

Diagnóstico del aislamiento estático en motores de inducción mediante la medición del flujo axial de dispersión

*Fernando Villada**, *Diego A. Valencia**, *Nicolás Muñoz**

(Recibido el 13 de agosto de 2004. Aceptado el 23 de octubre de 2004)

Resumen

En este trabajo se muestra la importancia del mantenimiento predictivo, algunas técnicas de diagnóstico y los resultados de algunos ensayos experimentales que se obtuvieron a partir de la medición del flujo axial de dispersión. También se describen los diferentes tipos de bobinas diseñadas en nuestro laboratorio para capturar la señal del flujo axial y las consideraciones económicas para implementar esta técnica de diagnóstico.

----- *Palabras clave:* mantenimiento predictivo, técnicas de diagnóstico, flujo axial de dispersión, fallas en devanados estáticos, motores de inducción.

Stator fault diagnosis in induction motors using the leakage axial flux

Abstract

This work shows the importance of a predictive maintenance program, the diagnosis techniques and the experimental results obtained from the measurement of the leakage axial flux to diagnosis in order to detect stator winding faults in induction motors. The types of coils designed to capture the axial flux signal and economic considerations to implement this diagnosis technique are also described.

----- *Key words:* predictive maintenance, diagnosis techniques, axial leakage flux, stator winding faults, induction motors.

* Grupo de Investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica, GIMEL, Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. fvillada@udea.edu.co. diegovalencia@tutopia.com, nmg018@yahoo.com.

Introducción

El mantenimiento es la preservación de la vida útil de la maquinaria y por lo tanto constituye una parte integral de la actividad de la empresa ya que garantiza la disponibilidad de los activos productivos. Su filosofía se ha basado fundamentalmente en reparar cuando se presente el fallo (correctivo) o en revisiones periódicas de equipos (sistemático). Aunque con este último se han logrado resultados satisfactorios, su costo no ha sido el óptimo ya que en muchas ocasiones se realizan cambios innecesarios de repuestos con vida residual considerable.

Una buena gestión del mantenimiento no se refiere solamente a la reducción de costos, su finalidad es prevenir pérdidas del negocio por lucro cesante y evitar costos excesivos por fallas catastróficas. La estrategia óptima de mantenimiento es aquella donde la suma de costos directos e indirectos es minimizada. Para lograrlo es necesario preparar un plan que optimice las tres principales estrategias: mantenimiento correctivo, mantenimiento sistemático y mantenimiento predictivo.

El mantenimiento predictivo es una filosofía que ha sido ampliamente difundida en el sector productivo [1]. Se han desarrollado muchas técnicas de mantenimiento predictivo, pero las más aplicadas son las que involucran análisis de vibraciones, análisis espectral de corriente, emisiones térmicas, análisis de aceites y análisis del flujo axial de dispersión.

El análisis del flujo axial de dispersión [2] es una técnica de diagnóstico recientemente introducida para motores eléctricos de inducción la cual muestra ser promisoría ya que puede brindar información del nivel de cortocircuito entre las espiras del estator; esto último es una de las principales causas de falla en los motores de inducción debido a que en el arranque y parada de este tipo de máquinas se pueden generar sobretensiones transitorias que pueden contribuir con el degradamiento del aislamiento. Además cuando se cortocircuita una espira o grupo de espiras la corriente que circula debido a la fuerza electromotriz generada sólo será limitada por la impedancia de ellas y contribuirá

con el cortocircuito paulatino entre espiras vecinas que pueden ocasionar daños irreversibles. Por esta razón, estas fallas incipientes deben ser detectadas a tiempo, para evitar una catástrofe mayor en los devanados de la máquina.

En el presente trabajo se estudia el flujo axial de dispersión como un nuevo método de diagnóstico de fallas en los devanados estáticos de los motores de inducción. Se presentan las ecuaciones características que representan el flujo axial y los resultados de su medición a partir de diferentes prototipos de bobinas construidas para tal fin. Finalmente se muestran los resultados experimentales obtenidos a partir de las fallas de cortocircuito realizadas en el laboratorio.

Técnicas de diagnóstico utilizadas en mantenimiento predictivo

Análisis de vibraciones

La severidad de la vibración se determina por la amplitud, o el máximo movimiento de su velocidad pico y de su aceleración pico. El ángulo de fase a menudo se mide cuando se compara el movimiento de una pieza que está vibrando con respecto a una frecuencia fija. Las máquinas vibrarán a lo largo de un amplio espectro de frecuencias. El análisis de vibraciones en el monitoreo de condiciones se realiza comparando las características de las vibraciones de la operación actual con respecto a una línea de referencia, la cual se midió cuando se sabía que la máquina estaba operando normalmente. La selección de los parámetros específicos para medir depende principalmente de la frecuencia de vibración.

Por medio del análisis de las frecuencias de las vibraciones se pueden identificar problemas mecánicos tales como desequilibrios, desalineamientos, partes sueltas y defectos en los rodamientos.

Análisis de aceites

Cuando se analiza el aceite de una máquina, existen varias técnicas diferentes que pueden aplicarse para determinar la composición química

del aceite y buscar materiales extraños en él. Una de ellas es la ferrografía, que permite la detección de virutas magnéticas examinando partículas de desgaste con base de hierro en los aceites lubricantes; también se utiliza la cromatografía, que mide los cambios en las propiedades de los lubricantes, como la viscosidad, punto de inflamación, pH, contenido de agua y fracción insoluble, mediante la absorción y análisis selectivos.

El análisis espectrométrico del aceite mide la presencia y cantidad de contaminantes en el aceite mediante el espectrómetro de emisión atómica o de absorción atómica. Es útil para determinar la presencia no sólo de hierro, sino también de otros elementos metálicos y no metálicos, que pueden estar relacionados con la composición de las diversas partes de la máquina, como rodamientos, cojinetes, anillos de pistones, etc. Es útil cuando las partículas de desgaste están siendo generadas inicialmente en las primeras etapas de la falla, ya que dichas partículas son pequeñas.

Ensayos de aislamiento

Los ensayos de aislamiento [3] son pruebas periódicas realizadas para determinar la condición del aislamiento de motores y transformadores. Normalmente son pruebas de resistencia convencionales y reflejan la presencia de humedad y suciedad. Sin embargo, pueden ser requeridas otras pruebas físicas, químicas o de laboratorio para determinar la causa de algunas fallas poco usuales en el aislamiento.

Su aplicación más importante se tiene en el diagnóstico de fallas de aislamiento en motores y generadores eléctricos donde además de ensayos con tensión continua, se realizan pruebas de sobretensión, ondas de choque, tangente delta y descargas parciales.

Análisis térmico

La temperatura es un indicador de fuentes de calor indeseables en una máquina. Bajo condiciones normales, el calor emitido tiene correspondencia directa con la potencia transmitida a través del

equipo, que es proporcional al cuadrado de la corriente. En máquinas eléctricas y mecánicas, la generación de calor es, con frecuencia, una señal anticipada de falla. La temperatura se mide usando sensores de contacto de punto como termopares o termistores, y técnicas de no contacto tales como el pirómetro infrarrojo. Una técnica flexible que permite el recorrido rápido de grandes áreas es la imagen infrarroja, que es ampliamente aplicada en distribución eléctrica para identificar y clasificar las fuentes posibles de calor en interruptores, paneles, barrajes, conexiones y aislamientos.

Análisis espectral de corriente

El análisis espectral de corriente [4-6] constituye un complemento para el diagnóstico mediante vibraciones ya que este último tiene limitaciones al detectar problemas tales como excentricidades en el entrehierro, barras rotas en los rotores y el aislamiento de los devanados de los motores de inducción causados por esfuerzos mecánicos, magnéticos o térmicos.

Las barras rotas en el rotor, que es la falla más fácil de detectar con el análisis espectral de corriente, generan dos campos magnéticos opuestos girando a las frecuencias $\pm sf$, donde s es el deslizamiento del motor y f la frecuencia de la línea. Estos campos originan bandas laterales de vibración alrededor de los primeros seis armónicos de la velocidad de rotación dadas por las frecuencias indicadas en la ecuación (1).

$$fb = [(1 - s)k/p \pm s]f \quad (1)$$

Donde fb es la frecuencia producida por las barras rotas; k es el índice armónico ($k=1, 2, 3, 4, 5$ y 6), p es el número de pares de polos del motor y s es el deslizamiento por unidad.

Otros autores [6], han mostrado que el análisis espectral de corriente también puede ser usado para diagnosticar desalineamiento; de acuerdo a sus resultados, las amplitudes de los armónicos con frecuencias $f - fr$, $f + fr$ y $f + 2fr$ son proporcionales al nivel de desalineamiento, donde fr es la velocidad del rotor en Hz.

El flujo axial de dispersión

¿Qué es el flujo axial de dispersión?

El flujo axial de dispersión es el flujo magnético que por inducción aparece en el eje, en la carcasa y en los alrededores de la máquina; por este motivo, es considerado como un flujo de pérdidas. Este flujo es producido por las corrientes que circulan por el estator y por el rotor y tiende a canalizarse por el eje de la máquina debido a que este último es generalmente fabricado con materiales ferromagnéticos como el hierro o aleaciones con alta permeabilidad o baja reluctancia con respecto al vacío, motivo por el cual el flujo magnético tiende a confinarse en el eje. En el flujo axial de dispersión, siempre se encuentran presentes diversas componentes armónicas de frecuencia no fundamental, y se debe a la inevitable asimetría de los circuitos eléctricos y magnéticos que aparecen por fabricación, transporte, instalación y uso de la máquina, además del uso de materiales no lineales, anisotrópicos y no uniformes que llevan al desbalance de las corrientes tanto en el rotor como en el estator; este desbalance se refleja en el espectro de frecuencia del flujo axial de dispersión. La magnitud de estas componentes armónicas tiende a aumentar a medida que aumenta la asimetría. La frecuencia fundamental que es la de alimentación de la red aparece en el espectro, además aparecen otras frecuencias que dependen de esta, del deslizamiento, de las

características de la máquina y de su estado. El flujo axial de dispersión puede ser captado indirectamente aprovechando la ley de inducción electromagnética de Faraday, mediante el uso de una bobina que enlace el eje del motor, de tal modo que capture las líneas de campo como se muestra en la figura 1.

Como el flujo axial de dispersión está presente en todo tipo de máquinas, en la bobina de captura siempre se induce una tensión proporcional al flujo que puede ser procesada y analizada en el laboratorio, y de este modo, realizar un diagnóstico del estado de la máquina. Esta señal se puede procesar mediante un analizador colector de datos o una tarjeta DSP utilizando el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT) [3, 7].

La señal del flujo captado contiene ciertas frecuencias características de cada fallo, de esta forma, cuando la amplitud de esas frecuencias aumenta o llega a niveles de alarma predeterminados según el tipo de máquina y de su capacidad, significa que hay un comportamiento anormal o fallo en la misma, el cual puede ser:

- Excentricidad estática o dinámica del entrehierro.
- Desalineamiento.
- Cortocircuito de las espiras del estator y rotor de la máquina, entre otras.

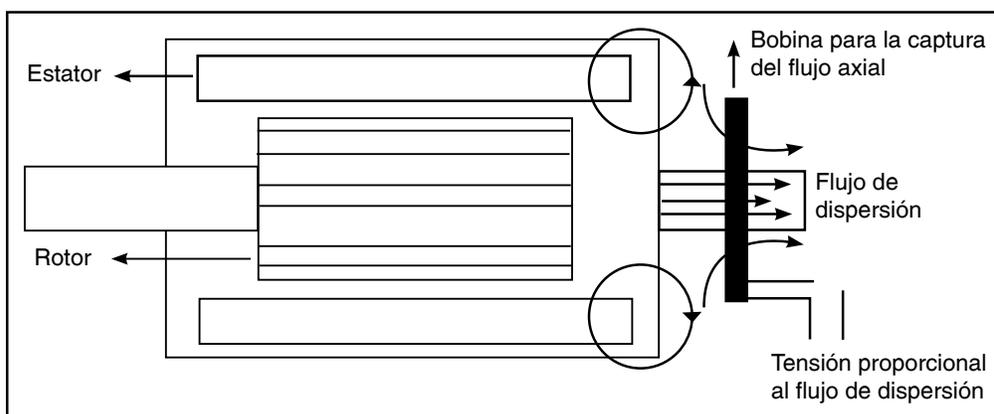


Figura 1 Líneas de flujo axial de dispersión

Frecuencias características del flujo axial de dispersión para asimetrías estáticas

Cuando se presenta un cortocircuito entre espiras del estator, la densidad de flujo magnético en el entrehierro cambia y su devanado se asemeja al de una bobina con paso acortado. Cuando en un máquina asincrónica se cambia el paso polar, las componentes armónicas de la fuerza magnetomotriz disminuyen sólo si son colocadas de forma adecuada [4]; de lo contrario, ellas se amplifican y esto es lo que sucede cuando se cortocircuitan las espiras del estator.

Por esta razón el flujo axial se afectará proporcionalmente al cambio de la densidad de flujo magnético en el entrehierro; este hecho lo convierte en un buen indicador del estado incipiente de falla ya que permite detectar el cortocircuito de pocas espiras, lo que no es posible con los métodos convencionales de monitoreo para diagnóstico de máquinas eléctricas.

De acuerdo con el análisis realizado por Penman [4], los armónicos de interés para el cortocircuito entre espiras del estator se deducen de la siguiente manera:

La densidad de flujo magnético en el entrehierro se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$B_s = B_1 \cdot \cos(\omega t + p \cdot \theta) + B_5 \cdot \cos(\omega t + 5 \cdot p \cdot \theta) - B_7 = \cos(\omega t - 7 + p \cdot \theta) + B_{11} \cdot \cos(\omega t + 11 \cdot p \cdot \theta) \dots \quad (2)$$

Donde:

B_i : Armónico espacial

Esta expresión tiene en cuenta los armónicos característicos del estator $6 \cdot K \pm 1$, donde K es un número natural.

Para referenciar la densidad de flujo magnético del estator con respecto al rotor se tiene:

$$\theta = \varphi + N_r \cdot t \quad (3)$$

En la figura 2 se muestra el ángulo θ entre el estator y rotor.

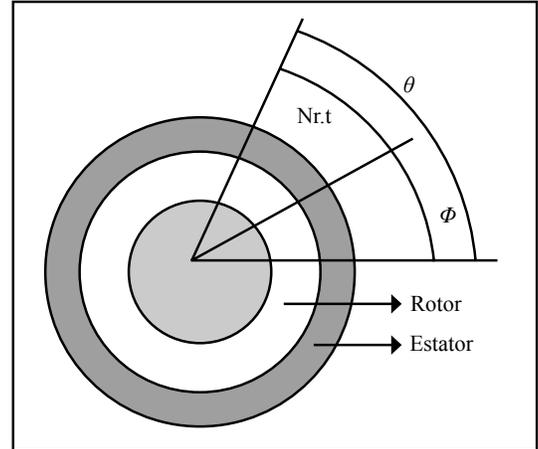


Figura 2 Relación espacial entre el estator y el rotor

Refiriendo la ecuación 2 con respecto al rotor y utilizando la ecuación (3), se tiene:

$$B_s f = 0.5 \cdot \sum B_n \cdot \cos[(1 \pm n \cdot (1-S) / p) \cdot \omega t \pm n \cdot \varphi], \quad n \neq 2 \cdot p \cdot m, \text{ para todo } m \quad (4)$$

Adicionando los armónicos de orden k correspondientes a la fuente de alimentación se tiene:

$$B_s f = 0.5 \cdot \sum B_n \cdot \cos[(k \pm n \cdot (1-S) / p) \cdot \omega t \pm n \cdot \varphi], \quad n \neq 2 \cdot p \cdot m, \text{ para todo } m \quad (5)$$

De este modo los armónicos de interés para el cortocircuito entre espiras en el flujo axial son:

$$[k \pm n \cdot (1 - S) / p] \cdot f \quad (6)$$

Donde f es la frecuencia fundamental de alimentación y n es un número natural. Una expresión más simple quedará entonces de la forma:

$$k \cdot f \pm n \cdot f_r \quad (7)$$

Donde f_r es la frecuencia de rotación del rotor.

Cuando el motor se encuentra sano, la amplitud de estos armónicos es despreciable o es muy pequeña con respecto a la amplitud de la frecuencia de alimentación. Cuando la amplitud de alguno de estos armónicos aumenta con respecto a un valor predeterminado, se puede pensar seriamente en una falla debido al cortocircuito del devanado del estator.

Medición del flujo axial de dispersión

Prototipos de bobina diseñados para la medición del flujo axial de dispersión

Uno de los principales objetivos de este trabajo es el diseño y construcción de un prototipo de bobina que permita la captura del flujo axial para su posterior medición. El objeto de la bobina es suministrar una diferencia de tensión proporcional al flujo axial; este último lleva consigo el contenido de armónicos que caracterizan el estado de la máquina. La señal de flujo axial debe ser transmitida al analizador de vibraciones SKF-MICROLOG CMVA55, a través del cual se analizarán los diferentes patrones de frecuencia asociados con el nivel de cortocircuito entre espiras del estator del motor de inducción.

Para el diseño de la bobina se tuvieron en cuenta varias particularidades que presenta el flujo axial en los motores en general, estas consideraciones son las siguientes:

- El flujo producido se canaliza a lo largo del eje en dirección axial del rotor.
- La bobina debe diseñarse de modo que pueda ubicarse en forma concéntrica al eje del rotor.
- La bobina debe permitir ser instalada sin necesidad de sacar el motor de servicio y brindar así mayor flexibilidad en los programas de mantenimiento predictivo.
- Al identificar el espectro de flujo axial, éste debe mostrar los armónicos característicos deducibles de las ecuaciones (6) y (7).
- Evitar la limitación de un sólo prototipo de bobina de tal modo que se logre obtener señales similares con diferentes prototipos y, de esta manera, reconfirmar la señal y evitar el riesgo de cometer errores en el análisis del espectro de flujo axial.

Considerando las anteriores características deseadas, decidimos realizar varios prototipos

de bobinas que cumplieran con los requisitos mínimos necesarios para la medición del flujo axial (véase referencia [8]).

El primer prototipo es un arrollamiento de alambre de ochenta vueltas, cuyo diámetro es de 30 cm, con resistencia de 32 Ω y con conectores que permiten el acople y desacople de la bobina. El segundo prototipo es un arrollamiento de alambre de veinte vueltas, con diámetro de 30 cm, con resistencia de 6,2 Ω , con conectores que permiten el acople y desacople de la bobina y con un amplificador de instrumentación con el fin de amplificar la señal proporcionada por la bobina pues ésta es muy débil para ser procesada en el laboratorio. El tercer prototipo de bobina es un arrollamiento de alambre de veinte vueltas, con diámetro de 16 cm, con resistencia de 5,2 Ω , con conectores que permiten el acople y desacople de la bobina. El cuarto prototipo de bobina es una bobina muy diferente a las anteriores, consistente en enrollar un alambre de cobre alrededor de un núcleo de acero al silicio de grano orientado ya que este último es un material ferromagnético que permite confinar el flujo axial para luego inducir una señal de tensión en el alambre de cobre; las características son: número de vueltas: 300; diámetro: 16 cm y resistencia: 6 Ω . Este último prototipo fue el que presentó mejores resultados durante los ensayos del laboratorio, por lo tanto se le adicionaron unos imanes permanentes que permitieran fijarlo al motor durante las mediciones como se muestra en la figura 3.

Ensayos experimentales

El montaje experimental consiste de un motor de inducción acoplado con un generador trifásico utilizado como carga tal como se muestra en la figura 4. Se realizaron cortocircuitos entre espiras del devanado del estator aprovechando las derivaciones que tiene el motor para tal fin; estos cortocircuitos deben ser controlados con resistencias limitadoras previamente calculadas para evitar la circulación de grandes corrientes en el devanado estático. Adicionalmente fueron sensadas la tensión y la corriente con el fin



Figura 3 Medición de flujo axial con el prototipo de mejores resultados

de prevenir la destrucción de la máquina y se utilizó un interruptor para poder realizar ensayos consecutivos bajo condiciones de carga y cortocircuito diferentes. Las fuentes de alimentación usadas fueron senoidal pura de 60 Hz y una señal proveniente de un variador de frecuencia tipo PWM.

La señal del flujo axial de dispersión, capturada mediante la bobina construida para tal fin, fue procesada en el colector de datos SKF-MICRO-LOG-CMVA55 que realiza la transformada rápida de Fourier y de esta forma permite obtener la magnitud de diferentes componentes armónicas; estos últimos contienen la información que permite diagnosticar el estado de los devanados del motor de inducción.

Ensayos experimentales alimentando el motor con una fuente senoidal pura

A continuación se muestran los resultados de los ensayos experimentales que se hicieron en un motor de inducción trifásico de 5 HP, 220 V, 10 A, 1674 rpm, 60 Hz, cuya alimentación es una fuente senoidal pura. Se aumentó progresivamente el cortocircuito entre espiras estáticas para comparar el espectro del flujo axial de dispersión y observar el comportamiento de las diferentes componentes armónicas ante la falla. La figura 5 muestra el espectro de flujo axial cuando el motor se encuentra sano (mejor condición); la figura 6 muestra el espectro de flujo axial cuando el

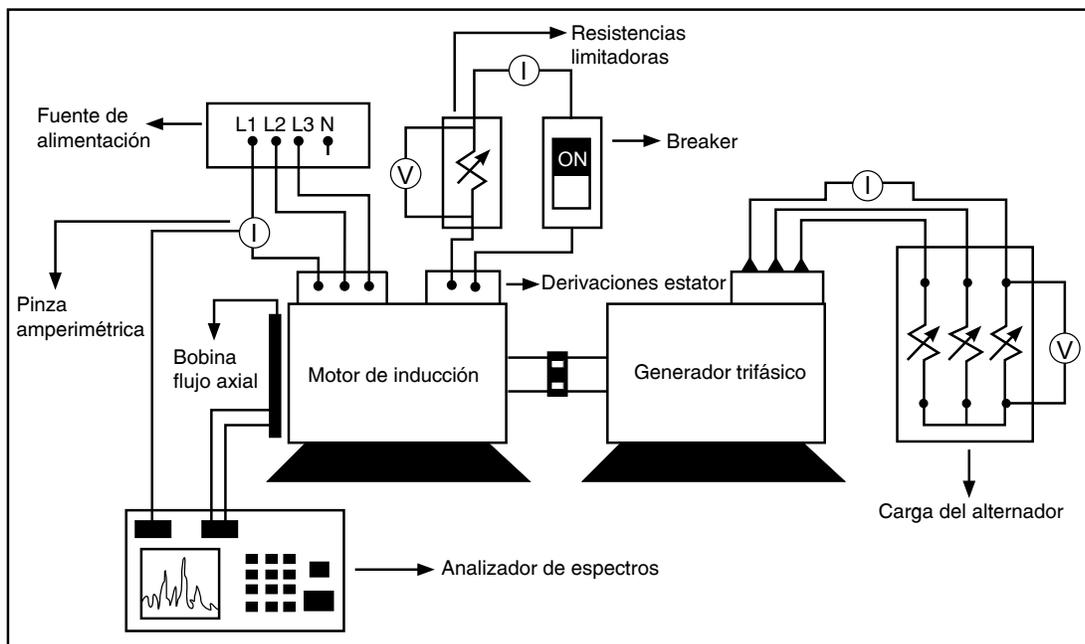


Figura 4 Montaje de laboratorio

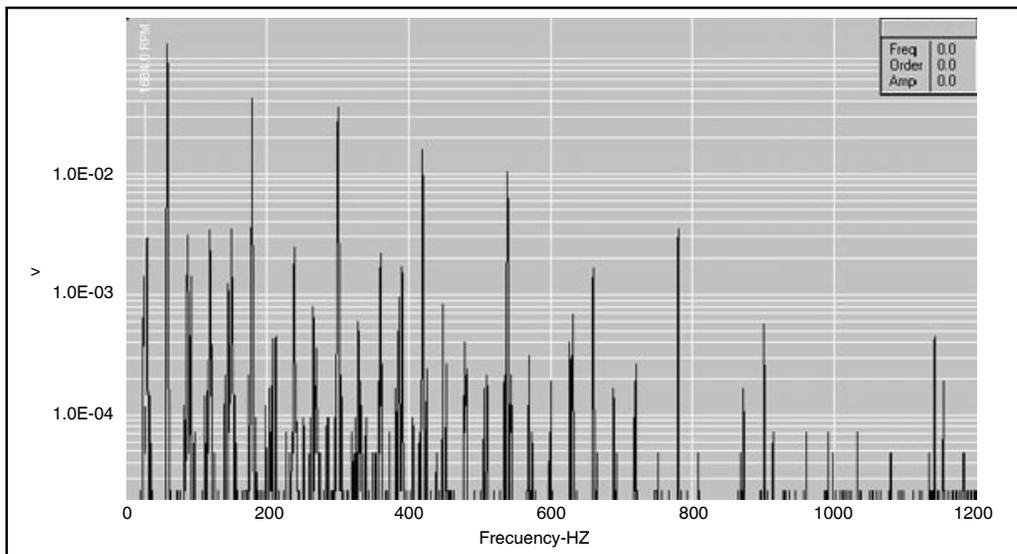


Figura 5 Espectro del flujo axial de dispersión con el motor sano

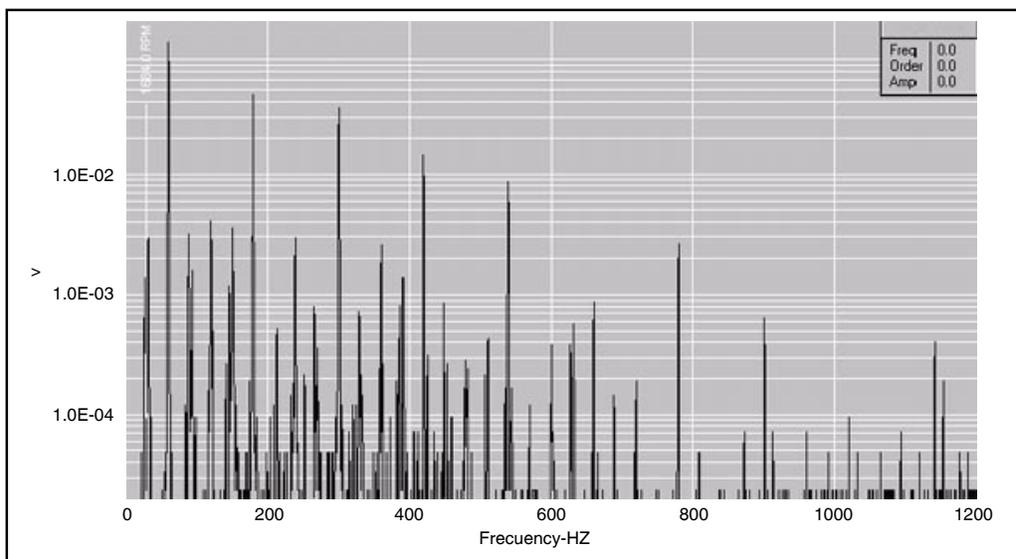


Figura 6 Espectro del flujo axial de dispersión con tres espiras en corto

motor tiene tres espiras en cortocircuito (peor condición); la figura 7 muestra el aumento de la amplitud de diversas componentes armónicas a medida que se incrementa la falla.

En la figura 7 se observa el aumento de la amplitud de algunas frecuencias del flujo axial de dispersión a medida que se incrementa el nivel

de falla. El aumento se puede decir que es representativo, puesto que la diferencia promedio entre el motor sano y con tres espiras en corto (limitado por resistencia) es de aproximadamente 0,5 mVrms. Es de esperarse que en el caso real donde el cortocircuito entre espiras es directo, el incremento de los componentes de frecuencia mostrados será mucho mayor permitiendo

predecir con mayor certeza el inicio de una falla incipiente.

Es importante notar que con estas pruebas, se confirma o se demuestra que las frecuencias más representativas para el monitoreo del flujo axial de dispersión son: $f - f_r$, $f + f_r$, $3f - f_r$, $2f + f_r$, $3f + f_r$, ya que crecen cuando se incrementa la falla, por lo tanto, se pueden utilizar para el diagnóstico de fallas estáticas en máquinas asincrónicas.

Ensayos experimentales alimentando el motor con un inversor PWM

En los últimos años se ha venido produciendo un constante aumento en la utilización de los

accionamientos de velocidad variable mediante inversores PWM para aplicaciones industriales. En general este tipo de equipos originan corrientes de entrada al motor con un elevado contenido de armónicos lo que hace más rico el espectro de frecuencias de las señales analizadas.

Para las pruebas se alimentó el motor de inducción del ensayo anterior con un convertidor PWM de seis pulsos con el objetivo de identificar las frecuencias más representativas en el diagnóstico mediante la medición del flujo axial de dispersión. La figura 8 muestra el espectro de flujo axial cuando el motor se encuentra sano (mejor condición); la figura 9 muestra el espectro de flujo axial cuando el motor tiene tres espiras

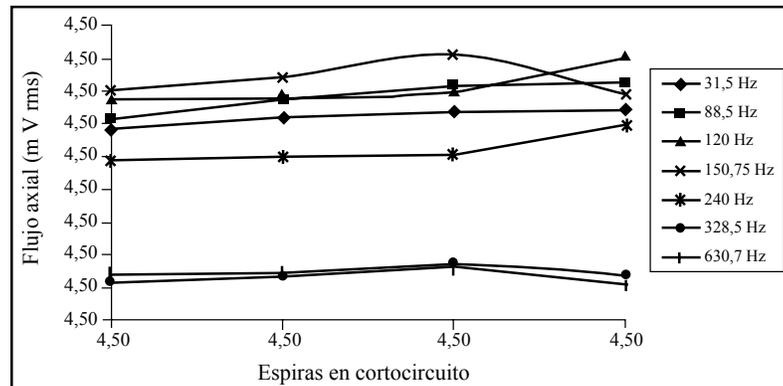


Figura 7 Componentes armónicas del flujo contra número de espiras en cortocircuito

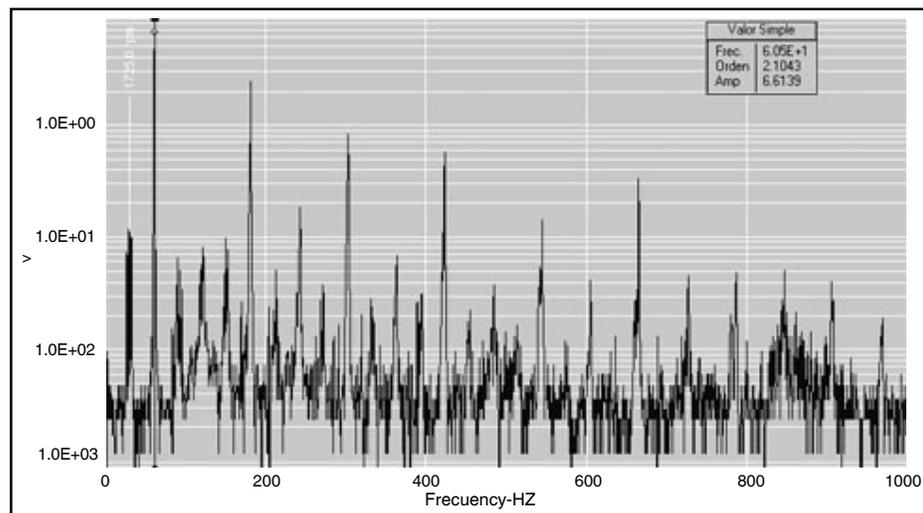


Figura 8 Espectro del flujo axial de dispersión con el motor sano

en cortocircuito (peor condición); las figuras 10 y 11 muestran el aumento de la amplitud de las componentes armónicas más representativas a medida que se incrementa la falla.

En general las curvas muestran al aumento de amplitud del flujo axial de dispersión con el empeoramiento de las condiciones de falla. El aumento se puede decir que es notorio, puesto que la diferencia promedio entre el motor sano

y tres espiras en cortocircuito es de aproximadamente 20 mVrms, mucho mayor inclusive que el obtenido cuando se alimentaba de una fuente senoidal.

Es importante notar que con estas pruebas, se confirma y se demuestra que las frecuencias más representativas para el monitoreo del flujo axial de dispersión, ya sea alimentando con una fuente senoidal pura o un variador de frecuencia son:

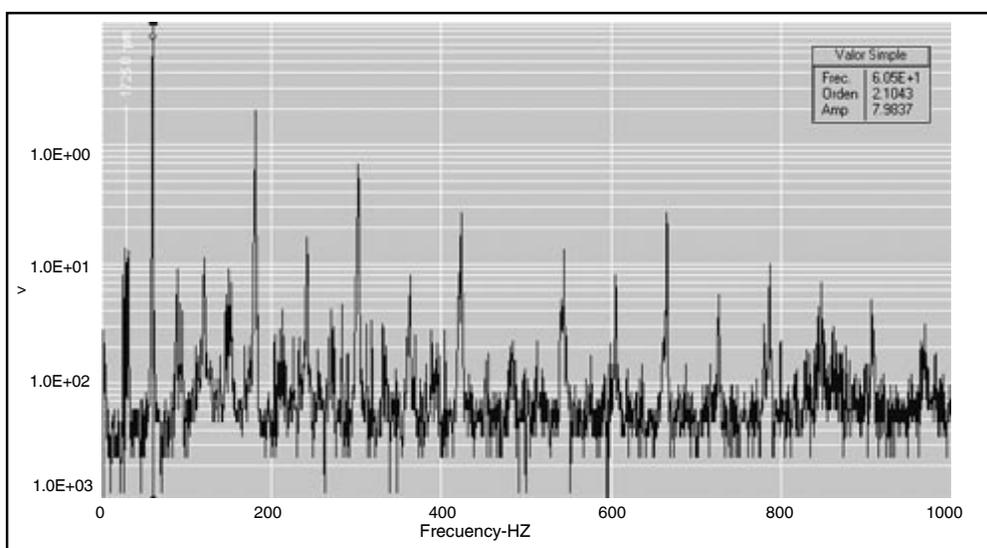


Figura 9 Espectro del flujo axial de dispersión con tres espiras en corto

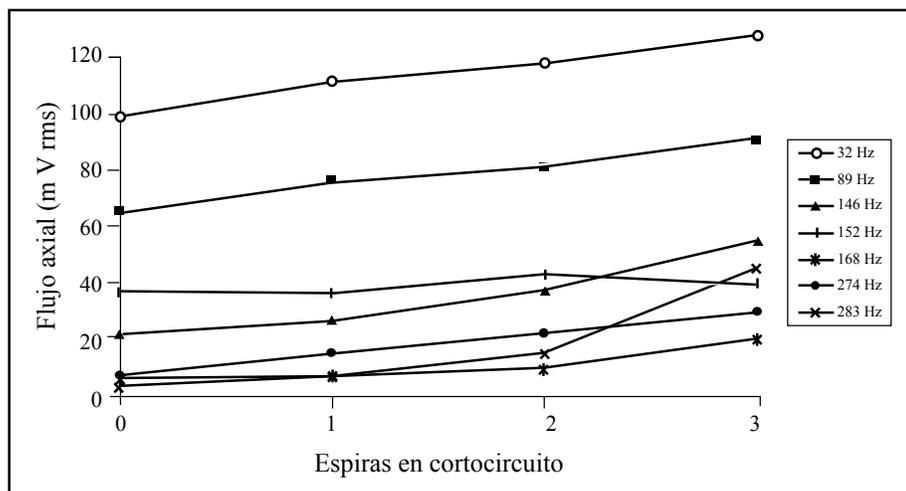


Figura 10 Componentes del flujo axial contra número de espiras en cortocircuito (0-300 Hz)

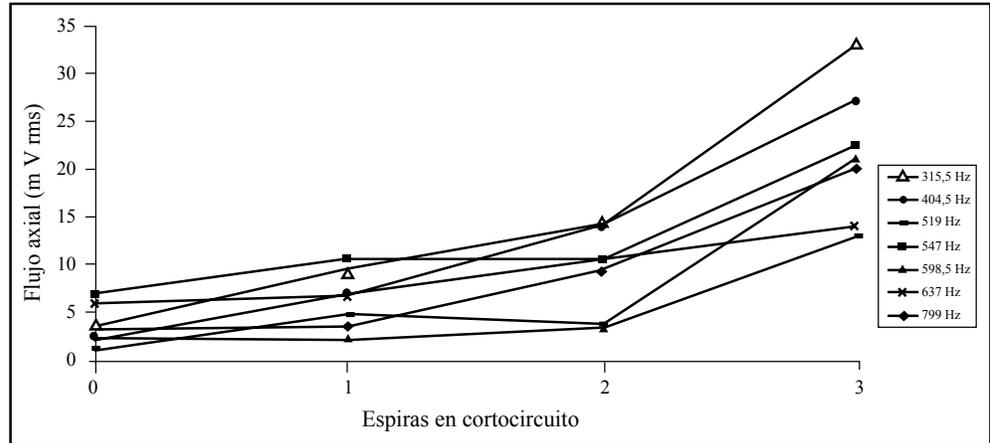


Figura 11 Componentes del flujo axial contra número de espiras en cortocircuito (300-800 Hz)

$f - f_r$, $f + f_r$, $3f - f_r$ y $3f + f_r$, ya que crecen cuando se incrementa la falla, por lo tanto, se pueden utilizar para el diagnóstico de fallas estáticas en máquinas asincrónicas.

Para el caso de alimentación con variador de frecuencia, se encontraron otras componentes de mayor frecuencia que serían igualmente importantes en un programa de mantenimiento predictivo ya que muestran incremento considerable a medida que empeora la condición de falla. Estas componentes armónicas se encontraron a las frecuencias: $13f - 16f_r$, $13f - 13f_r$, $13f - 9f_r$, $13f - 8f_r$, $13f - 5f_r$.

Otros componentes armónicos en la señal del flujo axial que también presentaron variaciones importantes y que también deben ser tenidos en cuenta se obtuvieron a las frecuencias: $3f - f_r$, $5f - f_r$, $7f - 5f_r$, $7f - 6f_r$, $7f - 13f_r$.

Conclusiones

- Para detectar asimetrías en el devanado estático de un motor de inducción es suficiente con observar el comportamiento de los armónicos característicos de la señal del flujo axial de dispersión; si las magnitudes de estos armónicos crecen se puede pensar seriamente que existe una falla en el aislamiento del estator y que progresivamente se está degradando

la máquina. En la mayoría de los casos, este tipo de fallas no es perceptible con métodos convencionales; esto puede ser nocivo para el sector industrial ya que se puede parar la producción y ocasionar pérdidas por lucro cesante.

- Se ha demostrado en forma práctica que el flujo axial de dispersión teóricamente puede ser usado para detectar distintas fallas producidas internamente en el motor. Caracterizar los espectros de frecuencia y detectar la sensibilidad ante estas fallas es un trabajo que se debe continuar para poder elaborar un método de mantenimiento predictivo confiable.
- Aunque los resultados obtenidos en esta investigación son alentadores, estos pueden ser mejores en el sector industrial, puesto que las fallas reales producidas en el estator no son limitadas por resistencia alguna, además, si se leen periódicamente espectros de flujo axial se logrará notar la evolución de la degradación paulatina en sus devanados.
- La obtención de un prototipo confiable se consiguió a unos costos despreciables comparado con el valor de cualquier sensor importado. Por lo tanto la implementación del programa de diagnóstico por flujo axial en una planta que ya disponga de un colector de datos para

vibraciones traería beneficios económicos considerables, pues la inversión adicional no superaría los US\$40 americanos. El costo del mejor prototipo desarrollado en nuestro laboratorio fue inferior a \$100.000 colombianos mientras que la bobina comercial de flujo axial marca SCI cuesta aproximadamente US\$500 americanos.

Referencias

1. Starr, A. y R. Wynne. "An introduction to condition based maintenance and its management". 2.º *Seminario Internacional de Sistemas Avanzados de Manufactura*. Colombia, 1996. pp. 124-134.
2. Cabanas, M. F.; Melero, M. G.; Orcajo, G. A.; Cano, J. M. y Solares, J. *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. 1.ª ed. Boixareu. 1998.
3. Salvador, C. "Ensayo de calidad de aislamiento de máquinas eléctricas rotativas". En: *Revista Mantenimiento*. Septiembre, 1995.
4. Penman, J.; Sedding, H. G.; Lloyd, B. A. y Flink, W. T. "Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors". En: *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 9. N.º 4. December, 1994.
5. Filippetti, F.; Franceschini, G. y Tassoni, C. "Neural networks aided on-line diagnostics of induction motor rotor faults". En: *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 31. N.º 4. July, 1995. pp 892-899.
6. Cabanas, M. F. *et al.* "Shaft misalignment diagnosis of induction motors using current spectral analysis: a theoretical approach". En: *The International Conference on Electrical Machines, ICEM96*. September, 1996. pp. 384-389.
7. Vas, Peter. *Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines*. ISBN 0-19-859375-9. Oxford Science Publications. 1993.
8. Valencia, D. y Muñoz, N. *El flujo axial de dispersión como indicador del estado del aislamiento de los devanados de los motores de inducción*. Monografía para optar al título de Ingeniero Electricista. Universidad de Antioquia. Agosto, 2003.
9. Walliser, R. F. y Landy, C. F. "Determination of interbar current effects in the detection of broken bars in squirrel cage induction motors". En: *IEEE Transaction on energy conversion*. Vol. 9. Marzo, 1994.
10. Villada, F.; Cadavid, D.; Muñoz, N.; Valencia, D. y Parra, D. "Fault Diagnosis in Induction Motors Fed by PWM Inverters". Publicación aprobada en: *IEEE Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*. Atlanta, GA, USA. 24-26 August, 2003.