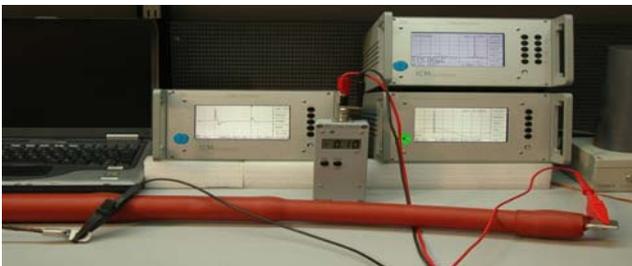

**DETECCION, ANALISIS Y PREVENCION DE FALLAS EN CABLES SUBTERRANEOS
TECNICAS UNIDAS DE DESCARGAS PARCIALES – VERY LOW FREQUENCY –
MICROSCOPIA DIGITAL 3D – RAYOS X**

PABLO PORFIRI
Inducor Ingeniería S.A.
Argentina

ROGELIO CORTEGOSO
Inducor Ingeniería S.A.
Argentina

Resumen – Estimar el grado de confiabilidad de un alimentador subterráneo, forma parte de la valoración de los activos de una empresa distribuidora, posibilitando determinar su rentabilidad real proyectada.

La gran cantidad de antiguos cables, aún en servicio, influyen en la fiabilidad de la red de distribución. En consecuencia, los ensayos en campo, son actualmente requeridos para evaluar la gravedad de la degradación, y para determinar cuales cables, empalmes o terminales, requieren de un inmediato reemplazo.



Las nuevas técnicas para el diagnóstico de cables y sus accesorios, permiten controlar desde la recepción de los mismos, el tipo de falla que a futuro tendrán, cuando se constituyan como parte integrante de un tendido subterráneo, y además, permiten también analizar metro a metro el estado de degradación, ascendente o estable, que sufra con el paso del tiempo.

La aplicación conjunta de técnicas de inspección por rayos X, y microscopia digital, unidas a los ensayos específicos de descargas parciales, ofrecen un nuevo y preciso panorama de análisis, tendiente a determinar el estado real de degradación de empalmes y en especial de terminales de MT /AT, dando lugar a la creación en la rama eléctrica, de una nueva ciencia del tipo forense.

Palabras clave: Microscopia digital 3D – Descargas Parciales – Rayos X. – Very Low Frequency.

1 INTRODUCCIÓN

Si bien hoy en día, la detección de fallas en cables subterráneos es un tema ya superado en cuanto al logro de sus objetivos; que no requiere de mayores esfuerzos mediante el uso de instrumentos y procedimientos adecuados; por el contrario, más allá de la necesidad de detectar fallas, en la actualidad, la tendencia mundial está basada en la anticipación temprana de un siniestro eléctrico, mediante la aplicación de técnicas de diagnóstico, cimentadas entre otras, en la medición de Descargas Parciales, y en los ensayos de Tensión Resistida a muy baja frecuencia (VLF – Very Low Frequency), además del estudio analítico de muestras, pre y pos siniestros, por medio de la aplicación de Rayos x y Microscopía Digital 3D, brindan la suficiente información para anticiparnos a un posible colapso

2 GENERALIDADES

Más del 90% de los puntos débiles en la aislación de cables de MT/AT, generan descargas parciales antes de convertirse en una falla. La elección correcta de un plan de diagnóstico, dependerá siempre de los objetivos y expectativas, que en mayor medida, comprenden la eliminación de problemas en el sistema, limitación del riesgo de potenciales fallas, y la reducción de los reclamos.

Producto de los años de investigación y de las nuevas técnicas de ensayos, se ha creado un moderno concepto referido al campo de la detección de fallas, dirigido a crear una nueva conciencia en cuanto al origen de las mismas: ante una falla o salida de servicio de un alimentador, generalmente aceptábamos que podría tratarse de una falla imprevista o espontánea; sin embargo, al existir medios de diagnóstico para su determinación temprana, ya no sería correcto considerarla como imprevista, si no mas bien, como desatendida.

2.1 Descargas Parciales :

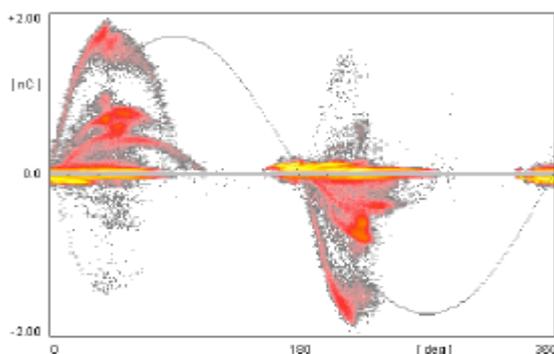
La actividad de las DP, es un indicador importante para calcular el nivel de degradación en equipos de alta tensión. El trazado (mapa) de la actividad de las DP, en función de la longitud del cable, permite identificar los niveles en un tendido, considerando su metraje, como así también sus accesorios más débiles.

Las mejoras en la adquisición y procesamiento de las señales, hicieron que esta técnica sea también aplicable en ambientes no apantallados (en campo). Los materiales aislantes, líquidos y sólidos, pueden tolerar un campo eléctrico que exceda al normal de su trabajo, o sea el comúnmente aplicado en cables y sus accesorios.

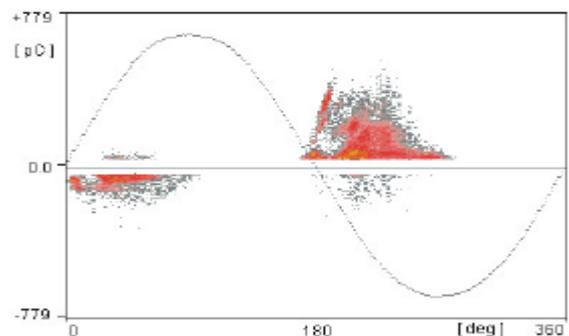
Para que las descargas parciales se presenten, es necesaria una imperfección (anomalía) que tenga un campo de inicio más bajo, como por ejemplo, una oclusión de gas; o como alternativa, que se aumente fuertemente el campo eléctrico en la aislación, por ejemplo, por inclusión de una partícula metálica filosa.

Ambas clases de imperfecciones, groseras o no, pueden ocurrir durante la producción (manufactura), manteniéndose desapercibidas durante las pruebas iniciales, o pueden desarrollarse durante el montaje y/o servicio. En las descargas parciales, una avalancha de electrones requiere siempre de un electrón libre inicial, que sea acelerado en el campo eléctrico, lo suficientemente fuerte como para desencadenar una nueva avalancha de electrones (efecto dominó).

La Figura izquierda muestra la actividad (patrón) de descarga, de varias cavidades. Aquí, el patrón simétrico indica que las cavidades se encuentran simétricamente en la aislación, y que no están junto a ningún material conductor.



DP en una terminal del cable.



Cable EPR-delaminación semiconductor externa

En contraste con lo anterior, en la figura derecha, se muestra un patrón asimétrico. Aquí, la delaminación del material semiconductor, provoca en el medio ciclo positivo y negativo, diferentes condiciones iniciales para la actividad de descarga,

2.1.1 Identificación del Defecto:

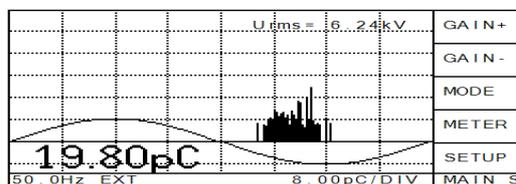
Las mediciones actuales de DP en laboratorios, obtienen una principal relevancia, no solo por la simple aplicación de un criterio de aceptación o rechazo de las partidas, si no por que del propio análisis de sus formas de ondas (patrón en fase resuelta), es posible guiar al personal de ejecución, acerca del tipo de problema u error que está cometiendo en el proceso de manufactura de un cable, terminal o accesorio.

El registro gráfico de una medición de DP, denominado registro en “fase resuelta”, o sea aquel que pueda samplear una medición en coordenadas de ángulo de fase, magnitud y frecuencia de repetición de cada pulso, brinda una correlación directa, entre la naturaleza de las DP (tipos), su ubicación dentro del elemento analizado (lugar), y sobre el nivel / frecuencia de repetición (gravedad).

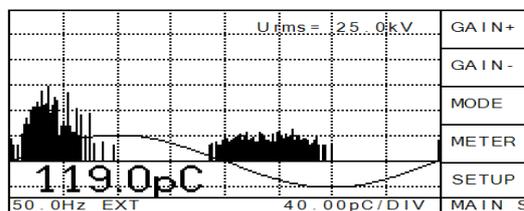
La ubicación de las descargas, según sea el semiciclo en que aparezcan (+) y/o (-), tiene una interpretación particular, relacionada directamente con el lugar del defecto dentro del cable u accesorio.

Por ejemplo:

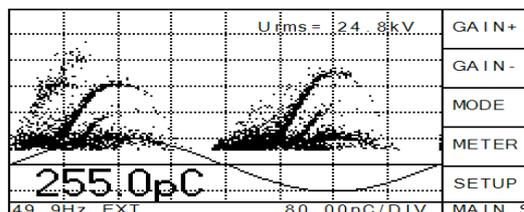
Bajo una tensión de ignición de 6KV (mínima tensión de ensayo que logra originar el inicio de las DP), la ubicación de las DP, en el semiciclo negativo de la senoide, indican que las mismas se producen en la interfase aislamiento / semiconductor externa.



Sin embargo; a una tensión de prueba de 28 KV, las DP ubicadas en el semiciclo positivo, señalan que las actividad en la capa semiconductor interna, logra superar en nivel a la de la capa semiconductor externa.



Por último, y para confirmar los resultados, las DP en forma de *senoide*, muestran claramente las caídas de tensiones en las cavidades (espacios de oclusión gaseosa) dentro de la aislación, con una fuerte persistencia, y con un consiguiente daño térmico del material aislante.



2.2 MICROSCOPIA 3D:

La microscopia digital en tres dimensiones, junto a la iluminación ultravioleta, y a la utilización de *methylene blue*, es hoy en día una herramienta indispensable para el estudio del fenómeno de DP.

La aplicación de estas técnicas, permiten de esta manera, visualizar lo que hasta el momento, las mediciones eléctricas, solo han podido detectar o mensurar, eliminando ahora, todo tipo de incertidumbre.

Las siguientes imágenes, extraídas de muestras analizadas inicialmente bajo las técnicas de fase resuelta, y posteriormente confirmadas bajo microscopía 3D con luz ultravioleta, muestran un correlato entre el patrón eléctrico de descargas (mensurable, pero no visible) y la posterior confirmación visual, del mismo defecto.

DEFECTO EN SEMICONDUCTORA EXTERNA:

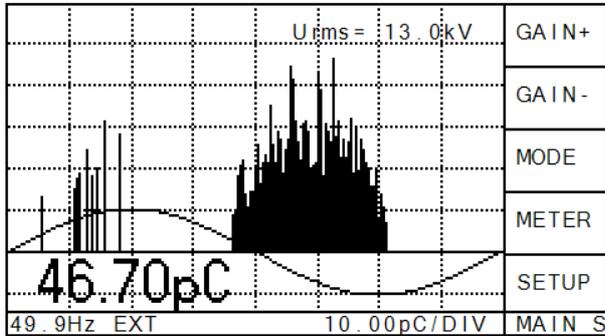


Imagen "ELECTRICA" en fase resuelta
Water tree en semiconductor externa



Imagen "VISUAL" en microscopía digital 3D:
Water tree en semiconductor externa

DEFECTO EN SEMICONDUCTORA INTERNA:

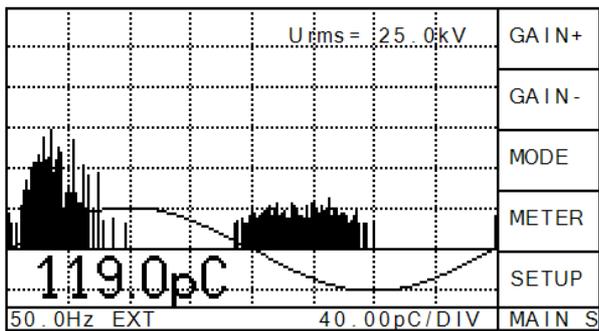


Imagen "ELECTRICA" en fase resuelta
Electrical tree en semiconductor externa

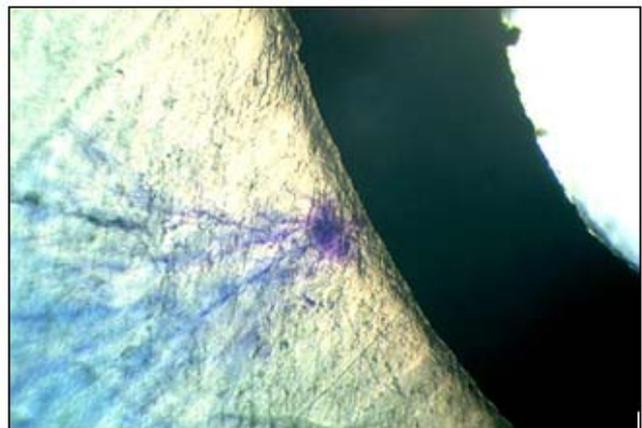


Imagen "VISUAL" en microscopía digital 3D:
Electrical tree en semiconductor externa

DEFECTO EN AISLACION PRINCIPAL:

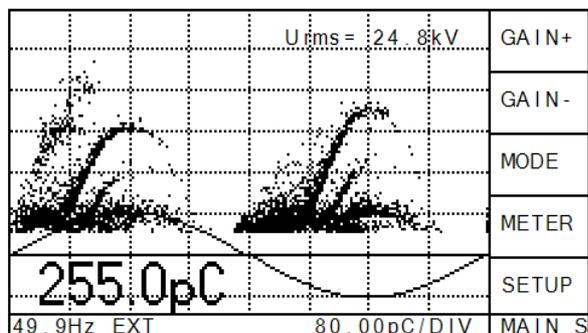


Imagen "ELECTRICA" en fase resuelta
Contaminación en Aislación Principal

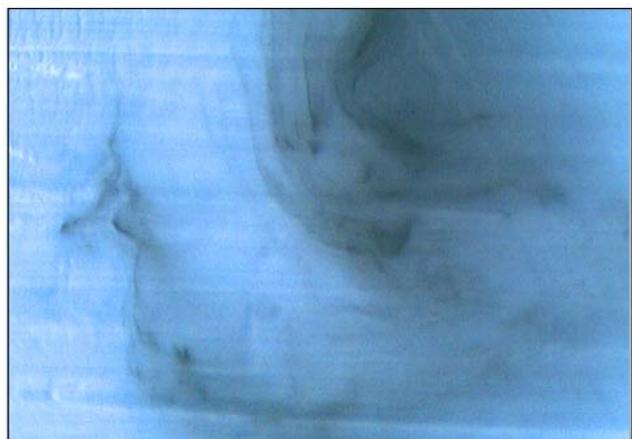
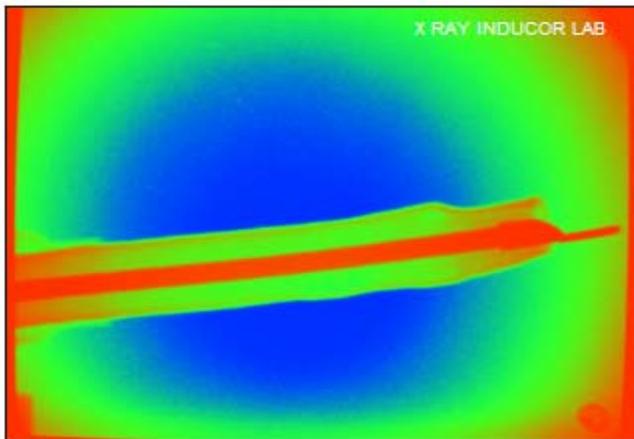


Imagen "VISUAL" en microscopía digital 3D:
Contaminación en Aislación Principal

2.4 Inspección por Rayos X:

Un aliado actual e indiscutible para el análisis forense del origen de daños, en accesorios de MT /AT, lo constituye la aplicación del análisis por Rayos x, como paso previo al desarme de la muestra bajo observación.

Conociendo los puntos críticos durante la construcción de terminales y empalmes; generalmente la zona de cortes de la capa semiconductora externa, oclusión de aire entre las mantas termo- contraíbles, corte de los filamentos de pantalla, entre otras; el investigador obtiene antes de efectuar el corte o el desarme final e irreversible de la muestra, una clara evidencia del origen del daño que llevó la colapso eléctrico.



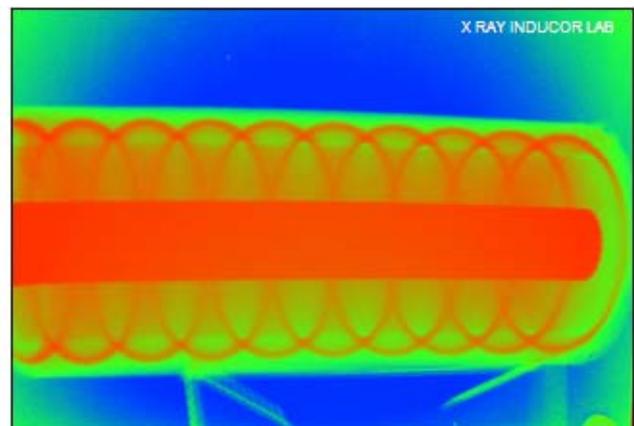
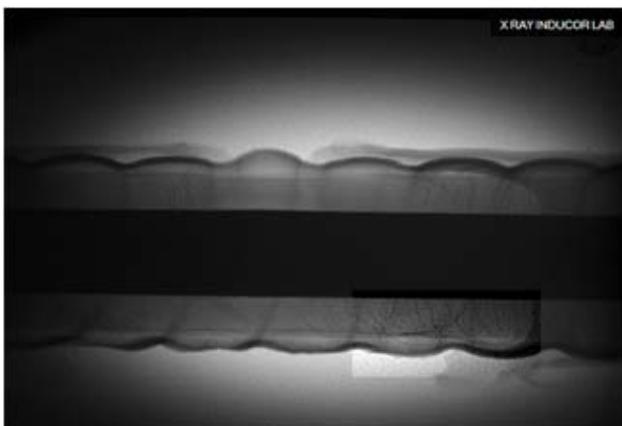
Imágenes por Rayos X, terminal 33 KV

Para estimar degradación ascendente en muestras aun en servicio, la aplicación de Rayos x se incluye también dentro de los denominados ensayos no destructivos, o sea aquellos que permiten obtener información del material analizado sin causar daños o cambios al mismo.

Su aplicación como control de calidad, permite detectar la presencia tamaño y posición de defectos en materiales aislantes conformados, tales como grietas y fisuras, trazas de carbón, oclusiones gaseosas, o impurezas. Se trata de la aplicación de radiaciones electro-magnéticas, que se propagan a la velocidad de la luz, con menor longitud de onda, y una mayor energía / penetración que la luz visible.

Se propagan en línea recta, sin sufrir desviaciones por campos eléctricos o magnéticos externos.

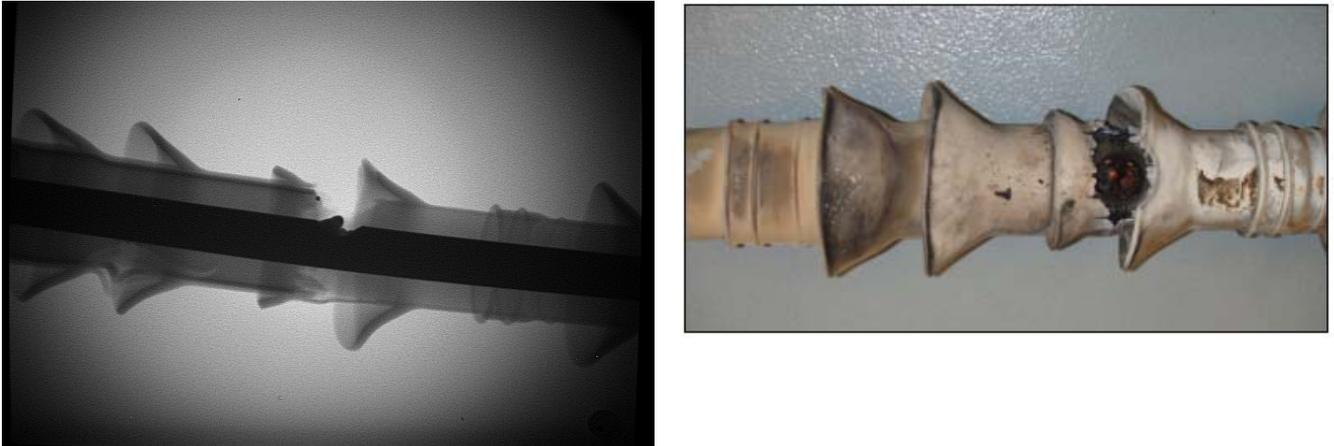
Dado que estos rayos atraviesan los cuerpos opacos sin reflejarse ni refractarse, y son absorbidos en mayor o menor medida, según el espesor y/o la densidad del material que atraviesan, y según la longitud de onda de la radiación emitida, el análisis visual de un defecto siempre se traducirá en la búsqueda de un contraste, ya sea en blanco y negro, o a color.



Rayos X (blanco y negro/color) sobre cable de 110 KV - XLPE

Los defectos en terminales, cables y empalmes, (grietas, oclusiones, fisuras, etc) de distintas densidades, absorben las radiaciones en distintas proporciones que el material base, de tal manera que estas diferencias, generarán detalles de contraste, del tipo claro-oscuro, en el registro fotográfico obtenido.

Las bolsas de aire o oclusiones gaseosas, atrapadas entre las capas de materiales termo-contraíbles, ofrecen generalmente una transparencia, de manera que su individualización es casi perfecta frente a la tonalidad más oscura de cualquier otro material que atraviese.



Imágen por Rayos X y visual en terminal fallado de 33 KV

Debemos considerar, que aquí se trata de radiaciones del tipo ionizantes, o sea, de aquellas radiaciones generadas artificialmente, con energía suficiente para ionizar la materia, extrayendo los electrones de sus estados ligados al átomo.

De aquí surge una nueva técnica de inspección, aliada a la detección de descargas parciales, producidas por oclusiones gaseosas esféricas (burbujas), contenidas en materiales del tipo polimérico.

De existir una cavidad gaseosa, ahora es posible, mientras se realiza un ensayo de descargas parciales, (excitación con fuente externa), producir artificialmente mediante la aplicación simultánea de Rayos X, la ionización de las oclusiones, permitiendo acelerar y detectar anticipadamente, el proceso de inicio de la descargas, invadiendo la cavidad con electrones que produzcan el efecto avalancha.

La aplicación estadística de Rayos X, sobre muestras retiradas del servicio antes del colapso de su aislación, proporciona una herramienta eficaz para determinar la línea de base, o la evolución de la degradación, en aquellas que se hallan aun en actividad.

Por otro lado, la aplicación sobre muestras fallidas, permiten determinar el origen o las causas del colapso, infiriendo resultados sobre la calidad del material empleado, o la mano de obra de utilizada en su confección. Disponer de herramientas útiles para anticiparnos a la salida de servicio de un alimentador subterráneo, siempre formará parte de una correcta estrategia de mantenimiento.

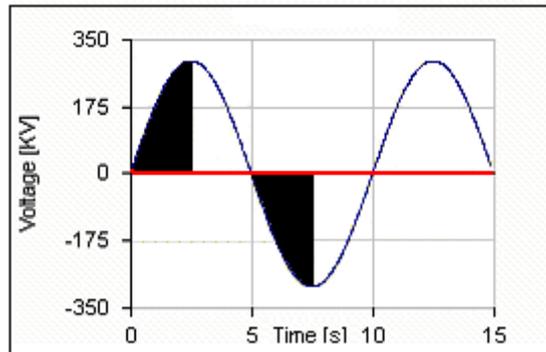
2.5 – Ensayos en Very Low Frequency:

VLF son las siglas usadas habitualmente para referirse a Very Low Frequency. Se considera generalmente que VLF es de 0,1 Hz o menos. Por definición de la IEEE, un equipo de ensayo bajo el sistema VLF, será todo aquel que pueda generar una señal de corriente alternada, de una frecuencia del orden de los 0,01Hz a 1Hz.

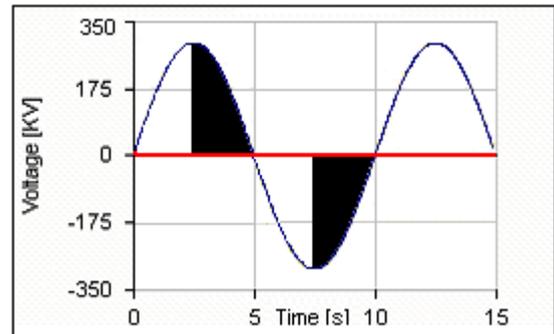
El equipo es simplemente un probador de aislación en corriente alterna, que trabaja a muy baja frecuencia. En 0,1 Hz, la duración de un ciclo completo es de 10 segundos, en vez de los 20 milisegundos

correspondientes a 50 Hz.. Los equipos VLF han sido usados durante décadas para pruebas de maquinas rotantes (IEEE 433-1974).

Estos sistemas logran formar una senoide a partir de una corriente continua, la cual, luego de ser acondicionada por algún sistema, electromecánico o electrónico, logra formar una alternancia, mediante un proceso sistemático de carga y descarga del cable bajo ensayo.



Intervalos de carga de un equipo VLF
- energía acumulada por ciclo -



Intervalos de descarga de un equipo VLF
- energía a disipar por ciclo -

Claro que cargar un cable con corriente continua es muy sencillo y requiere de una fuente de poca potencia, pero el principal problema está en los intervalos de descarga de la gran energía acumulada en dicho cable, según la ecuación:

$$E (\text{Joules}) = 0.5 \times C \times V^2$$

Esta variable de altas energías en juego, que debe ser disipadas 2 veces por ciclo, ha hecho que cada fabricante batalle por lograr un diseño particular o novedoso, tendiente a lograr esta alternancia, pero en realidad, no es un proceso simple de resolver cuando hablamos de altas tensiones y de grandes capacidades, como son los cables de extensas longitudes.

Como todo ensayo de tensión resistida la aplicación del VLF radica que un cable soporta (resiste) la tensión de ensayo, o falla durante el mismo. Si un cable tiene defectos, y por lo tanto no resiste la aplicación de 1,5 a 3 veces su tensión nominal, significa que no durará en servicio. La idea base es, que si el cable tiene que fallar, que lo haga entonces durante la prueba, y no cuando esté en servicio.

Dicho de otra forma, durante el ensayo de VLF, un defecto es forzado a la ruptura.

En la actualidad, la norma IEEE-400.2001 IEEE GUIDE FOR FIELD TESTING AND EVALUATION OF THE INSULATION OF SHIELDED POWER CABLE SYSTEMS cubre los ensayos de sistemas de cables instalados, de clase 5KV a 500 KV en todas sus etapas (instalación – aceptación – mantenimiento).

3 CONCLUSIONES

Las empresas de energía, cuentan hoy con una opción eficiente, y con normativas habilitantes, para probar el estado de sus redes subterráneas de energía.

Algunas optan por no cambiar sus tradicionales métodos de ensayos, y sus cables siguen fallando en servicio, teniendo que realizar reparaciones de emergencia, clientes insatisfechos, y pérdida de ingresos.

Más allá de la necesidad de detectar fallas, en la actualidad, la tendencia mundial está basada en la anticipación temprana de un siniestro eléctrico, mediante la aplicación de técnicas de diagnóstico de cables y sus accesorios, permitiendo controlar desde la recepción de los mismos, el tipo de falla que a futuro tendrán,

cuando se constituyan como parte integrante de un tendido subterráneo. Además, permiten también analizar metro a metro el estado de degradación, ascendente o estable.

Muchas fallas en cables subterráneos son debidas a una ineficiente ejecución de sus empalmes, y para estos casos, el VLF ha demostrado ser un método fácil y seguro, para mantener la confianza en los sistemas de distribución de energía.

Las aplicación conjunta de técnicas de inspección por Rayos X, y Microscopia Digital, unidas a los ensayos específicos de Descargas Parciales en fase resuelta, ofrecen un nuevo y preciso panorama de análisis, tendiente a determinar el real estado de degradación de empalmes, y en especial de terminales de MT /AT, dando lugar también a la creación en la rama eléctrica, de una herramienta del tipo forense.

Estimar el grado de confiabilidad de un alimentador subterráneo, forma parte de la valoración de los activos de una empresa distribuidora, posibilitando determinar su real rentabilidad proyectada.

4 REFERENCIAS:

IEEE Std400-2001 ENSAYOS EN CAMPO Y EVALUACION DE LA AISLACION DE CABLES DE POTENCIA
IEEE Std400.2-2004 ENSAYOS EN CAMPO DE CABLES DE POTENCIA APANTALLADOS USANDO VLF.
IEEE Std 1234-2007 FAULT LOCATING TECHNIQUES ON SHIELDED POWER CABLES SYSTEMS
Database interna Inducor Ingenieria S.A.
Todas las fotos publicadas pertenecen al Dto. Servicios de Inducor Ingenieria S.A.