

Medición de Descargas Parciales en Transformadores de Potencia bajo los estándares internacionales IEC e IEEE

Measurement of Partial Discharge in Power transformers under international standards IEC and IEEE

Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez¹

Fecha de recepción: 11 de mayo de 2017

Fecha de aprobación: 23 de agosto de 2017

Gómez-Ramírez, G. Medición de Descargas Parciales en Transformadores de Potencia bajo los estándares internacionales IEC e IEEE. *Tecnología en Marcha*. Vol. 31-1. Enero-Marzo 2018. Pág 70-80.

DOI: 10.18845/tm.v31i1.3498

¹ Profesor, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica. Profesor, Escuela de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ggomez@itcr.ac.cr



Palabras clave

Descargas parciales; materiales dieléctricos; aislantes.

Resumen

La estimación de la vida útil de un equipo de potencia como lo es un transformador de potencia, cobra mayor relevancia hoy en día, máxime cuando se desea saber cuánto es la vida residual del mismo y poder proyectar el grado deterioro del equipo en función de términos económicos, técnicos y de parámetros eléctricos de funcionamiento. La siguiente nota técnica detalla los principios y fundamentos de la medición de descargas Parciales en transformadores de potencia. Esta es una prueba de alta tensión no destructiva, en la cual se puede evaluar y cuantificar el grado de deterioro de un dieléctrico. Se explican, además, los conceptos eléctricos y dieléctricos que hay detrás de la prueba y se hace un análisis y comparación según las normas internacionales IEC e IEEE, aplicables al activo más valioso de un sistema de potencia: *Transformadores de Potencia*.

Keywords

Partial discharge; dielectrics materials; insulation.

Abstract

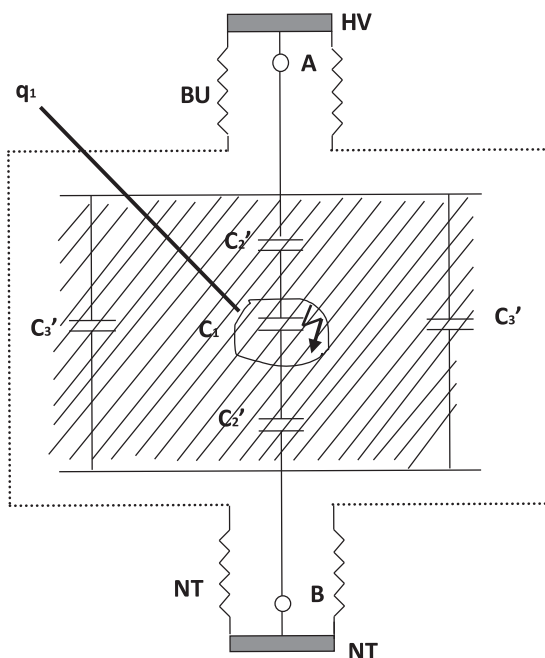
The estimation of the useful life of an equipment of power like it is a power transformer, major cobra importance nowadays, especially when one wants to know how much is the residual life of the same one and the degree is able to project deterioration of the equipment depending on economic, technical terms and electrical parameters of functioning. The following technical note details the beginning and foundations of the measurement of Partial unloads in power transformers. This one is a test of high not destructive tension, in which it is possible to evaluate and quantify the degree of deterioration of dielectrics. They make clear in addition, the electrical concepts and dielectrics that it is behind the test and an analysis and comparison is done according to the international procedure IEC and IEEE, applicable to the most valuable assets of a system of power: *Power transformers*.

Introducción

Una medición de descargas Parciales (medición DP) es una herramienta no destructiva con el propósito de establecer la condición del sistema de aislamiento de un transformador de potencia [1] [2]. El objetivo de la prueba es certificar que no existan fuentes dañinas de descargas parciales posterior a pruebas de alta tensión o después de su operación normal. [10] [9] [6] Una medición PD se hace posible detectando y localizando áreas dentro del transformador las cuales fueron expuestas a elevados esfuerzos dieléctricos. Las unidades y medidas para Descargas Parciales están definidas en los estándares de pruebas tanto para IEC 60270 (2000), IEC 60076-3 (2000) como IEEE C57.12.90-1999 [5] [14] [11]. Dichas pruebas van de la mano en complemento con el resto de las pruebas de baja tensión, con el fin de monitorear las condiciones dieléctricas de alta tensión, sobre todo la prueba de potencial inducido que esta se hace en un rango de frecuencia superior a la nominal del sistema.

Teoría

Una Descarga Parcial es la Ionización Transitoria causada por la concentración de campo eléctrico y que parcialmente abarca la distancia entre dos potenciales, provocando una fuga de electrones [1] [2] [15]. Con esto se degrada el aislamiento y en transformadores de potencia acaban como un arco eléctrico y se demuestra en la contaminación del aceite dieléctrico. Las Descargas Parciales son una corriente parcial de falla dentro de una serie de elementos del aislamiento [4] [3] en medio de dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial, (Capacitancias C_2' y C_1' en figura 1). Durante una típica medición de DP, la magnitud del valor detectable de la descarga parcial es generada en función de la tensión aplicada. Una descarga parcial puede ser interpretada como el movimiento rápido de un campo eléctrico desde una posición a otra. Para cambios muy rápidos, o durante el primer instante después del cambio de movimiento, el aislamiento individual enlazado en una serie de conexiones, en medio de dos líneas de terminales pueden ser considerados como un número de capacitores en serie conectados entre sí.



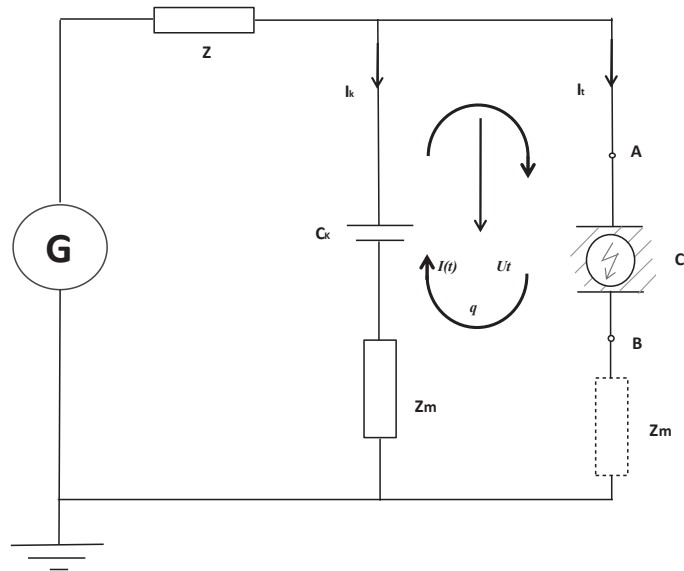
BU: aislador, HV: alta tensión, NT: terminal neutro, $C_{1,2,3}$: parte activa del transformador (incluido el aceite dieléctrico), C_1 : región debilitada, C_2 : capacitancia del objeto de prueba (C_2' y C_1')

Figura 1. Aislamiento básico de un transformador de potencia.

Si las dos líneas terminales son conectadas juntas por un capacitor externo C_k (ver figura 2) los cambios de movimiento dentro de la conexión serie del aislamiento (ver figura 1, capacitancias C_2' y C_3') será reflejada en el cambio del capacitor externo C_k . El cambio del movimiento puede ser detectado como una *corriente de impulso circulante* $i(t)$ en la conexión paralela de los capacitores C_k y C_1 , (ver figura 2). Se necesitan dos condiciones para iniciar una Descarga Parcial (por ejemplo, falla eléctrica) [1] [2] [3] dentro de la región de aislamiento débil:

- *Estrés de campo eléctrico localizado: E en la región débil será más grande que el inicial campo eléctrico de la fuente del Campo inicial de Descargas Parciales.*
- *Electrones libres estarán disponibles para inicial una falla eléctrica.*

El esfuerzo excesivo en la región débil puede resultar desde el desperfecto de diseño, contaminación o un mal control de calidad en la manufactura, también el defecto en los materiales aislantes, entre otros. Otra posibilidad son los daños causados al aislamiento posteriores a otras pruebas realizadas. [1] [2]



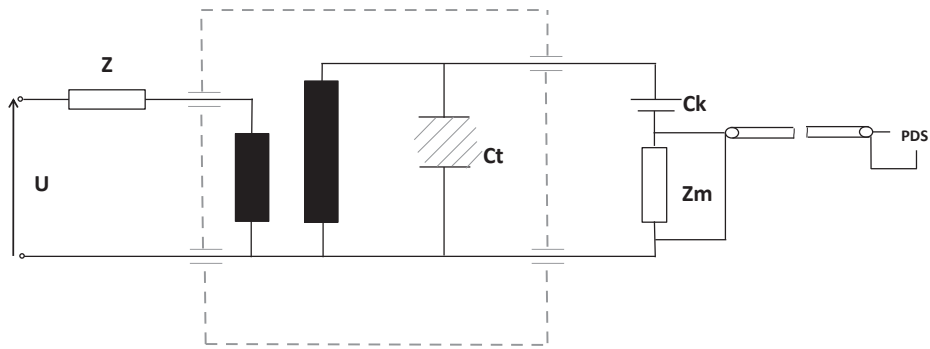
C_t : capacitancia del objeto de prueba, C_k : capacitancia de acople, G: fuente de voltaje, $i(t)$: corriente de pulsos de las DP, i_{kt} : corrientes desplazadas, Z: conexiones de las fuentes de tensión, q: cargas transferidas, U_r : tensión de la conexión en paralelo de los capacitores, Z_m : impedancia de medición

Figura 2. Circuito equivalente para la medición de DP.

Principio de Medición de Descargas Parciales

Todos los métodos de medición de Descargas Parciales [5] [6] [8] están basados en la detección de corrientes de impulso de DP $i(t)$, circulando en la conexión paralela de los capacitores C_k (capacitor de acople) y C_t (capacitor del objeto de prueba) por la medición de la impedancia Z_m . El circuito equivalente básico corresponde al de la figura 2. La medición de la Impedancia Z_m puede no necesariamente ser conectada en serie con el capacitor de acople C_k o con el capacitor del objeto bajo prueba C_t . Anteriormente se había discutido que las Corrientes de impulsos de DP son generados por los cambios transferidos en medio de las conexiones paralelo del capacitor C_k y el capacitor C_t .

Los estándares IEC e IEEE muestran las reglas y la manera de evaluación de los resultados a fin de establecer los criterios de aceptación de un transformador de Potencia. La IEC en su medición y procesamiento es distinta a IEEE. IEC transforma la señal a un valor en picocoulombs (pC) [5] mientras IEEE transforma la señal a un valor de Tensión de Radio Interferencia RIV [6] [11], generalmente medida en microvoltios (μV). El uso de la RIV esta descontinuado, pero IEEE aun no lo ha hecho oficial en su norma. A pesar de ello la IEEE ha preferido el método de medición el pC en el estándar IEEE C57.113. La integral de la medición de la corriente de impulso de DP puede ser realizada ya sea en el dominio del tiempo (osciloscopios digitales) o en el dominio de la frecuencia (filtro paso banda).



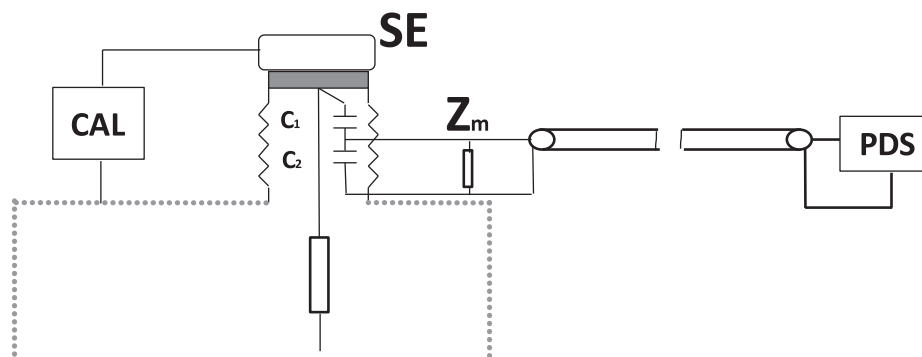
PDS: Sistema DP, C_k : capacitancia de acople, C_t : capacitancia del objeto de prueba, Z: conexiones de las fuentes de tensión, Z_m : impedancia de medición.

Figura 3. Circuito de prueba para medición sin toma capacitiva en transformadores de potencia

Medición de Descargas Parciales en Transformadores

Si circulan corrientes de impulso de DP, generalmente por una fuente externa de DP (en el circuito de prueba) o por una fuente interna (en el sistema de aislamiento del transformador) puede solamente estar midiendo los aisladores de alta tensión del transformador. En la figura 3 y figura 4 podemos observar la capacitancia del aislador de alta tensión C_1 , representada por un capacitor de acople C_k , cual es conectado en paralelo con la capacitancia C_1 , (*objeto de prueba = capacitancia total del sistema de aislamiento del transformador*).

Para Transformadores de Potencia la medida de impedancia es generalmente conectada en medio de los aisladores de alta tensión en la toma capacitiva de C_1 a tierra, tal y como se muestra en la figura 4. Para un aislador sin toma capacitiva se puede colocar un acople externo para la capacitancia de acople C_k y será conectada en paralelo con el aislador (figura 5)

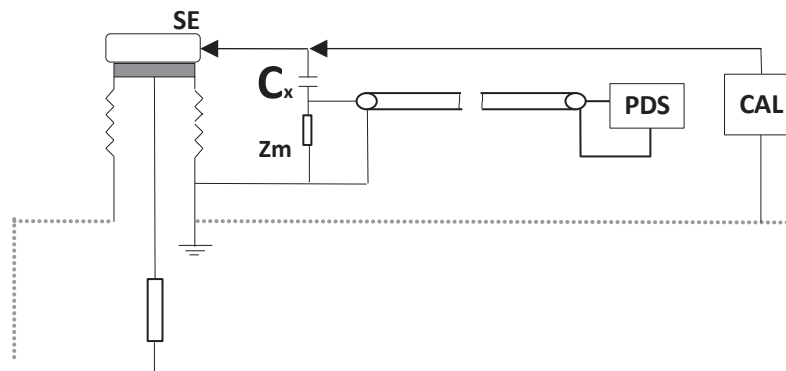


$C_1 = C_k$: capacitancia de acople, C_2 : toma de la toma capacitiva, SE: electrodo de protección, PDS: Sistema de DP, CAL: calibrador, Z_m : impedancia de medición

Figura 4. Circuito de calibración para medición de DP en transformadores de potencia, con toma capacitiva.

Estándar IEC

De acuerdo con IEC [5] [14], la medición de DP es hecha por la medición de la "carga aparente q". En este contexto la carga aparente es obtenida por la integral de la corriente de impulso de DP usando "filtro de ancho de banda" o "filtro de banda reducida". La medición de DP es conectada vía cable coaxial a la impedancia Z_m .



SE: electrodo de protección, PDS: Sistema de DP, CAL: calibrador, C_k : capacitancia de acople, Z_m : impedancia de medición

Figura 5. Circuito de calibración para medición de DP en transformadores, sin toma capacitiva.

La carga aparente q , medida en picocoulombs (pC), corresponde a la carga transferida durante el ΔU proceso de compensación de voltaje en una de las capacitancias conectadas en paralelo C_t (aislamiento del transformador) y la capacitancia del aislador C_1 o la capacitancia de acople C_k . (ver figuras 2 y 4). Esta tensión ΔU tampoco puede ser causado en el objeto de prueba (DP interna ya sea en el aislamiento del transformador o en el aislador) o en el circuito de prueba (DP externa). Si la DP es detectada durante la prueba, la fuente de DP deberá ser investigada a fondo. La magnitud de la medida de la carga aparente q , en pC será definida por el procedimiento de calibración del objeto de prueba.

Calibración

La calibración consiste en un generador de onda cuadrada [5] con un ajuste de amplitud U_o , conectada en serie con el capacitor pequeño C_o (normalmente podrá ser menor a un 10% del C_k). Para las mediciones de DP en transformadores, el calibrador es conectado a través del aislador, o a través del capacitor de acople conectado en paralelo con el aislador (ver figura 4). Se deberá calibrar cada aislador por separado. Asumiendo que $C_o \ll C_k$, el impulso inyectado desde el generador de onda cuadrado, corresponde a la carga q_o , cual es predefinida por valores de 100 hasta 1000 pC. IEC recomienda para el ajuste de la magnitud U_o que el tiempo de subida será ≤ 60 ns, la amplitud U_o entre 2 y 50 V polaridad seleccionable y un valor de repetición cada 100 Hz

$$q_o = U_o C_o$$

q_o : carga inyectada

U_o : voltaje ajustable del generador de onda

C_o : capacitancia del calibrador

El circuito de medición, consiste en la capacitancia de prueba C_t , capacitor de acople C_k , medición de impedancia Z_m , cable coaxial y el sistema de medición posteriormente serán calibrados.

Estándar IEEE

De rutina las mediciones de DP, los estándares IEEE [11] [6] requieren de la medición de "RIV". El RIV es determinado en μV (voltaje de interferencia). Un filtro "filtro de banda reducida" funciona integrando la corriente de impulso con el detector de picos en el centro de las frecuencias en medio de 0.85 MHz y 1.15 MHz. El "filtro de banda reducida" es utilizado para

suprimir el ruido externo. El sistema de medición es llamado *RIVmetro* o *medidor de ruido*. El *RIV* en μV depende en ambos casos, en la carga transferida y en el valor de repetición de los impulsos de DP (número de impulsos de DP por segundo). Esto porque no es posible convertir directamente la medida *RIV* en valores de μV dentro de los valores de carga aparente en pC. La carga transferida (medición de μV) es el resultado de una compensación del proceso de cambio de tensión ΔU en una de las capacitancias conectadas en paralelas C_t (aislamiento del transformador) y la capacitancia del aislador $C_1=C_k$ o del capacitor de acople C_k . (ver figura 4)

Calibración

El circuito de prueba de DP es calibrado en el mismo camino de medición de la carga aparente en pC, según figura 4. Asumiendo $C_o \ll C_k$ la aplicación de una tensión senoidal corresponde exactamente a los valores definidos por ajuste de la amplitud definidos en U_o en μV (100 μV , 1000 μV , etc). Durante la prueba de DP el sistema de medición está leyendo directamente en μV . Estos μV leídos son solamente validos para las especificaciones de calibración del aislador. De acuerdo a IEEE C57.12.90, las mediciones de DP también pueden darse en pC. Alguno de los problemas que pueden presentarse es la atenuación de la señal.

Procedimiento de Medición de descargas parciales

El procedimiento de medición de descargas parciales es básicamente definido por la Prueba de sobretensión inducida [6] [7]. Hay algunas diferencias entre IEC e IEEE, a continuación, se van a describir:

Estándar IEC

De acuerdo al estándar IEC para la medición de Descargas Parciales, esta se hará en conjunto con la Prueba de sobretensión Inducida en todos los transformadores de potencia [7]. La medición de Descargas Parciales puede ser realizada en la prueba de sobretensión inducida de larga duración (ACLD) como la prueba de sobretensión inducida de corta duración (ACSD). Las secuencias de prueba están dadas en el estándar de medición. La medición puede realizarse en todos los aisladores donde el sistema de tensión es mayor a 72.5 kV. Igualmente se mide en pC. También se pueden utilizar filtros para atenuar el ruido externo.

La primera medición de DP (valores de carga aparente en pC) será hecha a un nivel de tensión bajo (10% U_r). *Este valor servirá como referencia para medir el nivel de ruido del laboratorio de alta tensión*. De acuerdo a los estándares IEC, el nivel de ruido del laboratorio será mucho menor que el valor medio requerido de la carga aparente especificado por el transformador [7]. El nivel de ruido en un laboratorio de alta tensión debería ser lo más bajo posible. El seguimiento de la prueba será hecha en cada secuencia según los niveles de tensión indicadas en la figura 6 y 7 (partes A,B,D,E) con la excepción del nivel de alzada de la parte C. Todos los valores en pC de los aisladores deberán también ser documentados.

Para la parte C de la curva se tiene el siguiente criterio:

$$t = 120 \frac{f_r}{f_p}$$

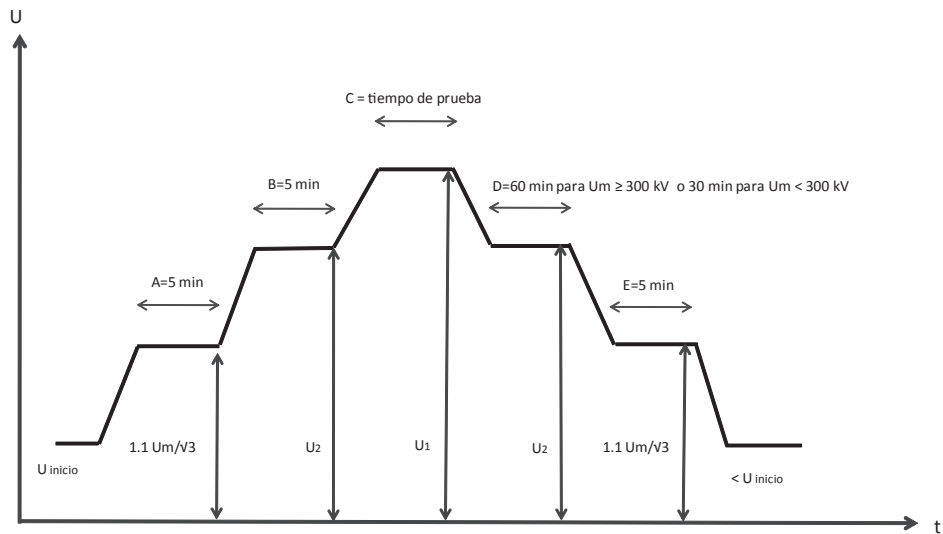
Donde

t : tiempo de la prueba en segundos

f_r : valor de frecuencia del transformador

f_p : valor de frecuencia de la prueba

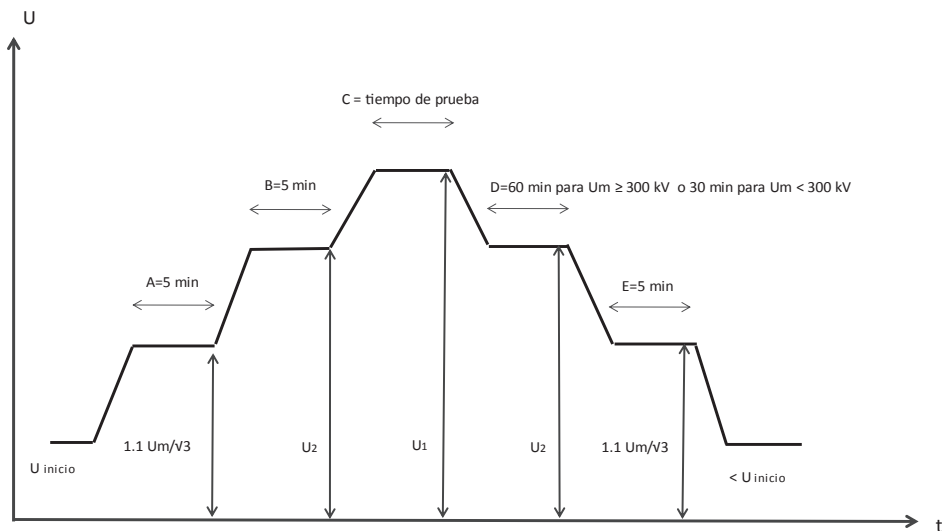
Será de 60 segundos máximo. La duración de la prueba *no será menor que 15 segundos independientemente el valor de la frecuencia de prueba*. De lo contrario se aplicará la corrección según la fórmula anterior para obtener el valor de la parte C de la curva.



C: tiempo según criterios de la norma

U_2 : $1.3 U_m$ (fase a fase) o $1.3 U_m / \sqrt{3}$ (fase a tierra)

Figura 6. Secuencia de tiempos para la medición de descargas parciales para la prueba corta (ACSD).



C: tiempo según criterios de la norma

D: 60 minutos para $U_m > 300$ kV o 30 minutos para $U_m < 300$ kV.

U_2 : $1.5 U_m / \sqrt{3}$ (fase a tierra)

U_p : $1.7 U_m / \sqrt{3}$ (fase a tierra)

Figura 7. Secuencia de tiempos para la medición de descargas parciales para la prueba larga (ACLD) [7].

Criterios de aceptación

La prueba de descargas parciales es considerada satisfactoria si la medición no presenta grandes variaciones en el transformador o en el aislador, e igualmente si no presenta variaciones a través del tiempo durante la medición. Los valores aceptables según la norma IEC son:

- 300 pC a 130% U_m
- 500 pC a 150% U_m
- El nivel continuo de medición no excederá 100 pC a 1.1 U_m

Donde:

U_m : valor r.m.s. fase a fase para lo cual el devanado del transformador está diseñado.

Estándar IEEE

De acuerdo al valor estándar de IEEE, la medición de descargas parciales será desarrollada en el “nivel de medición de una hora”, antes de elevar la tensión y durante una hora después de haber subido la tensión según la figura 8 [6]. La duración de A de la figura 8, será lo suficiente para empezar a medir DP en transformadores impregnado en aceite (mínimo 10 minutos). En aisladores las descargas parciales se medirán a tensiones ≥ 115 kV. Será medida en μV . Igualmente se deben usar filtros a la hora de realizar la medición.

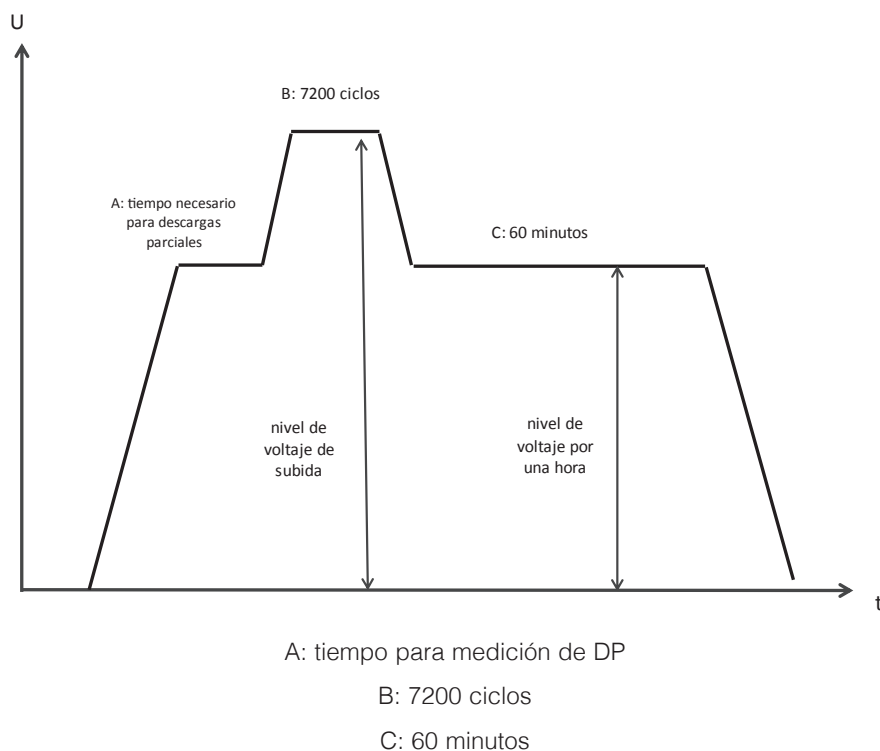


Figura 8. Secuencia de tiempos para la medición de descargas parciales.

La primera medición (valores RIV en μV) será hecha a baja tensión (cerca del 10% de U_r). Este valor servirá de referencia para medir el nivel de ruido del laboratorio. De acuerdo a los estándares este nivel de ruido deberá ser más bajo que la media en μV especificada por el transformador. [6] El seguimiento de la medición de DP será desarrollada a cada prueba según

se muestra en la figura 8 (partes A y C) con excepción de la tensión Alta o de subida. Todas las medidas en μV de los aisladores deben ser debidamente documentados también. Durante la hora de la prueba (parte C de figura 8), las mediciones en los aisladores deben ser medidas cada 5 minutos.

Criterios de aceptación

La Prueba de Descargas Parciales es considerada satisfactoria si la medición no presenta grandes variaciones en el valor en μV en el transformador o en el aislador, e igualmente si no presenta variaciones a través del tiempo durante la medición en la prueba larga. [6] Los valores aceptables según la Norma IEEE son:

- *La magnitud de la DP no excede 100 μV . El nivel de incremento de la DP durante la hora de la prueba no excede los 30 μV .*
- *Los niveles de DP durante la hora de la prueba no exhibirán una tendencia creciente y repentina, o un incremento sostenido en la medición durante los 20 minutos posteriores a la prueba.*

Discusión Final

Dadas las tendencias mundiales de evitar al máximo la afectación de los clientes y donde se requiere tener información a primera mano del estado dieléctrico [3] [1] [2] del transformador, es imprescindible, la utilización de técnicas más efectivas y menos invasivas de valoración del estado dieléctrico de un transformador de potencia. Una valoración de este tipo en línea sería grandemente aceptada y valorada en la industria eléctrica. Esto traería consigo un valor agregado de importancia, pues en tiempo real se podría tener un valor de la condición dieléctrica y a futuro, el tener insumos para la toma de decisiones.

Es bien sabido que una máquina eléctrica, está sometida a esfuerzos dieléctricos, que son inevitables, como por ejemplo las descargas atmosféricas y las sobretensiones ocasionadas en el interno de la red eléctrica. Esto hace sumamente necesario mantener una valoración continua y constante de los equipos. Una limitante de la prueba, es que los equipos desarrollados en su mayoría, tal y como se describió, en el artículo, fueron concebidos, para pruebas de laboratorio, [11] [12] [13] bajo condiciones controladas de ruido. No obstante, hoy día, se pueden adquirir equipos acústicos, en los cuales se puede detectar por medios acústicos la presencia de descargas parciales. No obstante, esta técnica presenta algunas limitaciones técnicas, que siempre dan pie a la utilización de las técnicas clásicas de evaluación.

Conclusiones

La prueba de descargas parciales es una prueba no invasiva y de gran importancia para el análisis de máquinas eléctricas. Dicha técnica requiere de un gran conocimiento del equipo a analizar tanto en aspectos constructivos, operativos y de mantenimiento a fin de facilitar su interpretación pues esta puede variar según la perspectiva que se analice. Dicha prueba requiere de un amplio conocimiento de materiales dieléctricos pues la afectación se da directamente sobre estos. En esencia se requiere mantener íntegros los aislamientos a través del tiempo pues estos deben ser capaces de tener soportabilidad ante cualquier sobretensión ya sea de origen externo como interno y de esta manera prolongar la vida útil de un transformador y aprovechar al máximo dicho activo que es tan valioso.

Por esta razón, las buenas prácticas en mantenimiento y operación, logrará que un transformador de potencia no sea más apto para generar descargas parciales destructivas y estas a su vez

inicien un punto de falla que pueda llegar a ser letal sobre todo para el cliente asociado a dicha máquina.

Recomendaciones

La técnica desarrollada en transformadores de potencia ha sido desarrollada ampliamente para equipos estacionarios de laboratorio, asociada a algunas pruebas especiales como sobretensión inducida. No obstante, gran parte de la investigación puede re-direccionarse en la investigación de descargas parciales cuantificables en línea y no por medios acústicos, como hasta la fecha ha sido.

A través de los años ha habido una cantidad importante de investigación que puede ser valorada en trabajos de grado y posgrado. De esta manera se puede explotar el conocimiento de las universidades para este fin y lograr no solo sistemas más eficientes y eficaces sino mas económicos.

Lista de Abreviaturas

IEC: International Electrotechnical Commission

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

DP: Descargas Parciales

pC: pico Coulomb

RIV: Tensión de Radio Interferencia

ACLD: Prueba de larga Duración AC

ASCD: Prueba de corta Duración AC

Referencias

- [1] Kuffel E., Zaengl W., "High Voltage Engineering. Fundamentals", Newnes, Great Britain, 2000
- [2] Naidu M., Kamaraju V., "High Voltage Engineering", McGraw-Hill, USA, 1996
- [3] Tereiev, B.R., "Física de los materiales dieléctricos", Editorial MIR, Moscú URSS, 1978.
- [4] "Application guide for partial discharge measurement during a.c. withstand voltage test on transformers according to 12.2, 12.3 and 12.4", IEC Standard 60076-3, 2000.
- [5] "Partial Discharge Measurement", IEC Standard 60270, 2000.
- [6] "Induced Voltage Test", IEEE Standard C57.12.90, 1999.
- [7] "Induce AC voltage test", IEC Standard 60076, 2000.
- [8] "Insulation Levels", IEEE Standard C57.12.90, 2000.
- [9] "Separate source AC withstand voltage test", IEC Standard 60076, 2000.
- [10] "Applied voltage Test", IEEE C57.12.90, 1999.
- [11] "Dielectric Test", IEEE Standard C57.12.90, 1999.
- [12] "High voltage test techniques-Part 1: General definitions and test requirements", IEC Standard 60076-1, 1989.
- [13] "High voltage test techniques-Part 2: Measuring systems", IEC Standard 60076-2, 1994.
- [14] "High voltage test techniques-Part 3: Definitions and requirements for on-sites test", IEC Standard 60076-3, 2000.
- [15] "Insulations level, dielectric test and external clearances in air" IEC Standard 60076-3, 2000.