

motortico

BOLETÍN TRIMESTRAL PREPARADO POR WWW.MOTORTICO.COM, COSTA RICA



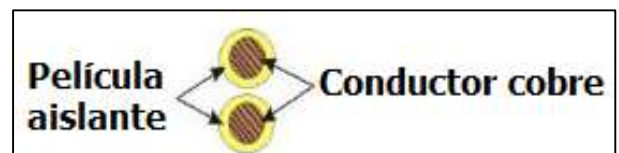
JULIO-SEPTIEMBRE 2018

Prueba de Comparación de Impulsos (Surge) aplicado a máquinas eléctricas rotativas

Introducción

Los estudios de fallas en motores de inducción indican que el 60–70% de las mismas se deben a problemas mecánicos, especialmente fallas en los rodamientos causadas por una lubricación inadecuada. La segunda mayor causa de fallas, entre el 30–40%, es de origen eléctrico, destacando las fallas de aislamiento en el estator, que cubren el 80–90% de esta categoría. En motores de media tensión, las fallas de aislamiento representan un 60-70% de las causas con origen eléctrico. En el caso de las fallas mecánicas, los programas de mantenimiento predictivo (basados en análisis de vibración u otra técnica) pueden conducir a detección temprana de fallas, lo que reduce significativamente los costos de mantenimiento y las paradas no deseadas. Mientras que, para el sistema de aislamiento, se deben usar un conjunto de técnicas más amplio, que todas juntas entregarán el diagnóstico global del devanado. Se considera que uno de los puntos más importantes por evaluar es el "aislamiento entre vueltas" dentro del devanado del estator. Ver Fig. 1 para ilustrar este concepto.

Figura 1 Aislamiento entre conductores en un devanado de alambre redondo
(Fuente: Baker)



La rotura (falla) del sistema de aislamiento eléctrico en máquinas rotativas provoca un daño catastrófico de la máquina y trae grandes pérdidas de tiempo de inactividad del proceso. Una de las principales razones de falla es la rotura del aislamiento entre vueltas (o espiras), ver Fig. 1. En este sentido, las pruebas de resistencia de aislamiento en corriente continua (CC) con megohmetro no son capaces de establecer completamente la condición del aislamiento entre vueltas, típicamente formado por una película de esmalte (a lo más detectará la presencia de humedad dentro de los devanados). Por el contrario, la **prueba de comparación de impulsos**, que se realiza fuera-de-línea (máquina apagada), es la forma más utilizada para evaluar la condición del aislamiento entre vueltas. En este boletín se presenta dicha prueba, para su correcta aplicación y adecuado diagnóstico.

Aplicación de impulsos (sobretensiones) en devanados de estator

Un impulso es una sobretensión provocada por un pulso de corriente con un tiempo de levantamiento de muy corta duración (en el rango de los micro-segundos), aplicado a un devanado. Esta técnica ha sido una práctica en la industria desde el año 1926 (en ese año, J. Rylander publicó el artículo "Prueba de voltaje de alta frecuencia para aislamiento de aparatos eléctricos rotativos"). Desde entonces, el uso de la prueba de impulso aplicado a máquinas rotativas ha avanzado mucho. Cuando se aplica sobre un devanado un pulso de corriente que aumenta rápidamente en magnitud, se inducirá un voltaje a través de la bobina, siguiendo el principio de inducción de Faraday. La tensión a través del devanado está dada por la siguiente expresión:

$$V = L \frac{di}{dt}$$

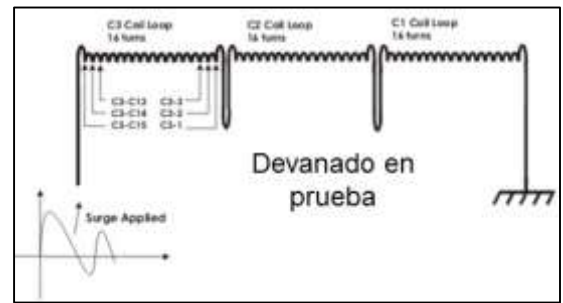
donde:

V es la tensión inducida a través del devanado, en Voltios,

L es la inductancia del devanado, en Henrios, y

$\frac{di}{dt}$ es la tasa de cambio de la corriente/tiempo, en Amperios/segundos.

Figura 2 Pulso de tensión aplicado a un devanado en prueba (Fuente: Baker)



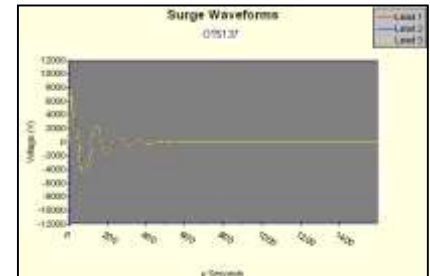
La tensión inducida V en los alambres del devanado es, en realidad, una suma de las tensiones inducidas entre cada uno de los bucles individuales. En la Fig. 2 se muestra el pulso de tensión. Si el aislamiento que separa las vueltas adyacentes es débil, y si la tensión inducida es mayor que la fuerza dieléctrica del aislamiento, se formará un arco entre las vueltas. El equipo de prueba está diseñado para crear la tensión inducida entre las vueltas adyacentes, y detectar cualquier arco eléctrico, que será indicativo de un aislamiento débil o defectuoso.

Un impulso de aumento rápido inducirá una mayor tensión entre vueltas del devanado. La mayor tensión vuelta-vuelta inducida se produce en las primeras vueltas, por el efecto de propagación de la onda de alta frecuencia que se mueve a través del devanado. Debido a este fenómeno, la norma IEEE 522 recomienda diferentes voltajes de prueba para diferentes impulsos de tiempo de subida.

Prueba de impulso (Surge Testing) según normas IEEE 522 y EASA AR100

Según la norma IEEE 522, la prueba de impulso tiene como objetivo determinar la fuerza dieléctrica entre vueltas en devanados de estator de máquinas rotativas. Los defectos que puede encontrarse son: i) fallas entre vueltas de la misma bobina, ii) entre bobinas, y, iii) entre fases. La condición más desfavorable es entre vueltas. La capacidad del instrumento es gravitante según la potencia de la máquina a diagnosticar. El tipo de prueba, y el reporte entregado se muestran en la Fig. 3.

Figura 3 Ejecución de prueba de impulso y reporte (Fuente: cortesía de Ferroman, Chile)



Los niveles de tensión sugeridos durante la prueba de impulso se muestran en la Tabla I, según recomendaciones de la norma IEEE 522 y EASA AR100 (Nota: donde $V_{p.u.} = [\sqrt{2}/\sqrt{3}]V_L = 1 p.u.$). La tensión de prueba se relaciona con el mínimo nivel de tensión que puede iniciar la formación de un arco (mínimo de Paschen). El mínimo nivel de tensión para provocar el arco es de 350 V.

Tabla I Tensión recomendada para prueba de impulso

Tensión de placa de la máquina de línea y en p.u.		IEEE 522		EASA AR100
		Nuevo	En Servicio	En Servicio
V_L	$V_{p.u.}$	$3.5xV_{p.u.}$	75% de Nuevo	$2xV_L + 1000$
480 V	392 p.u.	1.372 V	1.029 V	1.960 V
575 V	469 p.u.	1.643 V	1.232 V	2.150 V
4.160 V	3.397 p.u.	11.888 V	8.916 V	9.320 V

La Fig. 4 muestra un esquema del instrumento utilizado para la prueba de impulso. Del lado izquierdo de la Fig. 4 aparece el circuito del instrumento, y de lado derecho la onda amortiguada resultante. El condensador interno del instrumento se carga a una tensión conocida, por medio de la fuente de tensión. En un momento específico, se cierra un interruptor para transferir toda la carga del condensador a través del devanado en prueba. La carga fluye por el circuito dando como resultado una oscilación. Esta oscilación se repetirá hasta que las resistencias y las pérdidas en el circuito se absorben completamente. La medición de la tensión proporciona la onda de sobretensión, que muestra una oscilación amortiguada. Algunos equipos realizan y muestran en la pantalla las dos ondas de manera simultánea, para facilitar la comparación. Otros instrumentos realizan cada prueba por fase, y luego las presenta simultáneamente en la pantalla, para detectar diferencias. Por eso, la prueba se llama "Comparación de Impulsos", ya que cualquier separación entre fases, será indicativo de fallas internas. Pero, ¿cuál es la razón de que una separación entre fases indique una falla? Tiene que ver con que el periodo de la onda amortiguada, el cual se ajustará a la siguiente fórmula:

$$T = \sqrt{LC}, \text{ en segundos.}$$

donde: L es la inductancia del devanado, y C su capacitancia. Pero $L \approx N^2$, según lo presenta la Fig. 4, así: $T \approx N$, donde N es el número de vueltas del devanado en prueba.

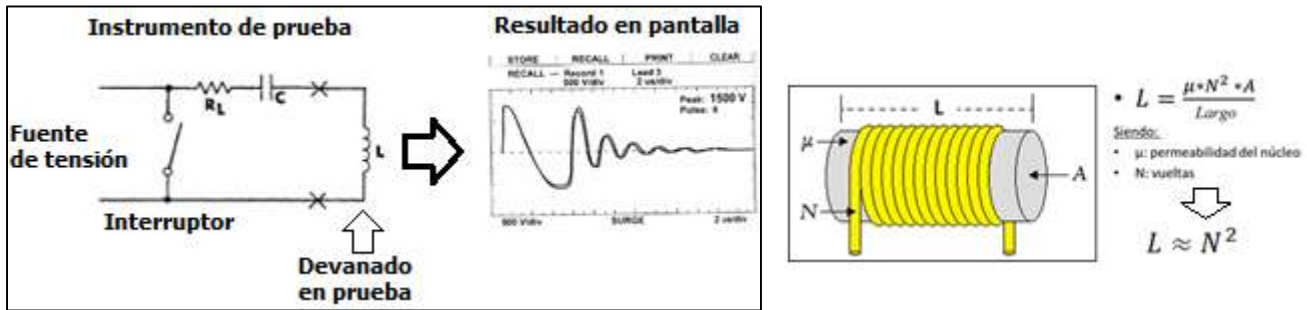


Figura 4 Principio de operación y teoría de la prueba de impulso

Entonces, si el aislamiento vuelta-vuelta falla, una fracción de la inductancia se cortocircuitará en el circuito. Según la ecuación anterior, el periodo T disminuye debido al cortocircuito. Este tipo de fallas entre vueltas se mostrará como un salto hacia la izquierda del patrón de onda. Dependiendo de la bobina y la ubicación del cortocircuito, la magnitud de la forma de onda de sobretensión también puede disminuir ligeramente. La Fig. 5 muestra un daño típico, con un cortocircuito vuelta-vuelta.

Figura 5 Acortamiento del período T (corrimiento a izquierda) de la fase dañada (Fuente: Baker)

Análisis de resultados y diagnóstico

La idea de la prueba es comparar las respuestas de las tres fases del devanado (o formas de onda de amortiguamiento), mostrando el rápido aumento en el tiempo de subida y decaimiento, con tiempos en el rango de los μs (micro-segundos). Si hay una diferencia excesiva, el devanado bajo prueba puede tener un defecto. Generalmente, se observan tres tipos de separaciones:

1. Solo al comienzo de la forma de onda,
2. Diferencia en la amplitud, y
3. Cambio en amplitud y periodo (cambio de fase).

La separación al comienzo y los cambios en la amplitud pueden estar relacionados con la forma de operación del equipo de prueba. Diferencias de amplitud de las ondas se dan por cortocircuitos entre vueltas. El cambio de fase indica cortocircuitos entre bobinas. Si se produce un cortocircuito intermitente en uno de los bobinados bajo prueba, el patrón de onda cambiará y se vuelve errático. La separación permanente de las ondas indica cortocircuitos sólidos, errores en el número de vueltas o conexión incorrecta. La Fig. 6 muestra dos casos típicos. A la izquierda, el caso de un devanado en buenas condiciones (las tres ondas coinciden perfectamente). A la derecha, se presenta el resultado de la prueba de impulso cuando una fase tiene una falla a tierra (la fase a tierra no presenta oscilación).

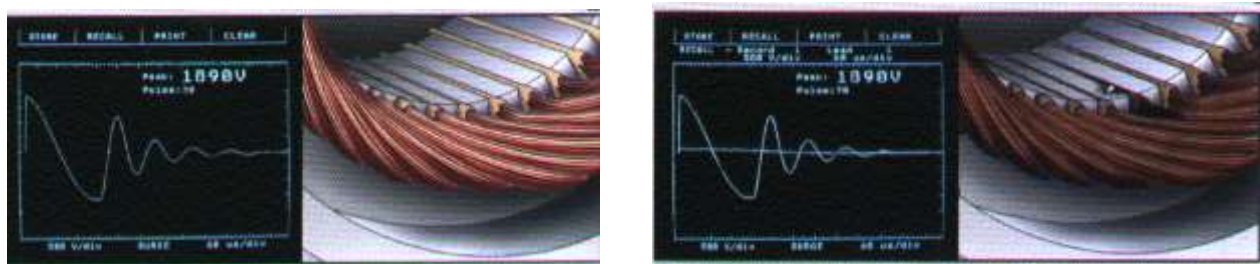


Figura 6 Resultado de dos pruebas de impulso en devanados (Fuente: Baker)

Una dificultad o desafío con la prueba de comparación de impulsos es su "subjetividad". Ya que depende de la observación de la persona que opera el equipo. Esto es, no siempre será fácil para los operadores llegar a la misma conclusión, cuando comparan dos formas de onda. Varios fabricantes de equipos han comenzado a utilizar técnicas de análisis que evalúen los resultados obtenidos. La meta es eliminar la subjetividad como sea posible, para mejorar la decisión. De los métodos analíticos más usados está el cálculo

del parámetro "Error Area Ratio" (EAR), en español definido como la relación de error de área. Este parámetro se calcula estimando las áreas de las curvas de las tres fases, y se obtienen las diferencias porcentuales entre sí. La Fig. 7 muestra un caso.

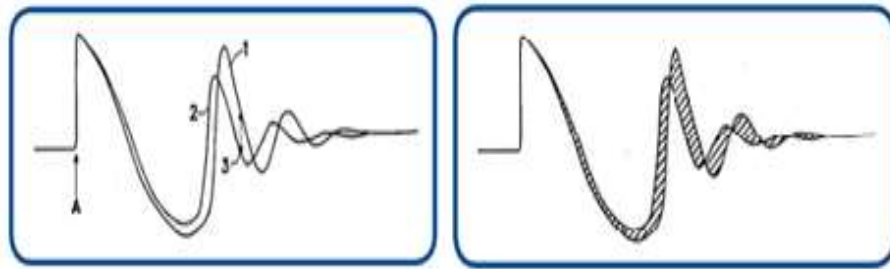


Figura 7 Manera de calcular el EAR en un devanado trifásico (fases 1, 2 y 3) (Fuente: EASA)

En la práctica se traza la magnitud de la tensión en el eje vertical, y el tiempo en el eje horizontal. En el momento "A" de la Fig. 1, se aplica un pulso, el cual tiene un aumento muy rápido visto por la pendiente pronunciada. Se llama a la forma de onda "1" como la referencia. La onda "3" coincide con la "1". Mientras que, la onda "2" se separa de la referencia, evidenciando un cortocircuito interno.

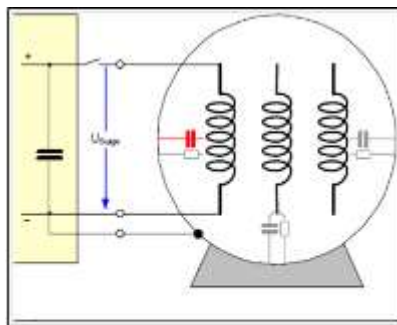
Si los circuitos de prueba tienen la misma resistencia, inductancia y capacitancia, se espera que las ondas resultantes aparezcan idénticas, es decir, se verían como una sola forma de onda (cuando se superponen). La pregunta es, ¿qué tan diferente es demasiado? La mayoría de la literatura sugiere que el **EAR** es un método efectivo. Para desarrollar un conjunto común de criterios de aceptación aplicables a devanados de diferente tamaño, forma, configuración, etc., se necesita normalizar el resultado a algo simple para comparar, como un porcentaje. Los valores que obtiene dependen no solo de la máquina, sino también del equipo de prueba, y de cómo se calculan los datos. Por lo tanto, los operadores deberían contar con la ayuda del fabricante para determinar los puntos de partida aceptables. Las recomendaciones de tres fuentes para los valores esperados para el EAR se muestran en la Tabla II.

Tabla II Valores recomendados máximos para el EAR

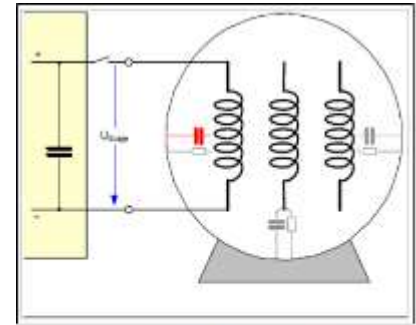
Fuente	EAR máximo
EASA	Para estatores trifásicos (sin rotor instalado) están por debajo del 15%.
Compañía BAKER	Dos ondas son idénticas si el valor es 0%. Dos ondas se ven (a la vista) idénticas con valores en el rango 4-5%. Dos ondas son notablemente distintas con valores de 10% o mayores.
Compañía Electrom Instrument Inc.	En general, se acepta un máximo de 10%. En bobinados en Lap (imbricado), hay una zona no muy clara alrededor del 10%. Para bobinados concéntricos el límite se puede subir de 20%.

Un último tema sobre la prueba de impulso es el efecto de la Capacitancia entre el devanado en prueba y la carcasa de la máquina, el cual puede influir en los resultados obtenidos. La capacitancia entre el devanado y la carcasa de la máquina se presenta en la Fig. 8, mostrada en color rojo.

Fig. 8 Capacitancia del devanado durante la prueba de impulso (Fuente: SCHLEICH)



La C en rojo representa la capacitancia de la bobina a tierra, la cual actúa en paralelo con la C del equipo de Impulso, si la Tierra está conectada.



Si la Tierra se deja levantada (no está conectada), la C del bobinado reduce su impacto durante el Ensayo de Impulso. Cuando está conectada el efecto es alto.

Debido a que la capacitancia se conecta en paralelo con la del equipo de prueba, el efecto es que la frecuencia de oscilación es reducida. En las máquinas "grandes" el efecto es mayor que en las "pequeños". Esto puede llevar a diagnósticos erróneos, ya que el resultado mostrará diferencias entre las ondas amortiguadas. La solución será levantar la tierra del instrumento durante la prueba.