

Primera experiencia con cámaras acústicas de descarga parcial en equipos de alta tensión

Greg C. Stone

Iris Power-Qualitrol
Mississauga, Canadá
gstone@qualitrolcorp.com

Mladen Sasic

Iris Power-Qualitrol
Mississauga, Canadá
msasic@qualitrolcorp.com

Christoph Wendel

Verkehrsbetriebe Zurich
Zurich, Suiza
christoph.wendel@vbz.ch

A. Shaikh

Kinectrics
Toronto, Canadá
ashfak.shaikh@kinectrics.com

Palabras clave

Corona
Descarga parcial
Cámara acústica

Resumen

Los micrófonos direccionales de ultrasonidos se han utilizado durante décadas para localizar los puntos de descarga parcial (DP) superficial y de corona en equipos de alta tensión. Sin embargo, siempre había cierta incertidumbre sobre la ubicación exacta de los puntos de descarga debido a las reflexiones y al campo de visión del detector. Además, la exploración de un devanado completo llevaba cierto tiempo. Recientemente se ha logrado un avance significativo en esta tecnología con el desarrollo comercial de una "cámara" acústica que puede mostrar dónde se produce el sonido con respecto a una imagen normal de luz visible del objeto de prueba. Es decir, el dispositivo produce una imagen acústica de la DP en el objeto de prueba de forma parecida a una cámara UV al localizar la luz ultravioleta de la DP en una imagen del objeto de prueba. La cámara acústica recurre a una gran matriz de micrófonos de banda ancha y es capaz de mostrar la señal acústica en rangos de frecuencia seleccionables en los rangos de sonidos y ultrasonidos. La efectividad de este nuevo instrumento se evaluó en un objeto de prueba de corona punto a plano, así como en bobinas de estator y estatores con una DP conocida. La banda óptima de detección de descargas superficiales parece ser la de 30 -50 kHz. También se puede detectar una intensa DP en los huecos internos, aunque a una frecuencia inferior que para la DP superficial. Se identifican rápidamente las localizaciones precisas de diversos puntos de descarga en diferentes objetos de prueba.

Introducción

La detección eléctrica directa de DP y de corona mediante condensadores de alta tensión o transformadores de corriente de alta frecuencia se usa desde la década de 1940 para detectar defectos de aislamiento en equipos nuevos y para evaluar el estado del aislamiento de equipos de alta tensión que han estado en funcionamiento. Estas pruebas no pueden detectar la ubicación exacta de las DP en el equipo de alta tensión. En el pasado, la localización de las DP se ha realizado mediante sondas de RF, ópticas y acústicas [1, 2].

La sonda de RF, a veces denominada sonda TVA o sonda de corona, detecta las señales de radio emitidas por la DP y las señales de corona. Puede detectar tanto la DP superficial como la descarga de corona, así como la DP dentro del sistema de aislamiento del objeto de prueba. La detección óptica de la DP superficial y de corona se realizaba originalmente con el ojo humano, detectando la luz procedente de una descarga. Se consigue una mayor sensibilidad a la DP apagando las luces (una prueba de "apagón" o "luces apagadas"); o realizando la prueba por la noche, si es al aire libre. En habitaciones oscuras se puede utilizar un fotomultiplicador para conseguir una sensibilidad aún mayor. En la década de 1970, los intensificadores de imágenes que funcionaban en el rango visible se utilizaban a veces en habitaciones oscuras y en exteriores por la noche. A finales de la década de 1990 se inventó un nuevo dispositivo que podía crear una instantánea o una imagen de vídeo de la DP superficial en la gama UV [3]. Esto supuso un avance significativo ya que permitió ver la señal óptica de la DP superficial en una sala iluminada o en el exterior con luz diurna, con una imagen de visibilidad normal del objeto de prueba para dar contexto. Esto aumentó en gran medida la capacidad de localizar la DP y la corona en los objetos de prueba de una manera segura, y crear un registro permanente. En la actualidad, estas cámaras UV se utilizan ampliamente para la detección de corona en líneas de transmisión y subestaciones, con mejoras técnicas que se produjeron rápidamente durante la década de 2000.

Del mismo modo, la localización acústica de descargas parciales y de corona se realizó primero mediante el oído humano y la limitada triangulación que puede realizar. Luego se aplicaron micrófonos direccionales en el rango audible para localizar mejor los puntos de DP. La relación señal/ruido de la DP se mejoró con el desarrollo de los micrófonos direccionales de ultrasonidos en la década de 1960. La DP y la corona producen un mayor rendimiento en las frecuencias de ultrasonidos, especialmente en la zona de 35 - 50 kHz (Fig. 1) [4]. Sin embargo, siempre hubo problemas de localización precisa debido a la ampliación del campo de visión con la distancia, así como a reflejos en superficies duras y planas.

Desde hace un año existe una nueva tecnología acústica. Se trata de una cámara acústica que contiene docenas de diminutos micrófonos que se combinan para producir imágenes de las fuentes de sonido, superpuestas sobre una imagen convencional de luz visible del objeto de prueba [5]. La cámara se desarrolló originalmente para la detección de fugas de gas pero también puede utilizarse para localizar descargas superficiales. La cámara acústica evaluada, la Fluke ii910 tiene 64 micrófonos que funcionan en los rangos de 2 - 50 kHz o 2 - 100 kHz. El operario puede seleccionar un ancho de banda de 5 a 20 kHz y cualquier frecuencia central dentro de este rango a través de la pantalla táctil. Nominalmente, puede detectar la imagen acústica de objetos situados a una distancia de entre 0,5 y 100 m, por lo que se puede utilizar con seguridad para detectar DP y de corona cuando hay alta tensión. El nivel de sonido se mide en dB y hay una escala codificada por colores para el nivel de sonido. Este dispositivo en particular tiene un modo en el que se puede medir el nivel de sonido frente a un ciclo de CA inferido de 50/60 Hz, lo que produce un patrón acústico de DP de fase resuelta (Phase-resolved partial discharge, PRPD). Tanto las instantáneas como los videos se pueden grabar en formatos estándar.

En este artículo se evalúa la eficacia de la cámara acústica para localizar la DP superficial y de corona utilizando un objeto de prueba de corona de punto a plano y varios objetos de prueba de bobinas y devanados del estator. En concreto se determinaron los siguientes aspectos:

- Frecuencia óptima de detección
- Efecto de la distancia al objeto de prueba
- Comparación de la tensión de inicio de DP (PDIV) medida con las cámaras acústicas y UV.

Objetos de prueba y equipo

El objeto de prueba de corona (T1) tenía una geometría punto-plano. El radio del punto era de aproximadamente 250 µm y el espacio entre el punto y el plano de tierra era de 25 mm. La PDIV aproximada era de 6 kV rms CA. Esto es similar al objeto de prueba de corona descrito en IEEE 1799 [6].

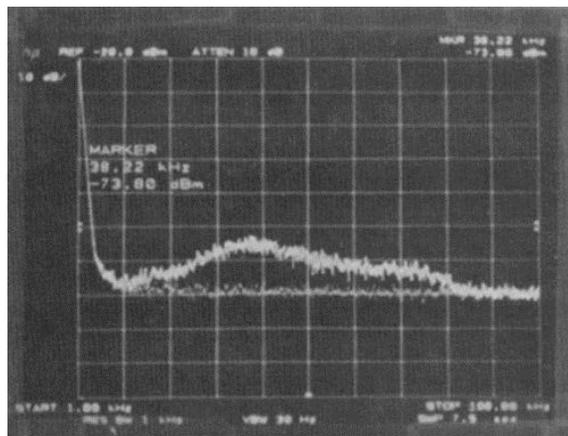


Fig. 1. Respuesta acústica de la DP superficial frente a la frecuencia (la línea más tenue es el ruido de fondo sin tensión). La escala vertical es de 10 dBm/div y la escala horizontal va de 1 kHz a 100 kHz. Se utilizó un micrófono B&K 4135, que tiene una respuesta plana hasta 100 kHz. [4].

También se utilizaron varios objetos de prueba de bobina de estator. T2 era una bobina de 13,8 kV que se había sometido a pruebas de resistencia a la tensión. El revestimiento semiconductor de la ranura de DP (OCP) había experimentado un grave deterioro, con una serie de lugares en los que el semiconductor había desaparecido debido a la DP superficial. La bobina también sufrió un deterioro de la conexión entre el revestimiento de carburo de silicio y el revestimiento semiconductor. La bobina se montó en una ranura ficticia conectada a tierra.

El objeto de prueba T3 era un conjunto de tres bobinas con una capacidad nominal de 2,4 kV de fase a fase, con revestimientos semiconductores especialmente aplicados en una de las patas de la bobina en la ranura, que podía estar conectada a tierra o flotante. Las tres bobinas estaban conectadas a una fuente de alimentación de CA trifásica. Las bobinas tenían una DP interna natural en la zona de la ranura. Al mover las bobinas una respecto a la otra, también se podía crear una DP de fase a fase en las zonas de los devanados finales.

El objeto de prueba T4 procede de una bobina sometida a una prueba de oscilación térmica, donde los conductores de cobre se separan del aislamiento a tierra. Esto crea una DP por delaminación interna. La barra también presentaba un pequeño deterioro del revestimiento de supresión de DP. La barra tenía una potencia nominal de 11 kV.

El objeto de prueba T5 era un devanado del estator de motor de 6 kV. El origen de la DP en la salida de la ranura no se conocía antes de la prueba y se pudo localizar con la cámara acústica.

La DP eléctrica se midió con un PDTech DeltaMaxx que funcionaba en el rango de baja frecuencia (IEC 60270). Además de la cámara acústica, la imagen UV de las fuentes se midió con una cámara OFIL DayCor Superb.

Frecuencia de detección

Ambos objetos de prueba T1 y T2 se utilizaron para encontrar la mejor frecuencia para detectar DP en medio del ruido acústico. En el caso de T1, las distancias entre el objeto de prueba y la cámara oscilaban entre 1 y 8 m. En el caso del objeto de prueba T2, la distancia era de 2 a 4 m. La figura 2 muestra la cámara utilizada con el objeto de prueba de la bobina T2. En todos los casos, el objeto de prueba se utilizó con una tensión constante durante 5 minutos antes de obtener las imágenes, para garantizar una fuente de DP/corona estable. Se seleccionaron frecuencias centrales de 10 kHz a 90 kHz en incrementos de 10 kHz con un ancho de banda de +/- 5 kHz.

La Fig. 3 muestra las imágenes acústicas registradas a 2 m y 8 m del objeto de prueba de punto a plano para una tensión de 10 kV rms, que está muy por encima de la PDIV. El círculo de color arco iris está centrado en la corona. La imagen muestra el nivel de sonido máximo en dB en la parte superior derecha de la imagen. El nivel de sonido máximo fue de 24 dB a 2 m y de 12 dB a 8 m para la misma tensión aplicada medida de 35 a 45 kHz. La cámara acústica dispone de una función para localizar automáticamente la fuente del sonido en el rango de frecuencias seleccionado y determinar la distancia desde la fuente de la DP a la cámara. Sin embargo, la Fig. 3b muestra que para esta configuración en particular la fuente de la descarga de corona no se encontró automáticamente a 8 m (la fuente se localizó automáticamente a distancias de hasta 6 m).

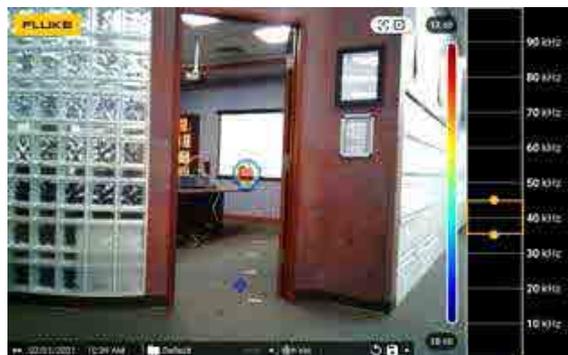
La Tabla 1 muestra la banda de frecuencias frente al nivel sonoro de la DP en dB a tres distancias para el objeto de prueba punto a plano (T1), a 10 kV rms. La magnitud de la DP registrada con un detector de DP convencional fue de 10 nC. La segunda columna muestra el nivel sonoro registrado cuando el punto-plano no tenía tensión y por tanto tampoco corona. Este "umbral mínimo de ruido" depende del



Fig. 2. Fotografía de la cámara acústica utilizada para detectar DP en la bobina T2.



(3a)



(3b)

Fig. 3. Imagen acústica de la corona punto a plano registrada a 2 m (a) y 8 m (b) del objeto de prueba T1 a 35 - 45 kHz

Frec. central* (kHz)	Umbral mínimo de ruido** (dB)	Distancia desde el objeto de prueba (m)					
		2 m		4 m		8 m	
		dB	Neto	dB	Neto	dB	Neto
90	40	40	0	40	0	40	0
80	39	40	1	40	1	40	1
70	33	37	4	34	1	34	1
60	27	35	8	27	0	27	0
50	20	32	12	24	4	20	0
40	10	30	10	20	10	12	2
30	9	26	17	19	10	12	3
20	7	25	18	18	11	11	4
10	3-11	20	-	15	-	7	-

*Ancho de banda +/- 5 kHz

**Sin aplicar tensión

Tabla 1. Niveles de sonido de la cámara acústica frente a la frecuencia y la distancia para el objeto de prueba punto a plano

ruido ambiental y era independiente de la distancia del objeto de prueba. Por encima de 75 kHz, el nivel de sonido era el mismo con y sin tensión. En el rango de 5 - 15 kHz, la imagen acústica tenía muchas "manchas" grandes sobre la imagen, presumiblemente a causa del ruido de fondo, y, por tanto, no se podía identificar la fuente de la corona. Las columnas "Neto" de la Tabla 1 muestran la diferencia entre el nivel de sonido con y sin tensión. En general, a medida que el rango de frecuencias de detección disminuía, se medían niveles de sonido netos más altos, aunque se observaron más "manchas" que no estaban asociadas a la corona. Como se observa en [4], parece que las frecuencias de 30 - 50 kHz son óptimas para la detección de la corona. A medida que aumenta la distancia, el nivel de sonido bruto y neto disminuye. Esto es de esperar ya que, en general, las frecuencias altas se atenúan con mayor intensidad que las bajas. Además, para una distancia fija, a medida que la frecuencia disminuye, el área de la imagen acústica aumenta, presumiblemente debido a las longitudes de onda acústica más largas a frecuencias más bajas.

La Tabla 2 muestra el nivel sonoro de la DP frente a la frecuencia para una bobina del estator (T2) con 2 m y 4 m entre la cámara acústica y la bobina. La bobina tenía revestimientos semiconductores gravemente dañados, y la DP era evidente en estos lugares defectuosos cuando tenía una tensión de 8 kV rms de línea a tierra. De nuevo, las mejores frecuencias para detectar la DP parecen estar en el rango de 30 - 50 kHz. Los rangos de frecuencia superiores producen poca señal de ultrasonidos por encima del umbral mínimo de ruido, mientras que en las frecuencias más bajas el ruido ambiental oscurece la fuente de DP. La Fig. 4a muestra una imagen acústica de la bobina con DP superficial. También se ve en esta foto un reflejo de la pared de la fuente de DP de la bobina original. Este reflejo desapareció al bajar la tensión, al igual que la fuente de DP. En el pasado, estos reflejos causaban muchos problemas con el uso de micrófonos direccionales de ultrasonidos. La Fig. 4b muestra la imagen UV de la misma fuente.



(4a)



(4b)

Fig. 4. DP producida por un daño severo del semiconductor en una bobina que funciona a 8 kV rms en una ranura simulada a 4 m de la cámara. (a) muestra la imagen acústica a 25 - 35 kHz. El círculo arcoíris es la verdadera fuente de la DP. Observe el reflejo azul (nivel de sonido inferior) de la pared. (b) muestra la imagen registrada con la cámara UV, donde los pequeños puntos blancos indican una descarga.

Frec. central (kHz)	Umbral mínimo de ruido (dB)	Distancia desde el objeto de prueba (m)			
		2 m		4 m	
		dB	Neto	dB	Neto
90	40	43	3	41	1
80	39	42	3	40	1
70	33	41	8	34	1
60	27	39	12	32	5
50	22	37	15	30	16
40	11	32	21	27	16
30	7	29	22	25	18
20	7	27	20	24	14
10	-	26	-	26	-

Tabla 2. Nivel de sonido de la DP frente a la frecuencia y la distancia para el objeto de prueba de la bobina T2

Comparación entre cámaras UV y acústica para medir la PDIV

Los objetos de prueba de DP de la corona T1 y de la bobina T2 se utilizaron para comparar la tensión de inicio de DP (PDIV) y las tensiones de extinción de DP (PDEV) mediante la cámara acústica y de UV, así como el detector de DP convencional. La cámara acústica se configuró para medir la PDEV y la PDIV en la banda de 35 - 45 kHz ya que se comprobó que este era el rango óptimo en las pruebas anteriores. En casi todos los casos, las tensiones de inicio y de extinción estaban dentro de los 100 V de diferencia. En el caso de la bobina, no hubo diferencias en las tensiones de inicio y extinción a distancias de 2,5 m y 4 m (Tabla 3).

Objeto de prueba/ distancia (m)	Cámara UV		convencional		Cámara acústica	
	PDIV	PDEV	PDIV	PDEV	PDIV	PDEV
T1 a 2 m	6,2	6,2	6,3	6,2	6,2	6,2
T2 a 2,5 m	-	-	3,5	3,2	3,5	3,2
T2 a 4 m	-	-	3,5	3,5	3,5	3,5

Tabla 3. Comparación de PDIV y PDEV (kV) para diferentes detectores

La prueba de DP convencional en T1 mostró que la PRPD presentaba diferentes patrones para la DP positiva (en el semiciclo negativo) y el pico de DP negativa alta (ciclo de CA positivo) para la corona punto a plano. La DP negativa era de unos 10 nC mientras que la DP positiva era de unos 2 nC. Cerca de la tensión inicial, la corona negativa con picos era intermitente, mientras que la corona positiva era más estable.

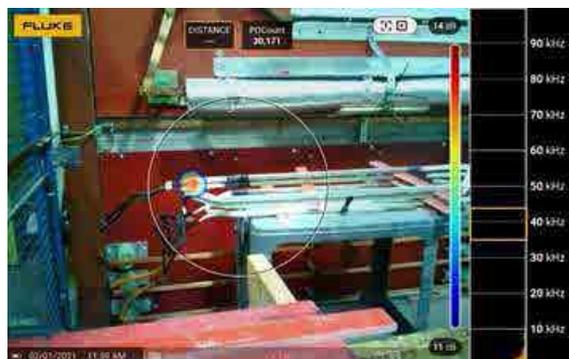
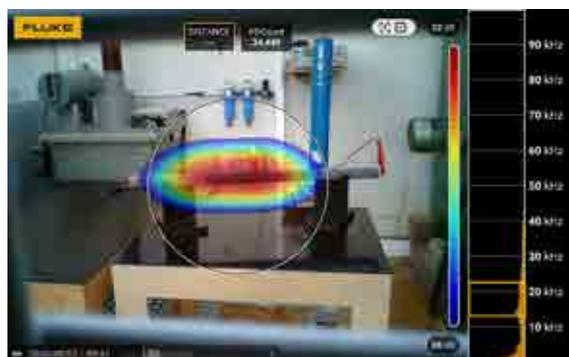


Fig. 5. DP de fase a fase en el devanado final, donde las bobinas de las fases A y C casi se tocan. La fase B se encuentra en la parte inferior de la pila de 3 co.

Una de las ventajas de la cámara UV es que puede hacer zoom para acercarse a la ubicación de la descarga, mientras que la cámara acústica tiene un campo de visión fijo (Fig. 4a frente a 4b).

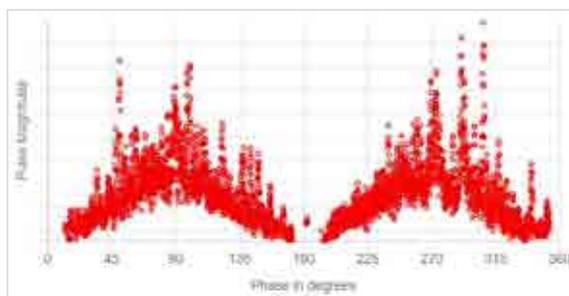
Fotografías instantáneas de diferentes objetos de prueba

La cámara acústica tiene la capacidad de grabar tanto instantáneas de la actividad de la DP, como de grabar vídeo durante un máximo de 5 minutos, lo que resulta útil para realizar estudios y medir la PDIV/PDEV. Se pueden ver ejemplos de imágenes de vídeo en [7]. En esta sección se muestran ejemplos de instantáneas de las imágenes acústicas de diferentes objetos de prueba.



(6a)

La Fig. 5 muestra la DP de fase a fase del objeto de prueba T3 entre las bobinas A y C del devanado final, cuando la tensión de fase a fase era de 6,9 kV, o de 4,1 kV de línea a tierra. La posición de la bobina de la fase A se ajustó de manera que las fases A y C casi se tocaran cerca de los cables de conexión. Las porciones de ranura de las bobinas no estaban conectadas a tierra, lo que evitaba la DP de fase a tierra.



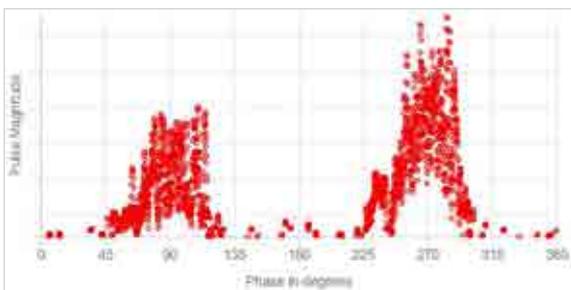
(6b)

T4 es una barra del estator que tiene delaminación entre los conductores de cobre y la tierra. Con la cámara acústica ajustada en el rango de 13 - 23 kHz, la actividad acústica se ve a lo largo de toda la barra donde había tensión eléctrica (Fig. 6a). Utilizando la capacidad de la cámara para descargar el nivel de sonido al tiempo, se produjo el gráfico de nivel de sonido frente al ángulo de fase de CA (Fig. 6b). Esto muestra la típica respuesta de fase de DP sin predominio de polaridad, lo que sugiere que la cámara es sensible a la DP por delaminación, aunque a una frecuencia más baja (que será más susceptible al ruido) y a un nivel de sonido más bajo.

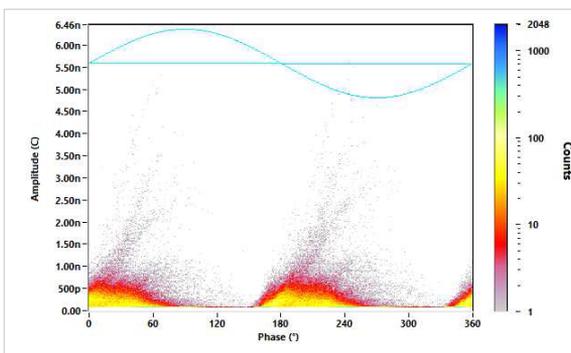
Fig. 6. Posible DP por delaminación interna (a) de una barra que ha sufrido oscilación térmica. Observe el rango de frecuencia más bajo utilizado en (a), así como el nivel de sonido mucho más bajo. (b) muestra el gráfico "PRPD" producido por la cámara acústica suponiendo un ciclo de CA de 50 Hz



(7a)



(7b)



(7c)

Fig. 7. Cámara acústica y medida de DP convencional a partir de una prueba de DP fuera de línea en una fase. La DP en la salida de la ranura de una bobina se muestra claramente en (a), mientras que (b) muestra la PRPD acústica con predominio positivo. El ángulo de fase real puede no ser correcto en (b). (c) es la PRPD de prueba de DP convencional fuera de línea.

Referencias

- [1] IEEE 1434:2014, "Guía para medir descargas parciales en máquinas eléctricas de CA"
- [2] G.C. Stone et al, "Electrical Insulation for Rotating Machines", 2ª edición, Wiley-IEEE Press, 2014.
- [3] K.W. Forsyth, "Electro-optical, non-contact measurement of electrical discharges", patente de EE.UU. 6476396B1, noviembre de 2002.
- [4] R. Van Haeren et al, "Preventing failure in outdoor distribution class metalclad switchgear", IEEE Trans PAS, octubre de 1985, págs. 2701-2712.
- [5] C.P. Suurmeijer et al, "Handheld Acoustic Imager", patente de EE.UU. D907,097, enero de 2021.
- [6] IEEE 1799:2012, Prácticas recomendadas para las pruebas de control de calidad de las descargas externas en las bobinas del estator, barras y devanados.
- [7] <https://irispower.com/learning-centre/acoustic-camera-video-files/>

La Fig. 7a muestra la imagen acústica a 35 - 45 kHz de un devanado de estator de 6 kV (T5) con una fase con tensión de 3kV. La DP superficial es evidente en la salida de la ranura de una bobina. Esto se verificó mediante una inspección visual de la ranura.

Conclusiones

La cámara acústica de DP parece ser un instrumento muy útil para mejorar la capacidad de localizar la DP superficial a una distancia segura de los objetos de prueba cargados con tensión. La cámara tiene claramente suficiente resolución espacial para identificar los lugares reales de las descargas parciales en la mayoría de los equipos prácticos de alta tensión. La capacidad de registrar la magnitud de las descargas parciales (que se supone que está correlacionada con el nivel de sonido) frente al ciclo de CA ofrece la seguridad de que se están detectando realmente las DP y de corona. Las tensiones de inicio y extinción de DP para los detectores de DP convencionales, la cámara acústica y la cámara UV, parecen ser más o menos las mismas para la DP superficial y de corona. Una ventaja significativa de la cámara acústica respecto al antiguo micrófono de ultrasonidos es que distingue fácilmente entre los lugares de DP reales y los reflejos. Para la DP superficial y de corona, la mejor relación señal/ruido parece estar en el rango de 30 - 50 kHz. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con las cámaras UV, hay indicios de que se puede detectar una DP interna significativa, aunque con una magnitud menor.

Agradecimientos

Los autores quieren dar las gracias a Fluke Corporation por prestarnos la cámara acústica ii910. También damos las gracias al Sr. Christoph Herold del Instituto Von Roll en Suiza por su ayuda.

Fluke. Keeping your world up and running.®

Fluke Ibérica, S.L.
Avda de la Industria, 32
Edificio Payma
28108 Alcobendas (Madrid)
Spain
Tel: +34 91 414 0100
E-mail: cs.es@fluke.com
www.fluke.es

©2021 Fluke Corporation. Reservados todos los derechos. Información sujeta a modificación sin previo aviso. 04/2021 210349-es

No se permite la modificación del presente documento sin una autorización escrita de Fluke Corporation.