuga

Las corrientes de fuga (ruido en modo común) acopladas capacitivamente entre el bobinado del estator y el terminal de tierra de la carcasa aumentan con los variadores PWM, ya que la reactancia capacitiva del aislamiento del bobinado se reduce con la salida de alta frecuencia del variador. Por tanto, los tiempos de subida más rápidos y las frecuencias de conmutación mas altas lo único que hacen es agravar el problema. También se debe tener en cuenta que el aumento potencial de las corrientes de fuga justifica el examen atento de los métodos establecidos de conexión a tierra segura de la carcasa del motor. El aumento de las corrientes de fuga puede también dar lugar a disparos intempestivos y molestos de los relés de protección contra fugas a tierra.

Se puede utilizar una reactancia de modo *común*, junto con una resistencia amortiguadora, para reducir las corrientes de fuga. También se pueden utilizar cables especiales de supresión de las interferencias electromagnéticas entre la salida del variador y los terminales del motor. Los hilos conductores de cobre del cable se recubren con gránulos de ferrita que absorben la energía de RF y la convierten en calor. Los transformadores de aislamiento en las entradas de c.a. también reducen el ruido de modo común.

Por J. David Rodríguez

Fluke Ibérica - División Industrial

Adaptación libre de la Nota de aplicación de Fluke Corporación "Medida en variadores de velocidad con multímetros Fluke"