

AVANCES EN LA INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE DESCARGA PARCIAL EN LÍNEA EN LOS DEVANADOS DEL ESTATOR

1. Introducción

Las descargas parciales pueden ser tanto una causa como un síntoma de muchos tipos de mecanismos de deterioro del sistema de aislamiento del devanado del estator en motores y generadores de 3300 V nominales y superiores. Por lo tanto, no sorprende que la medición en línea de descargas parciales se haya utilizado para evaluar la necesidad de mantenimiento en los devanados del estator desde 1951. Más concretamente, la medición en línea de DP ha podido determinar si el aislamiento eléctrico se está deteriorando debido a bobinas sueltas en las ranuras resultando en abrasión del aislamiento; deterioro térmico o ciclos de carga que conducen a la delaminación del aislamiento; y tracking eléctrico causado por contaminación parcialmente conductiva de los cabezales de devanados. Las pruebas de DP en línea también pueden determinar si los problemas de fabricación o instalación, como una impregnación deficiente con epoxi o bobinas demasiado juntas en el devanado final, son lo suficientemente graves como para acortar la vida útil.

Hay muchos métodos disponibles para medir la actividad de DP en máquinas operativas. Todas las técnicas eléctricas se basan en monitorear el pulso de corriente o voltaje que se crea cada vez que ocurre una descarga parcial. Los primeros métodos midieron las corrientes de pulso de DP por medio de un transformador de corriente de alta frecuencia en el punto neutro. Poco después, se utilizaron condensadores de alto voltaje conectados a los terminales de fase para detectar los pulsos de DP. Los tamaños de los condensadores oscilaron entre 80 pF y más de 1000 pF. Más recientemente, las antenas de RF también se utilizan para detectar DP en máquinas en funcionamiento. En IEEE 1434 se presenta una buena descripción general de todos los diferentes medios para detectar DP en máquinas. Este documento también proporciona el marco para permitir que se realicen mediciones confiables de DP en línea, al igual que IEC 60034-27-2.

Un desafío particular con las mediciones de DP realizadas en el funcionamiento normal de un motor o generador es que a menudo hay interferencia eléctrica (ruido). Las fuentes de ruido incluyen el efecto corona del sistema de alimentación, chispazos del conmutador/anillo deslizante, chispazos de conexiones eléctricas deficientes, operación de herramientas eléctricas y descarga electrostática del precipitador. Este ruido oscurece los pulsos de DP y puede hacer que el técnico desprevenido suponga que el devanado del estator tiene altos niveles de DP, cuando en realidad los altos niveles son causados por el ruido. La consecuencia es que un buen devanado se evalúa incorrectamente como defectuoso, es decir, se da una falsa alarma de que un devanado es malo, cuando no lo es. Tales falsas alarmas reducen la credibilidad de las pruebas de DP en línea, e incluso hoy en día, muchos sienten que las pruebas de DP en línea son más arte que ciencia y es mejor dejarlas en manos de especialistas.

Hace 25 años, la industria canadiense de servicios públicos patrocinó una investigación para desarrollar una prueba objetiva de DP en línea para máquinas que el personal de la planta pudiera realizar e interpretar con solo unos pocos días de capacitación. Las pruebas que se



3-3433818



Av. Beni, C/ Mururé, 2055.
Santa Cruz, Bolivia.

desarrollaron, ahora conocidas genéricamente como prueba PDA (para hidrogenadores) y prueba TGA (para turbogeneradores y motores), enfatizaron en separar los pulsos de DP de los pulsos de ruido eléctrico. Los métodos de separación de ruido dependen de comparar el tiempo de llegada del pulso entre un par de acopladores capacitivos y/o analizar la forma de los pulsos individuales. Para maximizar la relación señal-ruido y, por lo tanto, también para reducir el riesgo de indicaciones falsas, los sensores detectan las DP a frecuencias de 40 MHz y superiores. Los métodos de prueba resultantes lograron su objetivo y han permitido a las empresas de servicios públicos evaluar la condición de los devanados con su propio personal. Como resultado, se estima que más del 50% de todos los generadores de servicios públicos de 20 MW o más en los EE. UU. y Canadá ahora han sido equipados con los sensores requeridos. En todo el mundo, más de 15 000 máquinas tienen los sensores necesarios instalados permanentemente.

Con la aplicación generalizada de los mismos métodos de prueba en línea, se ha acumulado una gran cantidad de resultados de prueba en una sola base de datos. Hasta fines de 2019, se acumularon más de 685 000 resultados de pruebas durante los últimos 25 años utilizando instrumentos de prueba portátiles, y se aplicó un análisis estadístico simple a la base de datos para extraer información que pueda ayudar a los usuarios de pruebas a interpretar mejor los resultados de DP. Este documento actualiza una contribución anterior de 2002 que introdujo este concepto. El mejor medio para determinar si un devanado está significativamente deteriorado sigue siendo el seguimiento de la tendencia de la actividad de DP a lo largo del tiempo. Desafortunadamente, las magnitudes de DP no solo se ven afectadas por el grado de deterioro del aislamiento, sino que el voltaje de operación de la máquina, la presión del gas refrigerante, etc., también puede afectar los resultados. Con la disponibilidad de sistemas de monitoreo de DP en línea que miden continuamente las DP en un motor o generador, mientras adquieren simultáneamente datos de operación de la máquina, se ha obtenido una mejor apreciación del efecto de las condiciones de operación en la actividad de DP. Por lo tanto, este documento también presenta los rangos en condiciones de operación que permiten la medición de tendencias válidas de actividad de DP.

2. Base de datos de DP

2.1. Presentación de datos

Todos los datos presentados aquí se obtienen utilizando acopladores capacitivos de 80 pF (instalados dentro del devanado del estator o en los terminales de la máquina) o acopladores de ranura del estator (SSC), que son antenas instaladas debajo de las cuñas en las ranuras del estator que contienen barras de extremo de fase. Al igual que con la mayoría de los sistemas de medición de DP, se registra el número, la magnitud y la posición de fase con respecto al ciclo de CA de 50/60 Hz, una vez que los pulsos de DP se separan de los pulsos de ruido. La magnitud del pulso se mide en unidades absolutas de milivoltios, en lugar de picoculombios, debido a la dificultad de calibrar en pC causada por la naturaleza capacitiva inductiva de un devanado de estator completo.

Se generan dos tipos de gráficos para cada prueba de descarga parcial. El primer tipo de



3-3433818



Av. Beni, C/ Mururé, 2055.
Santa Cruz, Bolivia.

gráfico es bidimensional (2-D), donde se muestra el número de descargas parciales por segundo frente a la magnitud de DP. Cuanto mayor es el número de pulsos por segundo, más generalizado es el deterioro del devanado. Cuanto mayor es la magnitud de la DP, más severo es el deterioro. En la Figura 1 se muestra un ejemplo. El segundo tipo de gráfica (Figura 2) es una gráfica tridimensional de DP resuelta en fase (PRPD), donde la magnitud de la DP (escala vertical) y la frecuencia de repetición del pulso de la DP (codificados por colores para ser proporcionales a la densidad de pulso) frente al ángulo de fase de CA (escala horizontal). La experiencia ha indicado que dicho análisis de fase de pulso se puede utilizar para identificar si se están produciendo múltiples mecanismos de deterioro y los mecanismos responsables.

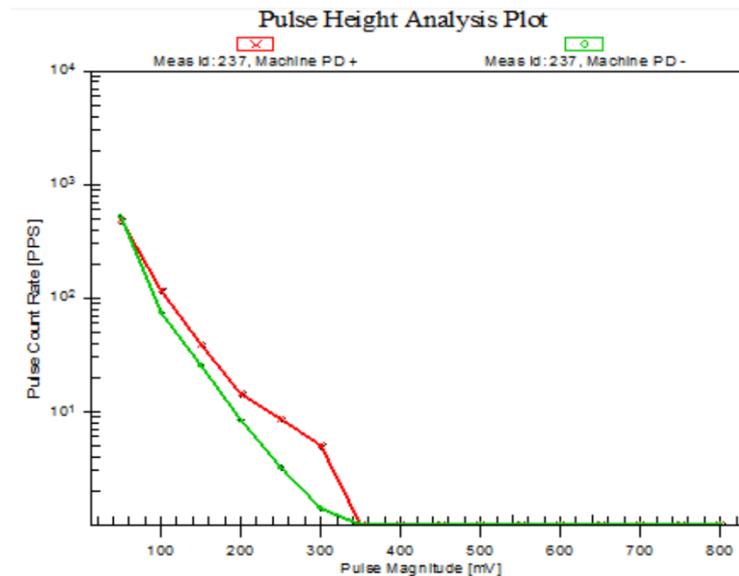


Figura 1 - Gráfico 2-D que muestra el número de descargas parciales por segundo frente a la magnitud de DP

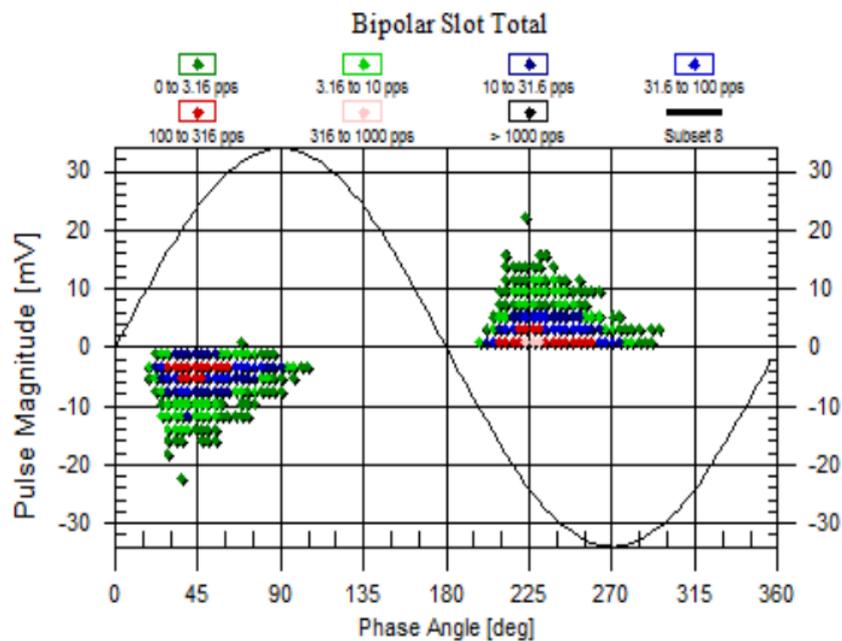


Figura 2: Gráfica de DP resuelta en fase 3D que muestra la magnitud de DP (escala vertical) y la frecuencia de repetición del pulso de DP (codificado por colores proporcional a la densidad del pulso) versus el ángulo de fase de



3-3433818



Av. Beni, C/ Mururé, 2055.
Santa Cruz, Bolivia.

CA (escala horizontal)

Los gráficos en 2D y 3D son difíciles de manejar para hacer comparaciones entre las máquinas. El PDA o TGA resume cada gráfico con dos cantidades: la magnitud máxima de DP (Q_m) y la actividad total de DP (NQN). El Q_m se define como la magnitud correspondiente a una tasa de repetición de DP de 10 pulsos por segundo. Q_m se relaciona con la gravedad del deterioro en el peor punto del devanado, mientras que NQN es proporcional a la cantidad total de deterioro y es similar a la punta del factor de potencia. Dado que la cantidad escalar Q_m es más indicativa de qué tan cerca está el devanado de fallar, la magnitud máxima (Q_m) se usará a lo largo de este documento para realizar comparaciones.

Se ha observado que Q_m es un predictor razonable del estado del aislamiento del devanado. Es decir, un Q_m elevado, medido en un devanado frente a un Q_m menor en otro devanado, suele implicar que el devanado anterior está más deteriorado. Inicialmente, esto fue una sorpresa ya que las lecturas de mV no estaban calibradas para la carga del devanado. Ahora creemos que las lecturas de Q_m informadas aquí, que se miden en frecuencias superiores a 40 MHz, pueden ser algo absolutas porque los pulsos se miden como ondas viajeras y todas las oscilaciones después del primer pico en un solo evento de DP no se tienen en cuenta. Dado que la impedancia de sobretensión de una bobina en una ranura es aproximadamente la misma para todos los tamaños y tipos de máquinas, la medición de banda muy ancha del primer pico en un pulso de DP no "ve" toda la carga capacitiva e inductiva del devanado del estator, dejando así la medida libre de los efectos de las oscilaciones y reflexiones del LC.

2.2 Base de datos a finales de 2019

Después de la acumulación de todos los datos de pruebas disponibles hasta 2019 con más de 685 000 registros de pruebas con instrumentos portátiles únicamente, se compiló cuidadosamente una base de datos utilizando los siguientes criterios de selección:

- Solo pruebas en línea obtenidas durante el funcionamiento normal
- Solo un resultado de prueba por sensor
- La prueba más reciente a plena carga y temperatura caliente del devanado del estator (FLH)
- Se descartó cualquier prueba con resultados cuestionables

Una vez que se aplicaron estos criterios, se analizaron alrededor de 20 000 resultados de pruebas estadísticamente independientes de más de 8 000 máquinas. La Tabla I muestra el desglose de los resultados que se retuvieron una vez que se descartaron las pruebas no FLH y repetidas.

Motores	32%
Hidrogeneradores	24%
Turbo generadores	44%

Tabla I - Número de Pruebas FLH por Tipo de Máquina



3-3433818



Av. Beni, C/ Mururé, 2055.
Santa Cruz, Bolivia.

2.3 Análisis estadístico

La base de datos se analizó para determinar el efecto en Qm de varios factores diferentes, que incluyen:

- Instalación de sensores
- Clase de tensión
- Presión de hidrógeno

El rango en Qm de todas las pruebas para el voltaje operativo particular se estableció para cada conjunto de los factores anteriores. En la Tabla I se muestra una muestra de la distribución estadística. Los valores porcentuales que se muestran en la columna de la izquierda en las Tablas II y III representan la probabilidad acumulada. Por ejemplo, para estatores de 13-15 kV en generadores de turbina o motores, el 25 % de las pruebas tuvo un Qm por debajo de 51 mV, el 50 % (la mediana) tuvo un Qm por debajo de 115 mV, el 75 % estuvo por debajo de 235 mV y el 90 % de las pruebas produjo un Qm por debajo de 430 mV. Así, si se obtiene un Qm de 500 mV en un generador de 13,8 kV, entonces es probable que este estator se deteriore, ya que tiene magnitudes de DP superiores al 90% de máquinas similares. De hecho, en más de doscientos casos en los que se examinó visualmente una máquina después de registrar un nivel de DP >90 % de máquinas similares, se observó un deterioro significativo del aislamiento del devanado del estator.

Cumulative Probability	Operating Voltage (kV)				
	6-9 kV	10-12 kV	13-15 kV	16-18 kV	> 19 kV
25%	25	35	51	39	40
50%	67	85	115	80	96
75%	145	196	235	207	225
90%	331	415	430	313	566
95%	507	670	619	486	842

Tabla II - Distribución de Qm (mV) para Máquinas Enfriadas por Aire, 80 pF Sensores en las Terminales (TGA)

Una instalación de PDA en un hidrogenerador usa los mismos sensores de 80 pF y estos generalmente se instalan dentro de un metro de la unión entre el bus de fase entrante y la primera bobina/barra en el circuito. Un sensor en esta ubicación será extremadamente sensible a cualquier pulso que se origine dentro de la bobina/barra, ya que la magnitud del pulso se amplificará cuando alcance el desajuste de impedancia entre el bus y la bobina/barra. Por lo tanto, puede ser razonable suponer que las magnitudes de DP obtenidas con los acopladores en esta ubicación serán mayores que cuando los acopladores están ubicados fuera de la carcasa de la máquina típica de las instalaciones direccionales (TGA). Sin embargo, cuando se comparan los resultados de TGA, Tabla II, con los resultados de PDA, Tabla III, aunque hay algunas variaciones menores, hay poca diferencia significativa entre los resúmenes estadísticos para devanados de menos de 19 kV. Por lo tanto, es seguro decir que para un devanado de 13,8 kV, independientemente del tipo de instalación, los niveles de DP deben ser inferiores a ~250 mV y aquellas máquinas con DP superiores a 500 mV necesitan más



3-3433818



Av. Beni, C/ Mururé, 2055.
Santa Cruz, Bolivia.

investigación.

Cumulative Probability	Operating Voltage (kV)				
	6-9 kV	10-12 kV	13-15 kV	16-18 kV	>19 kV
25%	10	38	38	39	52
50%	25	72	97	131	146
75%	51	132	202	338	380
90%	149	289	387	625	837
95%	285	452	580	856	1094

Tabla III - Distribución de Qm (mV) para máquinas enfriadas por aire, sensores de 80 pF instalados dentro de la carcasa de la máquina (PDA)

La descarga parcial es un proceso de descarga de gas, por lo que depende en gran medida, no solo de la geometría del espacio de gas, sino también del medio gaseoso. Por lo tanto, las magnitudes de DP de las máquinas enfriadas por aire suelen ser más altas que las de las máquinas enfriadas con hidrógeno a presión elevada. Por lo tanto, no es recomendable comparar los resultados de máquinas que utilizan diferentes medios de gas. La mayoría de los hidrogenadores (instalaciones PDA) son enfriados por aire, por lo que todas las pruebas para máquinas enfriadas por gas con capacitores se obtuvieron usando un instrumento TGA y sensores en las terminales de la máquina. La mayoría de las máquinas enfriadas por hidrógeno tienen cargas nominales altas y pueden sufrir problemas como la formación de arcos en el núcleo de hierro, lo que puede causar dificultades para separar el ruido de alta frecuencia asociado con este fenómeno del de las DP. Las descargas parciales o la actividad de ruido en los terminales de la máquina, fuera del entorno del hidrógeno, pueden dificultar la interpretación del estado del aislamiento del devanado del estator. Esta dificultad fue la razón principal del desarrollo de los acopladores de ranura del estator (SSC) que se han discutido extensamente en otras publicaciones. Los resultados obtenidos con este tipo de sensores en máquinas refrigeradas por hidrógeno están más allá del alcance de esta contribución.

Aunque siempre se recomienda hacer una tendencia de los resultados de una máquina a lo largo del tiempo y así controlar la tasa de degradación del devanado del estator, también es posible comparar los resultados de máquinas similares. Esta afirmación se realiza sobre la base del empleo de sensores y técnicas de prueba descritas en este documento. Las tablas II y III se pueden usar para determinar si una máquina requiere más pruebas e inspecciones o si está operando dentro de límites razonables. Las preocupaciones solo deben plantearse si los niveles de PD en una máquina específica están por encima del percentil 90 (alto). En todos los casos, esto significa aumentar la frecuencia de las pruebas de DP para determinar la tasa de deterioro y, cuando sea posible, realizar pruebas, inspecciones y reparaciones especializadas según sea necesario. En los sistemas de aislamiento a base de mica, las DP son un síntoma de un mecanismo de falla; la acción debe basarse en la gravedad del mecanismo de falla detectado por el PD, no en los resultados del PD. Los niveles de DP que superan las alarmas de umbral son advertencias para una mayor investigación a fin de determinar la causa de la DP alta; sin embargo, tenga en cuenta que los niveles de DP pueden fluctuar con las condiciones ambientales y de funcionamiento. El mantenimiento debe basarse en la causa de la DP, no en los niveles generales. Los monitores continuos de DP deben tener sus niveles de alarma



3-3433818



Av. Beni, C/ Mururé, 2055.
Santa Cruz, Bolivia.

establecidos en el nivel 75% o 90%.

El tiempo de falla del devanado es normalmente el resultado de un devanado deteriorado que se somete a una tensión extrema, como la caída de un rayo, sincronización desfasada, arranques excesivos o desequilibrio del sistema. Como estos son impredecibles, es imposible pronosticar cuándo ocurrirá una falla. Sin embargo, al monitorear las características de DP de un devanado de estator, a menudo es posible determinar qué máquinas son más susceptibles a fallas y, por lo tanto, cuáles requieren mantenimiento.

3. Caso de estudio.

En 1995, se instalaron sensores de descarga parcial de tipo cable de 80pF suministrados por FES International (ahora IRIS) en la central eléctrica de Solhom, Generador 2.

El generador tiene una potencia nominal de 125 MVA, 14,7 kV, 300 rpm. Después de la primera prueba de DP en más de 20 años, realizada en noviembre de 2018, se midieron niveles altos de DP, en comparación con la base de datos de IRIS. Los niveles de DP estuvieron entre el 10 % superior de los niveles más altos medidos en máquinas con devanados de estator en esta clase de voltaje. El análisis de las gráficas de fase resuelta indicó que la descarga de fase a fase es la causa más probable de niveles elevados de DP. Esta acción requería evitar mayores daños y una posible ruptura del aislamiento. Usando los resultados de DP y el diagrama de devanado del estator del generador, fue posible enfocarse en el área específica del estator y un breve apagado de 2 horas fue suficiente para ubicar visualmente el problema, Figura 3.



Figura 3 – Evidencia de descarga parcial entre dos fases

En la primera oportunidad (verano 2019) se realizó la acción correctiva para eliminar este problema. Posteriormente, se realizaron pruebas de DP en línea bajo las mismas condiciones de operación y resultados en comparación con la primera prueba, realizada en noviembre de 2018, Figura 4.



3-3433818



Av. Beni, C/ Mururé, 2055.
Santa Cruz, Bolivia.

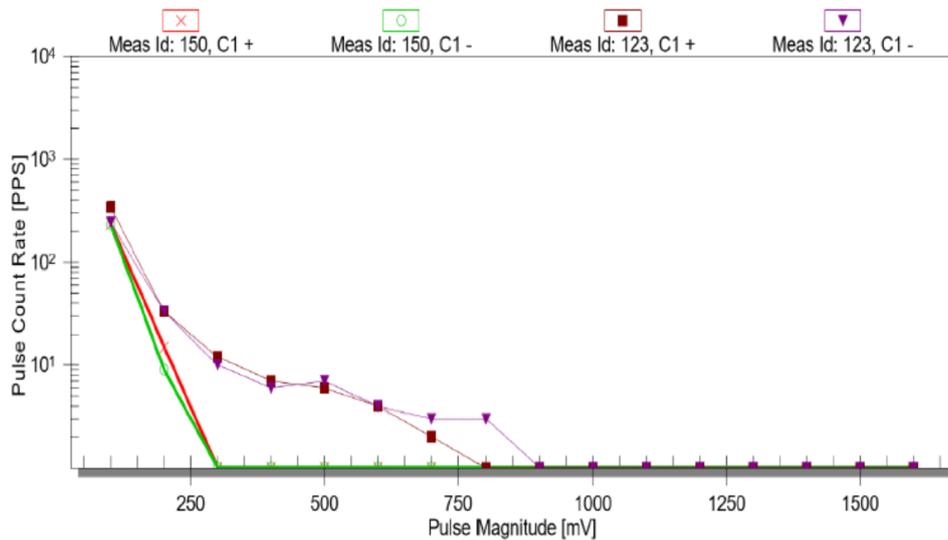


Figura 4: comparación de las amplitudes de los pulsos de DP antes (marrón/violeta) y después de la prueba de reparación (rojo/verde)

Los resultados de la prueba de 2019 indicaron una reducción significativa en la amplitud de los pulsos de PD, lo que confirma la efectividad de la reparación.

4. Conclusiones

1. Con muchos miles de máquinas monitoreadas, algunas durante 30 años con el mismo método, la prueba de descarga parcial en línea se ha convertido en una herramienta reconocida y comprobada para ayudar a los ingenieros de mantenimiento a identificar qué devanados del estator necesitan fuera de línea.
2. Con más de 685.000 resultados de prueba adquiridos con los mismos métodos de prueba, se ha definido lo que constituye un devanado con DP baja, moderada o alta. Tablas como las tablas II y III permiten a los usuarios de pruebas identificar fácilmente con cierta certeza qué máquinas probablemente sufrirán deterioro del aislamiento de la pared del estator, con una sola medición en una máquina.
3. La tendencia de las DP a lo largo del tiempo sigue siendo la forma más fiable de identificar qué máquinas necesitan mantenimiento. Sin embargo, dado que la actividad de DP no solo se ve afectada por el deterioro, sino también por la carga operativa, el voltaje, la temperatura, la presión del gas y la humedad, estos factores deben ser similares de una prueba a otra. Asegurarse de que estos factores sean los mismos cuando se realizan pruebas a lo largo de los años, permitirá al ingeniero de mantenimiento detectar el deterioro del aislamiento del estator lo antes posible.



3-3433818



Av. Beni, C/ Mururé, 2055.
Santa Cruz, Bolivia.