

Medición de ruido en transformadores de potencia

Leonardo Melo
UTN Avellaneda
lmelo@fra.utn.edu.ar

Definiciones

Presión sonora, p

El sonido puede ser definido como cualquier variación de presión (en el aire, el agua u otros medios elásticos) que el oído humano puede detectar. Las variaciones de presión viajan a través del medio desde la fuente de sonido a los oídos del receptor. El número de variaciones cíclicas de presión por segundo se llama "frecuencia" del sonido, y se mide en hercios. Cada frecuencia de un sonido produce un tono característico. El "zumbido" de un transformador es de baja frecuencia, de orden de cien o ciento veinte hercios (100 o 120 Hz) fundamentalmente (dependiendo de la frecuencia de la fuente de alimentación eléctrica), mientras que un silbido de alta frecuencia está típicamente por encima de los tres kilohercios (3 kHz). El rango normal de audición de una persona joven y sana se extiende desde aproximadamente veinte hercios a veinte kilohercios (20 Hz a 20 kHz).

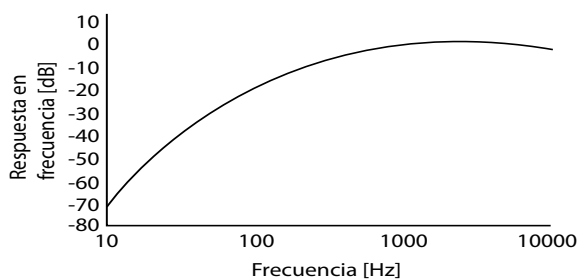


Figura 1. Curva de respuesta del filtro A

Una característica utilizada para describir un sonido es la amplitud de las variaciones de presión, que se mide en pascales (Pa). El sonido más débil que el oído humano sano puede detectar es fuertemente dependiente de la frecuencia, a un kilohercio (1 kHz) tiene una amplitud de veinte micropascales (20 μ Pa). Por el contrario, el umbral de dolor corresponde a una presión de sonido de más de un millón de veces mayor que la anterior. Por lo tanto, el uso de números tan dispares se debe evitar, por lo que se utiliza comúnmente la escala de decibeles (dB). Esta escala es logarítmica y utiliza el valor de veinte micropascales (20 μ Pa) como referencia p_0 , que corresponde a cero decibeles (0 dB). Por lo tanto, se define como L_p al nivel de presión sonora o acústica.

$$L_p = 10 \log (p^2/p_0^2)$$

" p " es una magnitud escalar y es la presión acústica medida por un micrófono. Un aspecto útil de la escala de decibeles es que da una mejor aproximación a la percepción humana de sonoridad relativa a la escala lineal medida en pascales, debido a que el oído responde al sonido logarítmicamente. Sin embargo, el oído humano no responde de la misma manera para cada frecuencia de valores, por lo tanto, es necesario colocar un filtro adecuado en el micrófono para garantizar mediciones que reflejen realmente el sonido percibido por el oído. Un filtro internacionalmente estandarizado es el denominado "Ponderación A". Las ecuaciones matemáticas que dan



respuesta del filtro son las siguientes, mientras que el gráfico de la figura del filtro se muestra en la figura 1.

$$Ra_{(f)} = 12.200^2 \cdot f^4 / [(f^2 + 20,6^2) \cdot (f^2 + 12.200^2) \cdot \sqrt{(f^2 + 107,7^2)} \cdot \sqrt{(f^2 + 737,9^2)}]$$

$$A = 20 \cdot \log [Ra_{(f)}] \text{ dB} + 2 \text{ dB}$$

Velocidad de la partícula, u

Esta cantidad describe la velocidad de oscilación de las partículas del medio en el que las ondas de sonido se propagan. Se mide en metros por segundo (m/s) y es una magnitud vectorial.

Intensidad sonora, I

La intensidad del sonido es una cantidad vectorial que describe la magnitud y la dirección del flujo neto de energía de sonido en una posición dada. Es el producto promediado en el tiempo de la presión sonora y la velocidad de la partícula en un punto dado.

$$I = p \cdot u$$

Se mide en watts por metro cuadrado (W/m²). La dirección del flujo de energía está dada por el ángulo de fase entre la presión de sonido y la velocidad de las partículas en la ubicación específica. La intensidad de sonido normal es la tasa de flujo de la energía del sonido a través de un área unitaria, medida en una dirección normal de área especificada.

Potencia sonora, W

Una fuente de sonido irradia energía en el aire circundante dando lugar a un campo de presión de sonido. La potencia sonora es la cauda, mientras que la presión sonora es el efecto. La presión sonora que se escucha (o que se mide con un micrófono) depende de la distancia de la fuente y el entorno acústico. Por lo tanto, el ruido de una fuente no se puede cuantificar por la simple medición de presión de sonido solo. En su lugar, es necesario determinar su potencia de sonido, la que es independiente del medioambiente y es un descriptor único del nivel de ruido de una fuente de sonido. La potencia sonora es la velocidad a la que

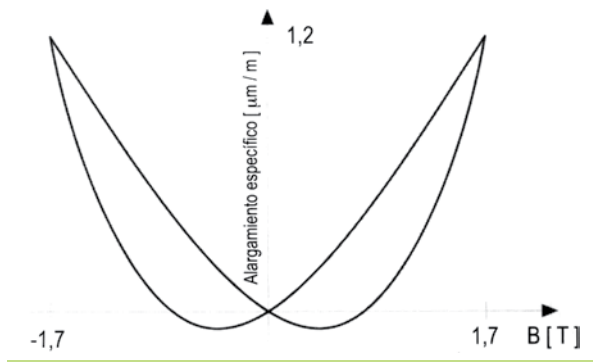


Figura 2

la energía es irradiada (energía por unidad de tiempo) y se mide en watts.

Fuentes de ruido en un transformador

Magnetoestricción

La magnetoestricción es el cambio de dimensiones, que se observa en ciertos materiales cuando son sometidos a un flujo magnético variable en el tiempo. En los núcleos de acero magnético, el cambio dimensional está en el orden de 0,1 a diez micrómetros (0,1 a 10 µm) por metro de longitud en los niveles de inducción típicos.

La figura 2 muestra la magnetoestricción vs. la densidad de flujo magnético para un tipo de laminación típica del núcleo de un transformador con una inducción máxima de 1,7 teslas. Para una calidad dada de acero, el estrés mecánico en las laminaciones del núcleo tendrá una fuerte influencia en la magnetoestricción.

Este último no depende del signo de la densidad de flujo, solo de su magnitud y orientación con respecto a ciertos ejes cristalográficos del material. Por lo tanto, cuando es excitado por un flujo sinusoidal, la frecuencia fundamental del cambio dimensional será el doble de la frecuencia de excitación. El efecto es altamente no lineal, especialmente en niveles elevados de inducción cerca de la saturación. La no linealidad se traducirá en un importante contenido en armónicos en el espectro de vibraciones del núcleo.

Fuerzas electromagnéticas en los arrollamientos

La corriente de carga en los devanados de los transformadores genera un campo magnético que oscila a la frecuencia de la red. Las fuerzas electromagnéticas resultantes actúan en ambas direcciones, axial y radial, en los devanados. La magnitud de estas fuerzas depende solo de la magnitud de la corriente de carga y del campo magnético local, que es también una función de la corriente de carga. Por lo tanto, las fuerzas magnéticas en los devanados son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga, mientras que su frecuencia es el doble de la de la red. Las amplitudes de las vibraciones resultantes dependen de las propiedades elásticas del conductor y del aislamiento eléctrico.

En un devanado firmemente fijado, las propiedades elásticas del material aislante son casi lineales en el rango de desplazamientos que se producen en virtud de las corrientes normales de operación. Los metales tienen módulos de elasticidad muy lineales. Por lo tanto, los armónicos superiores son de escaso valor, y la primera armónica domina el espectro de vibración.

Pantallas magnéticas sobre el tanque del transformadores

Las pantallas magnéticas se utilizan frecuentemente en grandes transformadores para reducir las pérdidas por corrientes parásitas debidas al flujo de dispersión que resulta de las corrientes de carga. A corrientes de plena carga, el flujo de dispersión en las pantallas magnéticas puede alcanzar valores que pueden superar la densidad nominal del flujo en el núcleo. Esto resulta en la generación de sonido magnetoestrictivo en las pantallas magnéticas, y puede contribuir significativamente al nivel global del ruido en el transformador.

Ventiladores

El origen del ruido del ventilador se debe al flujo turbulento de aire, dando como resultado fluctuaciones

de la presión en una amplia gama de frecuencias. El ancho de banda de este ruido tiene un pico ancho alrededor de la frecuencia en la que las palas del ventilador coincidan con la frecuencia natural de sus partes estructurales o del motor que lo acciona.

Bombas de aceite

El flujo de aceite a través de los equipos auxiliares de enfriamiento puede causar vibraciones, sin embargo, las bombas de aceite normalmente no aportan una cantidad significativa de potencia sonora, excepto para los casos en donde el caudal de aceite es muy alto o en aplicaciones especiales donde el ruido debido a la magnetoestricción es muy bajo.

Principios de medición del ruido

Medición del nivel de presión sonora

Un sonómetro es un instrumento diseñado para dar mediciones objetivas y reproducibles del nivel de presión sonora. Hay muchos sistemas de medición disponibles. Aunque diferentes en detalle, cada sistema consta de un micrófono, una fase de procesamiento y una unidad de lectura.

El micrófono convierte la señal de sonido en una señal eléctrica equivalente. El tipo más adecuado de micrófono para los medidores de nivel de sonido es el micrófono de condensador, el cual combina precisión con estabilidad y fiabilidad. La señal eléctrica producida por el micrófono es bastante pequeña. Por lo tanto, debe ser amplificada por un preamplificador antes de ser procesada.

Una simple medición del sonido no ponderado en el intervalo de frecuencia audible (normalmente, se toma como veinte hercios a veinte kilohercios—20 Hz a 20 kHz—) se usa raramente debido a su pobre correlación con la respuesta subjetiva. Por consiguiente, los sonómetros suelen incorporar una red eléctrica de filtrado denominada "Ponderación A" que modifica la respuesta de frecuencia para simular la del oído humano.



Medición de la intensidad de sonido

La intensidad del sonido es el producto promediado en el tiempo de la presión y la velocidad de la partícula. Un único micrófono puede medir la presión. Sin embargo, la medición de velocidad de las partículas no es tan simple. Para poder medir intensidad de sonido es necesario tener dos micrófonos separados una pequeña distancia.

Mediciones de ruido por bandas de frecuencia

Como ya se ha mencionado, el ruido de un transformador se caracteriza por contener tonos de frecuencia doble de la frecuencia eléctrica de alimentación de la red y de sus armónicos pares superiores (suponiendo excitación sinusoidal y sin componente de continua). Por lo tanto, el ruido a otras frecuencias puede ser suprimido mediante la explicación de mediciones por bandas de frecuencia. El término "banda de frecuencia" se utiliza aquí para describir una medición donde se realiza un análisis de frecuencia del sonido y, posteriormente, solo las bandas de frecuencia que contienen los tonos característicos de transformadores se utilizan en la evaluación.

El análisis de frecuencia se puede lograr mediante el uso de cualquiera de los dos métodos de análisis en tiempo real siguientes: frecuencia logarítmica o bandas de octavas (1/1 de octava, 1/3 de octava, 1/12 de octava, etcétera), o a través del método FFT (*Fast Fourier Transform*, 'transformada rápida de Fourier') que da lugar a una resolución de ancho de banda constante (x Hz).

Los niveles se miden sobre las bandas de frecuencia que contienen frecuencias iguales a dos veces la frecuencia nominal y múltiplos de estos. El nivel de presión sonora ponderado o nivel de intensidad sonora en cada posición de medición se puede calcular por la siguiente ecuación.

$$L_{Ai} = 10 \log \left(\sum_{v=1}^{v_{max}} 10^{0.1 \times L_{Av}} \right)$$

" L_{Ai} " es el nivel de precisión sonora (o nivel de intensidad sonora) ponderada en A, a tensión y frecuencia nominales; " L_{Av} " es el nivel de presión sonora (o nivel de intensidad sonora) ponderada en A medido sobre un ancho de banda Δf centrado en una frecuencia igual a $2fv$ a tensión y frecuencia nominales. La ponderación A puede ser llevada a cabo de dos maneras:

- » mediante el uso de un filtro análogo a la entrada del sistema de medición de modo que todos los valores medidos son A-ponderados desde el inicio;
- » si la medición es lineal: aplicar una ponderación digital en el nivel de medio en cada banda de frecuencia. Los valores de ponderación pueden extraerse de la figura 1.

" f " es la frecuencia nominal; " v " es el número de secuencia (1, 2, 3, etcétera) de los múltiplos de los armónicos pares de la frecuencia nominal.

La suma de las primeras diez bandas de los niveles de ruido es adecuada para la mayoría de los transformadores que operan a tensión y corriente senoidales. Sin embargo, ante la presencia de armónicos de tensión y/o corriente, las frecuencias más altas pueden contribuir significativamente al nivel de sonido total. En este caso, más bandas de frecuencia deben ser tomadas en consideración. ■