

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN EN LABVIEW DE UN SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS ROTÓRICAS EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS ESPECTRAL DE LA CORRIENTE DE ALIMENTACIÓN.

José Rivera ⁽¹⁾, Hólger Cevallos ⁽²⁾
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación ^{(1) (2)}
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) ^{(1) (2)}
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador
jose_bolivar47@hotmail.com ⁽¹⁾, hcevallos@espol.edu.ec ⁽²⁾

Resumen

El sistema implementado en este trabajo se lo diseñó e implementó en el programa LabVIEW y propone una alternativa para detectar barras rotas en motores de inducción a través de algoritmos de Análisis Espectral de Corrientes (MCSA).

El sistema acondiciona la señal de corriente de una de las fases de alimentación de un motor, la digitaliza y la envía a un computador. Se filtra la señal digitalmente para evitar ruido y después hallar el contenido espectral de la señal. En ella, se detecta picos en frecuencias específicas calculadas según el criterio establecido. Se analizan las amplitudes de dichos picos y según la diferencia entre ellas, se determina el estado del motor: excelente, bueno, moderado, daño medio, daño severo.

Al terminar la prueba, se presenta un diagnóstico del motor y una recomendación.

Palabras Claves: *motores de inducción, Análisis espectral, barras rotas.*

Abstract

The system implemented in this work was designed and implemented in the program LabVIEW, it proposes an alternative to detect broken bars in induction motors through algorithms of Motor Current Spectral Analysis (MCSA).

The system conditioning the current signal in a phase of the motor; it gets digitalized and sent to a computer. The signal is filtered digitally to avoid noise and then finding the spectral content of the signal. It detects peaks at specific frequencies calculated according to established criteria. It analyzes the amplitudes of these peaks and as the difference between them; it determines the condition of the induction motor: excellent, good, moderate, mild damage, severe damage.

After the test, it presents a diagnostic and a recommendation for the motor.

Keywords: *induction motor, Spectral analysis, broken bars.*

1. Introducción

El mantenimiento industrial se define como un conjunto de normas y técnicas establecidas para la conservación de la maquinaria e instalaciones de una planta industrial, para que proporcione mejor rendimiento en el mayor tiempo posible.

El mantenimiento ha sufrido transformaciones con el desarrollo tecnológico; a los inicios era visto como actividades correctivas para solucionar fallas. Las actividades de mantenimiento eran realizadas por los operarios de las máquinas; con el desarrollo de las máquinas se organiza los departamentos de mantenimiento no solo con el fin de solucionar fallas sino de prevenirlas, actuar antes que se produzca la falla.

Actualmente el mantenimiento busca aumentar y confiabilizar la producción; aparece el mantenimiento preventivo, el mantenimiento predictivo, el mantenimiento proactivo, la gestión de mantenimiento asistido por computador y el mantenimiento basado en la confiabilidad.

El mantenimiento asistido por computador es hoy en día una herramienta muy importante en la detección de todo tipo de fallas en los motores de inducción, en este trabajo nos enfocaremos a estudiar e implementar en el software LabView un método que nos permite determinar el grado de avería de un motor por fallas rotóricas, analizando una de las corrientes de fase.

2. Fundamento Teórico

Con el fin de justificar el efecto que las barras rotas provocan en un motor de inducción, se analizará el comportamiento de un motor en perfecto estado y luego uno con barras rotas. El análisis parte de la ecuación general que relaciona a la frecuencia del voltaje de alimentación al motor (f_1), con la velocidad sincrónica (N_s) del campo magnético giratorio, y el número de pares de polos de los devanados (p), y esta es:

$$f_1 = \frac{N_s * p}{120} \quad (1)$$

Para un motor sin barras rotas, únicamente se tiene la presencia de un campo magnético rotatorio en adelante que gira a velocidad sincrónica debido a que se tiene condiciones balanceadas o de perfecta simetría. Al poner el motor en funcionamiento, el rotor girará a una velocidad (N_r) menor que la velocidad sincrónica. A la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad de rotación del rotor se la denomina velocidad de deslizamiento ($N_s - N_r$), y expresada en “por unidad”

respecto de la velocidad sincrónica se representa como:

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2)$$

En la Figura 1 se ilustra como el rotor gira a una velocidad menor que la velocidad sincrónica y se puede visualizar el concepto de velocidad de deslizamiento. La frecuencia asociada a la velocidad de deslizamiento (f_2), que corresponde a la frecuencia de la corriente y voltaje inducidos en el rotor, se define como:

$$f_2 = \frac{(N_s - N_r) * p}{120}$$

$$f_2 = s * \frac{N_s * p}{120}$$

$$f_2 = s * f_1 \quad (3)$$

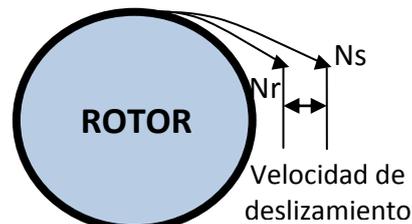


Figura 1.

Bajo un modo normal de operación, el campo magnético rotatorio producido por la corriente que circula a través de los devanados del rotor gira a una velocidad mayor que la velocidad del rotor para un instante dado, tal como se muestra en la Figura 2. Se puede demostrar que la velocidad del campo magnético rotatorio producida por la circulación de corriente en los devanados del rotor con respecto de los devanados del estator es la velocidad sincrónica, así:

$$N_r + N_2 = N_r + N_s - N_r = N_s \quad (4)$$

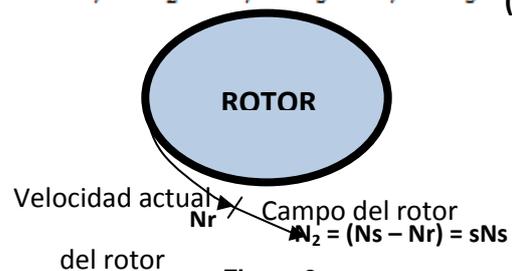


Figura 2.

Es así que con respecto de un observador estacionario en los devanados del estator, los campos magnéticos rotativos del estator y del rotor giran a velocidad sincrónica. El efecto de tener estos dos campos juntos es producir un torque permanente en la máquina.

Si el motor tiene barras rotas, crea condiciones no balanceadas o de asimetría que generan un campo magnético giratorio adicional en retraso, que gira a velocidad de deslizamiento, esto es a $-sN_s$ con respecto a la del rotor, tal como se muestra en la Figura 3. Con la presencia de este campo un observador estacionario en los devanados del estator observará un campo rotatorio a una velocidad denominada N_b que, análoga a la expresión 4, se define como:

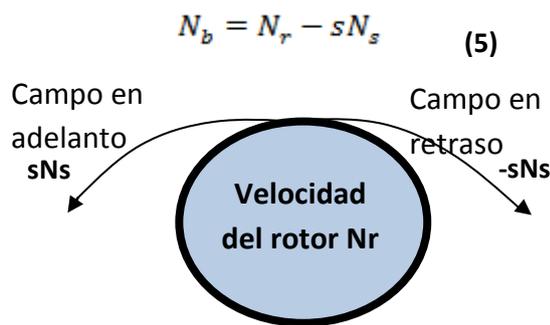


Figura 3.

Despejando de la expresión 2 la velocidad del rotor N_r , se tiene que:

$$N_r = N_s - sN_s \quad (6)$$

Remplazando la velocidad del rotor formulada en 6 en la expresión 5, se puede dejar a N_b únicamente en función de la velocidad sincrónica N_s y el deslizamiento s , así:

$$N_b = N_s - sN_s - sN_s$$

$$N_b = N_s - 2sN_s \quad \dots$$

Multiplicando ambos miembros de la ecuación 7 por el número de pares de polos p , y en base de la expresión 1, se puede formular a esta ecuación en términos de frecuencia, así:

$$N_b * p = N_s * p - 2sN_s * p$$

$$f_b = f_1 - 2sf_1$$

$$f_b = f_1(1 - 2s) \quad (8)$$

Como el campo magnético rotatorio de frecuencia f_b corta los bobinados del estator, se induce en ellos un voltaje y una corriente con la misma frecuencia del campo rotatorio, denominada f_{sb} , ya que corresponde a la frecuencia de la corriente que circula por los devanados estáticos, así:

$$f_{sb} = f_1(1 - 2s) \quad (9)$$

La expresión 9 quiere decir que bajo condiciones de asimetría, consecuencia de las barras rotas en un motor de inducción, existe la presencia de una banda lateral en $2sf_1$ por debajo de la frecuencia fundamental f_1 .

Por efecto de las barras rotas en el motor de inducción, se genera también una variación cíclica de la corriente, que da como resultado un torque y una velocidad oscilatorios al doble de la frecuencia de deslizamiento ($2sf_1$). Producto de esto, aparece una banda lateral a $2sf_1$ por sobre de la frecuencia de alimentación f_1 , descrita en 10. La banda lateral inferior por efecto de la velocidad de oscilación puede disminuir en su magnitud.

$$f_{sb} = f_1(1 + 2s) \quad (10)$$

En conclusión, tener barras rotas en el motor, da como resultado componentes de corriente que son inducidas en las bobinas del estator y que, por lo tanto, se ven reflejadas en la corriente de alimentación al motor a frecuencias dadas por 11, de donde se puede afirmar que la presencia de barras rotas origina bandas laterales ubicadas a frecuencias del doble de la frecuencia de deslizamiento ($2sf_1$) alrededor de la frecuencia fundamental f_1 .

$$f_{sb} = f_1(1 \pm 2s) \quad (11)$$

2.1 Rango de Diferencias de Amplitudes en Armónicos

Luego de varias experimentaciones realizadas en el laboratorio, con el banco de pruebas creado para este proyecto, el cual se mostrara en el capítulo posterior, se ha obtenido un resultado bastante fiable, que estipule un rango de diferencias de amplitudes en dB entre el armónico fundamental y el mayor de los armónicos laterales. La tabla que se verá a continuación, refleja este resultado y proporciona una guía muy segura para emitir diagnósticos sobre el

estado del rotor de un motor de inducción según esta diferencia.

Tabla 1. Estado del motor según la diferencia de amplitudes en dB's entre el armónico fundamental y el mayor de los armónicos laterales

ESTADO DEL MOTOR	
EXCELENTE	MAYOR A 50 dB's
BUENO	ENTRE 45 Y 50 dB's
MODERADO	ENTRE 40 Y 45 dB's
REVISAR	ENTRE 35 Y 40 dB's
NECESITA CAMBIO	ENTRE 30 Y 35 dB's
CAMBIAR DE URGENCIA	MENOR A 30 dB's

3. Diseño e Implementación de Hardware y Software

A continuación se describe las partes más importantes del diseño del software, la implementación de hardware y las herramientas utilizadas en el sistema de diagnóstico de barras rotas en el rotor mediante el análisis espectral de corrientes.

3.1. Software a utilizar

El sistema está desarrollado en LabView: Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. La idea principal es que LabView use diagramas de bloques por los cuales se genere y fluya la información. Además posee librerías específicas de análisis de señales, y adquisición de datos. La ejecución de los programas no los hace línea por línea sino basado en como fluyen los requerimientos de la información.

La versión que se utilizó para la implementación del sistema de detección de fallas es LabView 2010.



Figura 4. Programa LabView 2010

3.2 Motor

Se decidió utilizar el motor mostrado en la figura 5 con las características mencionadas en la tabla 2.

Tabla 2. Características del Motor utilizado en las pruebas

CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR UTILIZADO EN LAS PRUEBAS	
MARCA	SIEMENS
ALIMENTACIÓN	TRIFÁSICO
VOLTAJE NOMINAL	220 V
CORRIENTE NOMINAL	3,5 A
ROTOR	JAULA DE ARDILLA
FRECUENCIA	60 HZ
POTENCIA	1 HP
NUMERO DE POLOS	4
VELOCIDAD NOMINAL	1660 RPM



Figura 5. Motor utilizado en las pruebas

3.3 Transformador de corriente

Para la adquisición de la corriente del motor en nuestro sistema de detección de fallas rotóricas, se utilizó el transformador de corriente mostrado en la figura 3.4 con las siguientes características:

- Marca: Camsco
- Corriente en el primario: 30 A
- Corriente en el secundario: 5 A



Figura 6. Transformador de corriente utilizado en las pruebas

3.4 Mecanismo para regular la carga del motor

Debido a que las pruebas deben realizarse con carga en el eje del rotor, se diseñó y construyó un mecanismo mostrado en la figura 7; que consiste en un sistema de polea y banda que junto con unos resortes, aplican carga al motor dependiendo del requerimiento del usuario mediante una manivela, la cual al girar le aplica mayor ó menor tensión a los resortes y esta tensión a su vez es transmitida hacia la banda frenando la polea, provocando que el motor realice mayor ó menor esfuerzo, y aumente ó disminuya su consumo de corriente.



Figura 7. Mecanismo utilizado en la prueba para regular la carga en el eje del rotor.

3.5 Adquisición de Datos

Para adquirir los datos provenientes del secundario del transformador de corriente, se utilizó la NI

CompactDAQ-9174, mostrada en la figura 8, junto con el módulo NI 9227, mostrado en la figura 9, el cual posee las siguientes características:

- Posee 4 Entradas analógicas de 5 Arms cada una.
- Posee una resolución de 50 kS/seg/canal.
- Aislamiento entre canales de 250 Vrms.



Figura 8. NI CompactDAQ-9174 utilizada en las

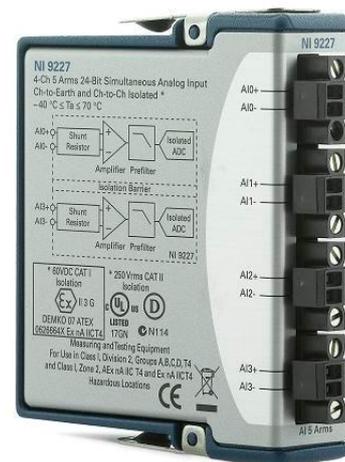


Figura 9. Módulo NI 9227 utilizado en las pruebas

3.7 Conexiones

Para adquirir la señal de corriente proveniente del secundario del transformador, utilizamos el canal 0 del módulo NI 9227 y se realizó el siguiente diagrama de conexiones mostrado en la figura 10.

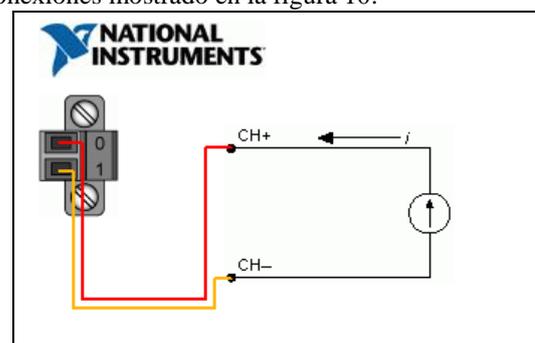


Figura 10. Diagrama de conexiones del secundario del transformador al módulo NI 9227

3.8 Análisis en frecuencia

Para la obtención del espectro de corriente del motor, se decidió utilizar la herramienta Power Spectrum de Signal Express de LabView, cuya figura es mostrada en la figura 11.

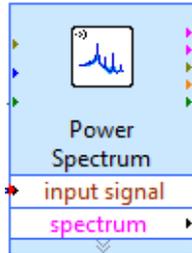


Figura 11. Implementación del espectro de corriente

3.9 Detección de picos en el espectro de corriente

Para la detección de los picos en el espectro de corriente se utilizó la herramienta Peak Search de Signal Express, la cual detecta picos en el espectro de corriente según el rango que se le asigne y nos entrega el valor del pico y la frecuencia en la cual se detectó el mismo, esta herramienta es mostrada en la figura 12.

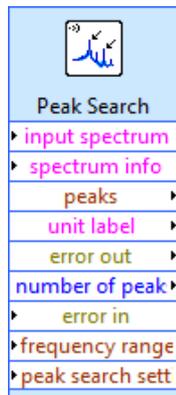


Figura 12. Implementación de la detección de picos en el espectro de corriente

3.10 Detección de la falla y diagnóstico

Como se trató anteriormente, la sección 2.4.2.1 da el criterio de detección de la falla según la tabla II.I. Una vez hallada la menor diferencia entre el pico de la fundamental y el pico de los armónicos laterales, este valor se ingresa a la función MathScript Node, la cual emite un diagnóstico del motor según el mismo. La implementación de esta función se muestra en la figura 13.

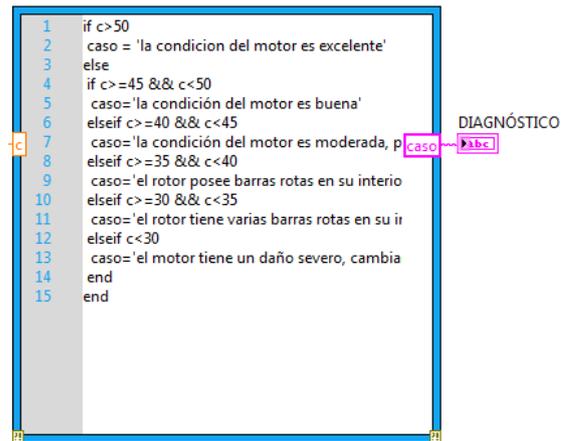


Figura 13. Implementación de detección de fallas

3.11 Panel frontal

El panel frontal es una interfaz que consta de cuatro paletas, cada una de ellas cumple una función dentro del sistema y están hechas para que sean amigables al usuario:

- Configuración
- Corriente en función del tiempo
- Espectro de corriente
- Resultado y diagnóstico

En la paleta configuración se ingresa por el usuario la frecuencia de red, los polos y las rpm del motor a ser diagnosticado; además posee un botón de reiniciar prueba y otro botón de stop.

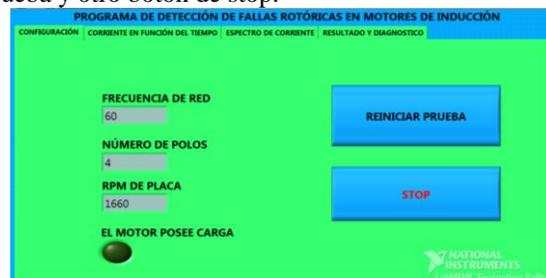


Figura 14. Pantalla configuración

En la paleta corriente en función del tiempo se muestra la corriente de alimentación del estator en función del tiempo, con la cual podemos observar el valor de la corriente de consumo del estator en ese instante.



Figura 15. Pantalla corriente en función del tiempo

En la pantalla “espectro de corriente” se muestra el cada vez que se presione el botón “reiniciar prueba” en la paleta “configuración”.



Figura 16. Pantalla espectro de corriente

La paleta resultado y diagnóstico es una de las más importantes y su apariencia se muestra en la figura 17.

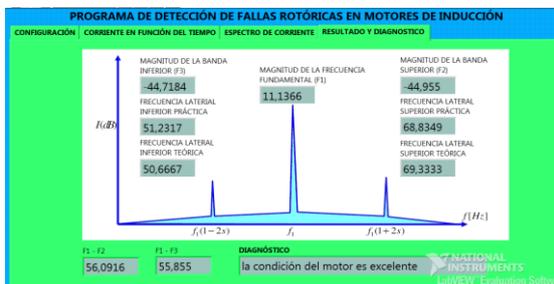


Figura 17. Pantalla resultado y diagnóstico

En esta pantalla se muestran los siguientes valores teóricos calculados con los datos ingresados en la pantalla configuración:

- Frecuencia lateral inferior teórica
- Frecuencia lateral superior teórica

También se muestran los siguientes valores prácticos tomados de la gráfica del espectro de corriente en la pantalla con el mismo nombre:

- Magnitud de la frecuencia fundamental en dB (F1)
- Magnitud de la banda superior en dB (F2)
- Magnitud de la banda inferior en dB (F3)
- Frecuencia lateral superior práctica
- Frecuencia lateral inferior práctica
- F1 - F2
- F1 - F3

Además de mostrarse también el diagnóstico que nuestro programa nos da con respecto al motor analizado.

4. Resultados

Para el efecto de este proyecto, se realizaron varias experimentaciones, para lo cual fue utilizado un motor de inducción jaula de ardilla, de pequeñas dimensiones y con características citadas en la tabla 2. Los resultados obtenidos experimentalmente, sirvieron para comprobar lo anteriormente estudiado en la teoría, y para determinar los criterios de diagnóstico

que posteriormente quedarán plasmados en el programa. El enfoque fue observar como se refleja en el espectro de corriente la presencia de una avería en el rotor, y para esto se tomo pruebas con diferentes niveles de carga, primero con el motor sano, luego se procedió a la rotura, una a una de las barras del motor, hasta llegar a 8 barras rotas.

4.1 Resultados Experimentales

Se realizaron pruebas con varios niveles de carga aplicada al motor, primero veremos los resultados obtenidos con un motor sano (sin barras rotas en el rotor).

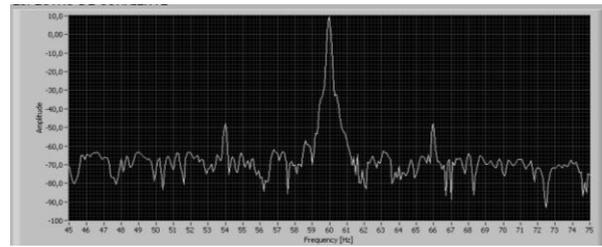


Figura 18. Espectro de corriente del motor sano con carga (3.1 A)

Con el motor en buen estado y sin barras rotas en el rotor se pueden apreciar 2 picos de corriente alrededor de la frecuencia fundamental pero de pequeña magnitud comparados con la fundamental, la diferencia en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 56.7 y 57.1 respectivamente. El diagnóstico del sistema nos dice que la condición del motor es excelente.

Luego de esto se procedió a romper una a una las barras del rotor y se realizaron pruebas con varios niveles de carga, ahora veamos los resultados obtenidos con 2 barras rotas.

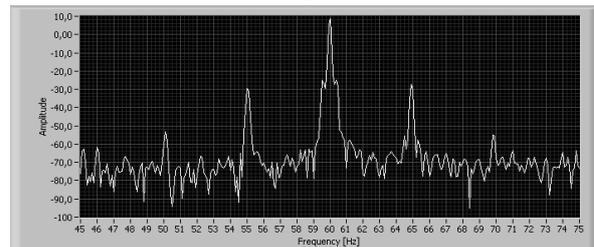


Figura 19. Espectro de corriente con 2 barras rotas con carga (2.9 A)

Con 2 barras rotas en el rotor se nota un crecimiento en la magnitud de los picos alrededor de la fundamental, además de unos picos de segundo orden de menor magnitud, la diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 35.8538 y 37.7679 respectivamente. El diagnóstico del sistema nos dice que el motor posee barras rotas en su interior.

Observemos los resultados ahora con un daño grave en el motor, en la figura 19 se muestra un espectro de corriente del motor con 5 barras rotas.

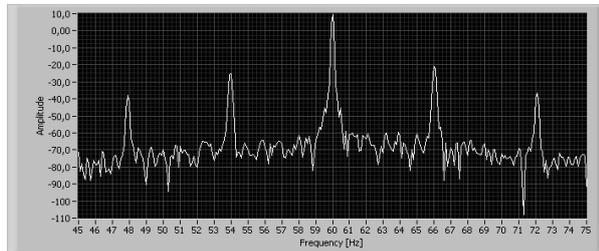


Figura 20. Espectro de corriente con 5 barras rotas con carga (3.1 A)

Con 5 barras rotas en el rotor, se aprecian más pronunciados los armónicos laterales de primer y de segundo orden, la diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 29.7466 y 33.6542 respectivamente. El diagnóstico del sistema nos dice que el motor tiene un daño severo, necesita cambio.

Conclusiones

1. Mientras más grande sea la avería del motor por rotura de sus barras en el rotor, la amplitud de los armónicos laterales relacionados con la falla es cada vez mayor, es decir, la diferencia en dB entre las magnitudes de la fundamental y los armónicos decrecerá.
2. A mayor sea la carga aplicada al motor, menor será la velocidad de giro del rotor y mayor su deslizamiento s , por lo tanto la distancia entre la fundamental y los armónicos laterales ($2sf$) será mayor. Por ello decimos que es más fácil diagnosticar un motor de inducción por fallas rotóricas cuando este tenga mayor carga aplicada, porque los armónicos se alejarán de la fundamental y será más fácil distinguirlos.
3. Con el mismo número de barras rotas y distintos niveles de carga, mientras mayor sea la carga, mayor será la corriente que circula por el rotor y la distorsión debido a la falla es más grande, dando como resultado una mayor amplitud de los armónicos.
4. Cuando el motor posee varias barras rotas en el rotor, el torque mecánico en el eje del rotor es cada vez menor, por lo que podemos concluir que si un motor posee este tipo de daño y no es diagnosticado a tiempo, colapsará tarde o temprano pudiendo ocasionar pérdidas por paros de producción en una industria.
5. Cuando el motor no posee barras rotas en su interior, la diferencia entre la fundamental y los armónicos laterales se mantiene entre los 50 y 60 dB's, pero cuando este sufre la ruptura de una de sus barras, esta diferencia decae entre 10 y 15 dB's.

6. LabView es una herramienta muy poderosa en el desarrollo de aplicaciones con fines industriales, que permite emitir diagnósticos de alta confiabilidad y precisión.

Recomendaciones

1. Al momento de diagnosticar las fallas rotóricas en un motor de inducción, asegurarse de que la corriente que circula por el estator se encuentre en un 85% o más de su valor nominal para poder diferenciar de mejor manera la fundamental y los armónicos laterales.
2. Se podría adquirir la información de la corriente de las tres fases del motor de inducción, con dos transformadores de corriente más y analizando las tres fases en LabView podríamos tener un diagnóstico más acertado de la falla.
3. Sería bueno abaratar los costos del diagnóstico de fallas rotóricas en un motor de inducción, se puede utilizar otros elementos de adquisición de corriente, se puede sustituir el transformador de corriente por una resistencia shunt en serie con una de las fases del motor y la tarjeta de adquisición en LabView debe de ser una de voltaje y no de corriente.
4. Seguir investigando el tema de diagnóstico de fallas en motores de inducción, más allá del diagnóstico de fallas rotóricas hecho en esta tesina, se puede diagnosticar por análisis de corriente otro tipo de fallas, tales como fallas en los rodamientos, excentricidad en el motor, entre otros.

Referencias

- [1] Fernández Cabanas Manés, "Técnicas para el Mantenimiento y Diagnóstico de Máquinas Eléctricas Rotativas", Primera Edición, Boixareu, 1998.
- [2] R. Hirvonen, "On-line condition monitoring of defects in squirrel cage motors", Vol. 2, Int. Conf. Electrical Machines, 1994.
- [3] P. J. Tayner, "Condition monitoring of electrical machines", 1st edition, Letchworth, 1987.
- [4] Carvajal Martínez, F.A. y J.M. Ramírez Cruz, "Diagnóstico en línea de motores de inducción mediante el monitoreo de las corrientes de fase, parte I: pruebas de laboratorio", RVP-98, IEEE Sección México, 1998..
- [5] Krause, "Analysis of Electric Machinery", 1st edition, Mc-Graw Hill, 1986.
- [6] Cruz, S.M.A. y Cardoso, A.J.M., "Rotor Cage Fault Diagnosis in three-Phase induction motors by the total Instantaneous Power Spectral Analysis", IEEE – IAS 99 Session 43, 1999.