

DIAGNÓSTICO INTEGRAL DEL DEVANADO DEL ESTATOR DE GENERADORES ELÉCTRICOS

Ing. Marcos Esparza Saucedo, Ing. Eugenio Ponce de León Viedas
Comisión Federal de Electricidad

1.0 RESUMEN

El objetivo de este trabajo es mostrar las pruebas de diagnóstico del devanado del estator de generadores eléctricos utilizadas actualmente en Comisión Federal de Electricidad, los criterios de aceptación aplicables y la experiencia que se tiene con estas pruebas respecto a su efectividad para indicar la condición de los aislamientos.

2.0 INTRODUCCION

En Comisión Federal de Electricidad existen más de 570 generadores eléctricos, con capacidades desde unos pocos MW hasta 675 MW, cuyos devanados de estator están fabricados con diferentes tipos de aislamientos, dependiendo de su antigüedad, como son a base de asfalto, resina poliéster ó resina epóxica; y que utilizan diferentes medios y tipos de enfriamiento como son aire en circuito abierto ó circuito cerrado, hidrógeno enfriando indirectamente ó directamente y agua.

Aun con tanta variedad en diseños de los generadores eléctricos, los mecanismos de degradación de los aislamientos del devanado del estator son los mismos; La temperatura a la que operan, los esfuerzos mecánicos de los arranques, paros y corrientes, los esfuerzos eléctricos, principalmente en tensiones a partir de 13.8 kV y el ataque de agentes químicos o ambientales. El impacto de cada mecanismo de degradación difiere dependiendo del diseño del generador eléctrico en cuanto al tipo de sistema de aislamiento utilizado y tipo de enfriamiento, así como de la magnitud y repetición ó duración de los mecanismos de degradación.

Artículo recomendado y aprobado por el Comité Nacional de CIGRÉ – México, para presentarse en el Segundo Congreso Bienal, del 13 al 15 de junio del 2001, en Irapuato, Gto.

Desde hace mucho tiempo se ha tratado de diagnosticar la condición de los aislamientos del devanado del estator buscando pruebas de diagnóstico que sean lo más efectivas posible para indicar el grado de deterioro, su localización específica y el mecanismo que produce la degradación. Tradicionalmente, las pruebas de diagnóstico se han hecho fuera de línea, es decir, con la máquina desenergizada, aprovechando las salidas de las unidades a mantenimiento, con un enfoque de mantenimiento preventivo, es decir, periódico.

Desde unos años atrás, se ha buscado el enfoque predictivo, el cual se basa principalmente en diagnóstico en línea, es decir, con la máquina en operación normal, lo cual tiene la ventaja de analizar la máquina bajo todas las condiciones de operación. Hace unos 50 años se empezaron a desarrollar instrumentos para medir las descargas parciales en línea, las cuales son un buen indicador de la condición de los aislamientos. Esta técnica se inició en generadores hidroeléctricos ya que la tecnología de esos tiempos, con electrónica analógica, no permitía discriminar adecuadamente las descargas parciales del ruido eléctrico en los turbogeneradores. Con el desarrollo de la tecnología de estos instrumentos, en especial la tecnología digital, y el desarrollo de programas de computadoras, actualmente existen varias compañías que fabrican equipos de monitoreo para todo tipo y capacidad de máquinas eléctricas rotatorias.

La limitante en el uso extensivo de estas tecnologías de monitoreo en línea es el costo de los equipos. Sin embargo, en CFE ya se han instrumentado varios generadores con este tipo de instrumentos, contando actualmente con varios hidrogeneradores y un turbogenerador de gran capacidad.

3.0 PRUEBAS DE DIAGNOSTICO

3.1.- PRUEBAS FUERA DE LINEA

3.1.1.- INSPECCION VISUAL

La inspección visual es una de las herramientas de diagnóstico más importantes y efectivas si se realiza

adecuadamente. La condición en la que se puede realizar la inspección visual más extensiva y detallada es con el rotor extraído del generador. Los puntos principales a inspeccionar son los siguientes;

Verificar si hay zonas con polvo blanco en cuñas del estator y sobre amarres, separadores y barras en el cabezal, indicativo de actividad de descargas parciales.

- Verificar si la separación entre barras en el cabezal es uniforme. Que no haya signos de aflojamiento o deformación de las barras en el cabezal ni separadores ni amarres flojos.
- Verificar si hay caminos de falla (tracking) entre barras en el cabezal. Se pone atención especial en separadores de barras contiguas que operan con alta diferencia de potencial entre ellas.
- Verificar que no haya grietas ni erosión en el aislamiento. Se pone especial atención en la zona de salida de las barras de las ranuras y en los amarres y separadores.
- Verificar si hay polvo amarillento sobre las cuñas en las ranuras. Esto es indicativo de desgaste del material de las cuñas o aislamiento por aflojamiento de cuñas.
- Verificar si hay signos de sobrecalentamiento en el aislamiento del devanado o en el núcleo magnético y los blindajes magnéticos.
- Verificar estado general de limpieza. Presencia de polvo o aceite sobre el aislamiento.
- Verificar que no estén obstruidos con suciedad o materiales extraños los ductos de enfriamiento del núcleo del estator o de los devanados cuando son enfriados directamente por hidrógeno.

3.1.2.- PRUEBAS ELECTRICAS .

Las pruebas fuera de línea se realizan preferentemente en aire, con el rotor extraído del generador. La temperatura del devanado debe estar al menos 5 °C sobre el ambiente para evitar condensación de humedad.

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

La medición de la resistencia de aislamiento no se considera como una prueba de diagnóstico de la degradación del aislamiento, aunque en ciertos casos y condiciones si puede serlo. Más bien, el valor absoluto de la resistencia de aislamiento y el índice de polarización se usan para determinar la condición del aislamiento en cuanto a suciedad y humedad del mismo y decidir si el devanado es apto para operar ó realizarle pruebas con tensiones

elevadas. También, es la prueba de rigor para determinar si existe falla a tierra o entre fases en el devanado después de ocurrir un disparo del generador.

La práctica usual es que cuando se vayan a realizar pruebas dieléctricas con tensiones equivalentes a la nominal del devanado ó mayores, se mida previamente su resistencia de aislamiento, incluyendo el índice de polarización, para asegurar que el devanado se encuentra en buenas condiciones de limpieza y seco para prevenir un posible daño al aislamiento por el esfuerzo de la tensión. Así mismo, después de realizar las pruebas dieléctricas, se miden de nuevo la resistencia de aislamiento y el índice de polarización para comprobar que no hubo ningún efecto adverso al aislamiento por las pruebas. La tensión de prueba para la medición de resistencia de aislamiento debe ser siempre la misma; 1000 VCD a 5000 VCD, dependiendo de la tensión nominal de la maquina.

Aun cuando casi todos los fabricantes recomiendan los valores de resistencia de aislamiento mínima e índice de polarización establecidos en el estándar IEEE-43, los cuales se consideran muy bajos, en CFE se están recomendando los siguientes:

Sistema de Aislamiento	Resistencia de Polariz.	Índice de
Asfalto-mica	kV + 1 MΩ	≥ 2.5
Poliéster ó Epoxi- mica	100 MΩ	≥ 4

La experiencia muestra que los valores anteriores de resistencia de aislamiento mínima pueden ser al menos 10 veces los indicados sin problemas para lograrlo.

3.1.2.1.- PRUEBA DE TANGENTE DELTA Y “TIP-UP”

La prueba de tangente delta de un aislamiento, también denominada factor de disipación y, también, equivalente al factor de potencia, es una medida de las pérdidas dieléctricas del aislamiento. Su magnitud depende del tipo de aislamiento y de las condiciones del mismo y es independiente de su volumen. La desventaja de esta prueba es que sólo determina la condición promedio del aislamiento, es decir, no detecta el punto de peor condición. Su valor puede verse afectado por la humedad y suciedad en la superficie del aislamiento que permite una circulación de corriente a tierra a través de la superficie del mismo aumentando las pérdidas.

El valor de tangente delta aumenta con las descargas parciales en el aislamiento. Por esta razón, se recomienda efectuar la prueba a dos valores de tensión, uno inicial, suficientemente bajo para prevenir que haya descargas parciales y el otro a la tensión nominal de fase a tierra, que permita

medir las pérdidas ocasionadas por las descargas parciales. Esta forma de medición se conoce como "tip-up" y es una medición indirecta de las descargas parciales.

Desafortunadamente, en devanados con recubrimientos graduadores del campo eléctrico a base de carburo de silicio, a tensión nominal la contribución principal en las pérdidas proviene de la conducción a tierra a través de este recubrimiento, siendo imposible discriminar cuanto de las pérdidas se deben a las descargas parciales y cuanto a la conducción de los recubrimientos graduadores. Por esta razón, con esta prueba no es posible determinar incrementos pequeños de descargas parciales con el tiempo.

Aun cuando muchos fabricantes establecen como aceptables valores de tangente delta y "tip-up" muy elevados, CFE recomienda los siguientes:

Tipo de Aislamiento	Tangente δ	"Tip-up"
	$0.2 E_n/\sqrt{3}$	$E_n/\sqrt{3} - 0.2 E_n/\sqrt{3}$
Poliéster ó Epoxi-mica	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$

Es conveniente hacer notar que en devanados del estator enfriados con agua, si la prueba se realiza con agua dentro de los devanados los valores de $\tan \delta$ pueden ser muy altos, dependiendo de la conductividad del agua.

Algunos fabricantes recomiendan obtener el "Tip-up" a una tensión de fase a tierra igual a la tensión nominal entre fases de la máquina. CFE considera que no es necesario aplicar una tensión de prueba tan elevada. Es suficiente con aplicar la tensión nominal de fase a tierra. En esta prueba, además de los valores absolutos de tangente delta y "tip-up", se debe analizar la tendencia de estos valores.

3.1.2.2.- CAPACITANCIA

El devanado del estator puede considerarse como un capacitor cuyos electrodos están formados por los conductores del devanado y el núcleo del estator y su dieléctrico por el sistema de aislamiento.

La capacitancia del devanado se reduce con la formación de huecos en el aislamiento y aumenta si este se satura con agua. La medición periódica de la capacitancia puede ser útil para determinar delaminación por sobrecalentamiento o contaminación con agua en el devanado. Para poder detectar cambios significativos en la capacitancia se necesita medirla con equipos de prueba con resolución de tres decimales. Generalmente los equipos de medición de tangente delta o factor de potencia incluyen la medición de la capacitancia con una buena resolución y se pueden realizar ambas mediciones al mismo tiempo. Sin embargo, la experiencia ha mostrado que esta

prueba no es muy sensible para detectar degradación del devanado.

3.1.2.3.- DESCARGAS PARCIALES

Por más cuidadoso que sea el proceso de fabricación del aislamiento de los devanados del estator, es imposible que la resina de impregnación de las cintas aislantes penetre y llene perfectamente todo el volumen del aislamiento por lo que siempre quedará una cantidad de huecos pequeños dentro del mismo. Cuando el aislamiento eléctrico del devanado es sometido a la tensión de operación del generador, en aquellos huecos donde se alcance a través de ellos un nivel de tensión de aproximadamente 3 kV/mm, se romperá dieléctricamente el aire contenido en ellos y se producirán descargas parciales. Las descargas parciales originadas en el semiciclo positivo de la tensión serán de polaridad negativa y las que se originen en el semiciclo negativo de la tensión serán de polaridad positiva. La magnitud de las descargas parciales depende del tamaño de los huecos, mientras más grandes sean los huecos, mayor será la magnitud de las descargas parciales. La unidad de magnitud de las descargas parciales en pruebas fuera de línea realizadas en CFE es el picocoulomb, pC. Aun los devanados nuevos nacen con una cantidad de descargas parciales internas del orden de algunos miles de pC, generalmente de 2 a 3, dependiendo del equipo de medición y su calibración, en pruebas fuera de línea.

En condiciones no severas de operación de un generador, es decir, sin aflojamiento de los devanados, sin arranques y paros muy frecuentes, sin cambios bruscos y fuertes de carga y sin temperaturas excesivas, se espera que el aislamiento se vaya degradando gradualmente a lo largo de muchos años, apareciendo más huecos y los existentes haciéndose cada vez mayores. Sin embargo, ante la ocurrencia frecuente de los factores de degradación antes mencionados, la aparición de huecos y daños en diferentes puntos del sistema de aislamiento se acelera, con lo cual aumenta la cantidad y magnitud de las descargas parciales. Por esta razón, se considera que las descargas parciales son un síntoma y no la causa de la degradación del aislamiento. Sin embargo, una vez que las descargas parciales se presentan en gran cantidad y magnitud, su acción contribuye a acelerar la degradación del aislamiento.

En las pruebas fuera de línea se miden la magnitud y el patrón de distribución de las descargas parciales respecto a una onda senoidal de referencia con lo cual se trata de determinar el grado de la degradación y su probable localización en el sistema de aislamiento. La correcta interpretación de estos patrones de descargas parciales requiere mucha experiencia en este tipo de pruebas. La ventaja de las pruebas fuera de línea es que, durante la medición, se puede ayudar a definir con más

precisión la localización de las descargas parciales más intensas con sensores direccionales de ultrasonido y, en la zona de ranuras, con una sonda conocida como TVA. La medición en forma periódica, permite determinar la razón de degradación y, con cierta precisión, el tiempo de vida del aislamiento.

La medición fuera de línea de las descargas parciales tiene como desventaja que no indica el comportamiento de las descargas parciales en las condiciones de operación del generador, especialmente en generadores eléctricos enfriados con hidrógeno, por ejemplo, en los cuales las descargas parciales se reducen notoriamente por efecto del hidrógeno a presión, además de que se reducen también por que el devanado solo tiene tensión suficiente para generar las descargas parciales en un 20% del mismo aproximadamente, dependiendo de la tensión nominal. Adicionalmente, ya que solo se puede probar el devanado de una fase a la vez, aplicándole una tensión al devanado completo contra tierra, no permite detectar problemas entre fases en el cabezal, tal como la formación de caminos de falla (tracking) entre fases. Tampoco detecta problemas incipientes en el recubrimiento semiconductor en la ranura por aflojamiento de las barras.

La forma de evaluación del aislamiento mediante esta técnica es mediante los valores absolutos de descargas parciales y su incremento con el tiempo. Es decir, se tiene que evaluar la tendencia. Un valor inicial de descargas parciales mayor al esperado no necesariamente significa que el aislamiento vaya a fallar pronto, se debe evaluar la magnitud del incremento con el tiempo.

El criterio general que se ha adoptado en CFE para el seguimiento de las descargas parciales fuera de línea es como sigue (dependiendo del equipo de medición utilizado y su calibración)

Periodicidad de la medición	Magnitud de las D.P.'s
Cada 4 años	$\leq 10,000$ pC
Cada 2 años	$> 10,000$ pC - $\leq 30,000$ pC
Cada año	$> 30,000$ pC - $< 100,000$ pC

Si las descargas parciales han alcanzado valores de 30,000 pC o más, lo recomendable es instalar equipo de monitoreo en línea para realizar una mejor evaluación de la causa de las mismas y un seguimiento más oportuno de la tendencia. Es importante considerar que cuando se realicen mediciones periódicas de descargas parciales, es necesario que siempre se midan con los mismos equipos y calibración para no tener variaciones de valores por utilizar diferentes equipos de medición y calibración de los mismos.

La experiencia actual en la medición de descargas parciales fuera de línea muestra que, en muchos casos, no es fácil determinar el origen de las descargas parciales. La contaminación ó suciedad de los devanados producen descargas parciales que pueden confundirse con otro mecanismo de falla. Esto dificulta tomar la decisión respecto al tipo de trabajo correctivo necesario. Aun con todo, esta prueba a demostrado ser la más sensible a degradación del aislamiento ó contaminación en el mismo.

3.1.2.4.- PRUEBA DE ELCID

Aun cuando este artículo se refiere al diagnóstico del devanado del estator, dado que el núcleo del estator está muy ligado al devanado, se incluye el diagnóstico del núcleo magnético del estator mediante la prueba de ELCID. Esta prueba determina cortos circuitos entre laminaciones del núcleo del estator mediante un toroide que produce un flujo magnético del 4 % aproximadamente del nominal. La prueba de ELCID ha demostrado buena sensibilidad para detectar laminaciones en corto en el núcleo del estator de turbogeneradores. En los generadores hidroeléctricos no responde tan adecuadamente por la construcción en secciones del núcleo magnético

El criterio de aceptación para considerar un núcleo magnético en buenas condiciones es el siguiente:

Corriente máxima: ≤ 100 mA

3.1.2.5.- PRUEBA DE ALTO POTENCIAL

La prueba de alto potencial no es aceptada por muchos como una prueba de rutina para evaluar la condición del aislamiento del devanado del estator por considerarse una prueba destructiva. Sin embargo, realizada a niveles de tensión menos severos que en fabrica ó en puesta en servicio, si el devanado pasa la prueba, se tiene un buen nivel de confianza en que este no va a fallar en operación cuando ocurra un transitorio de tensión.

La prueba de alto potencial se puede realizar con corriente directa o con corriente alterna. Se recomienda esta última por que somete al aislamiento a un esfuerzo más real respecto a la operación del generador y es más sensible que la corriente directa a defectos serios del aislamiento. El inconveniente con la prueba con C.A. es que se requieren equipos de prueba de alta capacidad, especialmente en máquinas grandes. Por esta razón, generalmente esta prueba se realiza con C.D.

Los valores de tensión de corriente alterna recomendados para esta prueba son los siguientes:

En fabrica $(2E_n + 1)$ kV 1 minuto

Puesta en Servicio 0.85 (2E_n + 1) kV 1 minuto

Si se quiere probar con corriente directa, se deben multiplicar los valores anteriores por 1.7

Las pruebas de alto potencial al aislamiento de los devanados no es una práctica recomendada en CFE como mantenimiento ya que se sobreesfuerza el aislamiento y se le resta vida. No se recomienda aplicar más de la tensión nominal de fase a tierra a un devanado.

3.2.- PRUEBAS EN LINEA

3.2.1.- DESCARGAS PARCIALES

La mejor prueba de diagnóstico en línea del devanado del estator de los generadores eléctricos que existe actualmente es la medición de descargas parciales, la cual se ha constituido en la herramienta más poderosa de diagnóstico del aislamiento del devanado del estator ya que se realiza con el generador eléctrico en operación, bajo los esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos propios de esa condición.

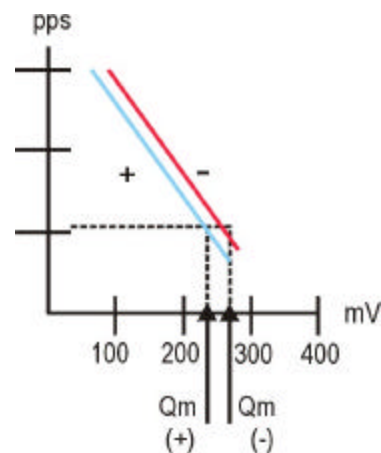
Las ventajas de esta técnica son: la medición se realiza en minutos en el momento que uno decida y, dependiendo del sistema utilizado, puede interpretarse por una persona que haya recibido un sencillo curso. Además, no requiere calibración de equipos ya que los sensores son fijos.

Por la confiabilidad de los equipos y experiencia con ellos, en CFE se está utilizando el sistema de medición desarrollado por Ontario hydro. En este sistema, en generadores hidroeléctricos, las descargas parciales que se originan dentro de los devanados y se transmiten al exterior de los mismos, se captan a través de capacitores de 80 nF conectados directamente a la salida de los devanados. El equipo analizador proporciona la siguiente información relacionada con las descargas parciales; Magnitud de las descargas parciales positivas y negativas en milivolts (mV), denominada como Q_m, definida como el valor en mV a una tasa de repetición de las descargas parciales de 10 pulsos por segundo. La cantidad de descargas parciales en pulsos por segundo convertida a un número llamado NQN, que es equivalente al área bajo la curva de cada polaridad en una gráfica de dos dimensiones en la cual en el eje "Y" se encuentra la cantidad de descargas parciales en pulsos por segundo y en el eje "X" la magnitud de las mismas en mV.

A continuación se muestra a manera ilustrativa y un tanto idealizada la apariencia de una gráfica de dos dimensiones típica de medición en línea de descargas parciales de un generador hidroeléctrico, en donde la magnitud de las descargas parciales positivas Q_m (+) y negativas Q_m (-), son aproximadamente de 240 mV y 270 mV,

respectivamente. Para cada fase del devanado se obtiene una gráfica similar. En la práctica, las curvas obtenidas de descargas parciales positivas y negativas no son perfectamente rectas.

La cantidad de descargas parciales negativas, NQN (-), en este ejemplo, sería un poco mayor que la de las descargas parciales positivas, NQN (+). Ya que, como puede apreciarse, el área bajo la curva de la polaridad negativa sería mayor que la de la polaridad positiva. También, mediante un software, se puede obtener el patrón de agrupamiento de las descargas parciales respecto a la onda senoidal de tensión de referencia, en una gráfica de tres dimensiones.

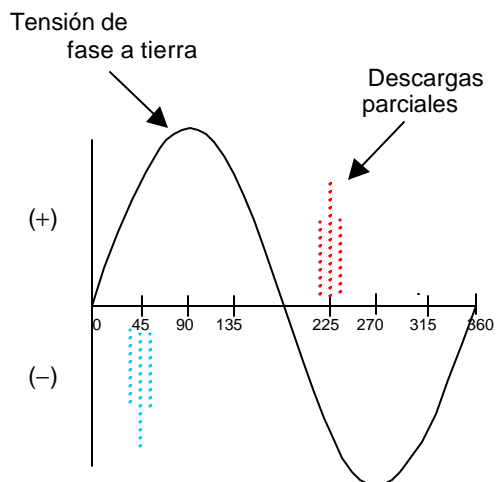


En CFE sólo se tiene hasta la fecha un turbogenerador, con capacidad de 350 MW, instrumentado con sensores para medición en línea de descargas parciales. En este caso, los sensores son tipo antena, los cuales captan las descargas parciales a través de los pulsos electromagnéticos que producen y se instalan directamente en las ranuras, dos por fase, entre las barras del devanado con mayor tensión y las cuñas. Por el tipo de sensor y, principalmente por el efecto del hidrógeno a presión para reducir las descargas parciales, en este tipo de sistema los valores obtenidos en cantidad y magnitud de descargas parciales son mucho menores que en el caso de los generadores hidroeléctricos que son enfriados por aire a presión atmosférica.

En un generador eléctrico la mayor parte del aislamiento del devanado del estator está sujeto a una tensión de fase a tierra, desde los conductores de cada barra del devanado a la superficie de las mismas recubiertas por una cinta o pintura semiconductor que se pone a referencia de tierra al estar en contacto con el núcleo del estator en las ranuras del mismo. Por lo tanto, las descargas parciales originadas en la sección del devanado con recubrimiento semiconductor y graduador dependen de la tensión de fase a tierra de la máquina.

Los sistemas de medición de descargas parciales en línea incluyen una señal de tensión de la máquina de fase a tierra como referencia, tomada de uno de los secundarios de los transformadores de potencial, con la cual, mediante software, se reproducen las ondas de tensión de fase a tierra de las otras dos fases para mostrar los patrones de agrupamiento de las descargas parciales en cada fase del devanado respecto a su tensión correspondiente de fase a tierra.

Las descargas parciales que se originan por la tensión de fase a tierra durante el semiciclo positivo de la tensión, se agrupan alrededor de los 45° eléctricos y son de polaridad negativa. Mientras que, las descargas parciales originadas en el semiciclo negativo, se agrupan alrededor de los 225° eléctricos y son de polaridad positiva, como se ilustra en la siguiente figura en la que la onda senoidal corresponde a la tensión de fase a tierra de una de las fases del devanado.



En un aislamiento en el cual solo existen huecos dentro del volumen del aislamiento principal, condición que se considera normal y que se espera que progrese gradualmente a lo largo de muchos años de operación, la magnitud y cantidad de las descargas parciales de ambas polaridades son muy similares entre sí, con pequeñas diferencias, como se observa en la gráfica de dos dimensiones anterior, en la cual la magnitud de las descargas parciales negativas (270 mV) es mayor en un 12.5% que la de las descargas parciales positivas (240 mV). Si la magnitud de las descargas parciales de una de las polaridades es mayor en un 50% aproximadamente que la de la otra polaridad, se dice que hay una predominancia de polaridad y esto es indicativo de la existencia de otros mecanismos de degradación en el aislamiento.

Los diferentes mecanismos de degradación del aislamiento se pueden identificar por las características en predominancia de polaridad así como del ángulo en que se agrupan las descargas parciales respecto a la onda de tensión de

referencia. También, se ha observado que algunos mecanismos de degradación del aislamiento muestran cambios en la magnitud de las descargas parciales por variaciones en temperatura y carga del devanado. A continuación se explican los mecanismos de degradación más comunes y la forma en que se pueden identificar mediante la predominancia de una polaridad.

No predominancia de polaridades. Si se encuentra que la magnitud y cantidad de las descargas parciales de ambas polaridades son similares, generalmente se debe a la existencia de huecos dentro del volumen del aislamiento principal. Aunque también es posible que esta característica ocurra cuando existan dos mecanismos de falla diferentes que produzcan descargas parciales de polaridades opuestas que resulten en magnitudes y cantidades similares.

Predominancia de polaridad negativa. Cuando las descargas parciales de polaridad negativa predominan, se ha encontrado que se deben a que el aislamiento principal se separa de los conductores del devanado. Esta situación se origina por arranques y paros excesivos en los que, por tener el cobre y el aislamiento principal coeficientes de dilatación por temperatura diferente, con la repetición de este efecto se fatiga la unión en la interfase de conductores y aislamiento hasta romperse formando huecos.

Predominancia de polaridad positiva. Cuando la polaridad que predomina en las descargas parciales es la positiva, se ha encontrado que son debidas a descargas parciales que ocurren de la superficie del aislamiento a tierra. Por ejemplo, al dañarse el recubrimiento semiconductor de las barras en la zona de ranuras y perderse la referencia de tierra, en donde haya separaciones entre el aislamiento y el núcleo del estator ocurrirán descargas parciales cuya característica es que son de polaridad positiva. También ocurrirán descargas parciales positivas en caso de daño en la interfase entre el recubrimiento semiconductor y el graduador a la salida de las barras de las ranuras.

Cuando se presentan problemas de contaminación ó tracking entre barras contiguas del devanado en el cabezal que son de fases diferentes con un alto potencial entre ellas, las descargas parciales en estos puntos son originadas por una tensión entre fases. En este caso, las descargas parciales se agruparán en un ángulo de $\pm 30^\circ$ eléctricos respecto a la tensión de referencia de fase a tierra. Es decir, a 15° ó 75° para las descargas de polaridad negativa y 195° ó 255° para las positivas.

El efecto de las variaciones de carga ó temperatura del devanado sobre las descargas parciales de algunos mecanismos de degradación puede ser ha subir ó bajar la magnitud de aquellas. Si al subir la carga ó la temperatura del devanado las descargas parciales se incrementan, se dice que hay un efecto positivo por estos factores. Si el resultado es

contrario, es decir, que se reducen las descargas parciales con el aumento de carga ó temperatura en el devanado, se dice que hay un efecto negativo. Para determinar si hay un efecto en las descargas parciales por temperatura, se debe lograr una variación en temperatura en el devanado del estator de al menos 20°C y en el caso de la carga la variación debe ser al menos de 40%.

A continuación se indican los mecanismos de falla más comunes del aislamiento y las características de las descargas parciales que producen.

Mecanismo De falla	Polaridad que predomina	Efecto de carga	Efecto de Temp.	Angulo de fase
Deterioro Térmico	Ninguna	Ninguno	Negativo	45° y 225°
Ciclos de carga	Negativa	Negativo	Negativo	45°
Devanado Flojo	Positiva	Positivo	Negativo	225°
Descargas a la ranura	Positiva	Ninguno	Negativo	225°
Mala Impregnación	Ninguna	Ninguno	Negativo	45° y 225°
Contaminación	Ninguna	Ninguno	No predecible	15°, 75°, 195° y 255°
Espacio inadecuado entre barras	Ninguna	Ninguno	No predecible	15°, 75°, 195° y 255°
Interfase semicon y graduadora	Positiva	Ninguno	Positivo	225°

La tabla anterior nos ayuda a determinar que pruebas hacer, incluyendo variar carga y temperatura, para determinar los mecanismos de falla que estén presentes. El criterio de evaluación incluye, además de la cantidad y magnitud de las descargas parciales, la tendencia. Inicialmente, se deben tomar lecturas cada seis meses. Si el valor inicial se considera muy elevado o si el segundo valor semestral es mayor que el anterior, se deben tomar lecturas con mayor frecuencia, por ejemplo cada tres meses. De acuerdo con el fabricante del equipo de medición en línea de descargas parciales, si el valor de estas se duplica cada seis meses, el devanado esta en un proceso de deterioro muy rápido y deben tomarse provisiones para un cambio de devanado o un mantenimiento correctivo. Otra forma de evaluación es comparando contra generadores similares.

Para que la tendencia de las descargas parciales sea adecuada, se debe tratar de que las condiciones operativas de la máquina sean lo más parecidas posible entre mediciones sucesivas. Las variaciones permisibles recomendadas para este efecto son como se indica en la siguiente tabla:

Parámetro	Tolerancia
Tensión del estator	± 200 V
Carga	± 10%
Potencia activa MW	± 10%
Potencia reactiva MVAR	± 10%
Temperatura de devanado	± 5°C
Presión de gas	± 30 kPa
Modo de operación: Generador/condensador	Sin cambio

El fabricante de los equipos de monitoreo en línea de descargas parciales cuenta con una base de datos de miles de lecturas, agrupadas por tipo de sensor de descargas parciales y medio de enfriamiento y, dentro de cada grupo por rangos de tensiones nominales de generadores eléctricos. A continuación se muestra una tabla con los valores de magnitud en mV de descargas parciales en generadores eléctricos enfriados por aire, equipados con sensores capacitivos de 80 nF conectados en arreglo conocido como diferencial, que corresponde a los arreglos de la mayoría de los generadores hidroeléctricos instrumentados con sensores de medición de descargas parciales en línea en CFE. Estos valores son parte de la estadística más reciente del fabricante de los equipos de medición utilizados por CFE.

Tensión nominal	13 – 15 kV	16 – 18 kV
Promedio	168	457
Máximo	3396	3548
25%	9	145
50%	79	269
75%	180	498
90%	362	1024

Los valores en el renglón de 25% significan que una cuarta parte de los generadores tienen descargas parciales por debajo de 9 mV y 145 mV, en esos dos rangos de voltaje y así sucesivamente, hasta el renglón de 90%. Esto significa que la gran mayoría de los generadores en esta categoría, 90%, tienen valores por debajo de 362 mV y 1024 mV en los dos rangos de tensiones nominales indicados.

4. CRITERIO DE DIAGNOSTICO REALIZANDO PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS Y DESTRUCTIVAS

Algunos fabricantes de generadores eléctricos han desarrollado la siguiente metodología para evaluar el grado de deterioro de los sistemas de aislamiento de los estatores a maquina parada (off-line), mediante una serie de pruebas no destructivas durante la vida operativa del generador y una serie de pruebas destructivas a una muestra de barras (semibobinas)

retiradas de generadores mayores de 20 años o en base a diagnóstico actual, con los siguientes criterios que implican que el sistema de aislamiento está cerca del final de su vida útil.

- Descargas parciales $> 100\ 000\ \text{pC}$ a $E_n/\sqrt{3}$ volts

$$\Delta \tan \delta \quad > 6.5\ \% \quad (\tan \delta \text{ a } E_n - \tan \delta \text{ a } E_0)$$

- Cambio de capacitancia

$$3.0\ \% \quad \frac{\text{cap } 0.6\ E_n - \text{cap } 0.2\ E_n}{\text{cap } 0.2\ E_n} \times 100 <$$

- Tensión de ruptura del aislamiento (V_r) $< 40\ \% V_r$

$100\ \% V_r$ = tensión de ruptura en fábrica (en barras de muestra)

También, la decisión de rebobinar un estator puede ser basada en los siguientes criterios; horas acumuladas de servicio, temperatura de operación, número de arranques/paros, así como, la importancia del sitio dentro del S.E.N.

5.0 CONCLUSIONES

Las pruebas de diagnóstico típicas para determinar la condición del aislamiento del devanado del estator de los generadores eléctricos son: $\tan \delta$, capacitancia y descargas parciales. La prueba de descargas parciales fuera de línea ha demostrado tener una mayor sensibilidad a la degradación del aislamiento y a la contaminación del mismo que las de $\tan \delta$ y capacitancia. Sin embargo, con los resultados obtenidos a la fecha con estas tres pruebas no se han podido correlacionar de una manera concluyente. Las pruebas mencionadas en este trabajo seguirán aplicándose en CFE con el fin de ganar más experiencia en su interpretación, sobre todo la de descargas parciales en la que se considera que falta más experiencia en su interpretación, sobre todo cuando se presentan mecanismos de degradación múltiples ó contaminación.

6.0 REFERENCIAS

- Reportes de pruebas del LAPEM
- Curso de Descargas Parciales de la compañía Iris Power Engineering
- G. C. Stone, V. Warren and M. Fenger, "Influence of Operating and Atmospheric Parameters on Partial Discharge Results From Stator Windings", Preliminary paper 7D, 2001 Doble Client Conference.
- Recomendaciones de fabricantes de generadores eléctricos.