

Metodología e instrumentación para la medición de excentricidad en generadores hidroeléctricos en operación

J. Ramírez-Niño
O. de la Torre
J. Carrillo

Instituto de Investigaciones Eléctricas
Av. Palmira 113, Col. Palmira,
Cuernavaca, Morelos, CP 62490.
MÉXICO.

Correo electrónico: jtrn@iie.org.mx
hotv@iie.org.mx
jcorona@iie.org.mx

Recibido el 24 de octubre de 2008; aceptado el 4 de abril de 2009.

1. Resumen

Se analizan las técnicas actuales para la medición de excentricidad en grandes generadores hidráulicos. Se presenta una nueva técnica que considera la medición de campo magnético con bobinas sensoras instaladas en el estator. También se presentan los resultados del modelado electromagnético, así como mediciones de campo realizadas con la instrumentación propuesta. Finalmente, se discuten los resultados y las técnicas para la validación de los mismos, resaltándose la utilidad práctica del sistema de monitoreo propuesto.

Palabras clave: generadores hidroeléctricos, medición de excentricidad, bobinas exploradoras.

2. Abstract

In this paper, current techniques for measuring eccentricity in large Hydrogenerators are analyzed; a new technique is presented which it considers the measurement of magnetic field with sensors coils installed in the stator. It also presents the results of electromagnetic modelling, as well as field

measurements made with the instrumentation proposal. Finally, the results and its validation techniques are analysed, underlines the practical usefulness of monitoring system proposed.

Key words: Hydrogenerator, measuring eccentricity, sensors coils.

3. Introducción

Uno de los problemas que se presentan en los generadores hidroeléctricos de potencia es la variación de la magnitud del entrehierro debida a problemas mecánicos. Los generadores de potencia están sometidos a enormes esfuerzos mecánicos que producen deformaciones tanto del estator, como del rotor, terminando en el arrastre del rotor sobre el estator y en la destrucción parcial o total de este último.

Entonces, las variaciones en la magnitud del entrehierro pueden deberse al descentrado del rotor, a la pérdida de su circularidad o a la deformación del estator.

Este trabajo está enfocado a presentar, tanto la instrumentación para la medición del entrehierro, como la aplicación práctica de la técnica de medición propuesta. Con esta técnica se resuelve el problema de la detección oportuna de cualquier cambio en la magnitud del entrehierro, evitando con esto, fallas catastróficas que representan además costos de reparación elevados y pérdida de la energía generada mientras el generador está fuera de servicio.

Un generador de potencia de 100 MVA a 300 MVA fuera de servicio representa una pérdida diaria del orden de un millón de dólares, lo cual da una idea de la repercusión que tiene la detección oportuna de una falla incipiente. La información del estado del entrehierro es de particular importancia para los ingenieros responsables de la operación y mantenimiento de los generadores hidroeléctricos.

En el campo de la medición del entrehierro existen comercialmente diferentes técnicas. Por ejemplo, sensores capacitivos instalados en el estator, con los que se evalúa la cercanía del paso de los polos

sobre cada sensor. Este tipo de sistemas tienen el inconveniente de, además de ser muy costosos, emplear señales de excitación en el orden de los 100KHz a 4MHz que en ocasiones interfieren con los sistemas de medición de descargas parciales propios del generador. Además, las capacitancias parásitas del sensor respecto del estator, así como la propia del cableado de los sensores, van directamente en detrimento de la sensibilidad del equipo. Por otro lado, estos sistemas tienen una respuesta no-lineal y por tanto requieren de módulos para compensarla y dificultando su calibración [1].

Los sensores magnéticos en cambio, emplean bobinas exploradoras instaladas en el estator, siendo robustos, económicos y relativamente no invasivos.[2] No existe ninguna limitación práctica para la aplicación de este tipo de sensores y puede ser empleado tanto para generadores hidroeléctricos como para turbogeneradores siendo la técnica de análisis diferente. La evaluación del entrehierro en grandes máquinas se ha analizado desde diferentes puntos de vista y se han realizado modelos de elemento finito para estudiar su comportamiento.[3-10]

El empleo de sensores magnéticos para evaluar el entrehierro es una técnica conocida, sin embargo, en este trabajo se plantea un modelo magnético simplificado para el análisis matemático de su comportamiento, se presenta la instrumentación diseñada específicamente para el propósito y se documenta la técnica de análisis para interpretar los resultados obtenidos de mediciones de campo permitiendo monitorear la evolución de las deformaciones de las máquinas.

4.1. Sensores magnéticos

Los sensores magnéticos empleados en este trabajo, están conformados por bobinas en las cuales se induce un voltaje el cual es proporcional a la derivada del flujo magnético. El flujo magnético en el entrehierro puede ser de dos tipos radial o tangencial, con un comportamiento semejante en el tiempo. Los sensores magnéticos están constituidos por embobinados fijos, instalados en el estator y que la dirección del embobinado establece la dirección del flujo magnético medido. El área de los embobinados y el número de vueltas que los conforman, están relacionadas con la cantidad de flujo magnético que pasa por el sensor, lo que principalmente define la inductancia propia del sensor. Como criterio de diseño se establece mantener constante el factor "F", definido como resultado de multiplicar el área efectiva de la bobina sensora y el número de vueltas de la misma. Al mantener este factor constante se asegura que dos sensores con diferente geometría y con el mismo factor, sometidos a un mismo flujo magnético proporcionarán el mismo

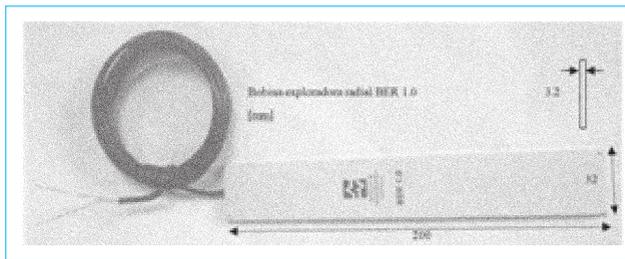


Fig. 1. Sensor magnético tipo radial para montaje en el estator.

voltaje inducido. Los sensores diseñados tienen un factor $F=30 \text{ N}\times\text{cm}^2$.

En la figura 1 se muestra un sensor magnético para la medición del flujo radial. Para la instalación de sensores en el estator es de particular importancia que tengan el mínimo espesor posible. La magnitud del entrehierro es de 1.4 a 3 cm en los generadores hidroeléctricos. Se debe evitar tapar los ductos de ventilación del estator para preservar su correcto comportamiento del diseño térmico. Es conveniente instalar los sensores en los dientes de la laminación y no en las cuñas, dado que éstas eventualmente se retiran durante el reacondicionado del generador o al reemplazar bobinas dañadas.

Otro tipo de sensores empleados son bobinas que enlazan el estator, de tal forma que abraza una porción del flujo principal con una sola espira, llamado sensor de núcleo, aportando información del entrehierro en forma semejante. Ver Figura 2.

Los sensores magnéticos son instalados por parejas en oposición y en forma simétrica alrededor del estator, de tal forma que en condiciones de simetría perfecta, el voltaje inducido en cada sensor es de igual magnitud. El número de

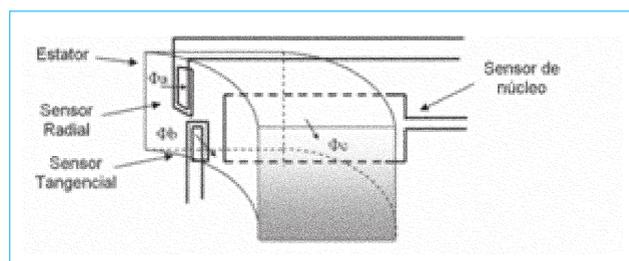


Fig. 2. Diagrama esquemático de los sensores magnéticos radial y tangencial sobre el estator, y el de núcleo que miden el flujo magnético, y respectivamente.

sensores alrededor del estator establece el detalle con el que se mide la deformación del estator y pueden ser cuatro o de preferencia seis. Entre mayor es el diámetro interno del estator, mayor número de sensores es requerido.

4.2 Instrumentación electrónica

El equipo de medición empleado fue diseñado y fabricado específicamente para esta aplicación. Está conformado por un sistema de adquisición de datos que considera siete microcontroladores, seis de los cuales adquieren y digitalizan el comportamiento de las señales y un maestro que se encarga de coordinar la adquisición y la comunicación con el módulo de comunicaciones. El módulo de comunicaciones es encuestado a través de una red Ethernet por una aplicación que se encuentra en el Centro de Diagnóstico de Generadores. El diagrama a bloque del sistema de adquisición de datos se muestra en la Figura 3.

Los canales analógicos tienen una impedancia de entrada de $10K\Omega$, cuentan con un filtro paso bajas de segundo orden que corta en 3Hz y una de ganancia ajustada para cubrir el 80% del rango dinámico del conversor analógico digital. Se emplea la frecuencia de corte baja con el propósito de realizar la integración del voltaje inducido en los sensores (a 60 Hz) y obtener directamente una señal proporcional al flujo magnético en cada sensor. Los microcontroladores realizan la conversión analógico digital muestreando a 2.5kHz y almacenan la información localmente hasta que el controlador maestro la solicita. La conversión A/D inicia cuando el controlador maestro recibe la instrucción de realizarla o tiene la opción de

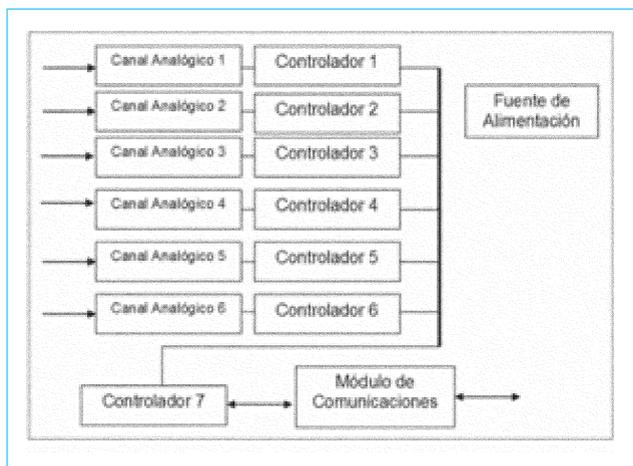


Fig. 3. Diagrama de bloques del sistemas de adquisición.

iniciarse cuando alguna de las señales analógicas alcanza un nivel de alarma predeterminado. El controlador maestro almacena un código de identificación del equipo y los factores de calibración independientes para cada canal. El equipo de medición se comunica con una aplicación remota a través del módulo de comunicaciones Ethernet.

Un programa desarrollado en lenguaje gráfico controla la adquisición periódica de datos. A cada medición se le incorpora el llamado "Time stamp" construyéndose una base de datos que permite relacionar los eventos en el tiempo con cambios en la forma de onda.

Además, un visor gráfico permite visualizar tanto la forma de onda, como los componentes espectrales de las señales medidas. Finalmente, es posible visualizar la tendencia en el tiempo de diferentes características de las señales como algún armónico específico o el valor "RMS" por ejemplo.

Para que las señales representen correctamente el comportamiento mecánico del generador, es necesario que se guarden en memoria varias vueltas completas del rotor, siendo el tiempo de adquisición de información, una función del número de polos del generador.

4.3. Modelado de sensores

Para los sensores magnéticos, el modelo magnético empleado es el mostrado en la figura 4.

Donde V1 representa la intensidad de campo magnético producido por la corriente de excitación en el rotor girando y generando la frecuencia nominal. El voltaje V2 representa la intensidad de campo magnético contra electromotriz producido por la carga del generador, ambos expresados en

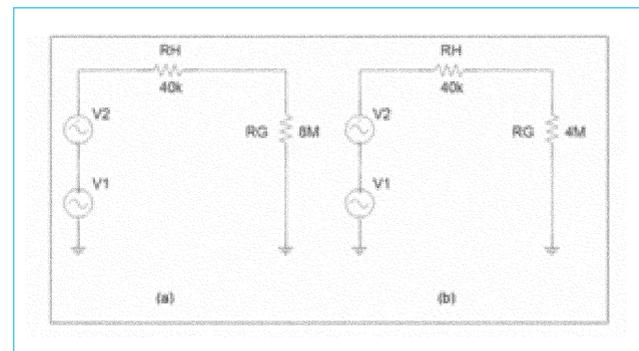


Fig. 4. Modelos del comportamiento del sensor magnético del entrehierro: a) de 2 cm y b) 1 cm .

Ampere-Vueltas. La R_H representa la reluctancia dentro de la laminación y R_G la reluctancia asociada al entrehierro. Se debe hacer notar que este modelo no considera la saturación del hierro.

En cualquier punto de operación del generador, el campo magnético resultante de la suma algebraica de los flujos V1 y V2, tanto en la laminación, como en el entrehierro establece el voltaje generado y es relativamente constante "C" dado que el generador siempre está interconectado al sistema eléctrico nacional.

Al existir excentricidad del rotor o pérdida de la circularidad, se presentan asimetrías en los voltajes inducidos en los diferentes embobinados y se generan corrientes parásitas circulantes entre los arreglos serie paralelos de los devanados del estator, provocándose entre otras cosas, vibración mecánica por los esfuerzos magnéticos des-balanceados.

Las reluctancias pueden ser calculadas por las siguientes expresiones:

$$R_H = \frac{l_H}{\mu_H A_h} \quad (1)$$

$$R_G = \frac{g}{\mu_0 A_g} \quad (2)$$

La μ_H (permeabilidad del acero) es varios órdenes de magnitud mayor que μ_0 (permeabilidad del aire) y por tanto $R_G \ll R_H$ resultando que el flujo magnético depende directamente de la magnitud del entrehierro.

Dado que el voltaje inducido en cada sensor es proporcional a la derivada del flujo, si se asume un flujo magnético senoidal con una frecuencia constante, la expresión del voltaje inducido es la siguiente:

$$V_s = |\dot{\phi}| \omega \quad (3)$$

$$\phi = \frac{V_s}{\omega} \quad (4)$$

Donde ϕ es la magnitud del flujo magnético y ω es la frecuencia angular.

En el modelo de la figura 4 la corriente representa el flujo magnético que es función principalmente de la reluctancia del entrehierro R_G . En la figura 4(a) y 4(b) se muestra el circuito equivalente que modela el comportamiento del flujo magnético para un entrehierro de 2 y 1 centímetro respectivamente.

Despejando de la ecuación 2 la magnitud del entrehierro ("gap") y sustituyendo la ecuación 4 se tiene que:

$$g = \frac{C [(\mu) \phi A_g \omega]}{V_s} \quad (5)$$

Donde la magnitud del entrehierro es función de un numerador formado por constantes y en el denominador está el voltaje presente en cada sensor. El numerador puede ser calculado usando los parámetros geométricos de los sensores considerando una velocidad de rotación constante.

4.4. Análisis de excentricidad

El análisis de la excentricidad se refiere al procesamiento de las formas de onda registradas por la instrumentación. La intención de este análisis es el obtener tanto la excentricidad estática que representa el movimiento del centro de giro del rotor o desplazamientos y deformaciones del estator, como la excentricidad dinámica que representa la pérdida de circularidad del rotor.

El análisis propuesto considera la medición y el análisis de tendencia de las diferencias en valores máximos de la magnitud del conjunto de sensores (seis sensores) colocados por parejas a 180° alrededor del estator. Al emplear seis sensores se tendrán tres diferencias, cada una de ellas asociada a una dirección. Con esta medición se obtiene el comportamiento de la excentricidad estática en el tiempo.

La excentricidad dinámica, también se obtienen del valor absoluto de las diferencias de los valores pico de cada paso polar sobre cada sensor. Para obtener un perfil de comportamiento del entrehierro es necesario tener una señal de sincronización de giro del rotor para establecer con precisión la localización de los desperfectos o pérdida de circularidad del rotor.

La consideración principal en el modelado del comportamiento de los sensores magnéticos es que el voltaje generado es constante. En realidad este voltaje varía por diversas razones (regulación del voltaje de sistema interconectado nacional) en forma cíclica diaria, la variación es de alrededor del 5%. La variación de voltaje debe considerarse como un error en la medición del entrehierro. Si se tiene el registro del voltaje generado, entonces este error puede reducirse y la medición sólo queda sujeta al error producido por la relación señal/ruido a la entrada de la instrumentación o al aportado por la digitalización a 10 bits.

4.5. Resultados obtenidos y su discusión

Se realizaron mediciones del flujo magnético, a través de la integración del voltaje inducido en las bobinas exploradoras, en la superficie (dirección tangencial y radial) del estator y los

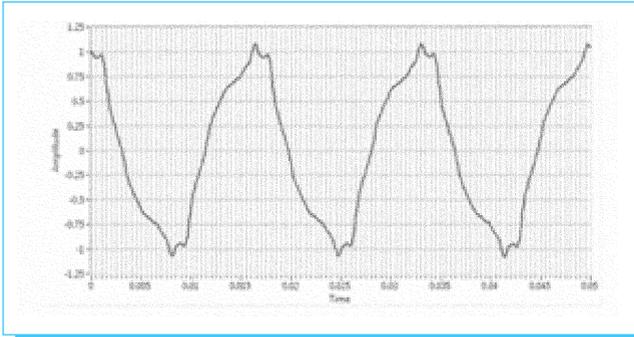


Fig. 5a. Formas de onda del flujo magnético de los seis sensores de núcleo de uno de los generadores instrumentados.

resultados se muestran en la Figura 5. Las crestas y valles máximos corresponden al paso de cada cara polar en las bobinas sensoras. Las asimetrías se deben a la forma de los polos, a la fuerza contra-electromotriz y al factor de potencia con el que opere la máquina.

El flujo magnético medido a través de sensores de núcleo y la disposición física de los sensores alrededor del estator se muestran en la Figura 6. La forma de onda del flujo magnético es casi senoidal y cada cresta y valle corresponde al paso de cada uno de los 64 polos que tiene la máquina sobre cada sensor.

Al aplicar la ecuación 5, se obtiene la magnitud del entrehierro, a partir de los valores máximos del flujo magnético mostrados en la Figura 6, se obtienen los valores calculados del entrehierro para cada polo de la máquina.

Con la información del entrehierro se realizan dos tipos de análisis; el primero analiza el comportamiento del paso de cada uno de los polos en forma individual cuando el rotor gira una

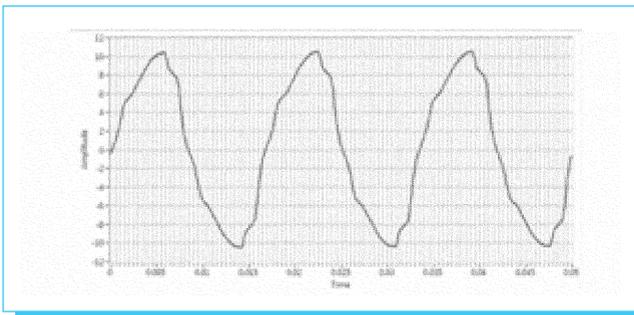


Fig. 5b. Flujo magnético medido, en unidades arbitrarias, con bobinas exploradores instaladas en el estator en la estator radial.

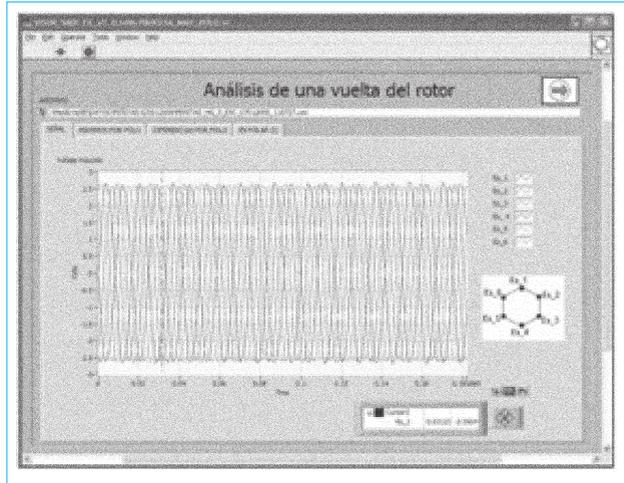


Fig. 6. Formas de onda del flujo magnético de los seis sensores de núcleo de uno de los generadores instrumentados.

vuelta completa. Con este análisis se obtiene información de la circularidad del rotor. El segundo tipo de análisis está enfocado a analizar el comportamiento del entrehierro en el tiempo, y permite determinar la evolución de las deformaciones tanto del rotor como del estator.

La magnitud del entrehierro en cada polo se muestra en la Figura 7 y corresponde al primer tipo de análisis. En general se observa una variación de un milímetro alrededor de los 15.5 mm en la magnitud del entrehierro. La línea amarilla

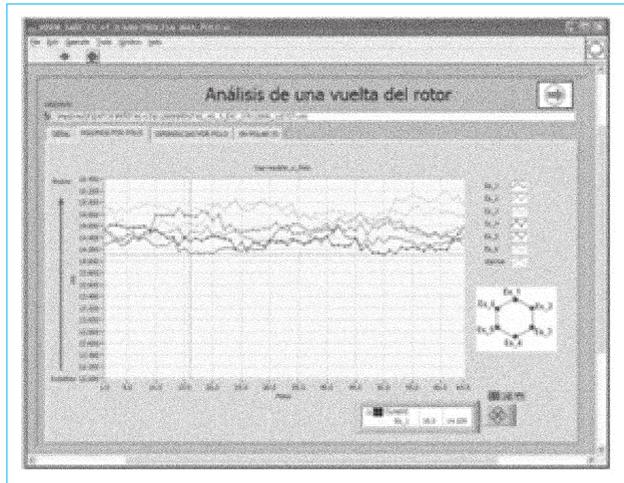


Fig. 7. Comportamiento del enrehierro del generador calculado a partir de los valores máximos de flujo magnético, al girar una vuelta del rotor.

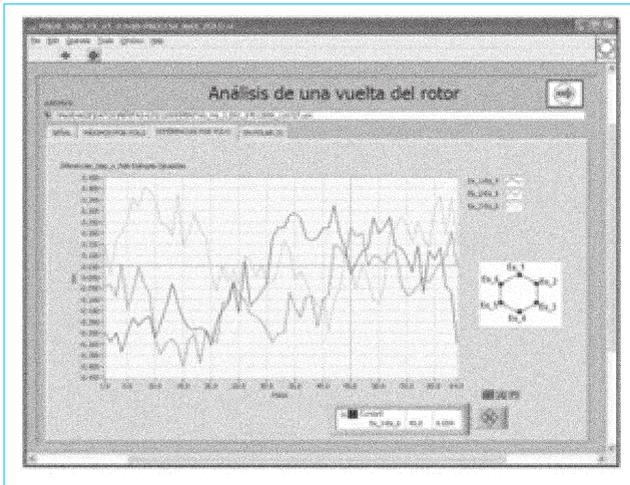


Fig. 8. Diferencia en la magnitud del entrehierro entre sensores ubicados a 180° alrededor del estator.

mostrada en el valor de 12 mm corresponde al umbral de alarma, por lo que cualquier valor menor de 12 mm, que permanezca por tres vueltas de rotor disparará la alarma.

En la Figura 8 se presenta la diferencia en la magnitud del entrehierro entre sensores ubicados a 180° alrededor y por tanto son solamente tres señales. Otra forma de visualizar este comportamiento es representándolo en forma polar, dado que cada pareja de sensores están asociados a cierto ángulo del estator. Lo anterior se muestra en la figura 9.

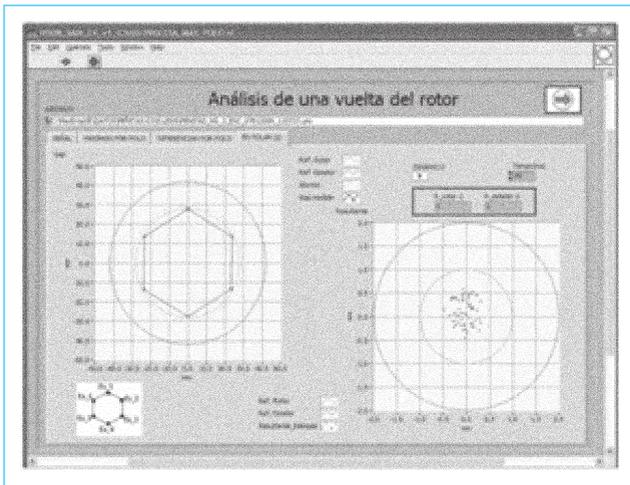


Fig. 9. Comportamiento del entrehierro en forma polar, en el diagrama del lado izquierdo se muestra el entrehierro completo y a la derecha, la s posibles variaciones del centro, el análisis es por una vuelta completa del rotor.

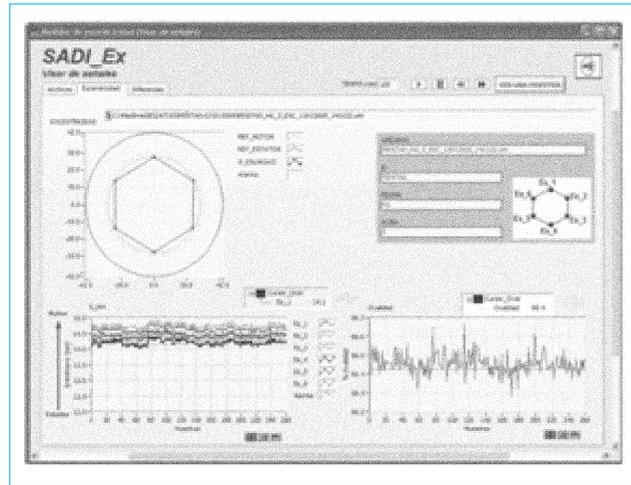


Fig. 10. Análisis de tendencia considerando 260 muestras tomadas cada 20 minutos.

En el segundo tipo de análisis, se estudia el comportamiento de las mediciones realizadas cada 20 minutos, ya sea por día ó por mes. Para facilitar el análisis, se desarrolló una aplicación que presenta en forma secuencial (como película) el comportamiento en el tiempo del entrehierro medido por sensor, Figura 10, ó por la diferencia entre sensores ubicados a 108° alrededor del estator, Figura 11.

5. Conclusiones

El empleo de sensores magnéticos es una técnica económica que aporta información confiable para determinar el comportamiento

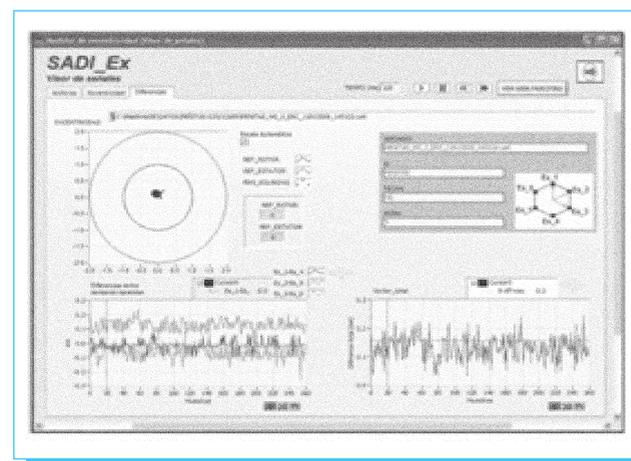


Fig. 11. Análisis de tendencia considerando 260 muestras tomadas cada 20 minutos de las diferencias del entrehierro entre sensores ubicados a 180° alrededor del estator.

del entrehierro. Permite establecer el comportamiento de la excentricidad y circularidad de rotores y estatores en operación. Con esta técnica se ha supervisado el comportamiento de cuatro generadores con antecedentes de fallas por rozamiento del rotor con el estator.

Los generadores son de 100 MVA a 13.8 kV y pertenecen a una central hidroeléctrica del Sistema Grijalva de la CFE. No se ha detectado ningún comportamiento anormal, indicativo de alguna falla en evolución, sin embargo, la instrumentación es capaz de observar deformaciones menores a 1 mm en los entrehierros. Los sistemas de monitoreo actuales permiten conocer el comportamiento de las variables importantes de los equipos eléctricos de potencia y detectar fallas incipientes en evolución.

Agradecimientos

Agradecemos a la Gerencia de Ingeniería Eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad el financiamiento de este desarrollo y las facilidades para realizar la instalación y puesta en marcha del sistema de medición de excentricidad.

6. Referencias

- [1] "Systeme de mesure D'entrefer" Vibro-Meter Inc. Longueuil, Quebec, Canada, Décembre 1990.
- [2] Jean-Jacques Simond, Mai Tu Xuan, Roland Wetter, "An Innovative Inductive Air-Gap Monitoring System for Large Low Speed Hydro-Generators, Tests in Operation", 24th Symposium on Hydraulic Machinery and Systems October 27-31, 2008, Foz Do Iguassu.
- [3] Carlos Azuaje, and Alexander Millan, "Stator Deformation of Large Hydrogenerators and Its Effects on the Machines", 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela.
- [4] Karlsson, Martin, Aidanpää, Jan-Olov, Perers, Richard, Leijon, Mats "Rotor Dynamic Analysis of an Eccentric Hydropower Generator With Damper Winding for Reactive Load", Journal of Applied Mechanics; Nov2007, Vol. 74 Issue 6, p1178-1186.
- [5] Pillai, K. P. P., Nair, Achuthsankar S., Bindu, G. R., "Unbalanced Magnetic Pull in Train-Lighting Brushless Alternators With Static Eccentricity", ; Jan2008, Vol. 57 Issue 1, p120-126.
- [6] Olivier Chadebec, Viet Phuong Bui, Pierre Granjon, Laure-Line Rouve, Nicolas Lebihan, Jean-Louis Coulomb, "Rotor fault detection of electrical machines by low frequency magnetic stray field analysis", SDEMPED 2005, International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives Vienna, Austria, September 2005, p. 7-9.
- [7] Al-Nuaim Nabil A., Toliyat, Hamid A., Method for Dynamic Simulation and detection of Dynamic Air-Gap Eccentricity in Synchronous Machines. IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, IEMDC, 1997, pMA2 5.1-5.3, Milwaukee, WI USA.
- [8] Bratolji T., Vrkljan P., Magnetic Force Created by Rotor Eccentricity in Electrical Machines. The Brown Boweri Review, Sep. 1967, Vol. 54, No. 9, p. 580-592.
- [9] D. Guo, F. Chu, D. Chen, The unbalanced magnetic pull and its effects on vibration in a three-phase generator with eccentric rotor, Journal of Sound and Vibration (2002) 254(2), 297-312.
- [10] Coulomb, J. L. 1983. A methodology for the determination of global electromechanical quantities from a finite element analysis and its application to the evaluation of magnetic forces, torques, and stiffness, IEEE Trans, on Magnetics, 1983, Vol. 19, No. 6, pp. 2514-2519.

Redalyc

Red de revistas científicas de
América Latina, el Caribe,
España y Portugal

www.redalyc.uaemex.mx