



COMITE URUGUAYO DE LA CIER - CUCIER
SUBCOMITE DE OPERACION Y MANTENIMIENTO - SOPEM

Tema Nº 2 - LA GESTION DE MANTENIMIENTO EN EL INCREMENTO DEL ESTADO OPERATIVO DEL EQUIPAMIENTO E INSTALACIONES ELECTRICAS

Montevideo, Uruguay - Mayo 1997

**TEMA 2 - ITEM 3 -- ENSAYOS DE AISLACION EN ALTERNADORES
PARA EVALUACION DE SU ESTADO**

Autor/es: ING. JORGE FERNANDEZ DAHER, ING. DANIEL SLOMOVITZ, ING. MARCOS ANDRADE
Empresa: ADMINISTRACION NACIONAL DE USINAS Y TRASMISIONES ELECTRICAS

PALABRAS CLAVE:

Alternadores Descargas parciales
Mantenimiento Alta tensión

DATOS DE LA EMPRESA:

Dirección: Paraguay 2385, Montevideo Uruguay
Código postal: 11800
Teléfonos: (598-2) 942042 - 942049
Telefax: (598-2) 942004
Correo Electrónico: labute@chasque.apc.org

Resumen:

Este trabajo describe las distintas técnicas de ensayo utilizadas para diagnosticar el estado de la aislación estática de alternadores en centrales hidráulicas y térmicas. Se detallan técnicas clásicas ampliamente difundidas a nivel mundial, y se introducen nuevas técnicas digitales basadas en adquisición y procesamiento de datos.

Se presenta un resumen de resultados obtenidos en una serie de ensayos realizados durante los últimos cuatro años en alternadores de centrales de UTE. Es posible estimar el estado actual de dichos alternadores basándose en resultados de los ensayos y realizando comparaciones con resultados de ensayos en otros países.

Se presentan resultados de ensayos destructivos practicados en un alternador parado para rebobinado debido a repotenciación de la central.

1. Introducción

Durante muchos años los operadores de máquinas generadoras han demostrado un alto interés en los ensayos de alta tensión tanto alterna como continua. La mayoría de los investigadores han concluido que ningún ensayo, por sí sólo, es suficiente para poder determinar el estado de la aislación de un alternador. La introducción de rutinas periódicas de ensayo busca detectar un deterioro progresivo o acelerado de la aislación antes que se produzca una falla. En el caso que se produzca una falla durante los ensayos, significa que en un corto período de operación se produciría una falla con la máquina en servicio. Esta provocaría daños mayores al bobinado y laminado produciéndose en un momento no previsto para mantenimiento y por lo tanto inadecuado.

Una forma de reducir este problema es la introducción de rutinas periódicas de ensayos no destructivos que permitan detectar cambios significativos en el estado de la aislación. Estas rutinas permiten también la postergación de rebobinados de acuerdo a la velocidad de deterioro de la aislación.

Se han desarrollado una serie de técnicas de ensayo en continua y alterna a frecuencia industrial descritas en normas y procedimientos ampliamente difundidos. Los ensayos en alta tensión continua son interesantes por el pequeño volumen del equipamiento necesario. A su vez, los resultados son sensibles a la contaminación superficial de aisladores de las barras de salida de máquina. Los ensayos a frecuencia industrial reproducen los esfuerzos eléctricos a los cuales está sometido el alternador en servicio pero requieren una fuente de alimentación de mayor potencia. Los investigadores han dedicado mucho esfuerzo en desarrollar ensayos no destructivos adecuados, reconociendo sus limitaciones y los riesgos de perforación durante los mismos.

Estos ensayos se realizan sobre las distintas fases del alternador en forma individual o sobre el conjunto de todas ellas. Los ensayos en continua requieren de uno a tres días dependiendo de la técnica utilizada. Los ensayos de alterna se realizan en el transcurso de algunas horas permitiendo la vuelta al servicio de la máquina rápidamente. En general la máquina se quita de servicio en la noche anterior, se quitan algunas tapas del alternador y se desconectan las barras de salida lo más cerca posible de la máquina. Los ensayos se realizan al otro día con los arrollados en frío y se vuelven a colocar las tapas y reconectar las barras al final del día. Cuando se produce una parada más prolongada, durante mantenimientos anuales, es posible realizar los ensayos de continua. Las fases de la máquina se conectan a tierra para descargar el dieléctrico antes de la realización de los ensayos y se ensaya una fase por día. Este tiempo puede reducirse

utilizando técnicas distintas que desprecian los efectos de las corrientes residuales debidas a la carga del dieléctrico. Se describen a continuación las distintas técnicas de ensayo y la evaluación de los resultados.

2. Ensayos en continua

2.1 Índice de polarización

Antes de energizar un alternador es necesario determinar el grado de contaminación y humedad para evitar un riesgo innecesario de falla. Esta condición se traduce en un aumento de la corriente de fuga. Esto puede determinarse mediante un ensayo de resistencia de aislación y cálculo del índice de polarización. Este índice se calcula mediante el cociente entre la corriente de fuga al minuto de aplicada la tensión, y la corriente a los 10 minutos. Este ensayo no permite discernir si el problema es superficial o interno de la aislación del alternador. Cuando se obtiene un valor bajo de índice de polarización primero debe realizarse una buena limpieza y secado. Los valores normales dependen del tipo de aislación. En general índices del orden de 3 son buenos para aislaciones bituminosas y 8 para aislaciones epóxicas.

2.2 Resistencia de aislación

Este ensayo se realiza simultáneamente con el índice de polarización. Se mide la corriente al minuto de aplicada la tensión y se calcula la resistencia de aislación. Este es un valor que depende de la corriente de fuga y los valores normales son distintos según el tipo de aislación y el tamaño del alternador. Existen normas que indican los valores mínimos de resistencia de aislación [1].

2.3 Corriente de absorción

Luego de un tiempo determinado de aplicada la tensión, se cortocircuita el bobinado a tierra y se mide el valor de la corriente de descarga al minuto de cortocircuitado el arrollado. Para poder comparar esta corriente en distintos alternadores es necesario normalizar el valor según la tensión de ensayo y la capacidad de la máquina. Existen criterios para decidir sobre el estado de la aislación de acuerdo al valor normalizado obtenido [2].

2.4 Desvío de la ley de Ohm

Este ensayo da una idea de magnitud de las fugas en las cabezas de bobina. Estas fugas normalmente no siguen la ley de Ohm. El ensayo consiste en determinar, para cada escalón de tensión, la

corriente de conducción relevando la curva I en función de V. El ensayo se continua hasta llegar a 2 veces la tensión nominal de la máquina o hasta que la pendiente de la curva llega a 5. Este límite es por razones de seguridad, para no correr riesgos de perforar la aislación. El relevamiento de la curva de corriente se hace mediante la aplicación sucesiva de escalones de tensión de la misma amplitud. Existen dos métodos, uno sugerido por EDF [2] y otro por IEEE [3]. La diferencia fundamental entre ambos es que el primero determina la corriente de conducción de cada escalón restando, de la corriente medida, la suma de las corrientes de absorción generadas por los escalones precedentes; mientras que el método de IEEE simplifica estos descuentos. En general las diferencias entre ambos métodos no son importantes, pero el método francés requiere mayor tiempo de ensayo.

3. Ensayos en alterna

Las características dieléctricas de la aislación de una máquina pueden ser representadas por una combinación en paralelo de una conductancia y una capacidad. Sus valores se mantienen prácticamente constantes, sobre el rango de tensiones, hasta la tensión de servicio. Sin embargo, si el dieléctrico contiene cavidades, al aumentar la tensión aplicada por encima del valor necesario para que aparezcan descargas parciales, se produce un aumento de la capacidad y de la conductancia. La pérdida de energía en la conductancia incremental es aquella que se disipa por las descargas parciales.

3.1 Factor de disipación

Existen dos métodos para medir la energía y la carga integrada de las descargas parciales descriptos en normas ASTM [4].

En el primer método, se realiza una medida inicial de capacidad y factor de disipación a una tensión por debajo de la tensión de aparición de descargas parciales. Luego se aumenta esta tensión hasta la tensión de ensayo, y se realiza otro juego de medidas. A partir de ambos juegos de medidas es posible calcular la pérdida de energía debida a las descargas parciales. Este ensayo se realiza con puentes convencionales de medida de tangente δ . El incremento del factor de disipación es usado como un índice de la intensidad de las descargas y se designa $\Delta \text{tg } \delta$.

En el segundo método, se utiliza un circuito de puente especial mostrado en la figura 1. Este es balanceado a una tensión inferior a la tensión de aparición de las descargas parciales. Luego se aumenta la tensión hasta la tensión de ensayo, pero el puente no se vuelve a balancear. Toda tensión de desbalance en los terminales del detector se muestra en un osciloscopio junto a una muestra de la tensión de

ensayo. Se forma una figura que se aproxima a un paralelogramo, cuya área es una medida de la pérdida de energía debida a las descargas parciales. En este tipo de puente se coloca el espécimen bajo ensayo en serie con un condensador de baja tensión y se conecta esta rama a una fuente de tensión sinusoidal. Otras dos ramas del puente proveen una tensión para lograr el balance de la tensión en bornes del capacitor de la rama de baja tensión. Cuando se aumenta la tensión, las descargas se integran por dicho capacitor, apareciendo una tensión de desbalance en sus bornes. Esta tensión controla la deflexión vertical del haz del osciloscopio, mientras que una tensión en fase con la tensión de ensayo controla la deflexión horizontal. Cuando el puente está balanceado la imagen es una línea horizontal. Al aparecer descargas, la imagen se aproxima a un paralelogramo cuya altura representa la suma de descargas parciales en medio ciclo, y el área la energía disipada por las descargas en un ciclo. Si el paralelogramo está girado o levemente distorsionado es posible hacer un pequeño ajuste en el puente para compensar por los cambios en la capacidad y $\tan \delta$ por efectos distintos a las descargas.

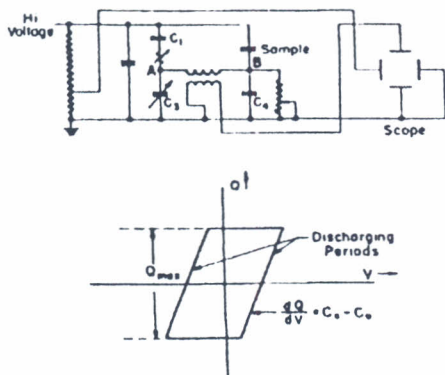


figura 1

Es importante que la fuente utilizada tenga potencia suficiente para poder excitar a la muestra y que esté libre de distorsión armónica, ya que de lo contrario no se es posible formar una línea al balancear el puente.

3.2 Descargas parciales

Este ensayo consiste en medir el valor de las descargas, a través de un capacitor de acople, a medida que se aumenta la tensión de ensayo. Se registra el valor de tensión al cual comienzan a aparecer las descargas y también el valor máximo de las descargas a la tensión de ensayo. Para determinar este valor es necesario que las descargas se produzcan a un ritmo casi permanente y se evalúa mediante un promedio visual. Obviamente, es necesario contar con personal con amplia experiencia para poder dar una estimación acertada de las descargas.

Otro método, utilizado por EDF, consiste en usar filtros pasabanda, de distinta frecuencia y realizar una integración del voltaje de salida, midiéndose valores rms de descargas. Los resultados arrojados por ambos métodos no son comparables, siendo este último muy dependiente del equipamiento utilizado.

Para la medición del valor máximo de las descargas, según el primer método, se hace pasar la señal por un filtro de banda ancha. En el método francés se aplican filtros de banda angosta y se calcula el valor cuadrático medio.

3.3 Técnicas digitales

Para que la evaluación de las descargas parciales sea independiente del operador, es que se están desarrollando a nivel mundial nuevas técnicas basadas en procesamiento digital de las señales de descargas. Estos métodos también permiten determinar con mejor precisión el tipo de defecto que se presenta en el alternador, mediante el análisis de nuevos parámetros. El equipamiento utilizado hasta ahora es específicamente diseñado para esta aplicación. A pesar de que los equipos están disponibles comercialmente, son muy caros. Con la aparición de nuevos osciloscopios digitales de bajo costo, esta técnica puede ser implementada, y el costo del equipamiento se reduce. Es posible discriminar la cantidad de descargas según su magnitud y la fase relativa a la tensión de ensayo. Estas distribuciones se pueden realizar fácilmente adquiriendo los datos con osciloscopios digitales y procesando la información con potentes programas de análisis en computadora. Las últimas tendencias [5] [6] proponen graficar la distribución acumulada en una gráfica de Weibull. Procesos de descargas parciales internas se corresponden con líneas rectas mientras que descargas en ranuras o superficiales cambian la forma de la gráfica. En la figura 2 se muestra la distribución para barras con descargas internas normales y la figura 3 muestra el caso de barras con descargas superficiales.

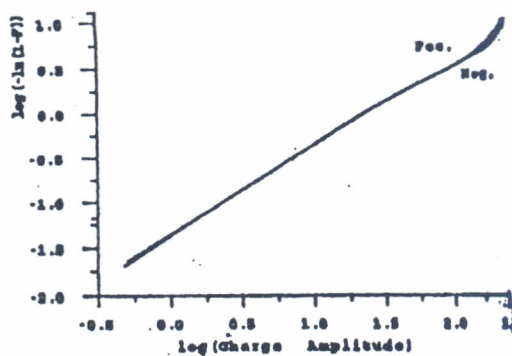


figura 2

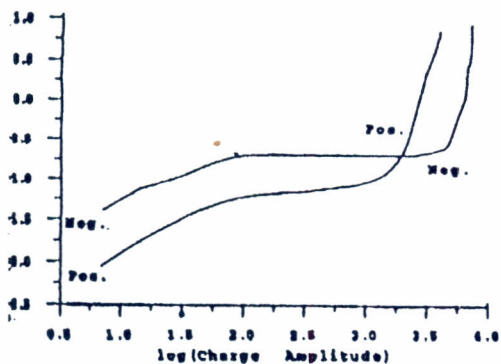


figura 3

4. Ensayos en máquinas de UTE

Desde hace aproximadamente cuatro años se vienen realizando ensayos periódicos en los alternadores de las centrales de UTE. La inquietud surge de los responsables de la operación de las centrales para poder determinar el estado actual de la aislación de sus alternadores, en vista a poder estimar la vida útil remanente de la máquina. Esto es muy importante ya que permite programar un cambio de bobinados o una reparación en el momento económicamente óptimo.

4.1 Descripción de los alternadores

UTE cuenta en la actualidad con tres centrales hidroeléctricas y tres térmicas.

4.2 Ensayos

La mayoría de los ensayos se realizaron en los alternadores de la central de Baygorria teniendo ya para uno de los alternadores dos ensayos completos y un ensayo completo en los restantes. Los valores promedio encontrados se muestran en la tabla 1. En las centrales térmicas se está comenzando a realizar ensayos.

ensayo	valor promedio
índice de polarización	3.1
resistencia de aislación a 40 °C (Mohm)	260
corriente de descarga a 20 °C (A/kV.F)	1.4
desvío de la ley de ohm	3.6
$\text{tg } \delta \text{ (} \times 10^{-3} \text{) a } 0.2 U_n$	32.0
$\Delta \text{ tg } \delta \text{ (} \times 10^{-3} \text{) (} 0.6 U_n - 0.2 U_n \text{)}$	1.2
descargas parciales máximas (nC)	25

tabla 1

Estos alternadores muestran un buen estado de la aislación. En la central Constitución se han realizado sólo ensayos en continua en 2 de sus máquinas también con buenos resultados. En la Central Gabriel Terra no se han realizado ensayos que puedan ser útiles para su mantenimiento predictivo ya que esta central está bajo un proceso de renovación. De todas maneras se tomó dos alternadores para efectuar los ensayos, pero con la intención de verificar los márgenes de seguridad de los mismos. En el ensayo del desvío de la ley de Ohm se aumentó la tensión hasta más de 2 veces la tensión nominal sin producirse perforación ni contorneo y manteniéndose la corriente en valores bajos.

Posteriormente se aplicó tensión alterna de 30 kV, muy superior a la nominal, sin producirse perforación. Es posible ver que a pesar de ser máquinas al final de su vida útil soportaron los esfuerzos a que fueron sometidas en estas sobretensiones. Esto indica que los márgenes de seguridad impuestos en los ensayos son adecuados, representando un riesgo mínimo para la aislación del alternador.

Es posible ver de los resultados obtenidos hasta el momento, en los alternadores de UTE, que el estado de estas máquinas es bueno.

El sistema digital implementado [8] ha sido probado en ensayos de campo en generadores. En la figura 4 se muestra la distribución de pulsos positivos y negativos para un hidrogenerador. Su forma depende del estado de la aislación. Es necesario eliminar los pulsos causados por ruido eléctrico para que éstos no afecten la distribución de pulsos. Una solución consiste en estimar un nivel de ruido en forma aproximada durante el ensayo y luego descartar todos aquellos pulsos por debajo del mismo. Para aquellos pulsos de ruido que aparecen en la misma posición, es posible marcar el ángulo de fase y descartarlos en el procesamiento digital de los datos. También es importante identificar las fuentes de ruido. El ruido generado por equipos eléctricos es fácil de identificar. El procesamiento de los datos puede ignorar aquellos pulsos que tienen la misma forma.

Distribución de Weibull

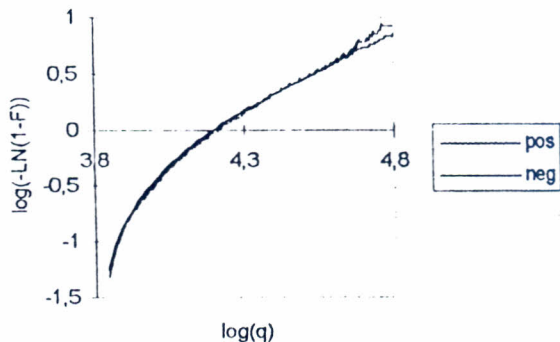


figura 4

4.3 Ensayo destructivo

Aprovechando el inminente rebobinado de dos máquinas hidráulicas de 32 MW, 13.8 kV, 125 rpm, del año 1961, se realizaron ensayos de alta tensión continua y alterna de tipo destructivo. El objetivo de los ensayos consistió en comprobar que en máquinas con varios años de servicio (35), los valores de tensión a los que se someten durante el ensayo, son conservativos. Estos son perfectamente soportables por ellas y no ocasionan ningún riesgo adicional. Si una máquina falla durante un ensayo es porque su aislación se encuentra puntualmente o en forma generalizada, en malas condiciones. En consecuencia, es preferible que se produzca la falla durante el ensayo en lugar de que ocurra en servicio.

Para determinar el nivel de sobretensión que soportan estas máquinas se realizaron dos ensayos. Uno en corriente continua, hasta 2.5 veces la tensión de línea y otro en corriente alterna, en primera instancia, hasta la tensión de línea. Durante este ensayo, se midió los valores de t_g δ y descargas parciales.

Posteriormente, se elevó la tensión hasta 30 kV (valor de ensayo de recepción de máquina nueva) durante 1 minuto, sin que se produjera ninguna falla. Este ensayo se repitió en todas las fases, por separado. Inmediatamente, se siguió aumentando la tensión (en la fase I) hasta la aparición de perforación o contorneo. Esto se produjo al alcanzarse los 36 kV. En este valor, se produjo un contorneo a nivel de cabezas de bobina. Similarmente, en la fase II se produjo contorneo al llegar la tensión a 34 kV. En la fase III se produjeron descargas a 13 kV, concluyéndose que esta fase fue dañada durante los arcos ocurridos en los ensayos anteriores.

De estos resultados se concluye que en una aislación en buen estado, la tensión necesaria para producir defectos es muy superior a la aplicada durante las rutinas periódicas de ensayos. Para la misma máquina, la tensión máxima de ensayo en alterna es de 11 kV, equivalente a 0.8 de la tensión nominal.

Por otra parte, el tipo de defecto que se produjo fue a nivel de cabezas de bobina, sin que se perforen las barras. Aún, estos defectos son relativamente simples de solucionar, si aparecieran durante un ensayo.

Esto muestra los bajos riesgos que se corren por la aplicación de esta metodología de ensayos.

5. Conclusiones

Se han presentado una serie de técnicas de ensayo en alternadores que permiten determinar el estado de su aislación. Ninguna de estas técnicas por sí sola permite dar un diagnóstico, sólo el conjunto de resultados permite hacerlo.

El desarrollo de nuevas técnicas permite hacer una evaluación más precisa del tipo de falla incipiente presente en una máquina.

Mediante esta tecnología es posible estimar la vida residual de alternadores, basándose en la degradación de los aislantes.

Es importante la realización de un programa de ensayos no destructivos periódico para poder identificar tendencias en la degradación de la aislación. Esto también permite la reducción de salidas de servicio no planeadas y la renovación del bobinado en el momento óptimo desde el punto de vista económico. Esto se está aplicando en los alternadores de UTE permitiéndole a los responsables tomar decisiones más rentables.

Referencias

1. IEEE std. 43-1974
2. Informe EDF ref: PA/AAI/LL
3. IEEE std. 95-1977
4. Norma ASTM 382-75
5. "Ensayos para el mantenimiento de máquinas eléctricas basados en técnicas digitales", Jorge Fernández, Daniel Slomovitz, Walter Mandl, CEDE 94, Buenos Aires.
6. "PD analysis of rotating machines", A. Contin, G. Rabach, IEEE Trans. Elect. Insul., v28, Feb 1993, pp. 1033-1042.
7. "Diagnostic testing og high-voltage machine insulation", J. S. Simons. IEE Proceedings, vol. 127, Pt.B, No. 3, May 1980.
8. "Digital techniques for partial discharge measurements in utility generators", Jorge Fernández, Walter Mandl, Daniel Slomovitz, Colloquium on Maintenance and Refurbishment of Utility Turbogenerators, Hydrogenerators and Large Motors, April 1997, Florence. Italy.