

# Medidas de la tensión de salida en variadores de velocidad para motores con osciloscopios digitales ScopeMeter® Serie 190 de Fluke

La utilización de variadores de velocidad para motores, también llamados "inversores de frecuencia", se está extendiendo considerablemente en las instalaciones industriales. Durante los procesos de instalación y mantenimiento, las medidas de las tensiones de salida suelen dar resultados imprevistos. ¿Por qué ocurre y qué se puede hacer para solucionarlo?

## Variadores de velocidad

En general, la maquinaria eléctrica conectada directamente a un sistema de alimentación monofásico o trifásico dispone de un rango muy limitado o incluso nulo para controlar la velocidad. La solución puede pasar por una caja de engranajes externa, pero es pesada, ruidosa, cara y sometida al desgaste.

Los nuevos dispositivos semiconductores con capacidad para manejar tensiones y corrientes elevadas han abierto las puertas al diseño de variadores de velocidad o "inversores de frecuencia". Estos dispositivos ofrecen mayor flexibilidad para el control de la velocidad, reducen las pérdidas eléctricas y pueden funcionar con par constante con independencia de la velocidad rotativa real de la máquina.

Por todo ello, la utilización de variadores de velocidad se está extendiendo considerablemente en las instalaciones industriales, donde ofrecen numerosas ventajas como las relacionadas a continuación:

- Eliminación del desgaste provocado por máquinas asíncronas,
- Control efectivo
- Alta eficiencia energética.



Sin embargo, durante la instalación y el mantenimiento se obtienen medidas con resultados inesperados. A continuación exponemos las razones que explican estos resultados y cómo resolverlos con los osciloscopios digitales ScopeMeter Serie 190 de Fluke.

## Generación de una salida de frecuencia variable

Existen varios métodos para generar la salida de frecuencia variable. Los primeros diseños fueron los convertidores de energía autorregulados o de sincronización mecánica mediante tiristores. Estos dispositivos se siguen utilizando hoy día en variadores de velocidad de alta potencia, si bien ya es posible encontrar mejores alternativas para aplicaciones de menor potencia.

Los tiristores o rectificadores controlados de silicio (SCR) solo se pueden desactivar cuando la corriente de alimentación pasa por cero, de ahí que la tensión de salida de estos convertidores no muestre una onda sinusoidal continua sino discontinua (como se puede ver en la figura 1).

En este contexto, si se cambia el ángulo de fase de la discontinuidad, la potencia de salida se puede controlar eficazmente y utilizarse para variar la velocidad de la máquina mientras se reduce la potencia mecánica disponible. Sin embargo, estos convertidores no permiten modular aleatoriamente la forma de onda de salida. Para resolver esta carencia, se han probado añadiendo otros circuitos pero esta solución resulta costosa y no tan eficaz como cabría esperar.

Con la aparición de los semiconductores de potencia controlados por puerta surge un método de control completamente nuevo para los variadores de velocidad. Estos semiconductores se pueden activar y desactivar, por lo que resultan idóneos para "trocear" señales en sistemas de CC. La figura 2 indica la estructura básica de estos variadores.

La entrada de alimentación monofásica o trifásica se conecta a un conjunto de rectificadores que alimenta un bus interno de CC. La tensión CC se almacena en un condensador de gran capacidad cargado con la tensión  $U_b$ :

$$U_b = \sqrt{2} \cdot U_{\text{alimentación}} \approx 1,41 \cdot U_{\text{alimentación}}$$

A continuación, la tensión CC se aplica a una serie de interruptores dobles que van alimentando cada una de las tres conexiones de la máquina a la línea del bus positivo o negativo. Además, los interruptores pueden estar en modo inactivo (es decir, no conductor) y mantener eficazmente la tensión flotante en el conector de la máquina al que estén conectados.

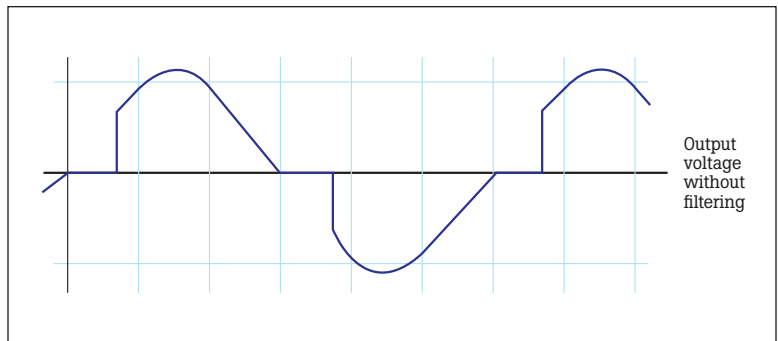


Figura 1: Tensión de salida de convertidores basados en SCR. La tensión de salida sin filtrar es claramente discontinua.

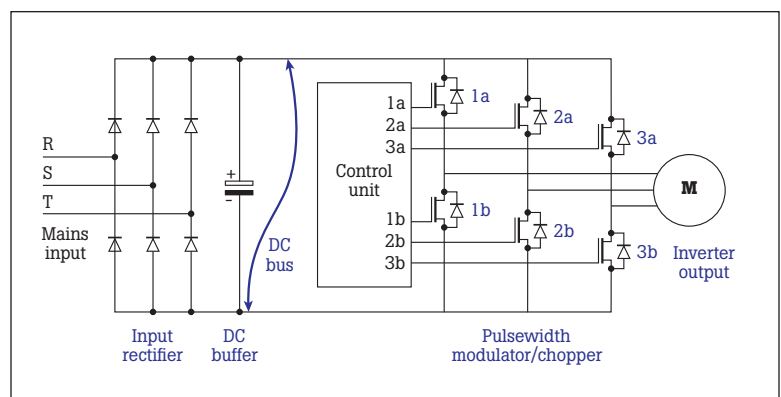


Figura 2: Estructura básica de un variador de velocidad.

Los interruptores están controlados por una unidad central de control que genera los pulsos para activar cada uno de los seis interruptores en el momento oportuno. La velocidad se puede variar y ésta determina a frecuencia de salida. El orden en que reciben pulsos las tres salidas describe la dirección de rotación de la máquina.

La unidad de control se configura para que la frecuencia de salida pueda variar en un amplio rango y, debido a que la velocidad de rotación de la máquina depende directamente de la frecuencia del suministro, la velocidad se podrá controlar sin ningún tipo de problema.

La figura 3 muestra las tensiones de salida resultantes de cada una de las tres líneas de salida. En cada conexión de la máquina, se aprecia un pulso positivo, un intervalo durante el cual la conexión no recibe alimentación y, a continuación, un pulso negativo seguido de otro intervalo en el que no se aplica tensión para la generación de pulsos.

En este sencillo supuesto, la tensión de salida alimentada de cada una de las conexiones es de  $+1/2 U_b$  o cero (flotante) o  $-1/2 U_b$ , donde  $U_b$  es la tensión del bus. Obsérvese que, al estar conectadas las tres salidas de igual forma, el valor medio de cada línea de salida equivale a la mitad de la tensión del bus  $CC$ .

Si aplicáramos la forma de onda anterior a un filtro paso bajo, el resultado simularía una onda sinusoidal con la misma frecuencia fundamental que la onda cuadrada producida por el circuito de control (ver la figura 4). No obstante, los filtros paso bajo capaces de admitir los niveles de energía presentes en los variadores de velocidad son instrumentos pesados y costosos. Por este motivo se han desarrollado soluciones alternativas.

### La alternativa a los filtros paso bajo

La alternativa a los filtros paso bajo ha surgido de otro avance en la electrónica de potencia. En los sistemas reales, los pulsos negativos y positivos no suelen producirse mediante la generación de un solo pulso de la polaridad deseada. Al contrario, todos los pulsos se generan activando y desactivando repetidamente el mismo interruptor a una velocidad de pulsos mucho mayor y con un ciclo de trabajo variable de activación/desactivación (ver la figura 5).

El truco ahora consiste en cambiar el ciclo de trabajo de tal forma que la corriente (no la tensión) que circula por el devanado de la máquina tenga una forma de onda sinusoidal. Como consecuencia, la inducción de los devanados hace las veces de filtro paso bajo, donde la modulación por ancho de pulso de la tensión da como resultado una forma de onda sinusoidal de la corriente.

En la figura 5, la curva superior muestra la tensión de salida para una sola línea de salida en la que se distingue claramente el efecto de la variación del ciclo de trabajo. La curva inferior muestra la tensión de salida efectiva por ciclo ( $T$ ) para cada ciclo del reloj interno  $T$  en una escala relativa.

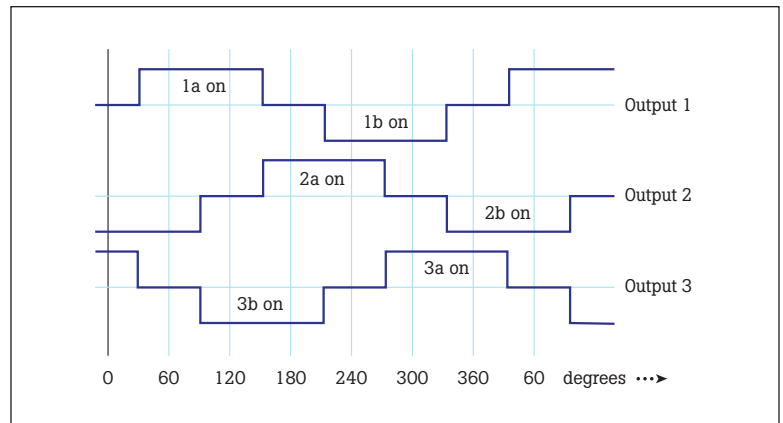


Figura 3: Tensión de salida para cada línea de salida.

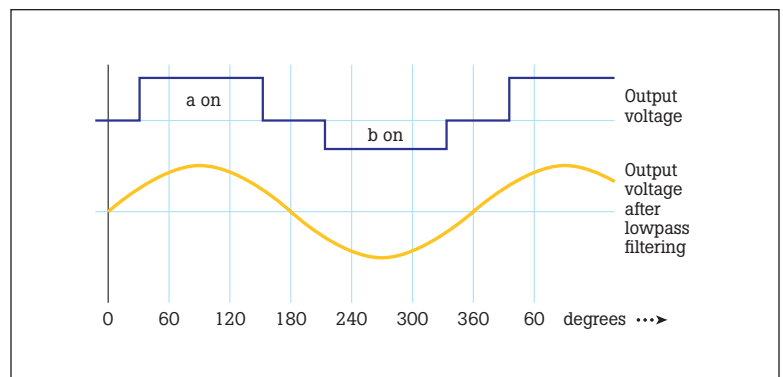


Figura 4: Tensión de salida directa y por filtro paso bajo.

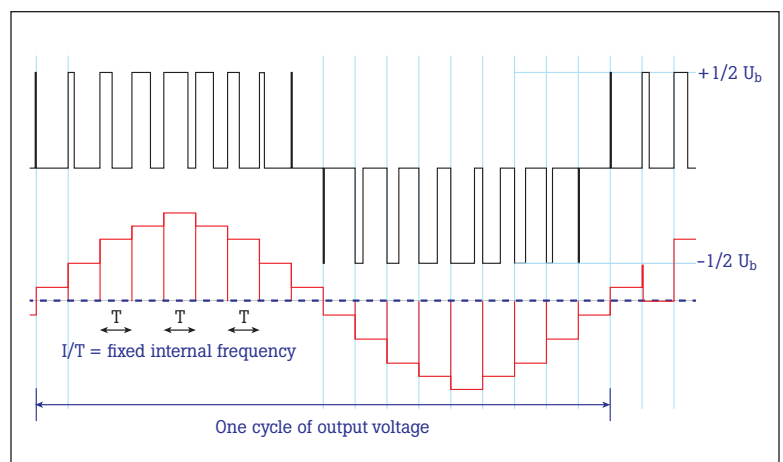


Figura 5: Tensiones de salida del variador por modulación de ancho de pulso (simplificado).

Del gráfico se puede concluir que la tensión de salida efectiva tiene una forma de onda sinusoidal. Ahora bien, la tensión de salida real del variador de velocidad se parece mucho más a la curva superior. Al contrario que los circuitos SCR mencionados anteriormente, la circuitería de control ahora se puede utilizarse en modo conmutado en todo momento, por lo que las pérdidas de energía en los interruptores del semiconductor son mínimas, lo cual permite que el módulo de control funcione con un nivel óptimo con elevada energía y una baja generación de calor.

### Medidas de tensión

A pesar de los evidentes avances en la eficiencia y versatilidad del control de velocidad, los técnicos responsables de la instalación o el mantenimiento de estos variadores siguen enfrentándose a una dificultad.

La tensión de salida se genera para producir una corriente con forma de onda sinusoidal a través de una carga inductiva, pero la tensión aplicada tiene una forma de onda totalmente distinta. Por tanto, al realizar medidas directas de la tensión de salida, se podrían obtener resultados imprevistos porque, al contrario que en la maquinaria eléctrica, el multímetro de tensión responderá a la tensión de salida sin filtrar.

Esto se debe tanto a la forma de onda de la tensión como a las características del diseño de los multímetros digitales. Por lo general, estos instrumentos se diseñan para medir la amplitud de una onda sinusoidal en la frecuencia de alimentación; es decir, en los valores de 50 o 60 Hz. Como contraposición, la tensión de salida del variador de velocidad es una onda cuadrada de alta frecuencia y su ciclo de trabajo varía continuamente. Sin embargo, la amplitud máxima de la onda cuadrada es fija. Y por último, son dos las polaridades que hay que tener en cuenta.

Los multímetros están diseñados en su mayoría para responder a la tensión máxima, de pico a pico o a su valor medio aplicado. A continuación se calibran para leer la amplitud efectiva de la onda sinusoidal. Además, cuando se utilizan para medidas de tensión CA, una gran parte de estos instrumentos cuenta con un rectificador de doble onda en la entrada para asegurar que las tensiones de distinta polaridad contribuyen por igual a la lectura.

Si observamos la tensión de salida de la figura 5, la tensión media por ciclo T (tras la rectificación) es directamente proporcional al ciclo de trabajo de la forma de onda y a la tensión de conexión CC, por lo que los cambios constantes en la misma obedecen a la variación en el ciclo de trabajo. En la mitad de un ciclo de la corriente resultante, la tensión media será:

$$U_{media} = d * U_{máxima} = d * ( 1/2 U_b )$$

Donde: d = ciclo de trabajo, que varía del 0 al 100 %.

El resultado es una lectura en voltios que podría diferir considerablemente del valor previsto en los terminales de la máquina, según lo observado, por ejemplo, en una pantalla integrada en el propio variador que lea la tensión de salida efectiva calculada por los controles electrónicos internos.

Para ilustrar todo lo anterior, probamos varias marcas y modelos de multímetros en las mismas condiciones y con el variador configurado de igual forma en todos los casos. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 1 y son realmente dispares: desde 143 V hasta 1000 V.

Multímetro digital modelo	Lectura (VCA)
1	1001 V
2	154,2 V
3	157,6 V
4	170,1 V
5	187,1 V
6	193,6 V
7	204,3 V
8	215,3 V
9	237,93 V
3	254 V
Fluke 41B	143V
Fluke 43B	143,3 V
Serie 190 de Fluke	144 V

Tabla 1: Lectura de tensión CA utilizando diversos multímetros digitales

## Realización correcta de las medidas

La forma correcta de calcular la tensión de salida para esta situación concreta es tener en cuenta la aplicación específica del variador.

La maquinaria eléctrica obtiene potencia de la corriente circulante por el devanado, mientras que la tensión aplicada se destina principalmente al flujo de la corriente. Teniendo en cuenta este hecho, los variadores de velocidad aplican una tensión discontinua de alta frecuencia para producir una corriente con forma de onda sinusoidal. Esta corriente pasa por los devanados de la máquina con una frecuencia regulada por la unidad de control y la polaridad de la tensión conmutada.

Por tanto, si deseamos conocer la tensión de salida efectiva del variador, debemos considerar únicamente la componente de la frecuencia fundamental de la tensión aplicada.

Este valor se puede obtener tras numerosas medidas de la tensión aplicada y mediante la generación de un gráfico detallado de la forma de onda de la tensión en la memoria digital del instrumento, donde puede calcularse y mostrarse la amplitud de la componente de la frecuencia fundamental.

Esto es exactamente lo que hacen los tres últimos instrumentos de la tabla 1, incluyendo los instrumentos de medida ScopeMeter Series 190B y 190C de Fluke, en los cuales las tensiones de entrada se digitalizan a una alta velocidad de muestreo y una imagen digital de la forma de onda se almacena en la memoria para un análisis más exhaustivo.

Para ello, los instrumentos de medida ScopeMeter Serie 190 cuentan con una función exclusiva para la medida de la tensión ("medidas Vpwm") que les permite analizar la señal digitalizada y calcular la frecuencia fundamental. Esto dará como resultado la misma forma de onda que la producida por la corriente de salida del variador. A partir de esta forma de onda se calcula el valor efectivo para mostrarse como lectura Vpwm.

La figura 6 muestra la pantalla del ScopeMeter con la amplitud pico a pico y la tensión de salida efectiva de un variador representadas como pequeños recuadros en la parte superior de la pantalla.

La frecuencia de salida efectiva de la forma de onda visualizada se puede determinar fácilmente en este ejemplo: un ciclo sencillo ocupa aproximadamente 6,3 divisiones, la base de tiempos se ha ajustado a 5 ms, por lo que un ciclo sencillo tarda unos 31,5 ms. La frecuencia de salida será entonces  $1/31,5 \text{ ms} = 32 \text{ Hz}$ .

Si lo desea puede utilizar los cursores para marcar un ciclo de esta forma de onda de salida.

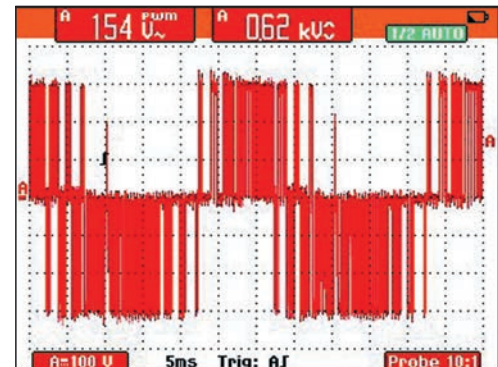


Figura 6: Medida de la potencia de salida en variadores con el Fluke 199C.

## Conclusión

Los variadores de velocidad ofrecen numerosas ventajas a los diseñadores, instaladores y usuarios de maquinaria industrial. Para el técnico de mantenimiento y instalador, la dificultad subyace en la medida de las tensiones de salida. Solo un equipo de medida especialmente preparado para comprobar estas tensiones de salida se obtendrán lecturas fiables y coherentes con la lectura realizada en el propio variador.

El ScopeMeter Serie 190 de Fluke resulta especialmente indicado para los trabajos de instalación y mantenimiento de estos variadores de velocidad y está dotado de todas las funciones de medida necesarias.

**Fluke.** *Manteniendo su mundo en marcha.*

### Fluke Ibérica, S.L.

Avda de la Industria, 32  
Edificio Payma  
28108 Alcobendas (Madrid)  
Spain  
Tel: 91 4140100  
Fax: 91 4140101  
E-mail: info.es@fluke.com  
Acceso a Internet: www.fluke.es

©2005, 2016 Fluke Corporation. Reservados todos los derechos. Información sujeta a modificación sin previo aviso.  
11/2016 2543358b-spa

No se permite ninguna modificación de este documento sin permiso escrito de Fluke Corporation.