

Verificación de la secuencia de fases y del equilibrio en sistemas trifásicos con los ScopeMeter de Fluke

Por Ignacio Usunáriz

Fluke Ibérica, S.L.
Para obtener más información, visite la Web: www.fluke.es

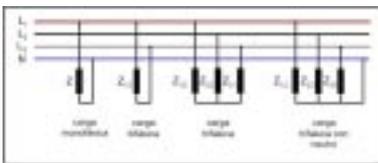
La adecuada conexión de las cargas trifásicas y la distribución compensada de las mismas, son condición sine qua non para la correcta explotación de los sistemas trifásicos

Por razones de economía, la energía eléctrica se produce y transporta mediante tres conductores eléctricos, llamados *conductores de línea*, que conforman lo que se denomina un sistema trifásico. La tensión definida entre cualquier par de estos tres conductores recibe el nombre de *tensión de línea*.

En ocasiones, a nivel de distribución, y a menudo en el consumo, el sistema trifásico puede incorporar un cuarto conductor, llamado *neutro*, que se utiliza como referencia de tensión de 0 V para las tres tensiones activas. La tensión definida entre cualquier conductor activo y el neutro recibe el nombre de *tensión de fase*. A nivel de consumo, es habitual que los sistemas trifásicos con conductor neutro puedan alimentar indistintamente cargas trifásicas a 400 V_{AC}, utilizando los tres conductores de fase, cargas bifásicas a 400 V_{AC}, utilizando dos conductores de fase, y cargas monofásicas a 230 V_{AC}, utilizando un conductor de fase y el neutro (ver figura 1).

Figura 2. Formas de onda y diagrama fasorial para un sistema trifásico de 3 conductores y secuencia

Figura 1. Tipos de cargas en un sistema trifásico.



La correcta explotación de los sistemas trifásicos requiere la adecuada conexión de las cargas trifásicas a la alimentación -respetando lo que se denomina *secuencia de fases*- y la distribución compensada o *equilibrada* de todas las cargas, ya sean monofásicas, bifásicas o trifásicas, entre las tres fases disponibles.

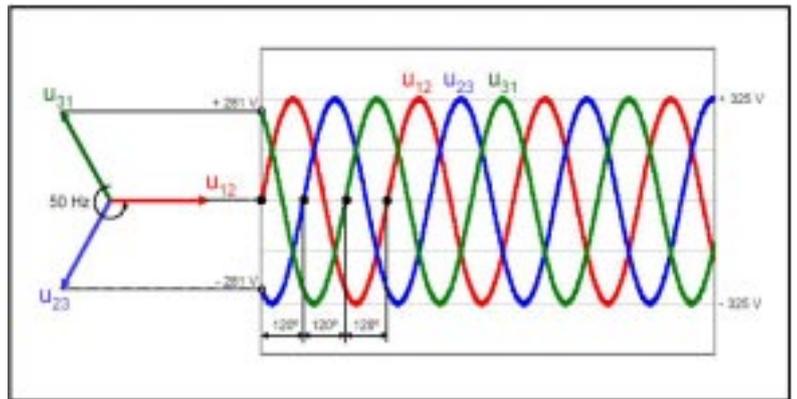
Estas dos condiciones de diseño y mantenimiento pueden ser verificadas fácilmente por el profesional del



mantenimiento y de la instalación eléctrica empleando los osciloscopios de mano de la Serie ScopeMeter de Fluke.

Formas de onda y Diagramas de fasores

En la figura 2 se presentan las formas de onda de las tensiones de línea V_{12} , V_{23} y V_{31} asociadas a un sistema trifásico de 3 conductores. Se dice que el sistema trifásico está equilibrado si las tres tensiones senoidales son iguales en amplitud y están desfasadas 120°.



Gráficamente, también es útil emplear el *diagrama de fasores* para representar estas tensiones. Los fasores son vectores que giran sobre su origen a la frecuencia de línea (50 ciclos/s) y en el sentido contrario a las manecillas de un reloj.

Si el módulo del fasor es la tensión de pico de la fase que representa (para una tensión alterna de 230 Vac, la tensión de pico es de 325 V), la proyección de su extremo sobre

un eje vertical establece, en cada instante de giro considerado, el valor instantáneo de la tensión de dicha fase.

Así, en la figura 2 se ve que en el instante de giro $t = 0s$, es $u_{12} = 0V$, $u_{23} = -281V$ y $u_{31} = +281V$.

En la práctica, y por razones de cálculo electro-técnico, la amplitud de los fasores se corresponde con el valor eficaz de la tensión, V_{ac} , y no con su tensión de pico, V_{pico} . La relación entre estos dos parámetros para formas de onda senoidales es:

$$V_{ac} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}}$$

Análogamente, si se trata de un sistema trifásico con tres conductores activos y neutro, las tensiones a considerar serán las tensiones de fase V_{1N} , V_{2N} y V_{3N} y su representación gráfica y diagrama de fasores se representa en la figura 3.

El diagrama de fasores permite

establecer sencillamente la relación entre las tensiones de línea y las tensiones de fase en un sistema trifásico de 4 conductores.

En efecto, como se aprecia en la figura 4:

$$\vec{V}_{21} = \vec{V}_{2N} - \vec{V}_{1N}$$

y por trigonometría:

$$|\vec{V}_{21}| = 2 \cdot |\vec{V}_{1N}| \cdot \cos 30^\circ = \sqrt{3} \cdot |\vec{V}_{1N}|$$

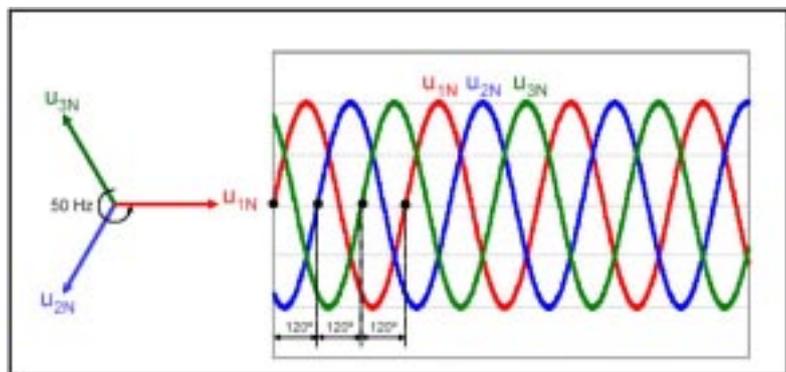


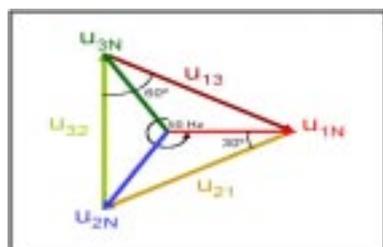
Figura 3. Formas de onda y diagrama fasorial para un sistema trifásico de 4 conductores y secuencia directa

Es decir, en un sistema trifásico ideal se cumple siempre, que las tensiones de línea son raíz de tres veces mayores que las tensiones de fase:

$$V_{línea} = \sqrt{3} \cdot V_{fase}$$

por lo tanto, si $V_{fase} = 230 \text{ V}_{AC}$, entonces:

$$V_{línea} = 398,4 \text{ V}_{AC} = 400 \text{ V}_{AC}$$



Secuencia de fases. Verificación

El giro fasorial es, por convenio, siempre contrario a las agujas del reloj. Si en el diagrama fasorial se toma como referencia de ángulo de giro la posición del fasor 1, puede suceder que durante el giro del sistema el siguiente fasor que ocupe esta posición de referencia sea el 2, y luego el 3.

Los sistemas trifásicos en los que la secuencia de las fases en el diagrama fasorial se produce en este orden (1-2-3) reciben el nombre de sistemas trifásicos de secuencia directa

(ver figura 2). Si la secuencia de fases es 1-3-2, el sistema trifásico se llama de secuencia inversa (ver figura 5). La tensión U_{12} adelanta 60° a la tensión U_{32} . La tensión U_{32} adelanta 60° a la tensión U_{12} .

En la mayoría de las cargas trifásicas, y sobre todo en los motores eléctricos, es muy importante respetar la secuencia de fases de los sistemas trifásicos. En el caso de los motores eléctricos es crítico, pues la secuencia de fases es la que determina el sentido de los campos electromagnéticos giratorios de su estator, que son los que a la postre inducen el movimiento giratorio del rotor del motor en un sentido o en el otro.

Para verificar la secuencia de fases de un sistema trifásico es conveniente recordar que *nunca se deberán efectuar las pruebas que aquí se indican, con osciloscopios de banco alimentados a red*. Estos equipos tienen eléctricamente unidos su re-

ferencia de tensión, o común, a la tierra de la alimentación a través del cable de red, por lo que si pone una tensión en el común del osciloscopio provocará un cortocircuito eléctrico fase-tierra. En su lugar se puede emplear cualquier osciloscopio digital de mano de la Serie ScopeMeter.

Verificación de la secuencia de fases en un sistema trifásico de 3 conductores

Tal y como se muestra en la figura 6, se conecta el canal A del osciloscopio a la fase 1, la referencia (común) a la fase 2 y el canal B a la fase 3 (si se utiliza un ScopeMeter de

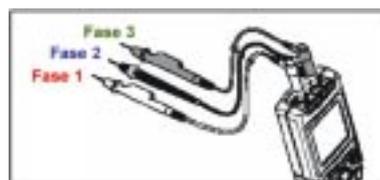


Figura 6. Verificación de la secuencia de fases con un ScopeMeter Serie 120.

la Serie 190, se deberán conectar a la fase 2 las dos referencias de sus canales aislados). De esta manera, la forma de onda del canal A corresponde a la tensión U_{12} , y la forma de onda del canal B corresponde a la tensión U_{32} . En la figura 7 se ve que en los sistemas de secuencia directa la tensión U_{32} está adelantada 60° con respecto a la tensión U_{12} , mientras que en los sistemas de secuencia inversa es la tensión U_{12} la que está adelantada 60° con respecto a la tensión U_{32} .

Figura 4. Relación entre tensiones de línea y de fase

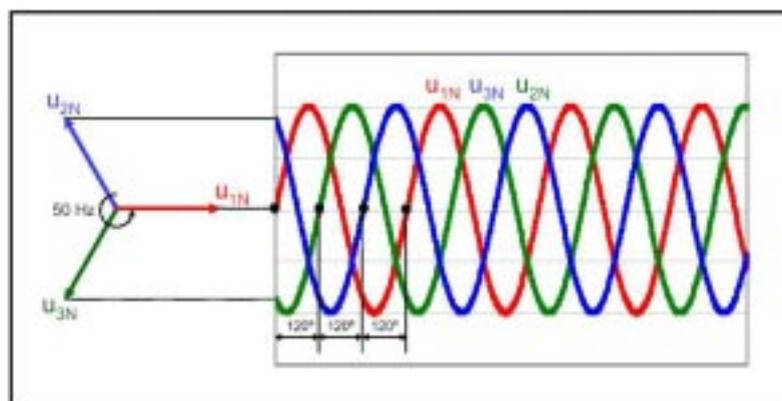
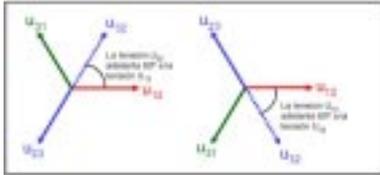


Figura 5. Formas de onda y diagrama fasorial para un sistema trifásico de 4 conductores y secuencia inversa

Figura 7. Desfases en sistemas trifásicos de 3 conductores de secuencia directa (izquierda), y de secuencia inversa (derecha).



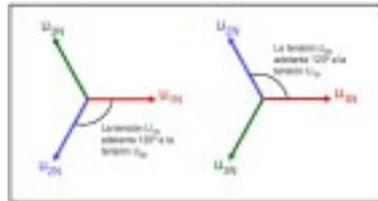
Podemos determinar fácilmente la secuencia de un sistema trifásico utilizando el menú de medidas automáticas del ScopeMeter y seleccionando la medida PHASE de desfase entre el canal A y el canal B (ver figura 8).

Figura 9. Desfases en sistemas trifásicos de 4 conductores de secuencia directa (izquierda), y de secuencia inversa (derecha).

En esta medida automática, los valores de desfase son positivos si el canal A está adelantado con respecto al canal B, y negativos en caso contrario.

Verificación de la secuencia de fases en un sistema trifásico de 4 conductores

Se conecta el canal A del osciloscopio a la fase 1, la referencia (común) al neutro, y el canal B a la fase 2 (de nuevo, si se utiliza un ScopeMeter de la Serie 190, se deberán conectar al neutro las dos referencias de sus canales aislados). De esta manera, la forma de onda del canal A corresponde a la tensión U_{1N} , y la forma de onda del canal B corresponde a la tensión U_{2N} .



Tal y como se aprecia en la figura 9, en los sistemas de secuencia directa la tensión U_{1N} está adelantada 120° con respecto a la tensión U_{2N} , mientras que en los sistemas de secuencia inversa es la tensión U_{2N} la que está adelantada 120° con respecto a la tensión U_{1N} . El procedimiento de medida es en todo análogo al del caso anterior, teniendo en cuenta que:

- Si la lectura del desfase es de $+120^\circ$, el canal A (U_{1N}) se encuentra adelantado 120° con respecto al canal B (U_{2N}), por lo que se trata de un sistema trifásico de secuencia directa.
- si la lectura del desfase es de -120° , se trata de un sistema trifásico de secuencia inversa.

Equilibrio trifásico en tensión. Verificación

Se dice que un sistema trifásico está equilibrado en tensión cuando las tres tensiones senoidales que lo componen tienen la misma amplitud y están desfasadas entre sí 120° . Generalmente, el desequilibrio en el desfase no es habitual, o sucede en

el caso de averías importantes (cortocircuito entre fases, por ejemplo). En condiciones rutinarias de mantenimiento, es más frecuente el desequilibrio en amplitud.

La forma más sencilla de verificar el desequilibrio en amplitud es midiendo el valor eficaz, V_{ac} , de cada fase, que debe ser el mismo en los tres casos (condición de equilibrio trifásico). De no ser así, hay que cuantificar el desequilibrio. Una forma sencilla de hacerlo es estableciendo la relación porcentual de la máxima desviación de los tres valores obtenidos con respecto al promedio de las tres, dividido por dicho valor promedio:

$$\%Desequilibrio = \frac{\text{Desviación máxima respecto al promedio}}{\text{promedio de las tres tensiones}} \cdot 100$$

Así por ejemplo, si las medidas de la tensión eficaz de las tres fases arrojan los valores:

$$\left. \begin{matrix} U_{10} = 410 \text{ VAC} \\ U_{20} = 398 \text{ VAC} \\ U_{30} = 404 \text{ VAC} \end{matrix} \right\} \Rightarrow V_{\text{medio}} = \frac{418 + 395 + 404}{3} = 403,11'$$

y la desviación de los tres valores con respecto a este V_{medio} es:

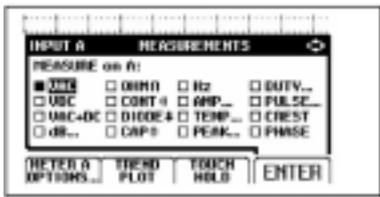
$$\begin{matrix} U_{10} - V_{\text{medio}} = 7 \text{ VAC} \\ U_{20} - V_{\text{medio}} = 8 \text{ VAC} \\ U_{30} - V_{\text{medio}} = 1 \text{ VAC} \end{matrix}$$

La máxima desviación se obtiene para U_{23} , y resulta ser de 8 V_{ac} . Por lo tanto, el desequilibrio porcentual queda:

$$\%Desequilibrio = (8/403) \cdot 100 = 1,98\%$$

En la práctica, y desde el punto de vista de calidad de suministro, son aceptables desequilibrios máximos del 2%. Por encima de este valor, el suministro eléctrico se considera de mala calidad, y puede ocasionar disfuncionamientos en los receptores a él conectados, o incluso averías a corto, medio o largo plazo, dependiendo de la severidad del desequilibrio.

Figura 8. Menú de medidas automáticas de los ScopeMeter Serie 120. La Serie 190 presenta otro menú equivalente que también incluye la medida PHASE de desfase entre canales.



La selección de la medida de PHASE ya le indica al ScopeMeter que debe activar la presentación en pantalla de las formas de onda de los dos canales, por lo que finalmente, una vez conectadas las sondas a los tres puntos de medida, lo único que hay que hacer es:

- Encender el equipo
- Hay que asegurarse de que se está en modo automático. Así, en la parte superior de la pantalla deberá aparecer la lectura AUTO. Si no es así, se activa este modo con la tecla AUTO situada en el panel frontal del equipo:
- Activar la medida automática PHASE (desfase entre canales)
- Si la lectura del desfase es de -60° , el canal A (U_{12}) se encuentra retrasado 60° con respecto al canal B (U_{32}), por lo que se trata de un sistema trifásico de secuencia directa. Si la lectura del desfase es de $+60^\circ$, se trata de un sistema trifásico de secuencia inversa.

Es el caso, por ejemplo, de los motores eléctricos trifásicos. El desequilibrio de la tensión de suministro a estos motores genera un desequilibrio en la corriente consumida por los mismos.

Se puede estimar el desequilibrio en corriente por esta causa como 8 veces el desequilibrio en tensión.

Así, un desequilibrio en tensión del 2% originaría un desequilibrio en corriente de, aproximadamente, el 16%. Esto significaría que uno de los tres devanados del estator del motor tiene una sobrecorriente del 16%, lo que provocará un sobrecalentamiento en el mismo por efecto Joule, un envejecimiento prematuro de su



aislante y, en definitiva, un acortamiento de la vida útil del motor.

La medida de la tensión eficaz se lleva a cabo con extrema sencillez y comodidad utilizando los ScopeMeter de Fluke (ver la figura 10).

Basta con conectar el canal A y el terminal de referencia (común) del osciloscopio a la tensión a medir (ya sea de fase o de línea), activar el modo AUTO en el osciloscopio, y seleccionar en el menú de medidas la opción V_{AC} (ver figura 8).

Cuando el ScopeMeter está en modo automático, selecciona los ajustes adecuados para presentar completamente estable en pantalla la forma de onda de la fase que se pretende medir, junto con la medida automática de su tensión eficaz o tensión alterna. □

Figura 10. Medida en un motor.