

Artículo

Monitoreo de descargas parciales en sistemas de cable de alta tensión

Autores

W. KOLTUNOWICZ, U. BRONIECKI, D. GEBHARDT, O. KRAUSE

Fecha

Mayo 2019

Producto relacionado de OMICRON

MONCABLO

Área de aplicación

Monitoreo de descargas parciales en sistemas de cable de alta tensión

Palabras clave

monitoreo de descargas parciales, monitoreo de DP, sistemas de cable de alta tensión

Versión

v1.0

Resumen del artículo

En este artículo del mes, se describe un concepto avanzado para monitorear el estado del aislamiento de los sistemas de cable de polietileno reticulado de alta tensión (XLPE). El artículo se basa en el caso práctico de un cliente en el que nuestro sistema de monitoreo de descargas parciales (DP) en línea MONCABLO se utiliza para evaluar de forma continua el estado del aislamiento de un sistema de cables eléctricos subterráneos.

Introducción

Entre 2000 y 2005, el CIGRE reportó un total de 119 fallas en sistemas de cables de AT de tensiones nominales comprendidas entre 60 kV y 500 kV. Aproximadamente el 50% de estas fallas se atribuyen a factores externos (condiciones anormales del sistema, otros parámetros físicos externos, daños mecánicos causados por terceros, etc.). El mismo estudio indica que los sistemas de cableado enterrado directamente tienen aproximadamente 10 veces más probabilidades de ser dañados por condiciones externas que los sistemas de cableado instalado en conductos o túneles.

Con respecto a los accesorios XLPE, la figura 1 presenta la tasa de fallas dividida en dos niveles de tensión: por debajo y por encima de 220 kV.

Las terminaciones exteriores en las clases de tensión más altas tienen la tasa de fallas más alta. La duración media de reparación de los sistemas de cables XLPE es de unos 20 días.

En un estudio realizado por un grupo de cuatro grandes compañías eléctricas europeas también se presentó información similar sobre las tasas de fallas. Los sistemas de cables largos imponen un mayor riesgo en las redes de transmisión. Como se han consolidado las pruebas de rutina realizadas en fábrica de los cables y accesorios, actualmente se presta más atención a las pruebas posteriores a la instalación y al monitoreo del estado de los cables en funcionamiento. El valor de las descargas parciales (DP) es un importante indicador de diagnóstico de la calidad del aislamiento del cable.

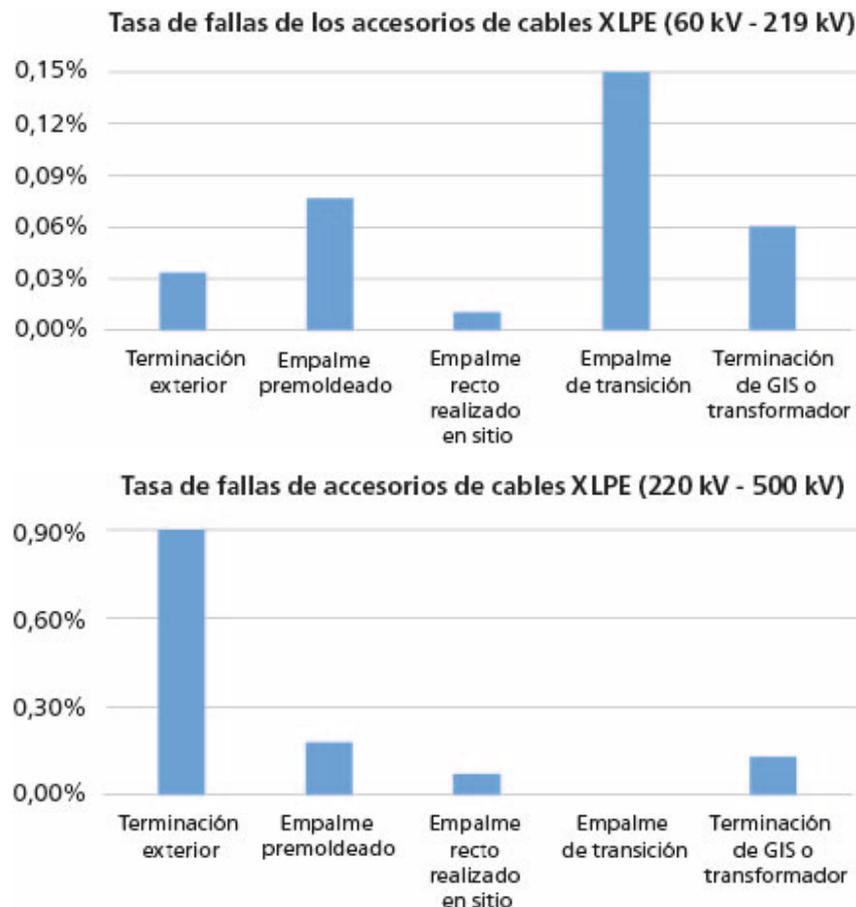


Figura 1. Tasa de fallas entre los accesorios de cables XLPE para la clase de 60 kV - 219 kV (superior) y 220 kV - 500 kV (inferior)

Medición de DP

La medición de DP es hoy en día un método aceptado en todo el mundo para la evaluación basada en el estado del aislamiento de los cables de alta tensión y una parte necesaria de las pruebas posteriores a la instalación. Diferentes soluciones para sensores y técnicas de registro han sido recomendadas, aplicadas y últimamente reconocidas por organismos técnicos y normas internacionales.

Por esta razón, es necesario educar continuamente a las compañías eléctricas sobre las diferentes tecnologías y, en muchos casos, éstas dependen de la experiencia externa para ello. Por lo tanto, existe una gran necesidad de un sistema versátil de monitoreo de descargas parciales que pueda utilizarse en diferentes tipos de cables (XLPE, aceite y gas), con diferentes tensiones nominales de hasta 500 kV y tendidos en túneles o directamente enterrados. Además, el sistema tiene que poder acomodar otros datos relevantes sobre el estado del cable, tales como la presión de aceite de los extremos de sellado, el estado de los limitadores de tensión de la pantalla en los empalmes de pantalla cruzada, la corriente de la pantalla, etc.

Se analizan en este documento las dificultades para diseñar e instalar un sistema de monitoreo de DP de este tipo en sistemas de cables enterrados y tendidos en túneles. Se estudia el diseño y las características del sistema de monitoreo de cables enterrados y tendidos en túnel para las pruebas posteriores a la instalación y las inspecciones de mantenimiento durante el funcionamiento del sistema de cableado (figura 2). En este documento se abordarán en particular los siguientes aspectos: posicionamiento del sensor y pruebas de tipo de la caja de conexiones, alimentación eléctrica del sistema de monitoreo instalado para cables enterrados y tendidos en túnel, localización de defectos y monitoreo de parámetros adicionales.

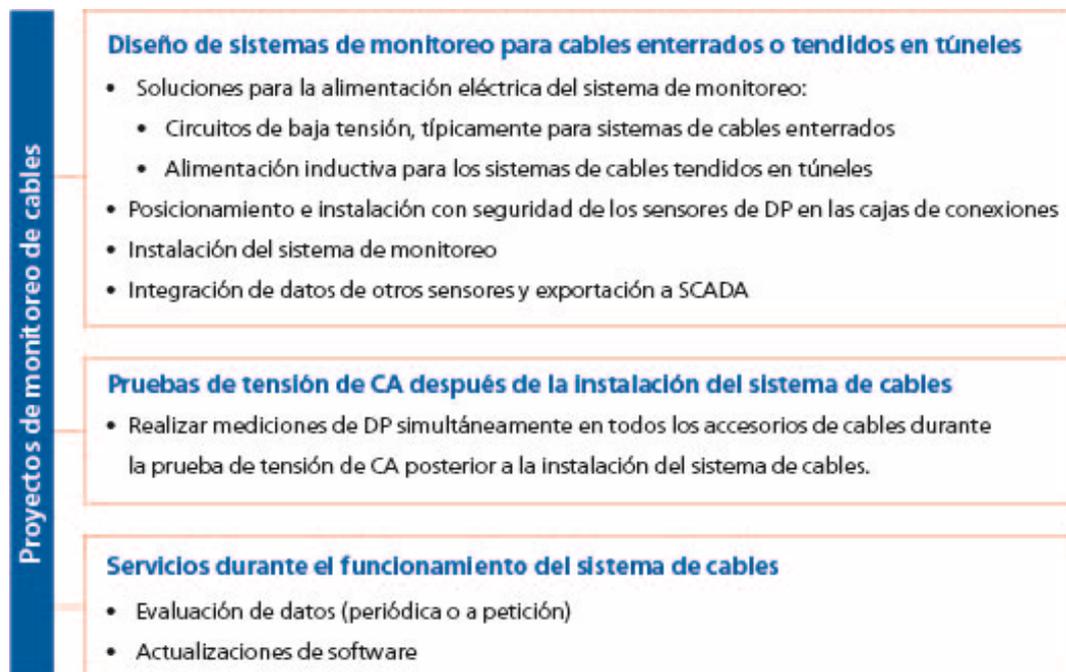
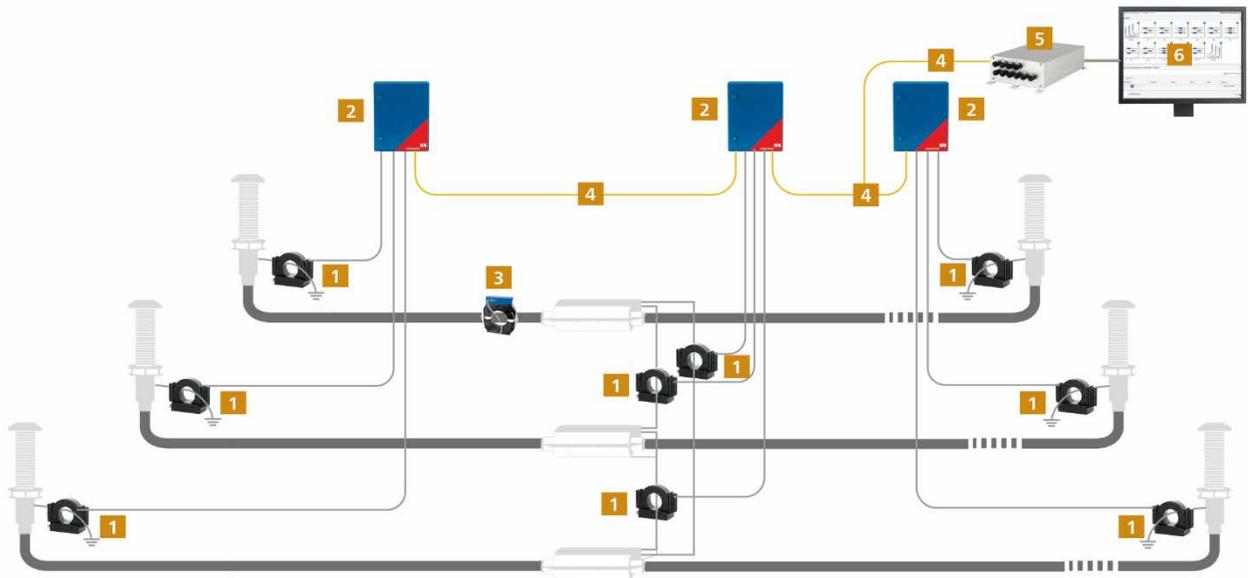


Figura 2. Elementos del proyecto durante el diseño, instalación y funcionamiento de un sistema de monitoreo de cables

Arquitectura del sistema de monitoreo

La arquitectura del sistema de monitoreo para los sistemas de cables largos se presenta en la figura 3a y en la figura 3b para los enlaces de cables cortos. La señal de DP es detectada por los sensores inductivos instalados en las cajas de conexiones y en las terminaciones de los cables. La información procedente de los sensores de DP se registra de forma sincronizada mediante una unidad de registro de datos multicanal. La sincronización entre canales es imprescindible para el procesamiento avanzado de las señales, permitiendo la separación de la fuente de la señal, la localización de defectos, etc. Además, la unidad de registro de datos extrae las características principales de la señal de DP y las pasa a una computadora que permite el almacenamiento de datos a largo plazo y su posterior tratamiento.



- 1) Sensor de DP (HFCT)
- 2) Unidad de registro de datos
- 3) Fuente de alimentación inductiva
- 4) Cable de fibra óptica
- 5) Unidad de control
- 6) Computadora central con software de monitoreo

Figura 3a. Arquitectura del sistema de monitoreo para un sistema de cables largos

Las unidades de registro se configuran y controlan remotamente por TCP/IP mediante el software del sistema de monitoreo. Esto permite a los operadores reaccionar rápidamente ante los problemas detectados y acceder a los datos almacenados desde cualquier ubicación remota.

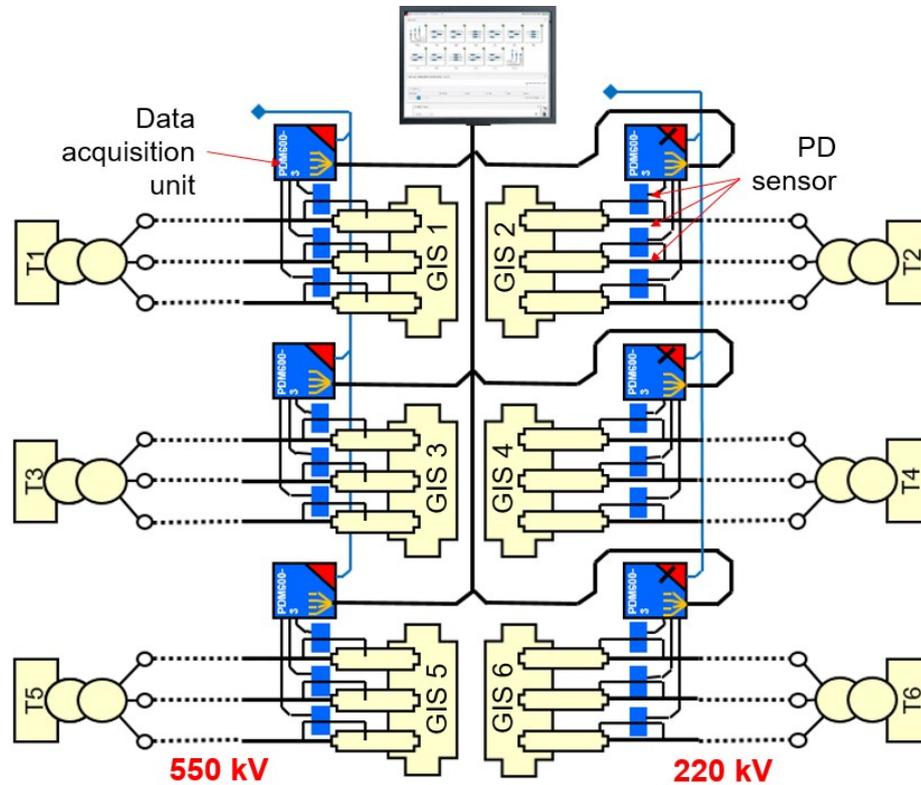
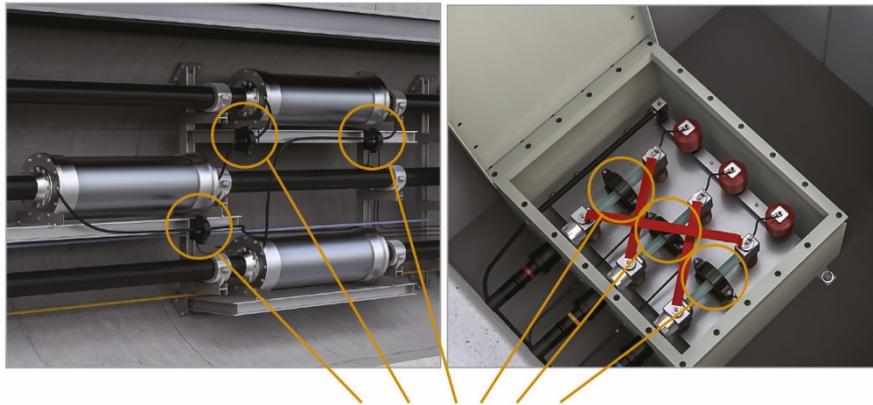


Figura 3b. Ejemplo de arquitectura de un sistema de monitoreo para enlaces de cables cortos de 220 kV y 550 kV; enlaces entre transformadores GSU y GIS en una central eléctrica

Disposición de los sensores de DP

Para la detección de la señal de DP, los sensores integrados en los empalmes o los sensores externos instalados en los enlaces de pantalla cruzada son las opciones más comunes. En el caso de los sistemas de cables tendidos en túnel, la instalación de los sensores de DP en los empalmes de los cables se realiza fácilmente, pero se deben tomar algunas precauciones cuando se instalan sensores en las cajas de empalmes cruzados, ya que la instalación de los sensores de DP disminuye la separación entre los enlaces de pantalla cruzada.



Sensores de DP

Figura 4. Instalación de sensores de DP en un empalme de cable tendido en túnel (izquierda) y en una caja de conexiones de un cable enterrado (derecha)

Por lo tanto, debe someterse a pruebas la caja de conexiones con los sensores de DP instalados para garantizar un funcionamiento seguro y a largo plazo. Se requieren pruebas de tensión CA y de impulsos, así como pruebas de corriente de cortocircuito y de arco interno.

Alimentación eléctrica del sistema de monitoreo

Al monitorear sistemas de cables largos, supone un auténtico reto la alimentación eléctrica de las unidades de registro instaladas en los empalmes, que generalmente se encuentran en zonas remotas sin acceso directo y alejadas de toda fuente de alimentación eléctrica. Dependiendo del modo de instalación del cable, se pueden adoptar diferentes soluciones para superar este reto. Para los sistemas de cables tendidos en túnel, las fuentes de alimentación inductivas desarrolladas especialmente para este fin pueden ser la solución. La fuente de alimentación inductiva (figura 5 - izquierda) proporciona a la unidad de registro suficiente energía, incluso en el caso de una carga muy baja del sistema de cables. Dispone de la electrónica necesaria para supervisar y gestionar la CC suministrada a su salida, en función de las distintas situaciones de carga de corriente de los cables de AT, así como para filtrar las perturbaciones de las mediciones de DP que se produzcan en las proximidades.



Figura 5. Soluciones de alimentación eléctrica para sistemas de cables tendidos en túneles (izquierda) y enterrados

En el caso de los cables enterrados, la colocación de un conductor de baja tensión (BT) junto al cable de alimentación es una práctica común. Para asegurar un funcionamiento seguro, es necesario instalar en cada empalme un circuito de supresión de transitorios diseñado especialmente para este fin (figura 5 - derecha). Garantiza la protección en caso de sobretensiones transitorias generadas por rayos en las terminaciones de los cables o cerca de la caja de conexiones, la conmutación de la red o las corrientes de entrada. Durante el funcionamiento normal, el circuito de BT es alimentado por la subestación en uno de los extremos del cable. En caso de interrupción, la alimentación del circuito es posible desde ambos extremos del cable. Además de los disipadores de sobretensión destinados a suprimir las tensiones en modo común y en modo diferencial, se instala un controlador de temperatura en el armario de la fuente de alimentación.

Software de monitoreo

Estructura del software

El software es un sistema distribuido altamente modular y escalable. Su arquitectura una parte central basado en Windows y una parte de control basada en web [8]. La parte central del software de monitoreo se ejecuta como servicios de Windows continuamente sin ninguna interacción directa con el usuario. El sistema central permite la recopilación y persistencia de los datos de medición para su posterior tratamiento y análisis, las tareas de seguridad para el acceso a los datos y las operaciones del sistema, así como las interfaces externas para el intercambio de datos por Ethernet o un bus de campo.

El sistema de monitoreo recibe datos de cada unidad de registro en dos modos: modo permanente y modo periódico. Durante el modo permanente, los datos se registran cada segundo, se comparan con los valores umbral y se muestran en la interfaz gráfica de usuario en tiempo real. Cuando estos datos están dentro de los márgenes normales, se representan en color verde. Si los valores superan los umbrales de "advertencia" o "alarma", se representan en color amarillo o rojo. Pueden visualizarse simultáneamente los datos del modo permanente correspondientes a todas las ubicaciones monitoreadas o a cada ubicación individualmente (figura 6). También es posible una comparación de los valores escalares correspondientes a todos los accesorios de los cables (vista comparativa).

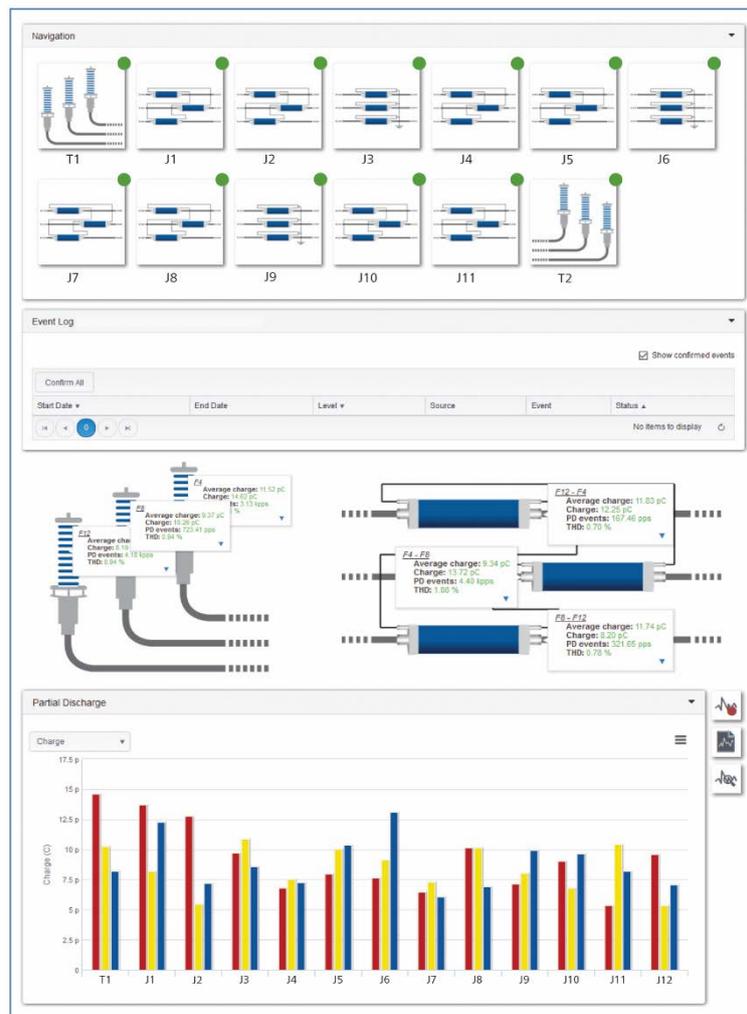


Figura 6. Visualización de datos en tiempo real en el modo permanente del software de monitoreo

Las mediciones periódicas se inician a intervalos de tiempo equidistantes, tal como cada hora. La duración de la medición periódica es normalmente 1 minuto. Durante este período de tiempo, se calculan todos los valores escalares mencionados y se registran los diagramas PRPD (Phase Resolved DP - patrones de DP resueltos en fase) y 3PARD (3 Pulse Amplitude Relation Diagram - diagramas de relación de amplitudes de tres pulsos) [9]. Estos datos se guardan para su posterior tratamiento y visualización de tendencias.

Se activan mediciones periódicas no programadas en caso de que uno o varios valores medidos superen los niveles de umbral preestablecidos. Además, el sistema de monitoreo registra conjuntos de datos (periódicos o activados por eventos) y realiza la separación automática entre múltiples fuentes de señales, indicando la fase más probable de su origen para facilitar la interpretación de los datos por parte de los usuarios sin conocimiento experto. La figura 7 presenta los datos (valores escalares e imágenes) que se almacenan para cada punto de la tendencia histórica.

El software del sistema de monitoreo también es responsable de la comunicación y la transferencia de datos a los sistemas de supervisión mediante interfaces y protocolos físicos universales. Al mismo tiempo, el sistema de monitoreo puede procesar y visualizar datos procedentes de sensores de terceros a través de la misma interfaz web. El usuario puede ser notificado en cualquier momento por correo electrónico/SMS si se superan los umbrales preestablecidos, indicando la ubicación y la hora de la incidencia.

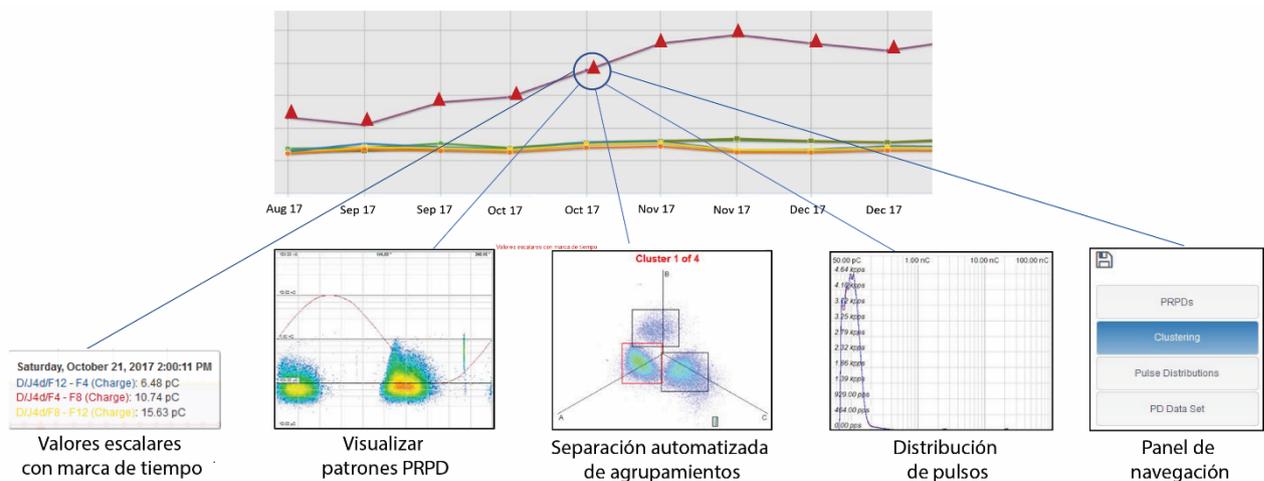


Figura 7. Visualización de valores escalares e imágenes almacenadas para cada punto de la tendencia histórica

Herramientas para la evaluación automatizada de datos

Para la evaluación automatizada de DP, el software utiliza herramientas específicas que permiten la separación de agrupamientos PRPD de diferentes fuentes de señales de DP de forma periódica (por ejemplo, una vez al día), o cuando son activadas por eventos y/o por el usuario.

La generación del diagrama 3PARD es posible gracias al registro síncrono de datos. Este diagrama visualiza la relación entre las amplitudes de un solo pulso de DP en una fase y sus señales generadas por diafonía en las otras dos fases [10]. Al repetir este procedimiento para un gran número de pulsos de DP, las fuentes de DP dentro del equipo en prueba, así como el ruido externo, aparecen como una concentración de puntos (agrupamientos) claramente distinguible en un diagrama 3PARD (figura 8). La separación de agrupamientos se realiza de forma periódica o cuando se superan los umbrales de alarma/aviso.

En el caso de las señales de DP, la unidad de registro realiza un preprocesamiento avanzado de los datos brutos. Las perturbaciones se eliminan y las características principales de la señal de DP se determinan y transfieren a la computadora, lo que permite el almacenamiento de datos a largo plazo.

El registro de datos se realiza síncronamente en todos los canales de una unidad de registro y en todas las unidades de registro del sistema de monitoreo. La sincronización entre varias unidades de registro se consigue mediante su conexión en cadena por un cable de fibra óptica (FO) preinstalado en el cable de alimentación eléctrica. Para evitar la pérdida de datos debido a interrupciones de FO, la conexión en cadena comienza y termina en la computadora central. Durante el funcionamiento normal, los datos se transmiten por una sola vía, mientras que en caso de una interrupción de FO (cuya ubicación es indicada por el sistema de monitoreo) los datos se transfieren por dos vías.

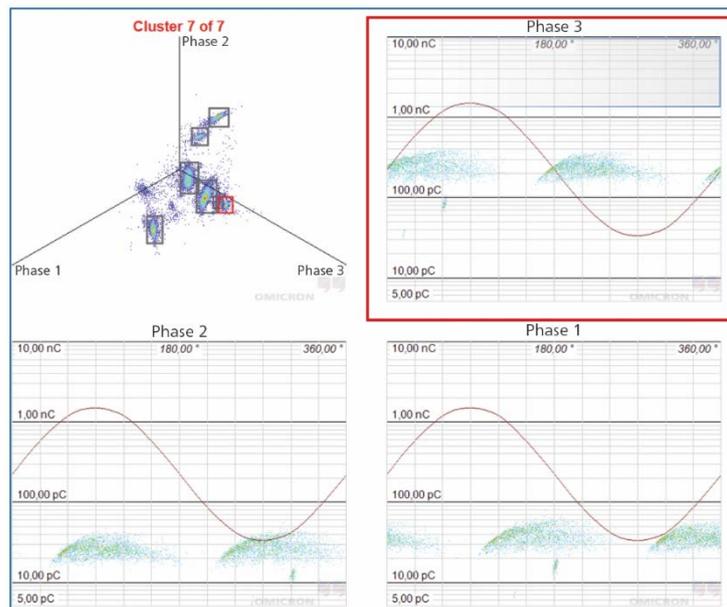


Figura 8. Ejemplo de separación de agrupamientos utilizando 3PAR

Localización de defectos

La funcionalidad de localización de DP se basa en un único algoritmo que realiza una evaluación estadística de los pulsos originales y sus reflexiones en dos puntos diferentes del cable donde se instalan las unidades de registro de datos. Esta funcionalidad es posible gracias al registro síncrono de datos entre todas las unidades de registro. Durante el funcionamiento del cable, las unidades de registro adyacentes a la fuente de señal a investigar se utilizarán como fuentes de disparo y correlación. La distancia desde la fuente de disparo hasta la ubicación de la fuente de la señal, se calcula automáticamente y se muestra en el software de diagnóstico.

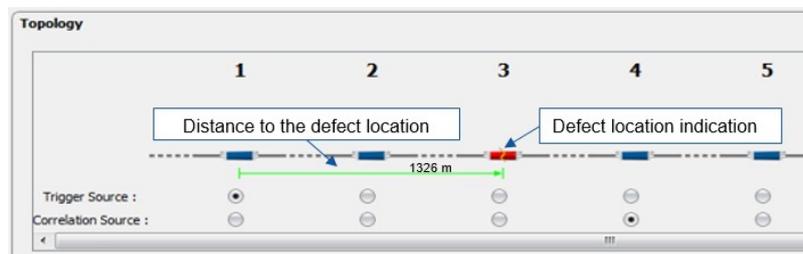


Figura 9. Funcionalidad de localización de DP del sistema de monitoreo

Pruebas después de la instalación

Las pruebas de AT se realizan en sitio en todos los cables de AT extruidos y, por lo general, los procedimientos de prueba en sitio deben ser negociados entre el fabricante y el usuario en base a las normas internacionales y nacionales.

Las pruebas dieléctricas realizadas en sitio no sustituyen las pruebas tipo ni las pruebas de rutina. Son complementarias a las pruebas dieléctricas de rutina y tienen como objetivo comprobar la integridad dieléctrica de la línea de cable completamente montada para eliminar defectos tales como daños durante el transporte y el tendido, o el montaje incorrecto de los accesorios. Los trabajos de instalación en sitio tienen un riesgo residual de introducir fallas, ya que las condiciones no son las idóneas para una instalación de accesorios EHV (tensión extremadamente alta). Las partículas pequeñas, el polvo, la humedad, las gotas, etc., pueden provocar defectos en las ubicaciones eléctricamente críticas de los accesorios, lo que puede reducir la vida útil del sistema de cableado o provocar fallas. Por lo tanto, es importante poder detectar, localizar e identificar el defecto. Los defectos generarán descargas parciales si el campo eléctrico local en el defecto excede el valor de arranque de las DP.

La tensión preferida para las pruebas de fábrica es la tensión CA de frecuencia industrial, normalizada para las pruebas de laboratorio en el rango de 45 a 65 Hz. Para las pruebas en sitio, es aceptable una tolerancia de frecuencia entre 20 y 300 Hz. Se suele usar un reactor resonante en frecuencia con inductancia fija y excitación mediante tensión ajustada por frecuencia, para aplicar la tensión de prueba AC.



Figura 10. Configuración de la prueba de resonancia para probar sistemas de cableado

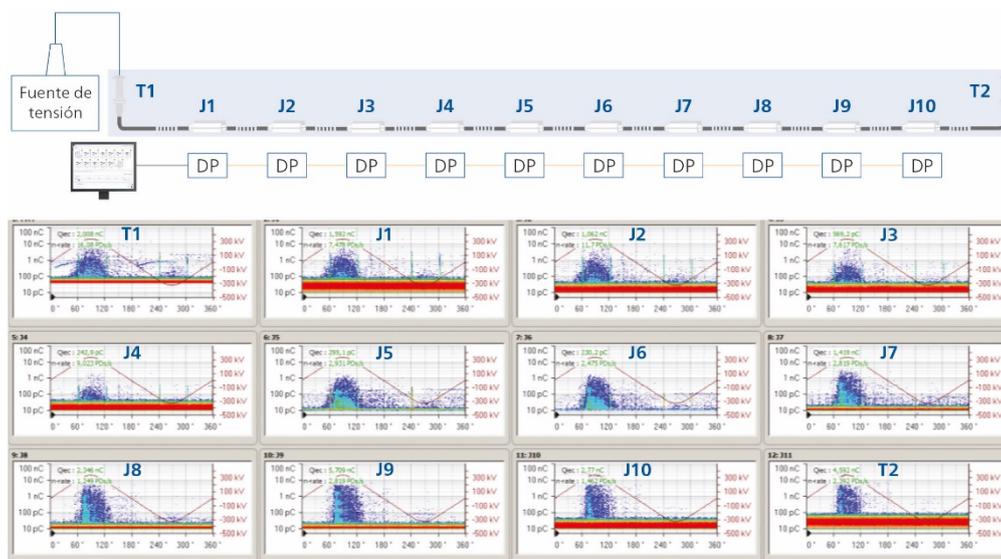


Figura 11. Ejemplo de mediciones de DP después de la instalación en todos los accesorios de un sistema de cableado

Cuando se puede realizar en sitio una prueba de CA de alta tensión en combinación con mediciones de DP, toda la experiencia de las pruebas de rutina en fábrica se puede transferir a las pruebas en sitio. Debido a que los cables de AT tienen que probarse en las instalaciones de fabricación antes de enviarlos al lugar de instalación, las mediciones de descargas parciales en sitio se centran en los accesorios instalados en el campo.

El sistema de monitoreo continuo de DP está preparado para utilizarse durante las pruebas dieléctricas posteriores a la instalación. Se realiza el registro simultáneo completo de la actividad de DP en todos los accesorios y la señal de DP se sincroniza con la fuente de la tensión de prueba.

Monitoreo de cable XLPE tendido en túnel - caso práctico

La línea de cable XLPE de 230 kV tiene una longitud de 6 km y la primera parte del cable está tendida en un túnel subterráneo. La segunda parte del cable está enterrada. Hay seis grupos de empalmes en la línea de cable y uno de cada 3 grupos de empalmes se conecta a tierra. Los otros empalmes son de pantalla cruzada. Era necesario monitorear continuamente el estado del aislamiento de dos empalmes de pantalla cruzada consecutivas dentro del túnel. Seis sensores HFCT montados en enlaces de pantalla cruzada se utilizan para detectar las DP directamente en los empalmes monitoreados. El sistema de registro de DP consiste en dos unidades de registro de tres canales de alta precisión y modulares (una en cada empalme). Las mediciones se realizan sincronamente en los seis puntos de medición. La sincronización de las unidades de registro se realiza mediante fibras ópticas de 2 a 5 ns. En el túnel se dispone de alimentación eléctrica para las unidades de registro, por lo que no se necesitan dispositivos adicionales (es decir, una fuente de alimentación inductiva). Los datos de monitoreo de dos unidades de registro se envían por fibra óptica a un servidor situado en la sala de control de la subestación al final del cable.

Se realizó una comprobación del desempeño del sistema inyectando pulsos de calibración de 100 pC directamente en los sensores HFCT. Para el filtro digital de la unidad de registro se ajustó una frecuencia central de 900 kHz y un ancho de banda de 300 kHz. Los pulsos de calibración se distinguieron del ruido de fondo del sistema.

Basándose en la experiencia anterior, se consideraron los niveles umbral de advertencia y alarma de DP y se fijaron en 30 pC (nivel de advertencia) y 50 pC (nivel de alerta), respectivamente. Los valores de DP deben permanecer un tiempo predefinido (por ejemplo, 15 s) por encima de los valores umbral para que se active una advertencia o alarma. Este procedimiento tiene por objeto evitar los falsos positivos que puedan aparecer durante el funcionamiento debido a variaciones de carga, operaciones de conmutación, condiciones ambientales, etc.

Durante el período de monitoreo se observó una señal propia de DP en la fase L2 del grupo de empalme 2. Los patrones PRPD registrados sincronamente en este grupo de empalme se presentan en la figura 12. También se observó un acoplamiento cruzado a las fases L1 y L3. Se registró la misma señal propia de DP en el otro grupo de empalme monitoreado con amplitud reducida. La fuente de la señal se detectó mediante mediciones adicionales. La fuente de DP se encontró en el interior del transformador conectado a la línea de cable a unos 1,8 km de distancia del grupo 2 de empalmes.

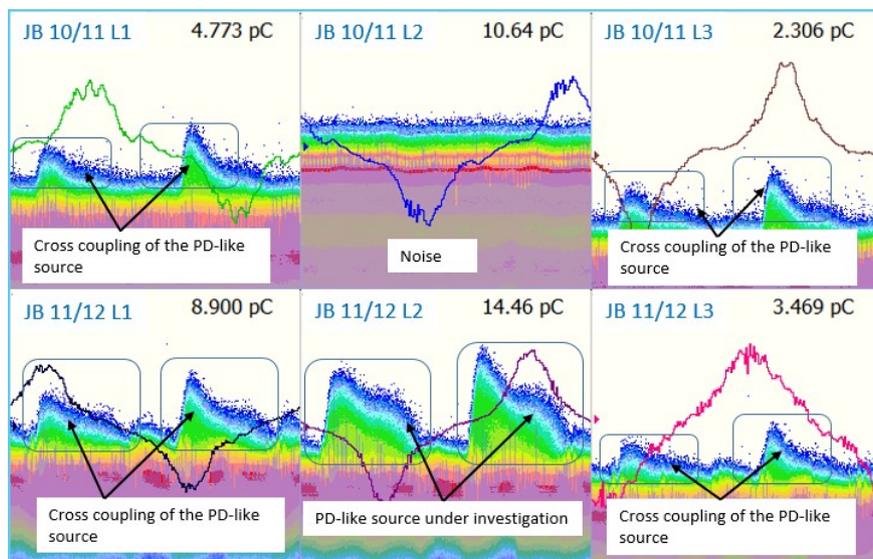


Figura 12. Patrones PRPD registrados sincronamente en el grupo de empalme 2

Conclusiones

El proveedor del sistema de monitoreo asistió al propietario del activo en todas las etapas del proyecto de monitoreo, desde el diseño del sistema hasta el mantenimiento del sistema de monitoreo en servicio.

El moderno sistema de monitoreo de DP en cables de AT ofreció al propietario del activo las siguientes funciones:

- > Separación automática de fuentes de DP y supresión de ruido. Las técnicas de evaluación síncrona multicanal cumplían estos requisitos.
- > Localización de fuentes de DP a lo largo de todo el cable de AT gracias a la aplicación con éxito de la reflectometría estadística de doble extremo en el dominio del tiempo.
- > Monitoreo de parámetros adicionales relativos al estado del cable, como por ejemplo, la corriente de la vaina, el estado de los limitadores de tensión de la vaina y la presión del aceite en las terminaciones. Esto permite reducir aún más los costos de explotación al eliminar algunas de las actividades de mantenimiento preventivo (verificación de la funcionalidad de la pantalla).
- > Mediciones de DP del sistema de cables durante las pruebas dieléctricas posteriores a la instalación. Es ventajoso realizar mediciones de DP simultáneamente en todos los accesorios de cables durante la prueba de tensión no disruptiva de CA.

Además, el proveedor del sistema de monitoreo ofrecía soluciones y experiencia probadas en los siguientes campos:

- > Soluciones para la alimentación eléctrica del sistema de monitoreo. Se propuso un circuito de baja tensión para los sistemas de cables enterrados y una fuente de alimentación inductiva para los sistemas de cables tendidos en túneles.
- > Posicionamiento de sensores y la instalación de sensores de DP en las cajas de enlace.

