

CRITERIOS DE DIAGNÓSTICO DE MÁQUINAS ROTANTES DE MEDIA TENSIÓN

Carlos A. WALL
IITREE-LAT-FI-UNLP
Argentina

Leonardo J. CATALANO
IITREE-LAT-FI-UNLP
Argentina

Javier RIOS
UTFSM
Chile

Pablo TRINCADO
UTFSM
Chile

Calle 48 y 116 – CPA: B1900AMF – La Plata – República Argentina – caw@iitree-unlp.org.ar

Resumen – Se presenta un análisis de distintas normas y publicaciones en las que se encuentran descripciones de procedimientos y criterios de evaluación del estado del aislamiento de máquinas rotantes de media tensión.

En esta publicación se consideran normativas a nivel internacional que contemplan procedimientos de medición y criterios de evaluación de los distintos parámetros involucrados.

Como resultado del mencionado análisis se ha elaborado un procedimiento de ensayo que contempla la medición de los distintos parámetros a determinar durante las pruebas que se realizan con la máquina fuera de servicio (off-line).

Los ensayos a realizar incluyen: medición del nivel descargas parciales (DPs), registros de oscilogramas y registros digitales de DPs en función de la fase de la tensión aplicada, determinación de capacidad, factor de pérdidas ($\text{tg } \delta$), resistencia de aislamiento e índice de polarización (IP).

Para el diagnóstico se consideran los parámetros dieléctricos medidos, parámetros combinados y parámetros derivados de las magnitudes medidas.

Palabras clave: Máquinas rotantes, curva de vida, descargas parciales (DPs), capacidad, factor de pérdidas, $\text{tg } \delta$.

1 INTRODUCCIÓN

Las máquinas rotantes cumplen un papel fundamental en toda cadena de producción en las que se encuentren emplazadas. Es bien conocida la criticidad que poseen tanto los generadores de energía eléctrica como los motores utilizados en procesos industriales, siendo de vital importancia en la producción, ya que ella depende el desempeño que posean estas máquinas, debiendo cumplir de acuerdo a lo programado, su papel en forma eficiente.

Para evitar que, tanto los generadores como los motores, sufran salidas de servicio en forma inesperada que provoquen interrupciones en producción, se deben llevar a cabo dentro de un plan de mantenimiento, mediciones que permitan evaluar el estado de las unidades y las acciones correctivas a implementar, si estas son requeridas.

Para una evaluación de carácter predictivo, se requiere un seguimiento que contemple un periodo regular de mediciones y de esta forma poder confeccionar una curva de vida para cada uno de los parámetros contemplados.

Se presenta un análisis de distintas normas internacionales en las que se encuentran procedimientos y criterios de evaluación del estado del aislamiento de máquinas rotantes de media tensión.

Se consideran normativas a nivel internacional que contemplan procedimientos de medición y criterios de evaluación de los distintos parámetros involucrados.

Del mencionado análisis se ha elaborado un procedimiento integral de ensayo con mediciones de distintos parámetros (off-line) que da como resultado la expectativa de vida de la máquina.

Los ensayos a realizar incluyen: medición del nivel descargas parciales (DPs), registros de oscilogramas y registros digitales de DPs en función de la fase de la tensión aplicada, determinación de capacidad, factor de pérdidas ($\text{tg } \delta$), resistencia de aislamiento y índice de polarización (IP).

2 GENERALIDADES

2.1 Objetivo

El objeto es elaborar un criterio que permita realizar la evaluación del estado de aislamiento de las máquinas rotantes y con éste establecer una estrategia de mantenimiento que evite las salidas de servicio durante periodos no programados.

2.2 Parámetros considerados

Los siguientes parámetros dieléctricos se consideran para el diagnóstico:

- Descarga Parcial (DP) - Medición de la carga aparente (Q) de acuerdo a la norma IEC 60270:2000 [1].
- Capacidad
- Factor de Pérdidas ($\text{tg } \delta$) – Incremento de la $\text{tg } \delta$
- Resistencia de aislación
- Índice de polarización (IP)
- Corriente de absorción del aislamiento

La magnitud de las DPs reflejan los puntos críticos del aislamiento con deterioro localizado.

El factor de pérdidas muestra el estado global del material dieléctrico, los incrementos de la $\text{tg } \delta$ se consideran proporcionales al volumen de vacuolas (cavidades dentro del material aislante) con actividad de DPs.

La resistencia de aislación, la respuesta de absorción y el IP revelan fundamentalmente la humedad absorbida y la contaminación.

3 SOLICITACIONES A APLICAR

Los ensayos a realizar son con tensión alterna y continua, con alterna se realizan los ensayos de Factor de Pérdidas, Capacidad y DPs, y con continua se determina la Resistividad del aislamiento y el IP.

3.1 Ensayos con tensión alterna

Se determina en primer lugar el nivel de la tensión a utilizarse " U_{ensayo} ", tensión que se aplica fase-masa y típicamente corresponde al 100% de la tensión fase-masa de un de ensayo de rutina y/o mantenimiento predictivo.

Es recomendable que la sollicitación alterna se incremente gradualmente en escalones de 20% de U_{ensayo} hasta alcanzar el 100% de U_{ensayo} , valor que se mantiene por un periodo de entre 10 a 15 minutos con el objeto de establecer un estado cuasi-estacionario en los parámetros eléctricos del aislamiento. Luego de este periodo la tensión se reduce en escalones de 20% de U_{ensayo} hasta cero. De este modo se podrá observar la evolución de los parámetros dieléctricos, los posibles cambios o histéresis entre el perfil de ascenso y descenso, etc.

Las mediciones se realizan en cada escalón de tensión alterna en valor eficaz, aunque para el caso de las DPs la normativa distingue que son relevantes las mediciones en perfil de descenso. También se pueden comparar los valores obtenidos en el ascenso de tensión con los del descenso.

3.2 Ensayos con tensión continua

Se determina en primer lugar el nivel de la tensión nominal de ensayo a utilizarse, típicamente en los rangos 1; 2,5 y 5 kV. La tensión se aplica fase-masa durante un periodo de 10 minutos. Adicionalmente se puede hacer de forma complementaria la aplicación de escalones de tensión continua de 1 kV con 1 minuto de duración hasta alcanzar el valor de ensayo, típicamente 5 kV.

4 ENSAYOS: Procedimiento y evaluación

Se plantea la realización de ensayos con tensión alterna y continua, los primeros son Factor de pérdidas, Capacidad y Descargas Parciales, mientras que los con tensión continua son Resistividad del aislamiento e Índice de polarización.

4.1 Factor de Pérdidas del aislamiento (tg δ) y capacidad

El procedimiento de medición se toma de la norma IEEE Std. 286-2000 [2], la evaluación de resultados se realizan de acuerdo a la norma DIN VDE 0530 [3] y recomendaciones del CRIEPI [4].

De acuerdo a lo establecido en la Norma DIN VDE 0530 [3], para los ensayos de mantenimiento preventivo, los aislamientos de las máquinas rotantes se evalúan con respecto a incrementos del factor de pérdidas medidos en escalones de tensión:

$$\Delta_0 \equiv \tan \delta_{0,2} < 30 \times 10^{-3} \quad \Delta_1 \equiv \frac{\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2}}{2} < 2,5 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_2 \equiv \tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,4} < 5 \times 10^{-3} \quad \Delta_3 \equiv \tan \delta_{0,8} - \tan \delta_{0,6} < 6 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_4 \equiv \tan \delta_{1,0} - \tan \delta_{0,8} < 7 \times 10^{-3}$$

De acuerdo a las recomendaciones del Criterio CRIEPI el factor de pérdidas de las máquinas rotantes debe cumplir:

$$\Delta_{\text{CRIEPI}} \equiv \tan \delta_{1,0} - \tan \delta_{0,2} < 20 \times 10^{-3}$$

Los valores de $\tan \delta$ se normalizan a 20° C. En la Fig. 1 se presenta una curva de capacidades y en la Fig. 2 la correspondiente a la $\tan \delta$ ambas en función de la tensión aplicada.

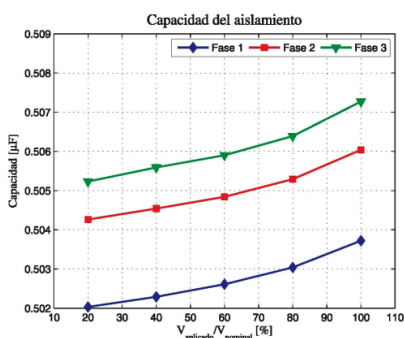


Fig. 1 – Curva de capacidad

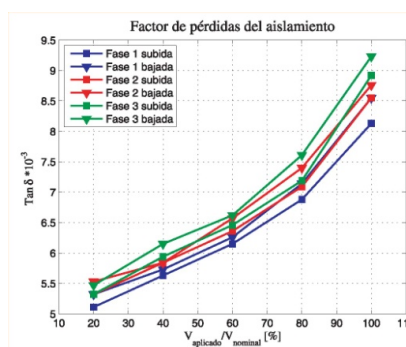


Fig. 2 – Curva de tan δ

La capacidad se utiliza como herramienta de diagnóstico, principalmente en cuanto a su variación positiva o negativa durante los 10 minutos que dura el ensayo a tensión nominal.

4.2 Descargas Parciales (DPs)

El procedimiento de medición utilizado toma como referencia la norma IEEE Std. 1434-2000 [5], se utiliza el mismo esquema de solicitaciones del ensayo de factor de pérdidas y se mide en forma simultánea con él. Las mediciones se llevan a cabo con un sistema de medición que cumple con los lineamientos establecidos en la norma IEC 60270:2000 [1], los circuitos de ensayos son los especificados por la misma.

Se mide el valor de la carga aparente Q [pC] y se compara con valores de referencia, por ejemplo para una máquina nueva este valor está en el rango de 5.000 pC. Si se dispone de registros con mediciones anteriores se observa el incremento en el valor de Q , se debe prestar atención que el incremento sea homogéneo para todas las fases y que mantenga cierta regularidad de incremento en el tiempo. Un incremento repentino de las DPs en una sola fase de la máquina resulta un signo de deterioro riesgoso. En la Fig. 3 se observa la variación de Q en función de la tensión aplicada.

También se determinan las tensiones de ignición (TIDP) y de extinción (TEDP) de DPs. En estas mediciones no existe un umbral definido se adopta como tal el nivel de ruido. El ruido y otros mecanismos de ajuste, son definidos en una etapa previa de medición y calibración en vacío, es decir, con todo el sistema de medida, pero sin la máquina conectada.

Por otro lado se determinan la distribución, el tamaño y la cantidad de las DPs, junto con la fase de ocurrencia, esto permite complementar el diagnóstico ya que se comparan con patrones característicos. El procedimiento considerado es el que se indica en la TS IEC 60034-27:2006 [6]. En la Fig. 4 se presenta un ejemplo correspondiente a una fase de un generador de 160 MVA.

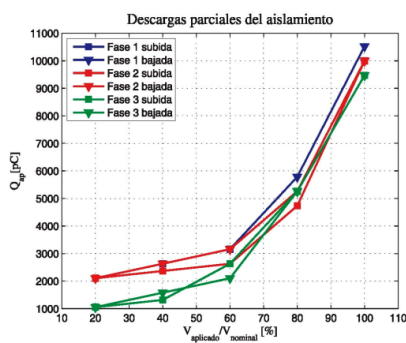


Fig. 3 – Curva de “Q” en función de $U_{aplicada}$

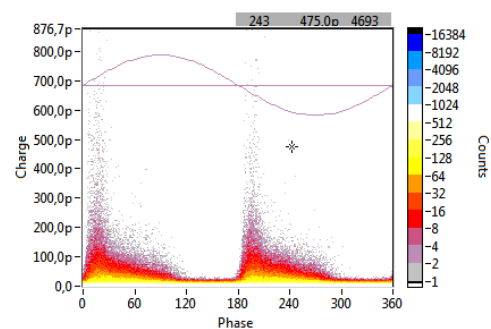


Fig. 4 – Distribución de DPs en función de la fase

4.3 Resistencia de aislamiento e Índice de polarización (IP)

Para el procedimiento de medición se toma como referencia la norma IEEE Std. 43-2000 [8]. Se aplica la tensión anteriormente fijada a una fase con las otras dos aterrizadas durante 10 minutos, donde se mide y grafica la corriente de pérdidas del aislamiento y se determina la resistencia del aislamiento en el tiempo. Adicionalmente se determinan parámetros clásicos como el IP cuyo rango normal según el tipo de aislamiento, se encuentra entre 2 y 6, interpretando humedad en el aislamiento para valores pequeños y agrietamiento superficial para valores altos. También son determinadas, las componentes de la corriente, como fuga resistiva, polarización y absorción.

Con la resistencia de aislamiento a los 10 min y la capacidad se puede determinar las constantes de tiempo del aislamiento por fase.

Complementaria y adicionalmente se aplica a cada fase contra masa, una tensión continua graduada en escalones de 1 kV, variable entre 1 y 5 kV. El tiempo en cada nivel de tensión es de 1 minuto, se registra la variación de la resistencia de aislamiento en función del tiempo

y se grafican los valores de las corrientes al minuto final de cada escalón con su nivel de tensión.

En las Fig. 5 y Fig. 6 se aprecian gráficas correspondientes a la corriente de absorción y respuesta a escalones de tensión respectivamente.

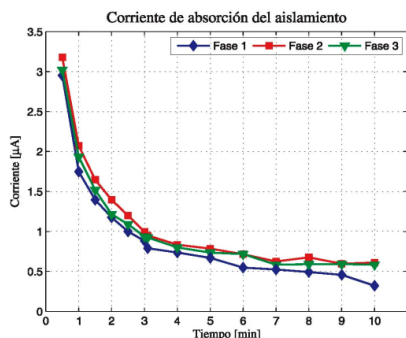


Fig. 5 – Corriente de absorción

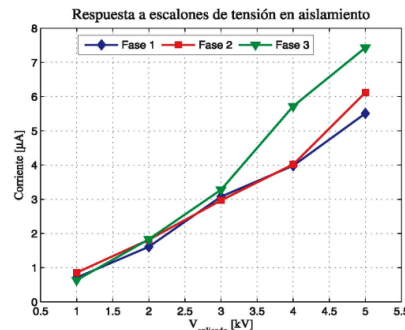


Fig. 6 – Respuesta a escalones de tensión

5 ANÁLISIS COMBINADOS DE MEDICIONES Y MAGNITUDES DERIVADAS

Luego de realizados los ensayos y obtenidos los resultados existen criterios de evaluación que combinan diferentes mediciones y otros que se realizan con magnitudes derivadas de las obtenidas en las pruebas.

5.1 Análisis de DPs y tg δ

En la evaluación de resultados se utilizan las recomendaciones del CRIEPI [4], en la que se analiza el incremento global del la tg δ entre el 20 y 100 % de la sollicitación aplicada y el nivel de la carga aparente máxima (Q), medidos a la tensión de operación fase-masa del devanado. Los criterios de evaluación se resume en la Tabla I.

TABLA I. EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL AISLAMIENTO “tg δ-DPs”

Estado	tg δ	DPs
Devanados en buen estado	$\tan \delta_{1,0} - \tan \delta_{0,2} < 20 \times 10^{-3}$	$Q < 10.000 \text{ pC}$
Devanados en observación	$20 \times 10^{-3} < \tan \delta_{1,0} - \tan \delta_{0,2} < 65 \times 10^{-3}$	$10.000 \text{ pC} < Q < 30.000 \text{ pC}$
Devanados en riesgo crítico	$\tan \delta_{1,0} - \tan \delta_{0,2} > 65 \times 10^{-3}$	$Q > 30.000 \text{ pC}$

5.2 Energía integrada de las DPs (W_{DPs})

Se determina la energía integrada de las descargas por ciclo, W_{DPs} , la evaluación se realiza en base a la publicación de J.S. Simons “Diagnóstico del aislamiento de máquinas de alta tensión” [7], en la misma se indica la relación de W_{DPs} y el contenido de vacuolas que se presenta en la Tabla II.

La determinación de la W_{DPs} se realiza de acuerdo a lo indicado en las ecuaciones (1) y (2)

$$W_D = 2\pi U^2 C_x \left(tg\delta_x - tg\delta_{x-1} \frac{C_{x-1}}{C_x} \right) \left[\frac{\mu J}{\text{ciclo}} \right] \quad (1)$$

$$W_{DPs} = \frac{2\pi U^2 C_x \left(tg\delta_x - tg\delta_{x-1} \frac{C_{x-1}}{C_x} \right)}{1000 C_x} \left[\frac{\mu J}{\text{ciclo-pF}} \right] \quad (2)$$

TABLA II. EVALUACIÓN EN FUNCIÓN DE LA ENERGÍA INTEGRADA DE LAS DPs

Estado	Energía integrada de las DPs
Máquinas con bajo nivel de vacuolas	$W_{DPs} < 5 \left[\frac{\mu J}{\text{ciclo} \cdot pF} \right]$
Máquinas con nivel moderado de vacuolas	$5 \left[\frac{\mu J}{\text{ciclo} \cdot pF} \right] < W_{DPs} < 20 \left[\frac{\mu J}{\text{ciclo} \cdot pF} \right]$
Máquinas con nivel elevado de vacuolas	$20 \left[\frac{\mu J}{\text{ciclo} \cdot pF} \right] < W_{DPs} < 50 \left[\frac{\mu J}{\text{ciclo} \cdot pF} \right]$

La energía integrada es calculada a partir de los incrementales del factor de pérdidas, tiene su justificación en la acción complementaria de los mecanismos de pérdidas del sistema de aislamiento, indicando que todo cambio anormal en los incrementos del factor de pérdidas es consecuencia de la actividad media de las descargas parciales de los estratos internos. Es decir, este parámetro no es sensible a las descargas externas tipo corona de ranura o cabezal.

6 CONCLUSIONES

En la Tabla III se resumen las diferentes solicitaciones, ensayos y criterios de evaluación utilizados.

TABLA III. RESUMEN DE ENSAYOS Y SOLICITACIONES

Solicitación	Ensayo	Criterio de Diagnóstico
Tensión alterna de frecuencia industrial	Factor de Pérdidas	Diferencia de la $\tan \delta$ para los distintos escalones de solicitación. (*)
	Descargas Parciales	Análisis del nivel de Carga Aparente (Q). (*)
		Evaluación de patrones con amplitud y tasa de repetición de DPs en función de la onda de tensión aplicada.
		Evaluación de la energía integrada de las DPs
Tensión continua	Resistencia de Aislamiento e Índice de polarización	Evolución entre diferentes mediciones. Criterios de humedad o agrietamiento superficial
(*) A través de estas dos magnitudes se emplea un diagnóstico de parámetros combinados.		

El criterio de evaluación descrito ha sido aplicado con éxito en gran cantidad de máquinas a lo largo de varios años y permite realizar una evaluación del estado global del aislamiento.

Adicionalmente a las mediciones que se presentan en este procedimiento, se utiliza como herramienta de diagnóstico consideraciones similares a la aquí presentadas, pero tomando en cuenta la data histórica medida de igual forma. De este modo se puede construir la "Carta Δ ", en la cual se grafica la variación de la capacidad más la $\tan \delta$ vs. las DPs ($\Delta = \Delta C + \tan \delta$). Con esta "Carta Δ " se puede realizar una estimación de la vida residual del aislamiento, también llamada curva de vida, en la Fig. 7 se presenta un ejemplo.

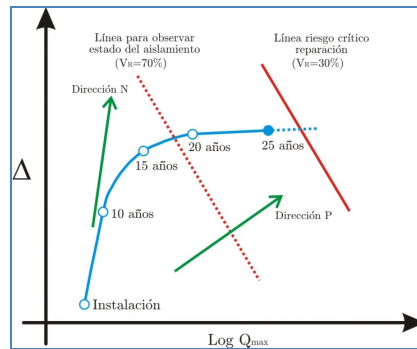


Fig. 7 – Carta “Δ” del aislamiento

La dirección “N” indica la tendencia de envejecimiento normal, originada en el proceso térmico-mecánico-eléctrico homogéneamente distribuido en todo el aislamiento.

La dirección “P” considera un crecimiento continuo de la amplitud máxima de las DP, con evidencia de deterioro localizado.

Se destaca la utilización de diferentes fuentes bibliográficas debido a que no existe hoy en día una norma precisa que integre todos los factores que influyen en el deterioro del sistema de aislamiento.

Hay que resaltar que el éxito del procedimiento se maximiza cuando se realizan mediciones en forma periódica según el estado del aislamiento. Para una máquina sana la periodicidad es de 2 a 3 años, mientras que en una máquina con sospechas de riesgo la periodicidad puede ser de 3 a 6 meses. Así se obtiene una mejor evaluación de la evolución de cada uno de los parámetros descritos.

7 REFERENCIAS

- [1] IEC 60270-2000. Third Edition. “High-voltage test techniques - Partial discharge measurements”.
- [2] IEEE Std. 286-2000. IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation.
- [3] DIN VDE 0530. Acapite 6. Ensayos dieléctricos de devanados de máquinas rotatorias.
- [4] Evaluación de aislamiento de generadores por parámetros dieléctricos combinados. Central Research Institute of Electrical Power Industry (CRIEPI) Japon.
- [5] IEEE Std. 1434-2000. IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery.
- [6] IEC 60034-27:2006. Rotating electrical machines – Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines.
- [7] Diagnostic testing of high-voltage machine insulation. J. S. Simons, B.Sc. (Eng.), C. Eng., M.I.E.E. IEE PROCEEDINGS, Vol. 127, Pt. B, No. 3, MA Y1980.
- [8] IEEE Std. 43-2000. IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.