

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE CONDICIÓN PARA MOTORES DE INDUCCIÓN

Hugo C. Caballero¹

José I. Huertas²

Resumen

Este artículo presenta una aplicación de la técnica de análisis espectral de corrientes del estator (MCSA) a la detección de daños en rodamientos y barras del rotor de motores eléctricos de inducción. Estos tipos de fallas modulan la densidad de flujo a través del entrehierro generando componentes de frecuencia en la corriente del estator, las cuales son predecibles y están asociadas con la frecuencia de suministro, la frecuencia de rotación del motor y parámetros geométricos de los componentes del motor. Se configuró un sistema de adquisición de datos y se desarrolló un programa que localiza las componentes espectrales asociadas a un posible defecto y estima la severidad del daño mediante el software de instrumentación virtual LabVIEW. Por último, se realizaron pruebas induciendo defectos sobre un motor y se evaluó la eficacia del programa para diagnosticar las fallas. El sistema demostró eficacia para detectar daños en barras en motores con al menos 80% de carga nominal. Sin embargo, se encontraron limitaciones de sensibilidad en el diagnóstico de daños en rodamientos.

1. INTRODUCCIÓN

Los motores eléctricos de inducción se usan en multitud de aplicaciones en la industria, siendo en algunas de ellas vital garantizar su correcto funcionamiento. Esto hace necesario una herramienta que permita conocer la condición del motor sin intervenir en la operación del equipo. Se ha encontrado que el 50% de los daños en los motores eléctricos de inducción obedecen a problemas en los rodamientos y el 10% a rotura de barras del rotor (Kliman, 1997). Respecto a esta última avería es importante señalar que aunque tenga un escaso porcentaje de incidencia, es una falla grave ya que sus consecuencias para la integridad global de la máquina suelen ser catastróficas. Kliman et al. (1988) probaron varias técnicas eléctricas de monitoreo en la detección de barras rotas en motores de inducción. Estas pruebas se basaron en las teorías de desempeño de motores con barras rotas desarrollados por Delaroi (1984). Posteriormente, Schoen et al. (1995) desarrollaron experimentos que probaron el uso de la técnica de análisis de corrientes del estator (MCSA) como herramienta alter-

na al análisis de vibraciones para detectar problemas en rodamientos en máquinas de inducción.

El Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes ha venido realizando actividades de investigación en el área de mantenimiento de maquinaria tendientes a adaptar tecnología para proveer a la industria local con herramientas de mantenimiento predictivo que permitan conocer en forma oportuna la condición de equipos industriales, tales como motores eléctricos de inducción. En este proyecto se emplea el MCSA como técnica no invasiva de detección de daños en rodamientos y barras en motores de inducción con rotor jaula de ardilla.

El objetivo de este trabajo es configurar un sistema de adquisición de datos y desarrollar un programa que, basado en las relaciones halladas en investigaciones recientes, permitan detectar la presencia de daños en las barras del rotor y pistas externa e interna y bolas de los rodamientos.

1 Estudiante de Maestría, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Los Andes.

2 Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Los Andes.

2. FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS DE DEFECTOS Y ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTES

Desde el punto de vista electromagnético las fallas más comunes que se presentan en un motor de inducción pueden ser divididas en dos categorías: aquellas que afectan la permeabilidad en el entrehierro (P_{ag}) y aquellas que afectan la fuerza magnetomotriz en el entrehierro (MMF).

Las variaciones en el entrehierro de la máquina son causadas por movimiento mecánico entre el rotor y el estator como por ejemplo, daño en cojinetes. En este caso se producen variaciones en la permeabilidad del entrehierro que ocasionan componentes espectrales en las corrientes del estator a frecuencias descritas por la ec. (1) (Schoen et al, 1995).

$$f_{bng} = f_e \pm k \cdot f_v \quad (1)$$

Donde $k = 1, 2, 3, \dots$ es el número de armónico de las componentes de frecuencias características f_v para cada tipo de defecto: daños en pista externa, pista interna y bolas. Estas componentes están dadas por las ec. 2, 3 y 4 (Schoen et al, 1995). La frecuencia de giro de la bola está determinada por la rotación de cada bola sobre su propio centro. Dado que un defecto sobre una bola hará contacto tanto con la pista externa como con la pista interna durante cada revolución, la frecuencia característica del defecto en una bola será el doble de la frecuencia de giro. Las frecuencias características de defecto en pista interna y pista externa son determinadas por el paso de cada bola sobre el defecto. Esto ocurre n veces durante cada vuelta sobre la pista.

$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{rm} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$f_o = \frac{n}{2} f_{rm} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \right] \quad (3)$$

$$f_i = \frac{n}{2} f_{rm} \left[1 + \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \right] \quad (4)$$

Las fallas en los rotores tipo jaula de ardilla suelen estar relacionadas con las altas temperaturas alcanzadas durante la operación y con las elevadas fuerzas centrífugas que soportan tanto barras como anillos de corto circuito, especialmente durante regímenes de funcionamiento transitorio. Algunos problemas pueden originarse desde el proceso de fabricación por defectos en

la fundición en el caso de rotores de aluminio o a juntas defectuosas en el caso de anillos de corto circuito soldados a barras de cobre. Los puntos donde se ubican los defectos, generan puntos de alta temperatura por alta resistencia eléctrica.

La presencia de barras rotas produce variaciones en el campo magnético del motor que se traduce en la aparición de dos series de armónicos de campo giratorios los cuales inducen fuerzas magnetomotrices, que finalmente dan lugar a la aparición de armónicos en la corriente de alimentación al motor. Dichas corrientes se presentan como componentes espectrales en las corrientes del estator a frecuencias descritas por la ec. (5) (Delaroi, 1984).

$$f_{brb} = f_e \left[k \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm s \right] \quad (5)$$

La valoración de la magnitud de la falla, se hace teniendo en cuenta las primeras componentes armónicas ($k/p = 1$) las cuales forman bandas laterales de la frecuencia fundamental y están descritas por la ec. (6a) y la ec. (6b), para las bandas laterales superior e inferior respectivamente:

$$f_e(1+2s) \quad (6.a)$$

$$f_e(1-2s) \quad (6.b)$$

Estudios realizados sobre una base de 300 motores de aplicación industrial, permitieron determinar la severidad de daños en barras (Tabla 1), teniendo en cuenta la diferencia entre la amplitud de las componentes correspondientes a la banda lateral inferior (LSB) y la amplitud de la componente fundamental f_e .

3. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos para el análisis espectral de corrientes, esquematizado en la Fig. 1, permite adquirir información de la señal de corriente y la velocidad de rotación del motor en forma simultánea. Adicionalmente se determina la carga del motor durante la prueba.

La medición de la corriente se realiza con una pinza amperimétrica de efecto hall, la cual toma la señal de una de las fases del motor. Esta señal análoga es luego llevada a un acondicionador donde es amplificada, y luego pasada por un filtro pasa baja, a una frecuencia de corte de 10 KHz, para remover las componentes indeseables de alta frecuencia las cuales producen *aliasing* de la señal muestreada.

DIFERENCIA DE AMPLITUD ENTRE BANDA LATERAL INFERIOR Y COMPONENTE FUNDAMENTAL (dB)	DIAGNÓSTICO
Diferencia ≥ 49	Motor sano
$46 \leq$ Diferencia < 49	Algún punto de alta resistencia
$44 \leq$ Diferencia < 46	Varios puntos de alta resistencia
$39 \leq$ Diferencia < 44	Muchos puntos de alta resistencia o una barra rota
$35 \leq$ Diferencia < 39	Al menos una barra rota
Diferencia < 35	Varias barras rotas

TABLA 1. CRITERIO DE DIAGNÓSTICO DE DAÑOS EN BARRAS DEL ROTOR (CABANAS ET AL, 1998)

Para medir la velocidad se utiliza un sensor de proximidad de corrientes de Eddy que registra el paso de una ranura sobre el eje y genera una onda cuya frecuencia corresponde a la frecuencia de rotación del motor. Esta señal pasa al acondicionador de señales donde se le aplica un filtro pasa baja con frecuencia de corte de 30 Hz.

La carga se mide con un torquímetro rotativo el cual registra el par suministrado por el motor utilizando el principio de la galga de deformación. La señal de torque es llevada al acondicionador donde es amplificada y filtrada tomando únicamente la componentes DC. Todas las señales análogas acondicionadas son tomadas por la tarjeta de adquisición de datos la cual realiza la conversión análogo-digital (A/D) y llevadas a través del puerto PCMCIA al computador portátil donde son procesadas.

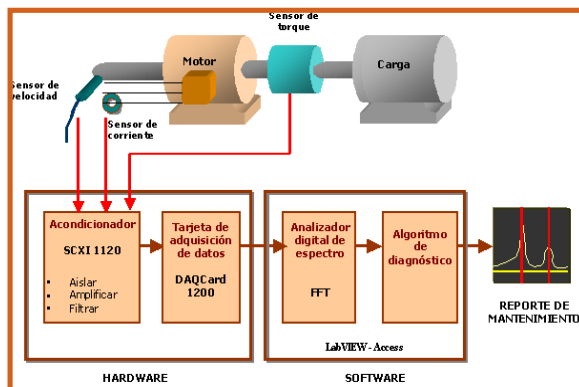


Fig. 1 Esquema del sistema de diagnóstico mediante análisis de corrientes (MCSA)

La rata de muestreo del sistema se fijó en 2000 muestras por segundo y el tamaño de muestra de 8192 lecturas para un tiempo de muestreo de 4.09 segundos. De esta forma los espectros tendrán una resolución de 0.24 Hz y una frecuencia de Nyquist de 1000 Hz. Este sistema combina en forma óptima una buena resolución de la frecuencia y sensibilidad a la señal. La primera característica es necesaria para distinguir las componentes del espectro con precisión y la segunda, para identificar las fallas en formación.

4 PROGRAMA DE DIAGNÓSTICO

La Fig. 2 muestra el diagrama de flujo del programa de diagnóstico. Este consta de rutinas de adquisición y análisis de datos en LabVIEW V5.0 enlazadas a una base de datos en Microsoft Access. La rutina de adquisición de datos toma los datos de la tarjeta de adquisición, procesa la señal de corriente de suministro de una

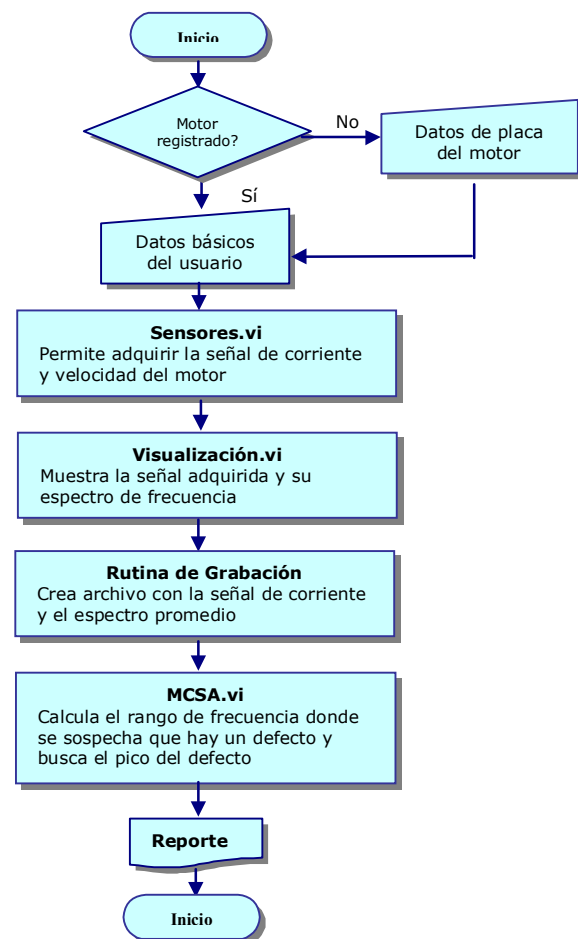


Fig. 2 Diagrama de flujo del programa de diagnóstico

de las fases del estator y obtiene su espectro en el dominio de la frecuencia mediante el algoritmo de transformada rápida de Fourier (FFT). Además calcula la velocidad instantánea de la máquina a partir de la señal del sensor de corrientes de Eddy. La base de datos permite almacenar las señales procesadas y la información concerniente al equipo y al usuario, para poder realizar el análisis posteriormente.

La rutina de análisis de LabVIEW es invocada desde Microsoft Access en el momento en que se desee realizar el diagnóstico. Esta rutina, basada en las ec. (1 a 6b), determina las frecuencias críticas asociadas a los distintos tipos de defectos, analizando las señales almacenadas y los datos del motor y de la configuración física de los rodamientos. Posteriormente, una subrutina se encarga de localizar los picos correspondientes a las frecuencias críticas en el espectro. Por último se determina la diferencia de amplitudes entre los picos asociados a frecuencias críticas y la componente fundamental (frecuencia de la red) con el fin de ver si estos valores están dentro de los rangos permisibles para motor sano o estimar la severidad de un posible daño (Tabla 1).

La información de todos los análisis es almacenada en la base de datos de modo que exista la posibilidad de realizar reportes de las pruebas hechas a un motor durante un tiempo dado, analizar la historia de un equipo y establecer tendencias de comportamiento.

5. PRUEBAS

Las pruebas tienen por objetivo verificar las predicciones establecidas por la teoría sobre fallas en rodamientos y barras en motores de inducción y evaluar la capacidad del programa de diagnóstico para identificar las componentes de frecuencia asociadas a dichos problemas. Para ello se adecuó el banco de pruebas que se muestra en la Fig. 3. Los ensayos se realizaron sobre un motor de inducción comercial con rotor jaula de ardilla de aluminio fundido. Las especificaciones se listan en la tabla 2.

Marca: KOLBACH	Modelo: 80-0395
Potencia: 1 HP	Voltaje: 220 V Delta
Amperaje: 3.8 A	F.P.: 0.72
Vel: 1720 RPM	FS: 1.15
Ip/In: 5	Aislamiento: B

TABLA 2. ESPECIFICACIONES DEL MOTOR DE PRUEBAS

El motor está acoplado a un freno eléctrico a través de una transmisión de poleas. El control del torque del freno se realiza mediante una unidad electrónica que regula la presión del disco a los elementos de frenado. La capacidad del freno es de 2 HP.



Fig. 3. Banco de pruebas acoplado a los sensores y al sistema de adquisición de datos

Se realizaron dos tipos de pruebas: barras rotas y rodamientos. Para las pruebas de barras rotas se tomó el rotor del motor y se le efectuó un orificio de 3 mm para romper una barra en el punto de contacto con el anillo de corto circuito. Se tomaron muestras de espectros de corriente con cargas desde 20% hasta 140% de la carga nominal en incrementos de 20%. La tasa de muestreo se mantuvo en 2000 muestras por segundo y el tamaño de muestra de 8192 lecturas para un tiempo de muestreo de 4,09 segundos. El procedimiento se repitió para 2, 3 y 4 barras rotas adyacentes.

Para realizar las pruebas sobre rodamientos, se tomó el rodamiento frontal del motor y se le efectuaron agujeros de 2, 3, 4 y 5 mm en las pistas externa e interna para simular una muesca sobre dichas pistas. El mismo procedimiento se repitió para el rodamiento posterior. Los daños en bolas se simulaban mediante el esmerilado de una bola del rodamiento. Se realizaron mediciones para dos niveles de daño (ligero y severo). Al igual que el caso de las barras, para estas pruebas se tomaron muestras de espectros de corriente con cargas desde 20% hasta 140% de la carga nominal en incrementos de 20%. La tasa de muestreo y el tamaño de muestra también se mantuvieron iguales al caso de las barras.

6. RESULTADOS

Las Fig. 4 y 5 presentan los resultados de las pruebas en barras del rotor. La Fig. 4 muestra los espectros

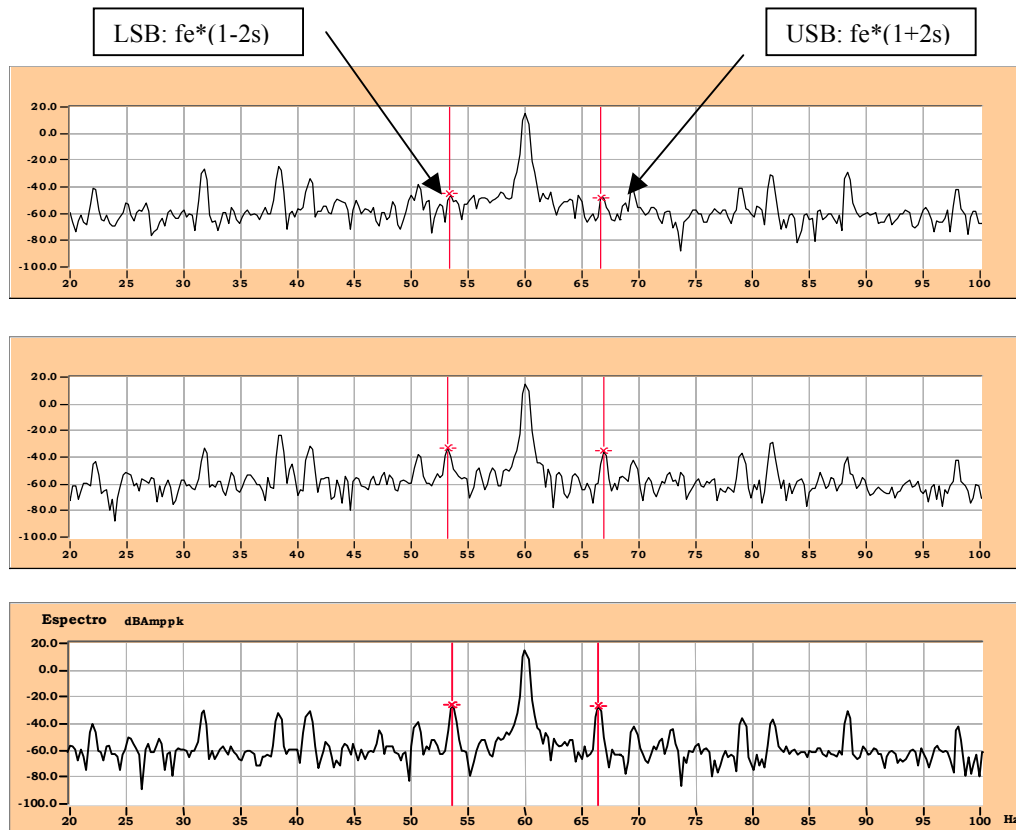


Fig. 4 Espectros de corriente para motor sano, rotor con una y dos barras rotas respectivamente

realizados por el programa para el caso específico de pruebas al 100% de carga con motor sano, 1 y 2 barras rotas respectivamente. Las frecuencias críticas correspondientes al primer armónico aparecen señaladas con cursores en el espectro. A estas frecuencias se les conoce como bandas laterales superior (USB) e inferior (LSB). Los espectros comprueban la presencia de picos a los valores teóricos de frecuencia predichos por la Ec. (5) y permiten apreciar claramente la evolución de

las bandas laterales características a medida que aumenta la severidad del daño.

La medición de la severidad del daño esta basada en la diferencia de amplitud de la LSB y la frecuencia de red (Tabla 1). La Fig. 5 muestra los valores de diferencia entre la amplitud de la frecuencia de red (60Hz) y la LSB para todas las pruebas desarrolladas para barras rotas a diferentes niveles de carga. Se observa que la diferencia de amplitud entre la frecuencia de red y la LSB disminuye al aumentar el porcentaje de carga, lo cual implica que el diagnóstico se ve influenciado por la cantidad de carga que tenga el motor. La rutina de diagnóstico mostró mayor acierto en la predicción de barras rotas para el motor operando al menos con un 80% de carga. En la gráfica correspondiente al caso de un motor sano, a diferencia de las demás, no se observa ninguna dependencia entre la diferencia de amplitud de la frecuencia de red y la LSB y el valor de la diferencia se mantiene por encima del 50 dB para cualquier nivel de carga.

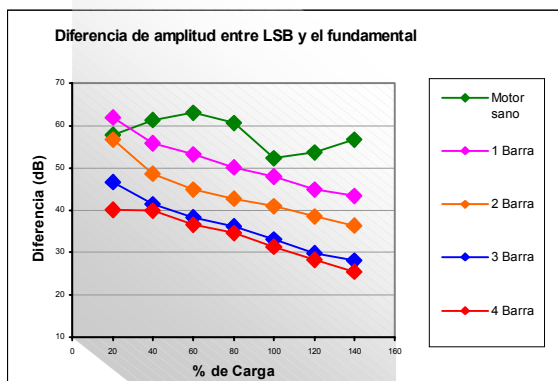


Fig. 5 Diferencia de amplitud entre la frecuencia de red (60Hz) y la banda lateral inferior para las pruebas sobre barras rotas a diferentes niveles de carga

Los resultados de pruebas en rodamientos aparecen en la Fig. 6 y 7. La Fig. 6 muestra los espectros de corriente del motor indicando las frecuencias asociadas a daños en pista externa (PE) y pista interna (PI) respectivamen-

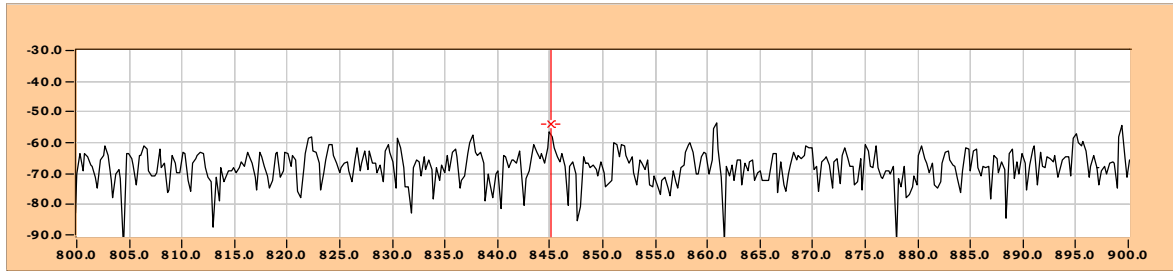


Fig. 6 Espectro de daño en PE y PI rodamiento trasero, el motor opera a 20% de carga. El cursor señala la componente armónica $m=4$

te, en el rodamiento trasero del motor operando a 20 % de carga. El cursor indica la ubicación de la componente espectral asociada al daño para el 4º armónico. La búsqueda de frecuencias críticas se realizó para 10 armónicos ($m=\pm 1, \dots, \pm 5$) y se observaron picos sólo en el cuarto y quinto armónicos para daños en pistas externa e interna.

La Fig. 7 muestra la diferencia entre las amplitudes de la frecuencia de red y la frecuencia crítica contra el porcentaje de carga para diferentes niveles de daño

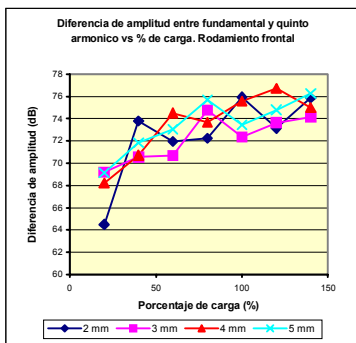


Fig. 7 Diferencia de amplitud en decibelios entre la frecuencia de red (60 Hz) y la frecuencia crítica para las pruebas sobre pista externa de rodamientos

Se observa que la amplitud de las componentes de frecuencia relacionadas con defectos en rodamientos son relativamente pequeñas comparadas con el resto de componentes del espectro de corrientes. Las componentes más grandes del espectro se presentan a múltiplos de la frecuencia de suministro y son causadas por saturación, distribución del devanado y el voltaje de suministro. Además se aprecia que los picos característicos de los daños son más evidentes con motor trabajando en vacío o con niveles de carga mínimos (20% de carga): a medida que se aumenta el porcentaje de carga, la diferencia entre las amplitudes de la frecuencia de red y la frecuencia de daño disminuye haciéndose imperceptible dentro del espectro (diferencias mayores de 75 dB).

7. CONCLUSIONES

Durante la simulación y posteriormente durante las pruebas se logró establecer varios factores críticos para el buen desempeño del programa en la adquisición y análisis de espectros:

- Rata de muestreo: para mantener íntegra la información de la señal de corriente y cumplir el teorema de Nyquist, la rata de muestreo debe ser al menos 5 veces mayor que la frecuencia de interés más alta.
- Tamaño de muestra: debe ser una potencia de 2, con el fin de que el programa pueda utilizar el algoritmo de FFT (Fast Fourier Transform), el cual es más rápido que el DFT (Discrete Fourier Transform).
- Resolución del espectro (Rata muestreo / No. muestras): Debe ser lo más pequeña posible para aumentar la sensibilidad y exactitud del programa.
- Número de muestras: El programa tiene la posibilidad de realizar los análisis con base en un espectro de potencia promedio de un número de muestras. Esto permite reducir el ruido y la aleatoriedad inherente al proceso de medición.
- Uso de ventanas: El programa permite el empleo de ventanas de suavización para reducir el fenómeno de fuga espectral propio de la reconstrucción de señales continuas a partir de muestras discretas.

Los resultados de las pruebas de barras demostraron que el sistema diagnostica acertadamente la presencia de barras rotas en motores de inducción, siempre y cuando se opere el equipo al menos al 80% de la carga nominal.

En el caso de daño en rodamientos las pruebas demostraron que, al contrario del caso de barras, es más favorable hacer la prueba a bajos niveles de carga. Esto se debe al efecto de amortiguamiento que produce la carga

mecánica sobre el movimiento del rotor en el entrehierro. También se pudo apreciar el hecho de que la componente de frecuencia donde el daño es más apreciable puede ser cualquier armónico de la frecuencia típica del elemento de rodamiento. Esto hace necesario revisar un buen número de armónicos para emitir un concepto válido y pone en evidencia las limitaciones de este medio de diagnóstico.

Se recomienda en este punto, realizar más pruebas sobre daños en cojinetes utilizando motores de mayor potencia y con diferentes configuraciones de rodamientos para establecer un patrón de comportamiento sobre un rango de potencia más acorde al uso industrial.

Este trabajo de tesis constituye el primer paso en el desarrollo de herramientas computacionales para diagnóstico de problemas en maquinaria realizado en la Universidad de los Andes. Es posible desarrollar herramientas similares de vibraciones y ruido, correlacionar resultados de pruebas y establecer métodos de diagnóstico más robustos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cabanas, M. Métodos no convencionales para la detección y diagnóstico precoz de fallos en motores eléctricos. 8ª reunión de grupos de investigación en Ingeniería Eléctrica. Cadiz, 1998
2. Delaroi, W., Broken Bar in Squirrel Cage Rotor and Induction Motor, Part 1: Description by Superimposed Fault Currents. Arch. fur Elektrotechnik, Vol.67, p. 91-99, 1984.
3. Finley, W. And Burke, R., Proper Specification and Installation of Induction Motors. En: IEEE Industry Applications Magazine. Denver. (Enero-Febrero 1997); p. 61.
4. Kliman, G. et al., Sensorless, Online Motor Diagnostics. En: IEEE Computer Applications in Power Magazine. Denver. Abril 1997; p. 39.
5. Kliman, G. et al., Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors. En: IEEE Transactions on Energy Conversión. Vol. 3, N° 4, Diciembre 1988; p. 873.
6. Krause, Analysis of Electric Machinery. New York. Mc-Graw Hill, 1986.
7. National instruments, Catalogo General, Austin, 1999
8. National instruments, LabVIEW V 5.0 User Manual, Austin 1999
9. Schoen, R. et all., Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring. En: IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 31, N° 6, Noviembre 1995; p. 1274.
10. Tavner, P. And Penman, J. Condition Monitoring of Electrical Machines. Letchworth, England: Jhon Wiley & Sons, 285 P, 1987

Lista de símbolos

BD diámetro de las bolas

f_b frecuencia característica de daños en bolas

f_{bng} frecuencia característica de daños en rodamientos

f_e frecuencia eléctrica de suministro

f_i frecuencia característica de daños en pista interna

f_o frecuencia característica de daños en pista externa

f_{rm} frecuencia de rotación del motor

k cualquier número entero

n número de bolas

P_{ag} permeabilidad en el entrehierro

PD diámetro nominal del cojinete

p número de pares de polos

s deslizamiento del motor por unidad

β ángulo de contacto entre pista y bolas del rodamiento