

Artículo

Mediciones de descargas parciales en máquinas rotativas: experiencia e innovación

Autores

Fabian Oettl, Michael Krueger, Omicron electronics GmbH, Klaus Wojciech Koltunowicz, Laurentiu-Viorel Badicu, Bogdan Gorgan, Omicron Energy Solutions GmbH, Berlin

Resumen

La medición de descargas parciales (DP) es hoy en día un método aceptado en todo el mundo para la evaluación basada en el estado del aislamiento de los estatores en máquinas rotativas. Este artículo describe las ventajas de utilizar un sistema de medición de DP completamente digital para esta evaluación. Este sistema incluye capacidades avanzadas de hardware y software para mejorar el diagnóstico del aislamiento mediante el análisis de DP. La sensibilidad de las mediciones de DP puede verse notablemente limitada por un alto nivel de ruido. Este artículo describe cómo esto se alivia con funciones de última generación basadas en técnicas síncronas multicanal y multifrecuencia para la separación de las señales de ruido de las provenientes de los defectos de DP. Se describen ejemplos de la evaluación de los datos, incluyendo el uso del reconocimiento automático de patrones de DP.

Palabras clave

Máquinas eléctricas rotativas, sistema de aislamiento, descargas parciales, supresión de interferencias, reconocimiento de patrones

Introducción

Las máquinas eléctricas rotativas (motores y generadores) se encuentran entre los activos más críticos de un sistema de suministro de energía o una instalación de producción industrial que funcione correctamente. El tiempo de inactividad no programado de la generación de energía eléctrica o la falla de un motor en una línea de producción puede ser un problema muy costoso. Los daños en el aislamiento del estator de una máquina son una causa frecuente de defectos en dichos equipos. La medición de descargas parciales (DP) constituye una herramienta de diagnóstico y mantenimiento adecuada que ofrece una identificación confiable y oportuna del estado, y que ha demostrado su eficacia en el campo en innumerables ocasiones.

Este artículo estudia los beneficios con más detalle. Se ofrece una comparación entre la medición de descargas parciales en línea y fuera de línea, así como las razones por las que tales mediciones en máquinas eléctricas rotativas son tan útiles. También examinaremos cómo los sistemas de medición de descargas parciales digitales asistidos por software ayudan a los usuarios en su trabajo. Esto abarca desde la separación de las diversas fuentes de DP en la máquina hasta la interpretación automática de los fenómenos.

Medición de las descargas parciales

La medición de descargas parciales en los devanados de las máquinas eléctricas rotativas constituye un método no destructivo y no invasivo para identificar los puntos de descarga individuales en su aislamiento.

Algunas causas de descargas parciales internas en el aislamiento de mica de resina epoxy utilizado en las máquinas de media tensión son de laminación de las capas de aislamiento, erosión mecánica resultante de la vibración o la abrasión de los recubrimientos de control por nombrar algunas. Los métodos anteriores difieren de otros, tales como las mediciones de la resistencia del aislamiento o del factor de pérdida, en que proporcionan una imagen completa del estado del aislamiento de todo el devanado, de las fases individuales o de las correas de fase, independientemente de hasta qué punto se pueda separar el devanado.

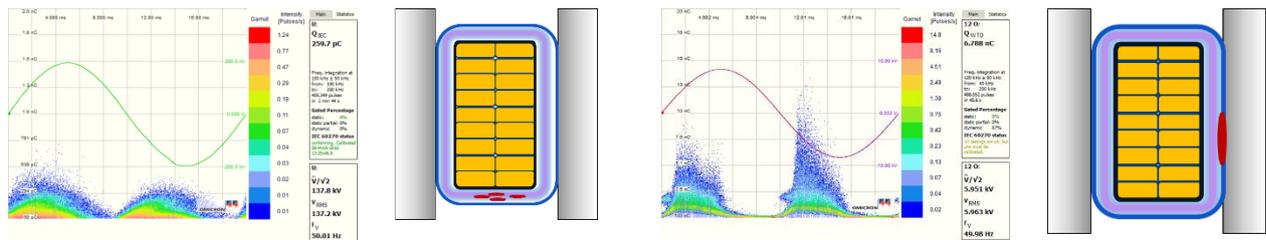
Al igual que los otros dos métodos, los resultados de una medición de DP deben interpretarse una vez realizada la medición. Los instrumentos de medición modernos ofrecen métodos de grabación muy elegantes, como los archivos de video, que permiten reproducir la medición en forma de película en un PC tantas veces como sea necesario.

La física que explica las descargas parciales es un tema muy amplio, por lo que su descripción completa supera el alcance de este artículo. Sin embargo, conviene hacer una breve descripción de la siguiente manera:

Según la norma IEC 60270, "una descarga parcial se define como la ruptura dieléctrica del aislamiento de equipos de alta tensión como resultado de un aumento localizado de la intensidad de campo causado por la contaminación o por los puntos de descarga en el medio aislante. El pulso electromagnético resultante liberado puede medirse para indicar el estado del aislamiento".

La medición de las descargas parciales permite identificar las fallas de fabricación y el envejecimiento del aislamiento de las máquinas eléctricas, lo que permite identificar a tiempo las causas potenciales de las fallas de las máquinas. Las actividades de mantenimiento subsiguientes pueden programarse para facilitar el despliegue selectivo de recursos frecuentemente escasos.

Lo que se conoce como el patrón de PRPD se ha establecido como la manera más confiable de interpretar la medición de las DP. PRPD significa **Phase Resolved Partial Discharge** (descarga parcial resuelta en fase). Este enfoque correlaciona los pulsos de DP individuales en términos de su frecuencia, amplitud, polaridad y fase en función de la alta tensión. Su ventaja radica en la correspondencia entre patrones típicos y los tipos de defecto del devanado. Esto permite no sólo identificar el tipo de falla, sino también clasificar el riesgo de acuerdo con las normas internacionales. Un ejemplo se ilustra en la Figura 1, donde el patrón resuelto en fase se correlaciona con los defectos conocidos correspondientes.



Descargas en el aislamiento o descargas internas

Descargas entre el conductor y el metal conectado a tierra que rodea el conductor, o descargas de ranura

Figura 1: Patrón de descarga parcial resuelta en fase con los defectos asociados

Además de los patrones resueltos en fase de la medición individual, la interpretación de los resultados de una serie de mediciones consecutivas proporciona la evidencia más confiable sobre el estado del aislamiento en una máquina. Cualquier cambio del patrón de los resultados resueltos en fase, o un rápido aumento de la amplitud, es una señal segura de que es necesario tomar medidas. Para ello es necesario realizar mediciones de las DP a intervalos periódicos utilizando una fuente externa de alta tensión (de aquí en adelante, "medición de descargas parciales fuera de línea") o mediciones continuas en la máquina, sin fuente externa, mientras está en funcionamiento (de aquí en adelante, "medición de descargas parciales en línea"). Ambos métodos tienen sus ventajas y desventajas, que se analizarán con más detalle en este artículo.

A menudo se hacen esfuerzos para definir valores límite para las descargas parciales y para evaluar el estado del aislamiento simplemente observando la amplitud de las DP. Esto constituye un intento equivocado de resolver procesos complejos mediante el uso de un criterio SÍ/NO. Sólo en muy raras ocasiones puede una sola medición desencadenar una necesidad inmediata de acción.

La medición de DP es una herramienta de mantenimiento adecuada que identifica el estado del aislamiento de las máquinas eléctricas rotativas y, sobre esta base, ayuda al equipo de ingeniería a determinar qué medidas de mantenimiento se deben adoptar en todo el parque de máquinas.

Respuesta de propagación del pulso de DP en el devanado

Como la medición directa de los pulsos de descarga en el punto de descarga no es posible en los sistemas de aislamiento complejos, como los existentes en generadores o motores, la carga aparente, que puede medirse en los terminales, se utiliza en su lugar para interpretar los resultados de las mediciones de DP.

Para interpretar correctamente los resultados de una medición de DP en el devanado del estator, el técnico de pruebas debe ser consciente de que el breve pulso unipolar de DP se transforma a medida que pasa a los terminales del generador mediante la atenuación, las reflexiones, la dispersión y los efectos de acoplamiento electromagnético en una señal oscilante que se amplía en mayor o menor medida. Dependiendo de la configuración del filtro en el instrumento de medición, los valores de amplitud de la carga pueden estar estrechamente relacionados con la fuente de la carga. Por esta razón, la medición comparativa discutida anteriormente siempre debe llevarse a cabo utilizando los mismos parámetros. Para demostrar este punto, se perforaron varios orificios en el devanado del estator de un hidrogenerador clausurado con una potencia nominal de 5,6 MVA. El objetivo era inducir en el devanado un pulso de descarga parcial artificial con una amplitud conocida y medir el pulso en el terminal utilizando diversos ajustes de filtro.

La Figura 2 muestra la configuración del experimento. Se inyectaron varios pulsos con una carga definida de 10 nC a lo largo del devanado. La medición se realizó en los terminales del cable utilizando un condensador de acoplamiento C_c y una impedancia de medición.

El resultado es algo denominado "matriz de atenuación" (Figura 3), que muestra la carga aparente en los terminales en función del punto de inyección del punto de descarga artificial. Consulte (F. Öttl, 2016) para una descripción más detallada del experimento y sus resultados.

La Figura 2 muestra la configuración del experimento. Se inyectaron varios pulsos con una carga definida de 10 nC a lo largo del devanado. La medición se realizó en los terminales del cable utilizando un condensador de acoplamiento (Cc) y una impedancia de medición.

El resultado es algo denominado "matriz de atenuación" (Figura 3), que muestra la carga aparente en los terminales en función del punto de inyección del punto de descarga artificial.

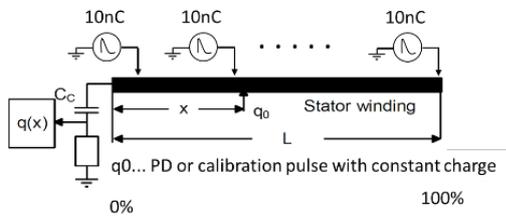


Figura 2: Diagrama de circuito equivalente de inyección a lo largo del devanado

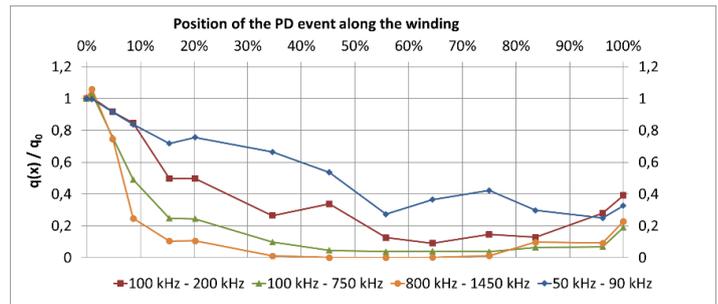


Figura 3: Matriz de atenuación; resultado de la medición en el cable al inyectar 10 nC a lo largo del devanado, registrado en varias frecuencias de filtro.

El resultado de estas mediciones selectivas de frecuencia confirma el hecho bien conocido de que una medición confiable de la carga aparente en los generadores sólo es posible cuando el filtro de pasa banda se ajusta a una frecuencia baja de banda media.

La ventaja de la medición selectiva de frecuencia se puede ver claramente en la Figura 3. Dependiendo de la frecuencia del filtro, los diferentes puntos de inyección son más o menos pronunciados. Esta característica es utilizada por los modernos sistemas de medición de DP para separar las fuentes.

Cuasintegración y detección de picos

Como ya se ha mencionado, la medición de DP determina la carga aparente. El resultado de este método se indica en culombios. En el mundo angloamericano, los valores se expresan generalmente en mV. Con frecuencia se plantea en qué medida se pueden comparar los dos métodos de medición. La respuesta resumida es la siguiente: Los valores de nC y mV no se pueden comparar entre sí.

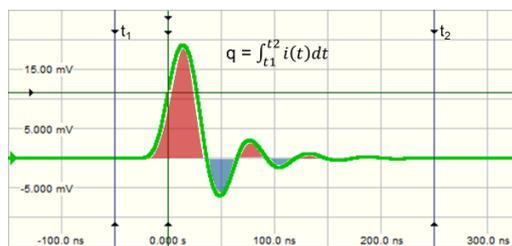


Figura 4: Integración de la carga aparente en la ventana de tiempo

En pocas palabras, el cálculo de la carga aparente puede verse como una integración del área delimitada por el pulso de DP (Figura 4). Esta explicación no es 100% correcta, ya que los componentes de CC de la señal no pueden pasar por el condensador de acoplamiento. Para cualquier otra explicación, el modelo es suficiente. Este método tiene dos ventajas principales:

- Primero, el área es proporcional a la energía liberada en el punto de descarga y por lo tanto al tamaño del punto de descarga.
- En segundo lugar, otros defectos, cuyas fuentes se encuentran a cierta distancia de los terminales, pueden detectarse con un grado razonable de precisión (Figura 3), ya que, suponiendo que se seleccione el filtro adecuado, pueden medirse los componentes de frecuencia "lenta" del pulso.

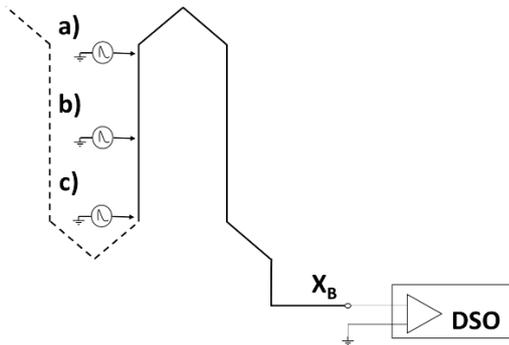
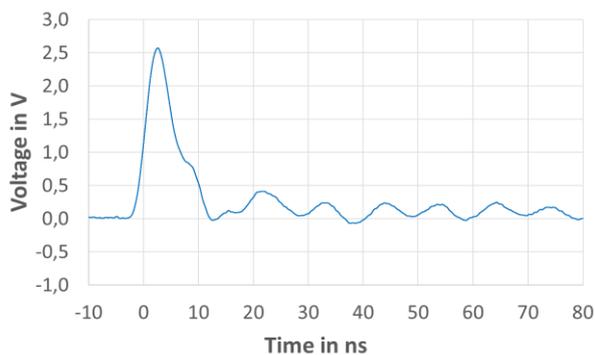
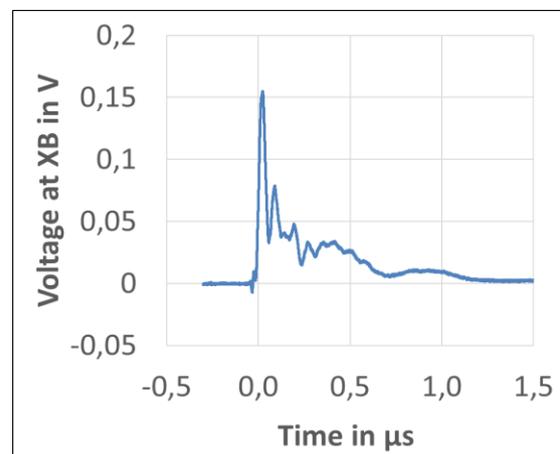


Figura 5: Diagrama del devanado que muestra los puntos de inyección y el osciloscopio digital en el punto de medición.

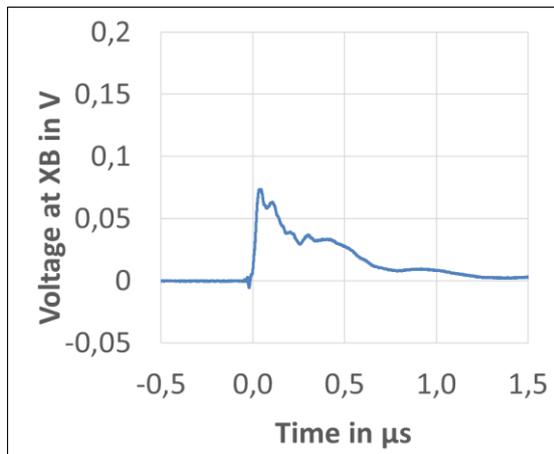
La detección de picos, por otro lado, mide el pico más alto de la oscilografía en mV y, por lo tanto, requiere un filtro de banda ancha muy amplio. Los componentes de alta velocidad de la señal dominan, pero se atenúan mucho después de unos pocos tramos del devanado. Esto se ilustra en la Figura 6 utilizando una medición práctica en un devanado de estator de un hidrogenerador clausurado con una potencia nominal de 102 MVA. El devanado se hizo accesible en la parte recta y se inyectó un pulso en tres posiciones cercanas al terminal donde se toma la medición con un osciloscopio digital. Una comparación de las señales en la Figura 6 muestra un "estiramiento" de las señales que, después de pasar a través de una sola barra inferior y secciones de una barra superior, ya muestran tiempos de subida/bajada mucho más largos que el corto pulso de calibración. La amplitud descende de 2,5 V a 155 mV (!) después de una sola barra Roebel. Una medición de las señales inyectadas en los puntos b) y c) muestra una reducción adicional a 75 mV y 60 mV de pico.



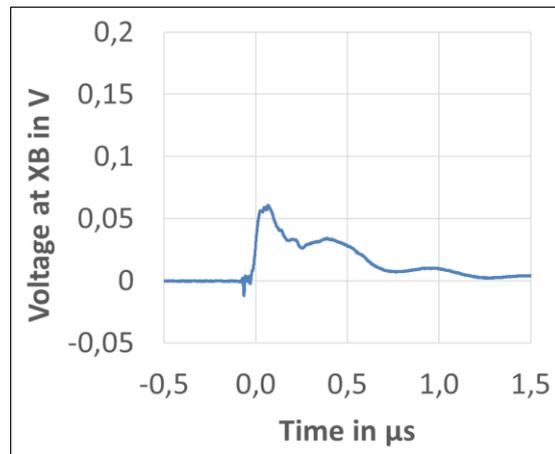
Pulso de inyección



Medición en el terminal X_B cuando se inyecta en a)



Medición en el terminal X_B cuando se inyecta en b)



Medición en el terminal X_B cuando se inyecta en c)

Figura 6: Inyección del pulso en tres puntos diferentes a lo largo de la barra superior en la ranura 2 (2ª barra después del punto de estrella) como se muestra en la figura 4. Atención: Note las diferentes escalas utilizadas para las señales de inyección.

Como ya se ha indicado, los efectos de atenuación, reflexión, dispersión y acoplamiento electromagnético provocan el "estiramiento" de las señales, que se inyectan a distancias de tan sólo 3 m y 5 m del terminal.

Medición de descargas parciales en línea o fuera de línea

Si se repite la medición de mV anterior midiendo la carga aparente en los mismos puntos de inyección, los 10 nC inyectados se detectarán como 9 - 9,5 nC en los terminales. Claramente, esto depende de los ajustes del filtro en la Figura 3, pero se aplica a cada ancho de banda de filtro de "baja frecuencia".

Ya hemos visto que hay dos formas posibles de medir las descargas parciales: Mediciones fuera de línea, donde la máquina está desconectada y la tensión de prueba proviene de una fuente externa, y mediciones en línea, donde la máquina se mantiene en funcionamiento y se realizan mediciones esporádicas o continuas utilizando condensadores de acoplamiento preinstalados (Figura 7).



Figura 7: Medición en línea con condensadores de acoplamiento instalados

En el caso de una medición en línea, los datos pueden ser generados en varios puntos operativos y bajo diferentes condiciones de carga o temperatura sin tener que apagar la máquina. Por lo tanto, las mediciones se realizan en condiciones reales de funcionamiento (Badicu, 2016). Sin embargo, esta ventaja se ve afectada por una probabilidad mucho mayor de que exista una interferencia externa. Ésta no proviene del sistema de aislamiento de la máquina, por lo que no debe incluirse en el diagnóstico. Para evitar este

problema y garantizar una distancia adecuada entre la señal útil y la señal no deseada, normalmente será necesario utilizar frecuencias de filtro más altas. Como se ha descrito anteriormente, los componentes de alta frecuencia medidos se atenuarán muy rápidamente entre su fuente y el punto de medición, lo que significa que sólo se pueden diagnosticar correctamente partes del devanado. A modo de compensación, la distribución de tensión del devanado hacia el punto de estrella disminuye cuando la máquina está en funcionamiento.

Las mediciones fuera de línea difieren en que todo el devanado se eleva al mismo potencial de alto voltaje, de modo que cualquier sitio de descarga que no aparezca durante la operación se verá en el patrón de resolución de fase, lo que aumenta en gran medida las posibilidades de detección temprana. Otra ventaja es que, en general, el nivel de ruido es muy bajo, lo que significa que se pueden utilizar frecuencias de filtro mucho más bajas. Esto permite medir pulsos lentos, lo que resulta en la detección de descargas parciales a lo largo de la mayor parte del devanado. Las mediciones fuera de línea también permiten calibrar la configuración de la prueba. Estas ventajas se ven compensadas por el hecho de que la medición es más costosa y lleva más tiempo, ya que la máquina debe desconectarse e instalarse una fuente externa (Figura 8). Por otra parte, este tipo de medición se lleva a cabo normalmente mientras se realiza el mantenimiento.

Como otra desventaja de las mediciones fuera de línea, hay que tener en cuenta la influencia de la humedad. Esto puede tener una influencia significativa en las descargas externas tales como descargas de ranura y/o descargas superficiales.

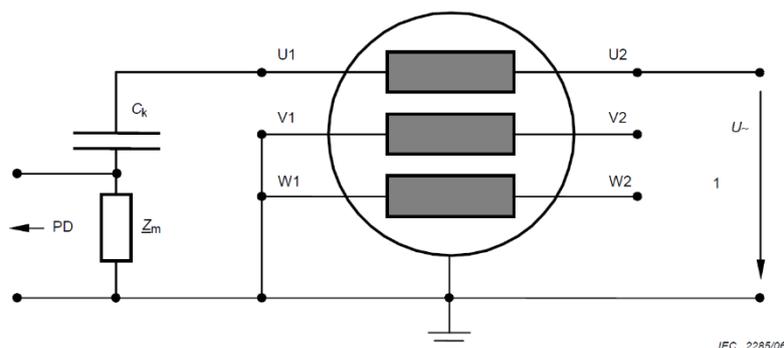


Figura 8: Circuito eléctrico equivalente de la medición fuera de línea para un canal en fase U.

Como los dos tipos de medición tienen sus ventajas y desventajas, y ofrecen diferentes posibilidades de diagnóstico, las mediciones fuera de línea y en línea pueden verse como formas complementarias de determinar el estado del aislamiento.

Separación de los fenómenos de descargas parciales

Cualquiera que haya realizado mediciones de DP en un motor o generador sabrá muy bien que los resultados normalmente se toman de dos o más fuentes de DP. Por lo tanto, para realizar una evaluación confiable del riesgo derivado de los fenómenos individuales, es importante separar estas fuentes de DP individuales. El ingeniero de pruebas se enfrenta normalmente a tres retos:

- 1) Interferencias externas
- 2) Superposición de los diversos fenómenos de DP
- 3) Acoplamiento cruzado de fases vecinas (medición en línea)

Para reducir al máximo las interferencias, las señales pueden digitalizarse en el punto de adquisición. La transmisión a larga distancia de las señales analógicas ya no se realiza, lo que hace que la medición sea lo más robusta y confiable posible. Los sistemas de medición selectiva de frecuencia también ofrecen la posibilidad de elegir diferentes ajustes de filtro e incluso medir a frecuencias más altas donde los niveles de

ruido son mucho más bajos. Sin embargo, esto debe hacerse con la máxima precaución, ya que la sensibilidad de la medición se ve fuertemente afectada por este parámetro (Figura 3).

Los puntos 2) y 3) anteriores pueden considerarse como un todo. Puede ser muy difícil diferenciar entre los diversos fenómenos en un patrón resuelto en una sola fase. Además de la experiencia, la inserción de las fuentes de DP individuales en varios intervalos de tensión en una medición fuera de línea puede, por ejemplo, ayudar con la interpretación. Si esto último no es posible, o existen altos niveles de ruido durante la medición en línea, los sistemas de medición síncronos, multicanal y selectivos en frecuencia ofrecen herramientas basadas en software que facilitan al usuario la extracción de conclusiones justificadas. He aquí algunos ejemplos:

- 3PARD (3 Phase Amplitude Ratio Diagram), diagrama trifásico de relación de amplitudes
- 3CFRD (3 Center Frequency Ratio Diagram, diagrama de relación de frecuencias de tres centros)

3PARD

En la figura 9 se muestra una representación esquemática del funcionamiento de 3PARD. Tres canales síncronos –en este caso las fases L1, L2 y L3– detectan el mismo pulso de descarga parcial a amplitudes variables dentro de una ventana de tiempo definida por el usuario. Si suponemos que el fenómeno ocurre en L1, aquí es donde la intensidad será mayor. Los otros dos canales también miden el pulso por acoplamiento cruzado en el devanado. La amplitud se transforma ahora en un vector que, cuando se agrega gráficamente, da un punto en el diagrama 3PARD. Si la fuente de DP aparece regularmente, los distintos puntos forman una nube, también conocida como "agrupamiento". Diferentes fuentes de DP forman varios agrupamientos en el diagrama. Estos agrupamientos pueden entonces ser separados y transformados de nuevo en un patrón resuelto en fase para su posterior análisis.

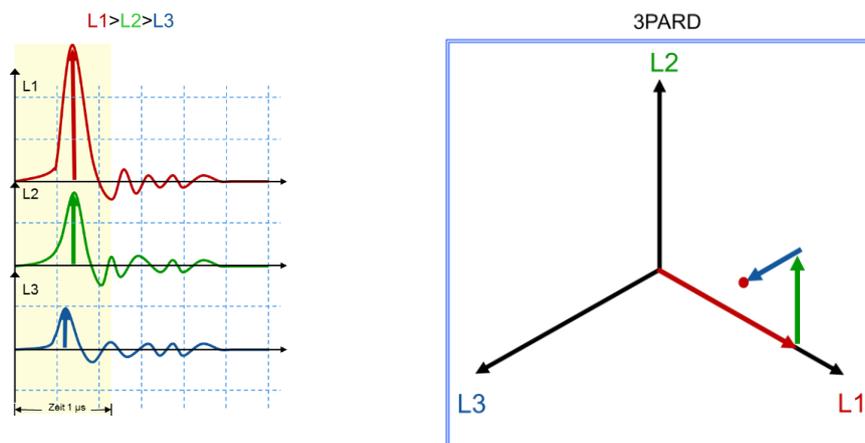


Figura 9: Cómo funciona el 3PARD; Izquierda: El pulso se detecta con amplitudes variables en los tres canales; Derecha: Agregación gráfica de los vectores en un diagrama 3PARD.

El ejemplo práctico que se muestra en la figura 10 ayudará a aclarar las cosas. Los tres canales individuales síncronos y sus patrones de DP resueltos en fase se muestran a la izquierda. Al tratarse de una medición en línea, la fase de cada una de ellas se desplaza 120°. La amplitud de la carga en cada uno de los patrones resueltos en fase es el valor instantáneo en culombios. La presencia de numerosas fuentes de DP, algunas de las cuales se superponen, se puede ver claramente. La vista 3PARD se muestra a la derecha de la figura.

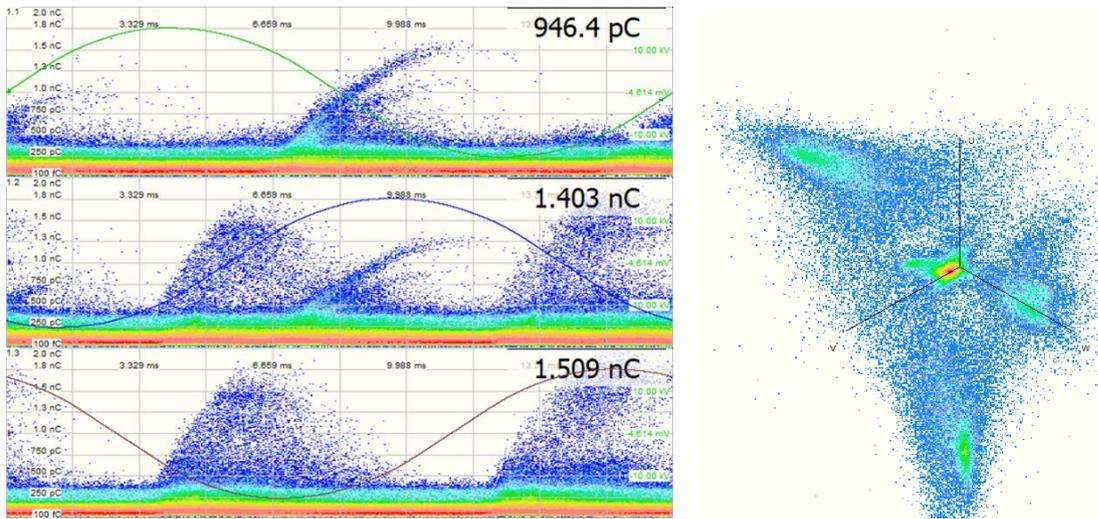


Figura 10: 3PARD, ejemplo práctico con medición de salida y visualización 3PARD.

Los cuatro agrupamientos en esta vista ahora pueden ser identificados y transformados de nuevo en sus patrones de DP resueltos en fase. La figura 11 muestra el procedimiento. Los fenómenos individuales pueden identificarse y llevarse a cabo una evaluación de riesgos. Con un poco de experiencia, la delaminación en el agrupamiento 2 y las descargas del cabezal del devanado entre las fases V y W también serán evidentes en la medición original. Sin embargo, la descarga interna en el agrupamiento 4 no se puede ver en la medición original, ya que está completamente oculta por el ruido identificado por el agrupamiento 1.

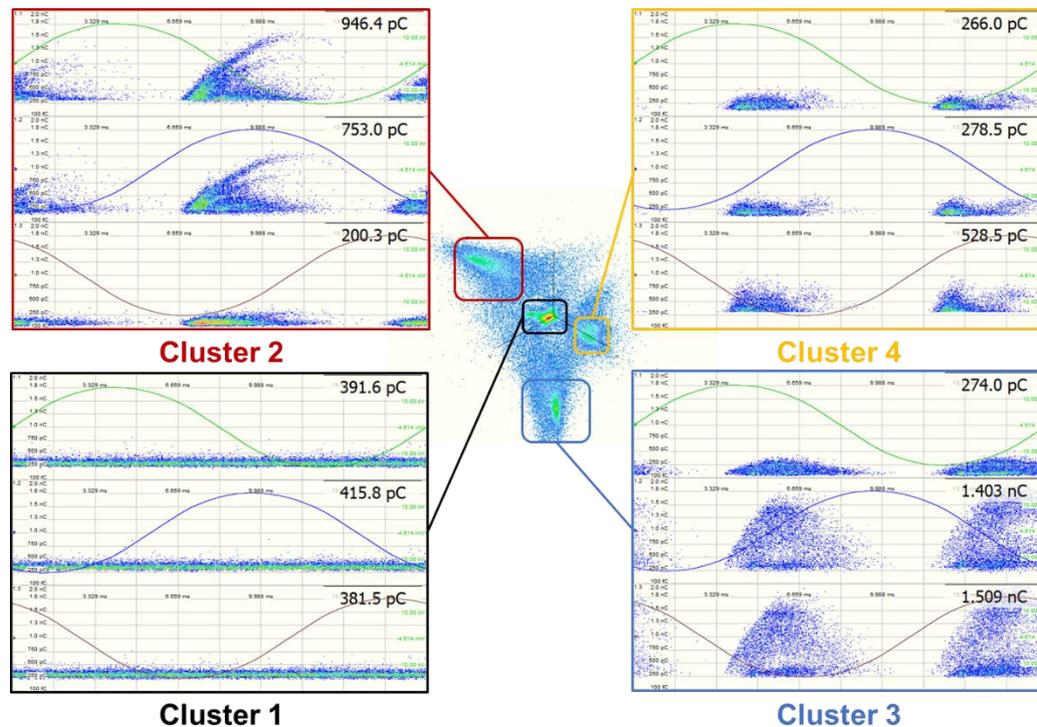


Figura 11: Separación de las fuentes de DP en la figura 10.

3CFRD

El método 3CFRD separa las fuentes de DP de manera similar y se utiliza principalmente en situaciones en las que no es posible medir utilizando tres canales, o cuando se requiere un criterio de decisión adicional aparte del 3FREQ. Este método mide los pulsos de DP al mismo tiempo utilizando tres anchos de banda de filtro diferentes. Dependiendo del mecanismo de creación, propagación y atenuación de las señales, las diferentes fuentes de DP también tienen diferentes amplitudes en los respectivos ajustes del filtro (Figura 12).

Estos, a su vez, se introducen en el diagrama de estrella descrito anteriormente y, tras la agregación gráfica, forman agrupamientos para los distintos fenómenos de DP.

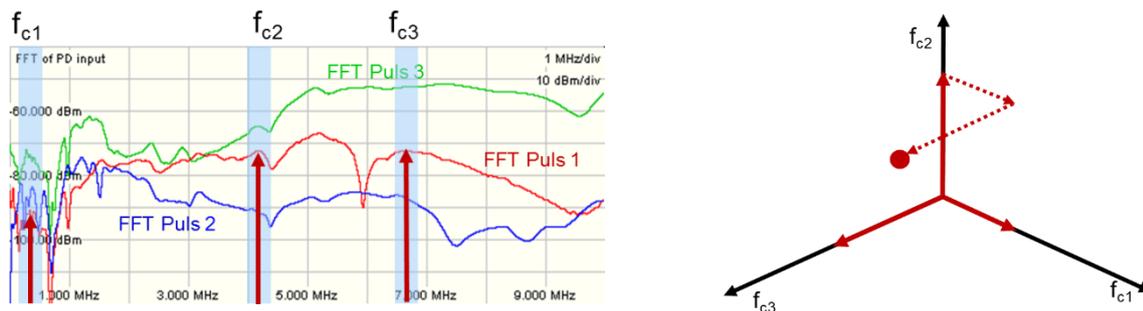


Figura 12: Una vez que se han agregado gráficamente en el diagrama de la derecha, que muestra el pulso de DP rojo, cada una de las tres fuentes de DP del diagrama de la izquierda forman agrupamientos diferentes.

Reconocimiento automático de agrupamientos

Hay disponibles herramientas de software que admiten la separación de agrupamientos descrita anteriormente. La separación automática es una condición previa para que la siguiente etapa facilite la mayor asistencia posible durante la evaluación. Como se ha descrito anteriormente, se puede suponer que cada agrupamiento representa una fuente de DP. Los distintos defectos generan descargas parciales cuyos patrones resueltos en fase son conocidos desde hace mucho tiempo. Después de la separación automática de las fuentes de DP, estos patrones pueden ser interpretados automáticamente usando el software.

Sin embargo, el resultado de esta interpretación asistida por software depende de ciertos parámetros del sistema, siendo uno de los más significativos el tiempo de medición, ya que éste debe ser lo suficientemente largo como para generar patrones de PRPD suficientemente claros. Suponiendo que éste sea el caso, el procedimiento se puede dividir en las cinco etapas siguientes:

1. Creación del 3PARD con los agrupamientos separados
2. Diferenciación entre la fuente de DP de la máquina y otras señales
3. Clasificación - Evaluación basada en el conocimiento
4. Clasificación - Reconocimiento del patrón
5. Informes

La identificación de agrupamientos se realiza mediante OPTICS (**O**rdening **P**oints **T**o **I**dentify the **C**lustering **S**tructure, orden de puntos para identificar la estructura del agrupamiento), un algoritmo basado en la densidad para identificar los agrupamientos. Sólo se incluyen aquellos agrupamientos con una densidad de puntos suficiente. Los puntos individuales o los agrupamientos que no son lo suficientemente densos no se incluyen debido a su falta de puntos de datos.

La identificación posterior de las señales no deseadas y la capacidad de distinguirlas de las señales útiles del sistema de aislamiento de la máquina elimina todos los puntos de datos que son irrelevantes para la interpretación. El software puede identificar un rango de diferentes fenómenos de ruido, incluyendo señales

asíncronas, tales como las frecuentes "alfombras de ruido" en los patrones de PRPD, o la interferencia síncrona, tales como los pulsos de excitación.

Una vez que todos los agrupamientos irrelevantes han sido eliminados de la medición, el software se concentra en interpretar los que quedan. El primer paso consiste en verificar cada agrupamiento en cuanto a atributos, como los que se enumeran en la tabla 1.

Tabla 1: Ejemplo de atributos utilizados para clasificar las descargas parciales

Nombre de atributo	Propiedad de atributo
Variación de carga de pulsos en la mitad positiva	Amplia
Simetría de carga de pulsos en la mitad positiva	Simétrica
Comportamiento de carga de pulsos en la mitad positiva	Pico
Relación de polaridad	Polaridad igual
Simetría de fase de pulsos en la mitad positiva	Desviada hacia la derecha
Regularidad de la fase de carga en la mitad positiva	No plana
Simetría de la fase de carga en la mitad positiva	Desviada hacia la derecha

El software ejecuta varias iteraciones usando un esquema de decisiones. Si se detecta uno de los atributos, se examina el siguiente criterio. El árbol de decisión proporciona un procedimiento determinista para identificar instancias únicas y claras. Si no se puede encontrar una, el software recurre a la identificación de patrones.

Los patrones estudiados se comparan con una serie de patrones de referencia guardados en una base de datos. La similitud entre un fenómeno medido y un patrón existente se determina con la ayuda de un algoritmo de distancia euclídeo

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

en el que la distancia x_i representa el vector de propiedad del patrón de PRPD actual e y_i representa el vector de propiedad del patrón de referencia. El índice i es una variable de diversas propiedades. Si la distancia es cercana a cero, se puede suponer que el fenómeno medido corresponde a la referencia y que se ha identificado el tipo de defecto.

Al final de cada sesión de identificación automática se emite un informe detallado con una lista de los distintos tipos de fuentes de DP.

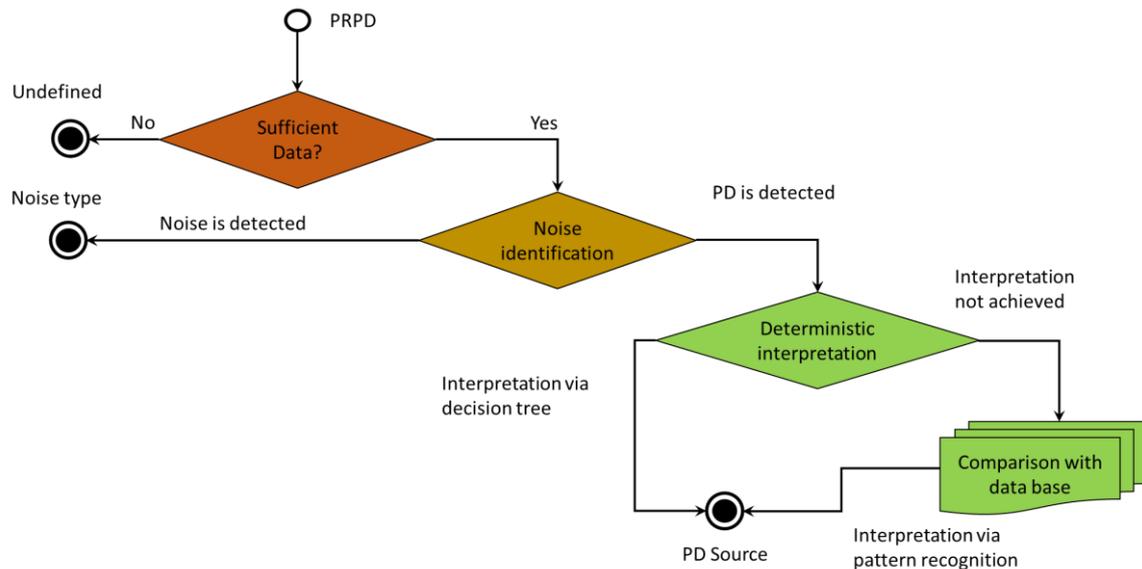


Figura 13: Descripción general del proceso utilizado durante la interpretación automática.

A continuación utilizaremos otro ejemplo práctico para ilustrar el proceso de decisión descrito. Para ello se utiliza un sistema de monitoreo de un turbogenerador de 1160 MVA con una tensión nominal de 27 kV instalado en 2012. Los datos históricos se identifican y evalúan mediante el reconocimiento de patrones. El agrupamiento analizado se resalta en rojo en la figura 14.

El agrupamiento analizado fue identificado como tal por el programa y se determinó que tenía suficientes puntos de datos. La clasificación sobre la base de los atributos mostró que se trataba de un caso límite entre dos fenómenos. Para cada una de las tres mediciones, el sistema recurrió a hacer una comparación con uno de los fenómenos almacenados en la base de datos.

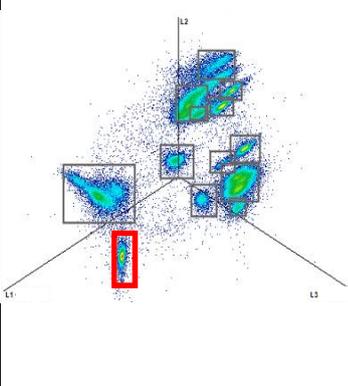
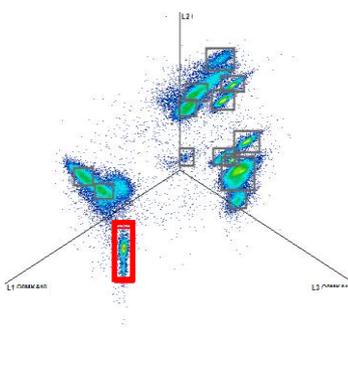
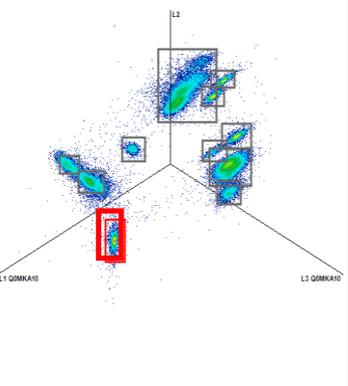
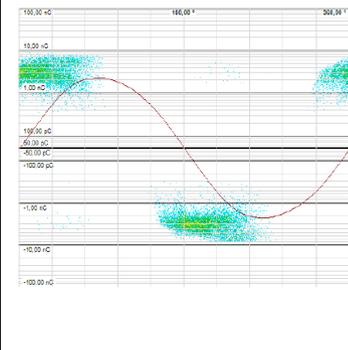
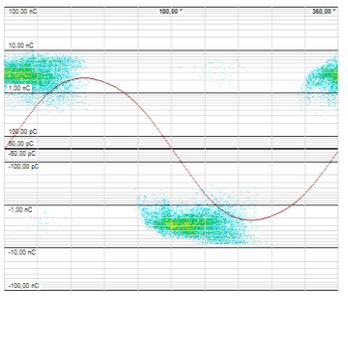
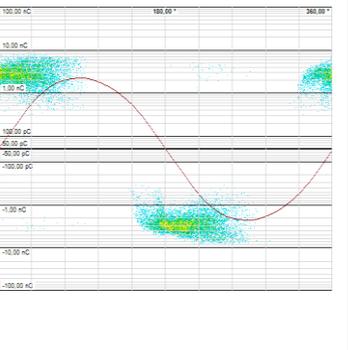
		01/2017	02/2017	03/2017
Ejemplo de una identificación	3PARD			
	PRPD			
	Resultado	<p>Superficies-Cabezal de devanado- Descarga – E1</p> <p>Proceso de decisión: Datos suficientes → Señal útil → Decisión basada en atributos – Sin conclusión firme → Comparación con la base de datos de PRPD (E1 50%)</p>	<p>Superficies-Cabezal de devanado- Descarga – E1</p> <p>Proceso de decisión: Datos suficientes → Señal útil → Decisión basada en atributos – Sin conclusión firme → Comparación con la base de datos de PRPD (E1 100%)</p>	<p>Superficies-Cabezal de devanado- Descarga – E1</p> <p>Proceso de decisión: Datos suficientes → Señal útil → Decisión basada en atributos – Sin conclusión firme → Comparación con la base de datos de PRPD (E1 100%)</p>

Figura 14: Identificación de agrupamientos a partir de una serie de mediciones con proceso de decisión.

Resumen

La medición de descargas parciales en máquinas eléctricas rotativas se considera hoy en día como el método de medición eléctrica que permite extraer las conclusiones más detalladas sobre el estado del aislamiento de una máquina. Muchos tipos diferentes de defectos pueden identificarse y clasificarse de forma confiable en función del riesgo que presentan.

A pesar de las numerosas ventajas que ofrece este tipo de medición, hay que estar atento a las peculiaridades del método de medición a la hora de interpretar los resultados. Estas peculiaridades incluyen la capacitancia distribuida del devanado, el tipo de conexión, la interferencia causada por señales no deseadas o la aparición simultánea de varios fenómenos de DP.

Los sistemas digitales de DP con selección de frecuencia proporcionan a los usuarios una serie de herramientas para controlar estas peculiaridades y permitir sacar conclusiones justificadas. Estas abarcan desde la digitalización en el punto de adquisición hasta la medición utilizando varios ajustes de filtro y la interpretación automática de las diferentes fuentes de DP.

Referencias

- [1] IEC 60270 (2015): High-voltage test techniques – Partial discharge measurements. (Técnicas de prueba de alta tensión – Medición de descargas parciales.)
- [2] IEC 60034-27 (2006): Rotating electrical machines – Part 27: (Máquinas eléctricas rotatorias – Parte 27:) Off-line partial discharge measurements on the stator winding of rotating electrical machines. (Mediciones de descargas parciales fuera de línea en el devanado del estator de máquinas eléctricas rotatorias.)
- [3] Öttl, F., Fuhr, J., Riesen, D., Krüger, M., Binder, E., Storr, B., Pöschl, J., Keßler, T., Bittner, B. (2016): Eine Untersuchung zum Ausbreitungsverhalten von Teilentladungsimpulsen in der Hochspannungswicklung rotierender elektrischer Maschinen. VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik. (Estudio del comportamiento de propagación de los pulsos de descargas parciales en el devanado de alta tensión de máquinas eléctricas rotativas. Conferencia VDE sobre tecnología de alta tensión.)
- [4] Kraetge, A., Hoek, S., Koch, M., Koltunowicz, W. (2013): Robust Measurement, Monitoring and Analysis of Partial Discharges in Transformers and other HV Apparatus. (Medición, monitoreo y análisis confiable de descargas parciales en transformadores y otros aparatos de alta tensión.) IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 20, Issue 6, December, pp. 1715-1723. (Transacciones de IEEE sobre dieléctricos y aislamiento eléctrico, Vol. 20, Número 6, diciembre, pp. 1715-1723.)
- [5] Badicu, L.V., Koltunowicz, W., Broniecki, U., Battle, B. (2016): Increased operation reliability through PD monitoring of stator winding. (Aumento de la confiabilidad del funcionamiento mediante el monitoreo de las DP del devanado del estator.) 13ª Conferencia Internacional de Aislamiento Eléctrico (INSUCON), Birmingham, Reino Unido.
- [6] Binder, E., Draxler, A., Egger, H., Hummer, A., Muhr, M., Praxl, G. (1998): Experience with on-line and off-line PD measurements of generators. (Experiencia en mediciones en línea y fuera de línea de las descargas parciales de generadores.) Sesión General de Cigre.
- [7] Koltunowicz, W., Plath, R. (2008): Synchronous multi-channel PD measurements. (Medición de DP multicanal sincrónica.) IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, Issue 6, December, pp. 2043-2051. (Transacciones de IEEE sobre dieléctricos y aislamiento eléctrico, Vol. 15, Número 6, diciembre, pp. 2043-2051.)
- [8] Badicu, L.V., Koltunowicz, W., Koch, M., Piccolo, A. (2013): Return of experience from continuous PD monitoring of rotating machines. (Rendimiento de la experiencia del monitoreo continuo de DP en máquinas rotatorias.) 18º Simposio Internacional de Ingeniería de Alta Tensión (ISH), Seúl, Corea del Sur.
- [9] Rethmeier, K., Obralic, A., Kraetge, A., Krüger, M., Kalkner, W., Plath, R. (2009): Improved noise suppression by real-time pulse-waveform analysis of PD pulses and pulse-shaped disturbances. (Supresión mejorada del ruido mediante el análisis en tiempo real de la forma de onda de los pulsos de DP y de las perturbaciones en forma de pulso.) 16º Simposio Internacional de Ingeniería de Alta Tensión (ISH), Ciudad del Cabo, Sudáfrica.
- [10] Koltunowicz, W., Belkov, A., Broniecki, U., Badicu, L.V., Gorgan, B., Krause, O. (2017): Automated evaluation of PRPD patterns for on-line PD monitoring of stator windings. (Evaluación automatizada de los patrones de PRPD para el monitoreo en línea de las DP de los devanados de estator.) 20º Simposio Internacional de Ingeniería de Alta Tensión (ISH), Buenos Aires, Argentina.
- [11] Koltunowicz, W., Badicu, L.V., Broniecki, U. (2016): Increased Operation Reliability of HV Apparatus through PD Monitoring. (Mayor confiabilidad del funcionamiento de los aparatos de alta tensión mediante el monitoreo de DP.) IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, Issue 6, June, No. 3, pp. 1347-1354. (Transacciones de IEEE sobre dieléctricos y aislamiento eléctrico, Vol. 23, Nº 3, junio, pp. 1347-1354.)

Autores

Fabian Oettl es Gerente de Producto para la prueba y medición de máquinas eléctricas rotativas en OMICRON electronics en Klaus, Austria. Antes de incorporarse a OMICRON, trabajó como ingeniero de aislamiento en el departamento de investigación y desarrollo de ANDRITZ Hydro, que también tiene su sede en Austria. Estudió Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Paderborn y se licenció en 2011.

Michael Krueger es ingeniero jefe de pruebas y diagnóstico de equipos eléctricos para OMICRON electronics en Klaus, Austria. Estudió ingeniería eléctrica en RWTH en Aachen y en la Universidad de Kaiserslautern (Alemania) y se graduó en 1976. Obtuvo su doctorado en ingeniería en la Universidad Técnica de Viena en 1990. Michael Krüger tiene más de 40 años de experiencia en el campo de la ingeniería de alta tensión y el diagnóstico de transformadores, transformadores de medida, máquinas eléctricas rotativas, cables y subestaciones aisladas por gas. También es miembro de VDE, CIGRE e IEEE y participa en varios grupos de trabajo de ÖVE, CIGRE e IEC.

Wojciech Koltunowicz se graduó como ingeniero eléctrico en 1980, 1985 y 2004 respectivamente. Obtuvo un doctorado y un título postdoctoral en ingeniería de alta tensión en la Universidad Técnica de Varsovia en Polonia. Entre 1987 y 2007 trabajó para CESI en Italia, donde se dedicó a la prueba y diagnóstico de sistemas de alta tensión. Es Consultor Técnico Superior de OMICRON Energy Solutions en Berlín desde 2007 y se dedica al monitoreo de equipos de alta tensión. Es el representante austriaco en el Comité de Estudio D1 de "Materiales y Técnicas de Pruebas Emergentes" del CIGRE y Presidente del Grupo de Trabajo D1.66 "Requirements for Partial Discharge Monitoring Systems for Gas Insulated Systems" (Requisitos para sistemas de monitoreo de descargas parciales para sistemas de aislamiento por gas) del CIGRE. También miembro de IEC TC42 WG14.

Laurentiu Viorel Badicu se licenció en Ingeniería Eléctrica en 2008. En 2012 obtuvo un doctorado en ingeniería eléctrica de la Universidad Politécnica de Bucarest en Rumania. Se incorporó a OMICRON Energy Solutions en Berlín como ingeniero de pruebas en 2012, donde participó en el mantenimiento de los sistemas de monitoreo y asumió la responsabilidad del análisis de los archivos de PD y los informes subsiguientes. Desde 2015, Badicu es Gerente de Producto de OMICRON, donde es responsable de los sistemas de monitoreo en línea y de su desarrollo.

Bogdan Gorgan obtuvo su licenciatura y doctorado en ingeniería eléctrica en la Universidad Politécnica de Bucarest, Rumania en 2009 y 2013, respectivamente. Trabajó para Simtech International en Rumania de 2012 a 2015, donde pasó la mayor parte de su tiempo en las pruebas de alta tensión y diagnóstico de transformadores de potencia, sistemas de monitoreo en línea para transformadores de potencia, índices de salud y cálculos de confiabilidad para sistemas de alta tensión. Se incorporó a OMICRON Energy Solutions en Berlín en 2016 y trabaja como ingeniero de aplicaciones de alta tensión, trabajando en el monitoreo y diagnóstico de equipos de alta tensión.

OMICRON es una compañía internacional que presta servicio a la industria de la energía eléctrica con innovadoras soluciones de prueba y diagnóstico. La aplicación de los productos de OMICRON brinda a los usuarios el más alto nivel de confianza en la evaluación de las condiciones de los equipos primarios y secundarios de sus sistemas. Los servicios ofrecidos en el área de asesoramiento, puesta en servicio, prueba, diagnóstico y formación hacen que la nuestra sea una gama de productos completa.

Nuestros clientes de más de 150 países confían en la capacidad de la compañía para brindar tecnología de punta de excelente calidad. Los Service Centers en todos los continentes proporcionan una amplia base de conocimientos y un extraordinario servicio al cliente. Todo esto, unido a nuestra sólida red de distribuidores y representantes, es lo que ha hecho de nuestra empresa un líder del mercado en la industria eléctrica.