

ENSAYOS DE DESCARGAS PARCIALES IN-SITU, EN CABLES DE DISTRIBUCION, UTILIZANDO VERY LOW FREQUENCY (VLF) Y EXCITACION A FRECUENCIA INDUSTRIAL

Detlev W. Gross & Markus Söller
Power Diagnostix Systems GmbH



Partner: Inducor Ingeniería S. A. - Buenos Aires Argentina - www.inducor.com.ar

RESUMEN

En la mayoría de las empresas distribuidoras de energía, la desregulación del mercado eléctrico, ha tenido un fuerte impacto en las estrategias de mantenimiento.

Al mismo tiempo, 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 requieren de un inmediato reemplazo.

Durante las pruebas de degradación, existen varios métodos posibles para energizar a un cable con tensión de ensayo. Los equipos de pruebas del tipo resonantes, de frecuencia fija (50/60Hz), concuerdan con las condiciones del servicio; pero dichos equipos son pesados y costosos. Existen otras soluciones, como los equipos de pruebas del tipo resonantes, a frecuencia variable, otros de ondas oscilantes amortiguadas, y los de excitación a muy baja frecuencia (VLF).

Estos últimos ofrecen soluciones más redituables.

PALABRAS CLAVE

Localización de Descargas Parciales, trazado (mapeo) de DP, VLF, equipo de pruebas del tipo resonantes, Tangente Delta; ensayos en campo.

INTRODUCCION

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 las DP del cable en función a su metraje, así como también, sus accesorios (empalmes) más débiles.

Sin embargo, existen grandes diferencias entre los cables poliméricos, y los cables impregnados.

Históricamente, las mediciones de DP en cables, eran utilizadas cada vez más desde el cambio al polietileno (PE), y más tarde, con el polietileno reticulado (XLPE) como material de aislación para la mayoría de los cables de potencia.

La mejorada adquisición y procesamiento de la señal, hicieron que esta técnica sea también aplicable en ambientes no apantallados (en campo). Sin embargo, hay que tener especial cuidado en el correcto filtrado de la fuente de tensión utilizada, y en la reducción del nivel del ruido ambiental.

INCIDENCIAS DE LAS DESCARGAS PARCIALES

Los materiales aislantes, líquidos y sólidos, pueden tolerar un campo eléctrico que exceda al normal de trabajo, o sea, el comúnmente aplicado en cables y otros equipos de AT. Por consiguiente, para que las descargas parciales se presenten, es necesaria una imperfección (anomalía), que tenga un campo de inicio más bajo,

como por ejemplo una inclusión de gas; o como alternativa, que aumente fuertemente el campo eléctrico en la aislación, como por ejemplo, por la inclusión de una partícula metálica filosa.

Ambas clases de imperfecciones, pueden ocurrir durante la producción (manufactura), manteniéndose desapercibidas durante las pruebas iniciales, o pueden desarrollarse durante el 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 avalancha de electrones.

Con la baja energía disponible en la superficie de una cavidad esférica, ocluida en polietileno fresco, ningún electrón libre es habilitado a iniciar las DP, a pesar de que el campo eléctrico interno de esa burbuja de gas, sea mayor que el campo inicial.

Por lo tanto, no se producen DP hasta que el electrón libre sea provisto de cargas, o de un fotón de radioactividad natural. Esta radioactividad natural –suelo radioactivo, gases, fotones- causan alrededor de $2 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ electrones libres. De este modo, el lapso de tiempo que ocurre hasta que se presenta la descarga en la cavidad del material polimérico, inicialmente fresco, puede alcanzar varias decenas de minutos dependiendo del tamaño de la cavidad.

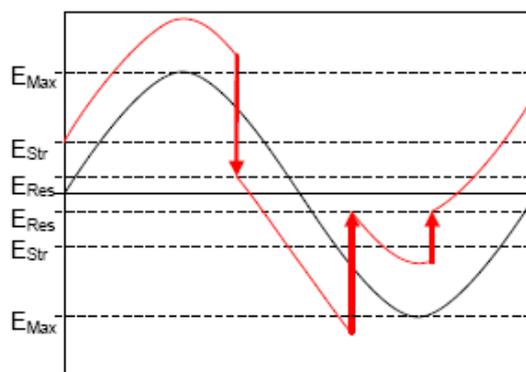


Figura 1: Campo E interno con baja disposición de electrones.

Una vez que este impulso de DP ha ocurrido, la superficie de la cavidad es invadida de electrones con niveles de energías comparablemente bajos, que serán capturados y acumulados en la misma.

De este modo, estos electrones dependerán de las propiedades de los materiales. Con polietileno fresco (polipropileno, resina epoxi, etc.), esta constante de tiempo de captura, estará dentro de un rango de decenas de ms, y más.

La figura 1 muestra como reacciona el campo eléctrico en el retardo (*delay*) estadístico, causado por la captura. La figura 2 muestra el patrón de DP correspondiente, o también llamado **patrón ϕ -q-n**.

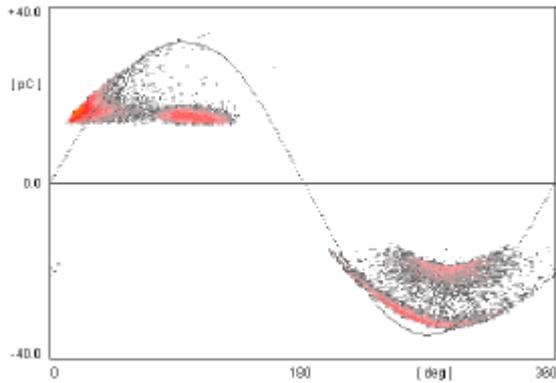


Figura 2: Patrón ϕ -q-n con baja disposición de electrones

Aquí (fig. 2), la magnitud de la descarga, refleja el campo eléctrico dependiente con la fase. De esta manera, la forma de la tensión sería triangular. Otras configuraciones de los electrodos, como una delaminación, muestran otras correlaciones entre el campo eléctrico y la magnitud de la descarga.

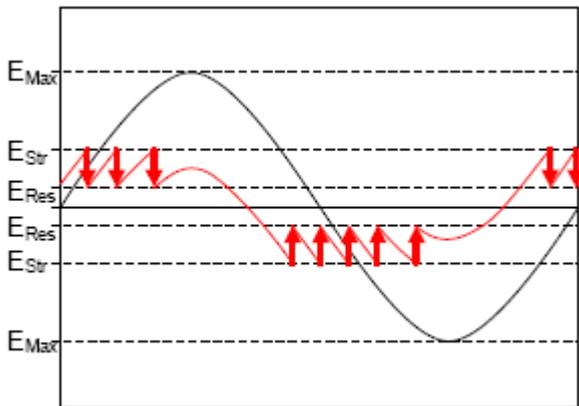


Figura 3: Campo E interno con alta disponibilidad de electrones

En la Figura 3, el mismo sistema (burbuja de gas en material polimérico), es expuesto a la radiación ionizante, provocando una captura mucho más rápido. De este modo, los electrones están disponibles con anterioridad, y la magnitud de la descarga es menor (Figura 4). En consecuencia, las propiedades del material, como por ejemplo: la capacidad de almacenar cargas en la superficie o volumen, y la conductividad de la superficie; tienen un fuerte impacto en la aparición de las descargas parciales. La humedad o la corrosión de las superficies poliméricas por DP, tienen un impacto extra en la capacidad del material para proveer electrones libres, y en su constante de tiempo, y por ende, influyen enormemente en la aparición del patrón de descarga.

Generalmente, con el envejecimiento (corrosión) de las superficies poliméricas, las cadenas de unión se parten, y la constante de tiempo cae, para facilitar electrones libres. Con respecto a la frecuencia de la tensión de ensayo, esta constante de tiempo es insignificante para las superficies metálicas.

Basándose en dichas consecuencias fundamentales de la física de la descarga en gas, el análisis del patrón ϕ -q-n, o patrón de DP de **fase resuelta**,

ha demostrado ser un excelente método, tanto para identificar las propiedades de la actividad de las DP; para distinguir las fuentes (origen), y para esbozar conclusiones sobre las propiedades de los materiales involucrados en la actividad de las descargas.

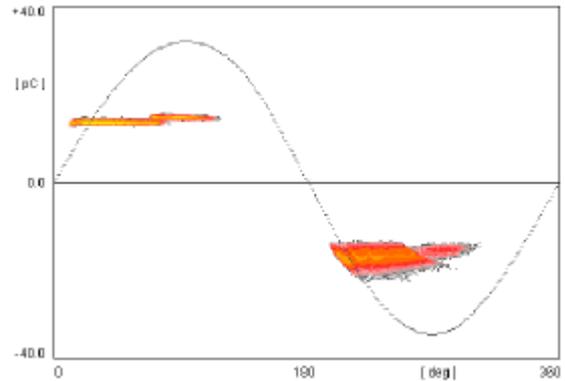


Figura 4: Patrón ϕ -q-n con alta disposición de electrones

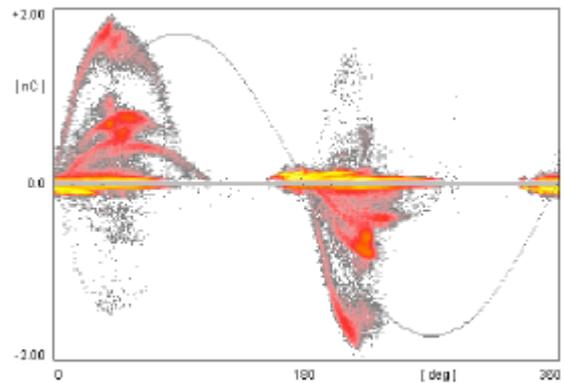


Figura 5: DP en una terminal del cable.

La Figura 5, muestra la actividad de descarga de varias cavidades. Aquí, el patrón simétrico indica que las cavidades se encuentran simétricamente en la aislación, y no están junto a ningún conductor.

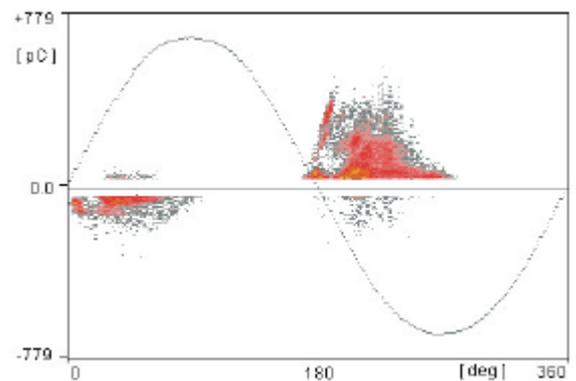


Figura 6: Cable EPR-delaminación de capa semiconductora

La Figura 6, en contraste, 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,

ESQUEMA DE DESCARGAS PARCIALES

Los impulsos de DP, en su origen, tienen un *rise time* (tiempo de crecimiento), de alrededor de 1ns bajo atmósfera de Nitrógeno, y a presión ambiental. De este modo, en su origen, el impulso de corriente, a saber, el desplazamiento de la corriente provocado por la avalancha de electrones, tiene un espectro de amplitud que es plano desde CC (0 Hz), hasta un par de cientos MHz. En el caso de un cable de potencia, la impedancia del cable transforma al impulso corriente, en un impulso de tensión, que viaja por el cable en ambas direcciones. Generalmente, el ancho de banda original, no se puede mantener a grandes distancias.

Técnicamente, para conformar un capacitor cilíndrico ideal, un cable polimérico de triple extrusión consiste en 3 capas –la aislación principal de XLPE es terminada en ambos lados con una fina capa de material polimérico semiconductor. Estas capas limitan el ancho de banda de alta frecuencia de los cables de potencia de triple extrusión. Dependiendo principalmente del grosor de las capas semiconductoras, el ancho de banda de la transmisión es limitado a 5-10MHz, con una atenuación cada vez más fuerte, en función de la frecuencia y la distancia. Este ancho de banda puede ser utilizado para ubicar sensores en el interior de los empalmes, y para conceptos de monitoreo.

Además, esta estructura de capas causa dispersión, esto significa que el tiempo de desplazamiento no es uniforme sobre la frecuencia. En consecuencia, el frente del impulso de DP, originariamente excesivo es suavizado más adelante por este efecto, y por la mencionada atenuación, y por lo tanto, la precisión de la ubicación alcanzable es cada vez más limitada. Comparada con los cables de polietileno, esta atenuación de los impulsos de alta frecuencia es mucho más fuerte para los cables del tipo EPR.

Sin embargo, la atenuación más grande se encuentra en los cables impregnados. Aquí, en cables mayores a un par de cientos de metros, la reflexión en el extremo final, se hace cada vez más oculta en el piso del ruido (línea de ruido base).

La forma o frecuencia de la fuente de alta tensión elegida, no influye en la obtención de la ubicación de la actividad de las descargas parciales en un cable, siempre y cuando la imperfección produzca DP.

Así, en principio, cualquier fuente de alta tensión puede ser utilizada para ubicar las DP.

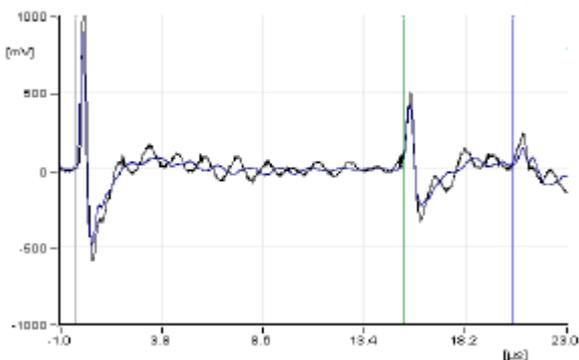


Figura 7: Patrón de reflexión (Azul: post proceso)

Una vez que se producen las DP, viajan hacia ambos extremos del cable; se reflejan y producen, un trazo típico de tres impulsos. En este trazo, el tiempo entre el primer y el segundo impulso, corresponde a la distancia existente entre el origen de la DP y el extremo final del cable; así mismo, el tiempo entre el primer y el tercer impulso, refleja el tiempo en desplazarse dos veces por el cable. La figura 7 muestra un trazo típico. Aquí, también puede observarse la influencia de la atenuación y de la dispersión.

Un simple cálculo resuelve la posición (origen) de la descarga, en función a la longitud del cable.

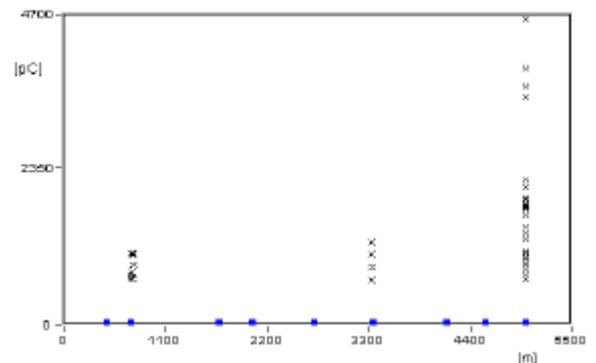


Figura 8: Mapa del sitio de la actividad de las DP

Basado en los resultados de la ubicación, el diagrama de las DP es el mostrado en la figura 8, que muestra las actividades en función a la longitud del cable.

Comparando este diagrama con el plano de instalación del cable, y con las posiciones de los empalmes (verificadas durante la calibración), se pueden identificar los lugares defectuosos del sistema.

FUENTES DE ALTA TENSION

Normalmente, en la sala de ensayos del fabricante de cables, se utiliza un transformador o un equipo resonante (CA), de frecuencia fija. Esto concuerda perfectamente con las condiciones normales de trabajo del cable. Con los cables ya instalados, las consideraciones de pesos y costos, demandan soluciones más efectivas, y los voluminosos transformadores para ensayos, a frecuencia fija (50/60 Hz), no son aquí una opción práctica.

De mismo modo, un equipo resonante, a frecuencia variable, que utiliza un filtro y un capacitor de acoplamiento como base de carga, y en donde la capacidad adicional del cable a ser probado luego baja la frecuencia final a valores de entre (25 Hz-300 Hz), alcanzaría fácilmente un peso de 1000Kg.

Utilizando **VLF (Very Low Frequency)**, las fuentes de alta tensión, reducen drásticamente el peso y el costo, debido a que el requerimiento de la potencia de la carga, disminuye en un factor de 500, cuando se lo compara al comúnmente utilizado de 0.1Hz, con respecto al de 50Hz. Ambas tecnologías de construcción en VLF: electrónicas y electromecánicas, están disponibles hoy en día.

Finalmente, los equipos de onda oscilante, mientras cargan el cable con un suministro de CC, y lo descargan en un inductor, producen de esta manera, una onda oscilante (*damped*). Aquí la frecuencia también depende de la carga; o sea, la capacidad del cable. De acuerdo a la calidad del inductor, y a la tangente delta del cable, la onda oscilante decaerá en tiempo más o menos rápido. Otro caso especial, es el de utilizar VLF con señal del tipo cosenoidal. Aquí, una señal de onda cuadrada, es combinada con una transición en el rango de la frecuencia de red.

Sin embargo, en cuestión de fuentes, además del peso y del costo, también debe considerarse el impacto producido en el campo eléctrico local, por la frecuencia de ensayo, y su incidencia en las DP. Como se mencionó anteriormente, el patrón de DP, refleja las distintas constantes de tiempo derivadas del electrón inicial. Por lo tanto, la apariencia (forma) del patrón de las DP, y en consecuencia su magnitud, es influenciada por la frecuencia. Esto se vuelve evidente, si consideramos que la media en la constante de tiempo de captura de la actividad de DP, se presenta en orden de magnitud del ciclo de la tensión de ensayo.

De este modo, para una actividad de DP, que presenta una constante de tiempo de captura de aproximadamente 10ms, la medición a 50Hz produce un patrón bien distribuido. Si la misma actividad es expuesta a 0.1Hz, la constante de tiempo de 10ms será pequeña contra el tiempo del ciclo de 10s y, por consiguiente, el patrón de las DP cambia su apariencia de manera similar al que se muestra en las anteriores figuras 1 y 3.

De esta manera, especialmente en superficies poliméricas, la magnitud de la actividad de DP no es comparable entre los 0.1Hz y 50/60HZ. Sin embargo, si provienen de cables envejecidos, ej: superficies corroídas; la constante de tiempo de captura decae y se vuelve incluso corta, cuando se la compara con el ciclo de 50Hz. Así, la magnitud es comparablemente baja en ambas frecuencias de excitación. En consecuencia, una actividad que comienza desde las superficies de metal, con una alta afinidad de electrones libres, tales como las tipo *point-plane*, mostrará una actividad similar en todas las frecuencias de ensayo (Figura 9).

Con todas las actividades de descarga que presenten una alta disponibilidad de electrones de inicio, como por ejemplo, las superficies corroídas de accesorios montados incorrectamente, los equipos de onda oscilante iniciarán la actividad con el primer medio ciclo o incluso durante el tiempo de carga. Sin embargo, la oportunidad de detectar una cavidad interna en un cable tendido recientemente, es comparablemente baja debido al retardo o remanencia inicial (*delay*), tal como se describió anteriormente.

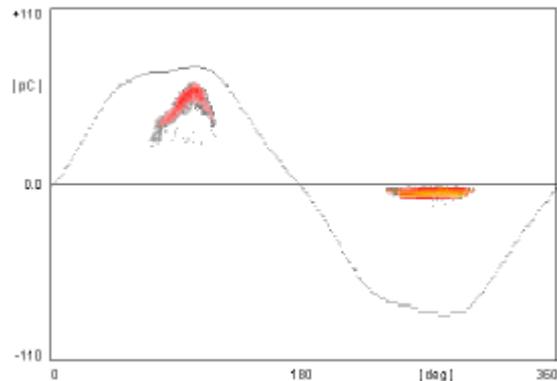


Figura 9: Descarga "Point-plane" partiendo de un extremo metálico.

La adquisición de un patrón ϕ -q-n con un sistema de prueba de onda oscilante, no es muy útil, debido a que combina las actividades de descargas, que acontecen bajo diferentes tensiones, y como consecuencia, no van de la mano.

Otros efectos que dependen de la frecuencia, conciernen a los accesorios (empalmes). Si, por ejemplo, un pico de tensión tiene un débil trayecto semiconductor a tierra, la disminución de tensión resultante en ese trayecto, causará descargas superficiales bajo 50/60Hz, o en ensayos a frecuencias variables. Dado que las corrientes son 500 veces más pequeñas en ensayos de 0.1Hz, esto podría permanecer oculto al utilizar equipos de VLF. Generalmente, al seleccionar una fuente de alta tensión para ensayar tendidos de cables, deben compararse las distintas propiedades (ventajas y desventajas).

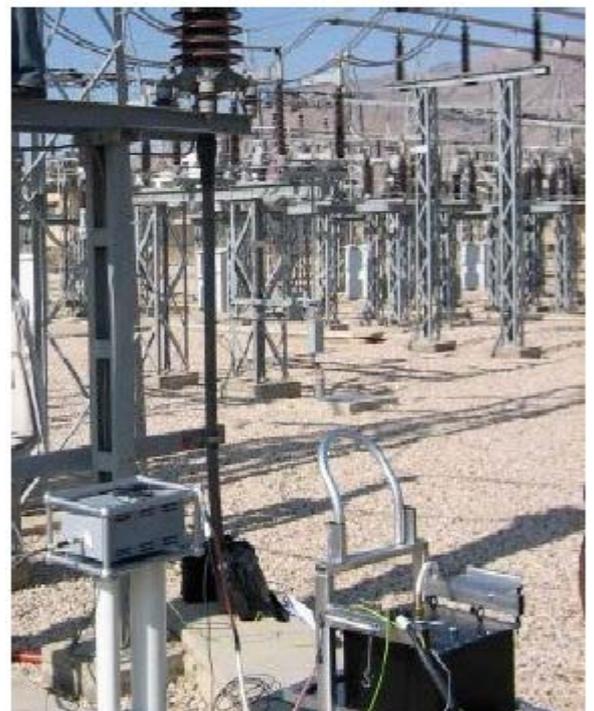


Figura 10: Ensayo en subestación con unidad VLF de 90kV

El equipo resonante se acerca a las condiciones de la vida real, pero es pesado y costoso. El ensayo en VLF es una alternativa muy redituable, pero deben considerarse los efectos de la gran diferencia que existen en los patrones de DP, en función a las frecuencias de los ensayos, y el saber evaluarlos. En consecuencia, debido al coeficiente individual de las diversas propiedades y requerimientos para cada caso, no puede darse recomendaciones generales.

REQUERIMIENTOS DEL ENSAYO EN CAMPO, A DIFERENCIA DE LOS DE UN LABORATORIO

En una sala de ensayos, normalmente se conecta un detector de medición y detección de DP, a un cuadripolo, ubicado a la salida de un capacitor de acoplamiento. De ser posible, se inserta un filtro de alta tensión entre el transformador y el cable a ensayar. La señal de DP, así como la señal de tensión, es conducida a través de un cable coaxial. La disposición es similar cuando se integra el instrumento dentro de una camioneta o vehículo de ensayos, tal como es requerido para los equipos resonantes de frecuencia variable, y para los equipos VLF más grandes.

La figura 10 muestra la situación durante un ensayo con una unidad portátil VLF.

Aquí, el capacitor de acoplamiento, su cuadripolo, y el filtro de alta tensión requerido, son combinados en una sola unidad.

Esta unidad de acoplamiento y filtro combinado, que está ubicada entre la fuente de alta tensión y el cable bajo ensayo, es compatible para tensiones que alcancen hasta los 150kV.

La figura 10 muestra una unidad de 65kV (TCC65) Power Diagnostix, que se adapta a una fuente VLF de 90kV, marca HIGH VOLTAGE Inc.

La figura 11 muestra un sistema junto con una unidad VLF de 60kV., marca HIGH VOLTAGE Inc. Aquí, la unidad TCC45 Power Diagnostix, con filtro de acoplamiento combinado, es utilizada para eliminar el ruido de la fuente de alta tensión, y para proveer la señal de DP, así como la señal para la sincronización y medición de la tensión.

Para combinar los ensayos de cables in-situ, con la localización y medición de DP, se requiere generalmente de un filtro de alta tensión, ya que, a pesar del principio técnico, todos los equipos resonantes de frecuencia variable, y todos los equipos VLF, producen ruido de alta frecuencia, que dificultan las mediciones si no son filtrados adecuadamente. Con ensayos a frecuencia variable resonante, deben aplicarse también, las técnicas de sincronización, debido a que los impulsos del IGBT o de los tiristores, son muy fuertes, y requieren indispensablemente ser filtrados.



Figura 11: Sistema TCC45 Power Diagnostix, con una unidad VLF de 60kV marca HIGH VOLTAGE Inc.

Integrar el filtro T y el capacitor de acoplamiento en una sola unidad, simplifica enormemente el sistema. Sin embargo, especialmente en las fuentes de alta tensión portátiles, se deben tomar precauciones al conectar el equipo a tierra, y también es necesario revisar cada conexión en forma previa a cada ensayo.

CONCLUSION

Las localizaciones y mediciones de las DP, pueden combinarse con fuentes de alta tensión portátiles de diferentes principios, utilizando modernas técnicas de procesamiento y adquisición de señales. Sin embargo, la mayoría de los diversos métodos de excitación, producen como efecto secundario, ruido de alta frecuencia, que dificultan la sensibilidad de la detección de las DP, y por consiguiente, requieren de un filtrado y de una concordancia adecuada.

Los equipos resonantes de frecuencia variable, permiten el uso de frecuencias de excitación cercanas a la frecuencia de red, pero normalmente las consideraciones de peso y costos, conducen a la aplicación de fuentes de alta tensión VLF. Sin embargo, la fuerte desviación en parte de las condiciones normales de servicio (50/60Hz), tienen un impacto en la detección de ciertos tipos de defectos, y en la apariencia del patrón de DP, que deben ser evaluadas por profesionales en el área de ensayos.

Versión adaptada a la presentada ante el Comité de JICABLE, Versailles, Francia, 24-27 de Junio de 2007. -

FUENTE: **INDUCOR INGENIERIA S.A.**

ELECTRICAL TESTING GROUP
H.V. PARTIAL DISCHARGE
Power Diagnostix Systems GmbH
Latin American Sales & Applications
www.inducor.com.ar