

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

Nota de aplicación

La utilización de variadores de velocidad o "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 esto y qué se puede hacer para solucionarlo?

Variadores de velocidad

En general, la maquinaria eléctrica conectada directamente a un sistema de alimentación monofásica o trifásica dispone de un intervalo muy limitado o incluso nulo para controlar la velocidad. Frente a esta situación, un motor externo puede ser una alternativa, pero se trata de una máquina pesada, ruidosa, cara y que quedará expuesta al desgaste.

Los nuevos dispositivos semiconductores con capacidad para manejar elevadas tensiones y corrientes han abierto las puertas para el 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 a un par constante con independencia de la velocidad de rotación 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 por la utilización de máquinas asíncronas
- control eficaz
- funcionamiento óptimo para niveles de elevada energía

No obstante, durante los procesos de instalación y mantenimiento, las medidas de las tensiones de salida suelen dar resultados impredecibles. A continuación, exponemos las razones de estos resultados y la forma en que el ScopeMeter serie 190 de Fluke puede medirlos.

Generación de tensión de salida de frecuencia variable

Son varios los métodos para generar tensión de salida de frecuencia variable. Los primeros dispositivos diseñados al efecto fueron los convertidores de energía autorregulados o de sincronización mecánica por tiristores. Estos dispositivos siguen utilizándose hoy día en inversores de frecuencia de alta potencia, si bien ya es posible encontrar mejores alternativas para aplicaciones de menor potencia.

Los tiristores o rectificadores controlados de silicio (SCR) sólo se pueden desactivar cuando la corriente de alimentación pasa por el valor cero, de ahí que la tensión de salida de estos convertidores no muestre una onda sinusoidal continua sino discontinua (como se aprecia 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 cambiar 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 circuitos adicionales, pero ésta se presenta como una solución costosa que no resulta todo lo eficaz que cabría esperar.

Con la aparición de los semiconductores 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 "recortar" señales en los sistemas de CC. La figura 2 ejemplifica la estructura básica de estos variadores.

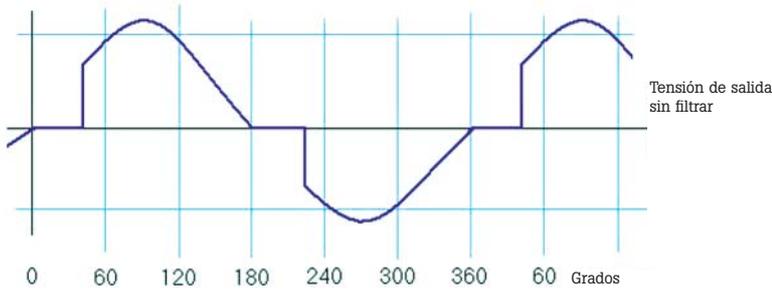


Figura 1: Tensión de salida de convertidores de tipo SCR. La tensión de salida sin filtrar es claramente discontinua.

La entrada de alimentación monofásica o trifásica se conecta a un conjunto de rectificadores que alimenta una conexión CC interna. La tensión CC se almacena en un condensador de gran capacidad energizado con tensión de conexión:

$$U_b = \text{alimentación} \sqrt{2} \approx \text{alimentación} \cdot 1.41 \cdot U$$

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 en el terminal de conexión 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.

Una unidad de control central activa cada uno de los seis interruptores en el momento oportuno mediante la generación de pulsos. Las variaciones en la velocidad de conmutación determinan la frecuencia de salida y 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, ya 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 conexiones de salida. En las conexiones 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 $-1/2 U_b$, siendo U_b la tensión de conexión. Observe que, al estar conectadas las tres salidas de igual forma, el valor medio de cada una es la mitad de la tensión de conexión 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 (consulte 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.

Es por ello que ya han aparecido 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 una determinada polaridad. 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 de activación/desactivación variable (consulte la figura 5).

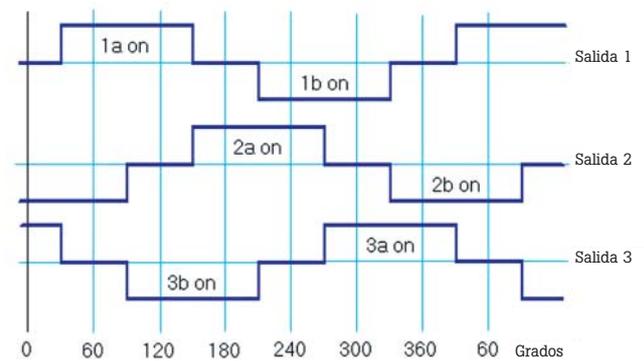


Figura 3: Tensión de salida para cada conexión de salida individual.

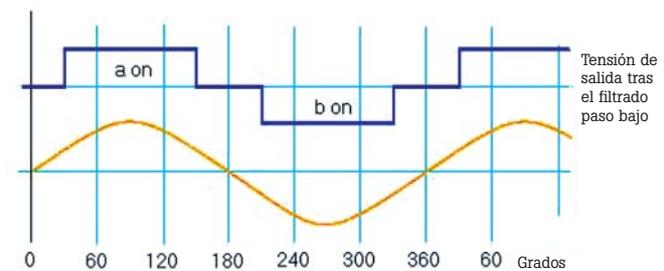


Figura 4: Tensión de salida directa y por filtro paso bajo.

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, el carácter inductivo 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.

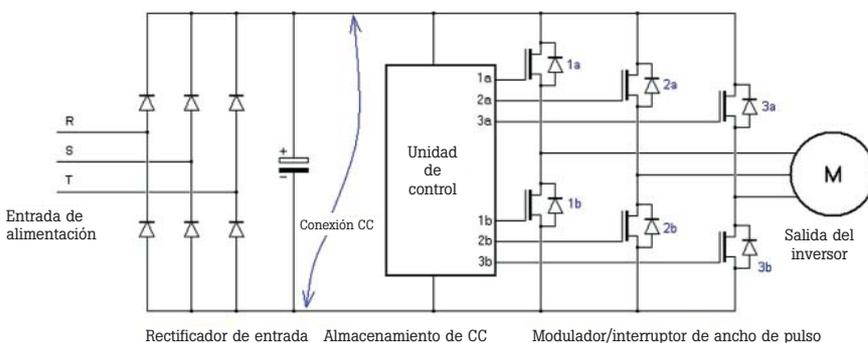


Figura 2: Estructura básica de un variador de velocidad.

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

al contrario que en la maquinaria eléctrica, el voltímetro 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

En la mitad de un ciclo de la corriente resultante, la tensión media será:

$$U_{med} = d * U_{m\acute{a}x} = d * (1/2 U_b)$$

Donde: d = ciclo de trabajo, que oscila 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.

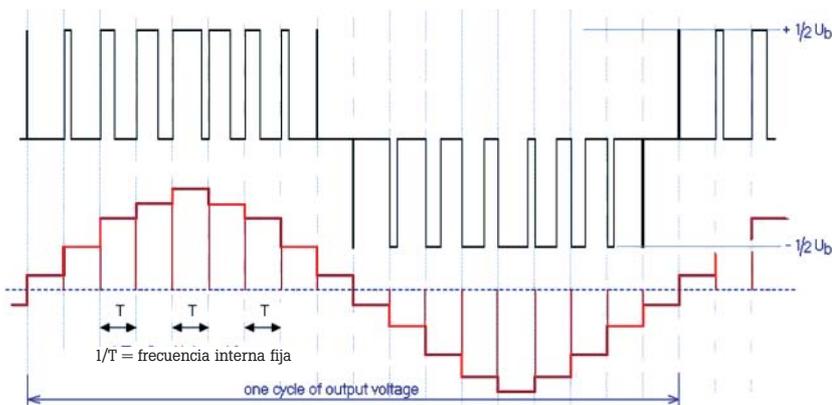


Figura 5: Tensiones de salida de variador por modulación de ancho de pulso (simplificado).

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 asemeja mucho más a la curva superior. Al contrario que los circuitos SCR mencionados anteriormente, los de generación de pulsos pueden ya utilizarse en modo conmutado en todo momento, por lo que la pérdida de energía en los interruptores del semiconductor es mínima, el variador funciona a un nivel óptimo con elevada energía y la generación de calor es inferior.

Medidas de la tensión

A pesar de los evidentes avances en la eficacia 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,

diseñan para medir la amplitud de una onda sinusoidal en la frecuencia de alimentación; es decir, en los valores de 50 ó 60 Hz. Como contraposición, la tensión de salida del variador de velocidad es una onda cuadrada de alta frecuencia y su ciclo de trabajo cambia 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.

La mayoría de multímetros están diseñados para responder a la tensión máxima, de pico a pico o media aplicada. Cuando se utilizan para medidas de la 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.

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
10	254 V
Fluke 41B	143V
Fluke 43B	143.3 V
Serie 190 de Fluke	144 V

Tabla 1: – Lectura de la tensión CA con varios multímetros digitales

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 1 y son realmente dispares: desde 143 V hasta 1.000 V.

The measured results, given in table 1, range from 143 V up to 1000 V!

Realización de medidas correctas

La forma correcta de medir 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 precisamente lo que sucede en los tres últimos instrumentos de la tabla 1, incluidos los ScopeMeter series 190B y 190C de Fluke, en los que 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 ScopeMeter de la serie 190 cuentan con una función exclusiva

para la medida de la tensión ("medidas V^{pwm} ") 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 V^{pwm} .

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 cuadros en la parte superior.

La frecuencia de salida efectiva de la forma de onda visualizada se puede determinar fácilmente en este ejemplo:

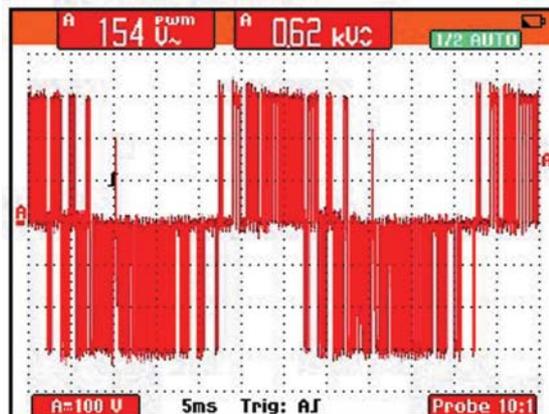


Figura 6: Medida de la potencia de salida en variadores con el Fluke 199C

un ciclo sencillo ocupa aproximadamente 6,3 divisiones, la base de tiempos es de 5 ms por lo que un ciclo sencillo tarda unos 31,5 ms. La frecuencia de salida será $1 / 31,5 \text{ ms} = 32 \text{ Hz}$.

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

Conclusión

Los variadores de velocidad ofrecen numerosas ventajas a los diseñadores, instaladores y usuarios de maquinaria industrial. Para el técnico de mantenimiento y el encargado de la instalación, la dificultad subyace en la medida de las tensiones de salida. Sólo con un equipo de medida preparado específicamente para estas tensiones de salida se obtendrán lecturas fiables, afines a la lectura calculada 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.
 Polígono Industrial de Alcobendas
 C/Aragoneses, 9 post
 28108 Alcobendas
 Madrid
 Tel.: 914140100
 Fax: 914140101
 E-mail: info.es@fluke.com

Web: www.fluke.es