

Análisis simplificado para la detección de barras rotas en motores de inducción

M.A. Gómez Martínez, D. Granados Lieberman,
A. Medina Flores, M.A. Hernández Figueroa

Universidad de Guanajuato,
Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica y Electrónica,
México

gomezma@ugto.mx, david.granados@itesi.edu.mx

Resumen. La ruptura de barras en los rotores de los motores de inducción tipo jaula de ardilla es un problema muy común, el cual tradicionalmente se detecta por medio de sensores acoplados directamente en el motor conectado a un complejo sistema de instrumentación. Sin embargo, durante los últimos años se han utilizado nuevas técnicas basadas en las mediciones de corrientes en el estator, que permiten realizar un diagnóstico del motor mientras funciona en condiciones normales de operación, el presente trabajo utiliza una instrumentación básica y el análisis de señales para la detección de este tipo de problemas.

Palabras clave: Barras rotas, motores de inducción.

Simplified Analysis for Detecting Broken Bars in Induction Motors

Abstract. Broken bars in the rotors of squirrel-cage induction motors are a very common problem, traditionally detected by sensors directly attached to the motor and connected to a complex instrumentation system. However, in recent years, new techniques based on stator current measurements have been used, allowing motor diagnostics while operating under normal conditions. This paper uses basic instrumentation and signal analysis to detect this type of problem.

Keywords: Broken bars, induction motors.

1. Introducción

Los motores asíncronos son máquinas rotativas de flujo variable y sin colector. El campo inductor está generado por corriente alterna. Generalmente, el campo inductor está en el estator y el campo inducido en el rotor, cuando este rotor está entre dos polos de campo electromagnéticos que han sido magnetizados por una corriente alterna, se induce una fuerza electromotriz (fem) en las espiras de la jaula de ardilla, una corriente

muy grande las recorre y se produce un fuerte campo que contrarresta al que ha producido la corriente (ley de Lenz) [1].

El rotor no puede girar a la velocidad del campo magnético generado en el estator del motor (velocidad de sincronismo), ya que en este caso no existiría ningún desplazamiento relativo de las espiras del rotor con relación a los polos del estator, por lo tanto, la fem. inducida sería cero y no existiría una corriente circulante en el rotor y por tanto tampoco una fuerza electromagnética.

Se denomina deslizamiento a la diferencia de velocidad entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor:

$$n_{des} = n_{sin} - n_m, \quad (1)$$

donde:

$$n_{des} = \text{Velocidad de deslizamiento},$$

$$n_{sin} = \text{Velocidad sincronizada},$$

$$n_m = \text{Velocidad del eje del motor}.$$

Expresada en porcentaje:

$$\%n_{des} = \frac{n_{sin} - n_m}{n_{sin}} 100\%. \quad (2)$$

2. Barras rotas en el rotor

Las causas de rupturas de barras en motores tipo jaula de ardilla pueden deberse a un mal diseño en la construcción del rotor. La mayoría de las rupturas de barras ocurren en la unión entre la barra del rotor y los anillos de cortocircuito, y son debido a esfuerzos o expansión térmica del anillo de cortocircuito, principalmente durante el arranque, además de vibraciones en el motor, desbalanceo del rotor o desalineación entre la carga.

Este tipo de falla 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 del motor. Dichas corrientes se presentan como componentes espectrales en las corrientes del estator a frecuencias descritas por la ecuación (3):

$$f_{brb} = f_1 \left[\left(\frac{k}{p} (1-s) \right) \pm s \right], \quad (3)$$

donde:

$$f_{brb} = \text{Componentes debidas a barras rotas en el rotor},$$

$$f_1 = \text{Frecuencia de la red de alimentación},$$

$$\frac{k}{p} = 1, 3, 5, \text{ etc.},$$

$$p = \text{Pares de polos},$$

$$s = \text{Deslizamiento}.$$

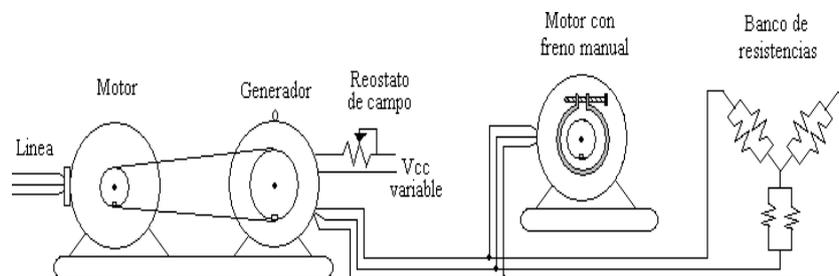


Fig.1. Montaje para la carga mecánica del motor.

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, las cuales están descritas para las bandas laterales superior e inferior respectivamente tal y como lo muestra la ecuación (4):

$$f_{brb} = f_1(1 \pm 2s). \quad (4)$$

Aunque el motor esté en perfecto estado, estos armónicos están siempre presentes en la corriente de la máquina, debido a las asimetrías del rotor inherentes al proceso de fabricación y ensamblado. Por lo tanto, el método consiste más que en detectar la presencia de los armónicos, en monitorear su amplitud y comparar cuando exceda de un cierto umbral en referencia a la componente de la frecuencia de alimentación.

Esta técnica se denomina Análisis de la Corriente del Estator (MCSA, - Motor Current Signature Analysis-por sus siglas en inglés) [2,3], centrándose en el análisis espectral de las corrientes de estator.

El MCSA se emplea con éxito en los casos en los que el par de carga es constante. Sin embargo, en máquinas donde existen cargas variantes, surgen dificultades, tales como la aparición de otros inter-armónicos debidos al par no constante y a reductores de velocidad.

3. Diseño del experimento

El desarrollo práctico para la realización del proyecto se realizó en el laboratorio, contando con un motor de inducción Jaula de ardilla de 7.5 Hp y 2 polos.

La carga mecánica que se necesita para poder llevar el motor desde un estado en vacío hasta un factor de servicio de 1.15 veces la corriente nominal del motor se realizó mediante una banda acoplada a un generador síncrono, el cual alimenta a un banco de resistencias y un motor de ca. que cuenta con un freno mecánico.

La figura 1 muestra el esquema de conexiones.

El análisis del motor es en estado estable, pero para realizar un estudio más completo se realizó la captura de la corriente del motor desde el transitorio de arranque. Para lo cual se realizó un arreglo que permite sincronizar el momento de captura de la forma de onda de la corriente del motor y el momento de arranque del mismo.

Uno de los parámetros para la localización exacta de la frecuencia de interés es la velocidad del motor como lo indican las ecuaciones (3) y (4), de esta manera se pueden



Fig. 2. Dispositivo de medición para la velocidad.

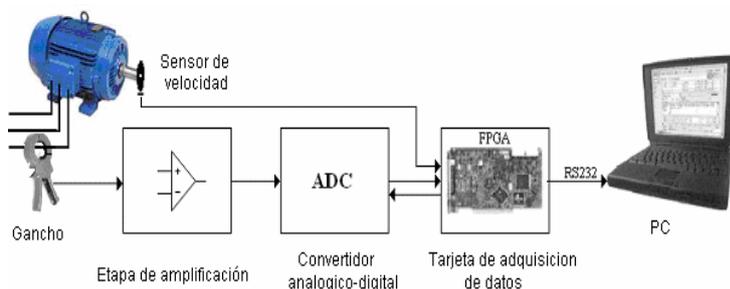


Fig. 3. Sistema de adquisición de datos.

determinar a qué frecuencias se encuentran los inter armónicos de interés, corroborando lo establecido teóricamente.

El encoder que se montó posee 180 ranuras (divisiones claras) y se fijó a la flecha del motor, mientras que el sensor se fijó mediante una estructura a la carcasa del motor. La figura 2 muestra una fotografía del montaje descrito.

El valor de la velocidad del motor lo realiza una tarjeta la cual utiliza un FPGA (Field Programmable GateArray, por sus siglas en inglés), el cual realiza el conteo de los pulsos por segundo y los exhibe en la pantalla del display de forma hexadecimal, de forma que realizando las conversiones convenientes se determina la velocidad de giro del rotor.

4. Sistema de adquisición de datos

En la figura 3 se muestra el diagrama de flujo de las etapas de adquisición de datos implementadas en el sensado de la corriente del motor.

Para la realización de esta etapa se utilizó una tarjeta, la cual posee un FPGA que se programa, permitiéndonos flexibilidad para la selección del número de datos adquiridos y la frecuencia de muestreo, para este caso en particular se utilizaron 8192 muestras en un rango de 1.2 KHz, siendo este valor múltiplo de la frecuencia fundamental (60Hz), lo que nos disminuye el chorro de la señal. Además, la tarjeta controla la interfase RS232 para la comunicación entre el sistema de adquisición de datos y la computadora.

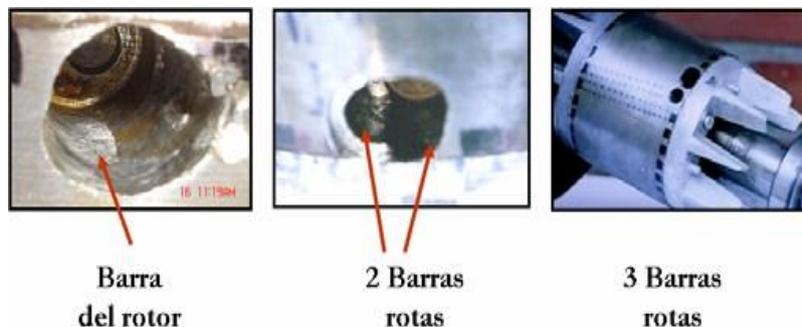


Fig.4. Perforaciones realizadas para la ruptura de barras en el rotor.

Tabla 1. Valores de la amplitud de la fundamental y los interarmónicos.

| Estado del motor | Amplitud fund.(db) | Amp. int.arm a (db) | Amp. int.arm (db) |
|-------------------|--------------------|---------------------|-------------------|
| Buen estado | 154.51 | 78.3 | 67.43 |
| Una barrarota | 198.19 | 106.79 | 104.66 |
| Dos barras rotas | 202.35 | 119.62 | 118 |
| Tres barras rotas | 207.87 | 127.36 | 127.22 |

La captura de la forma de onda de la corriente del motor procesada en Matlab, de esta manera podemos ver la forma de onda original y con la función *fft* (transformada rápida de Fourier, por sus siglas en inglés) de Matlab se obtiene la descomposición en armónicos de la señal.

También con la ayuda de Matlab, se realizó un pequeño programa con el que podemos hacer referencia sobre los cálculos teóricos, realizando marcas a las frecuencias señaladas con las ecuaciones 3 y 4, sobre la gráfica del espectro de la señal.

5. Caracterización del motor con barras rotas

Para poder caracterizar el motor en condiciones de barras rotas, identificamos la localización de cada barra con la ayuda de un Growler para poder realizar las perforaciones, para esto realizamos el método del zumbador, obteniendo la posición exacta de cada barra y el número de barras del motor, las cuales para este caso son 31 barras con un diámetro aproximado de 1/4 in. La figura 4 muestra las perforaciones realizadas en el rotor.

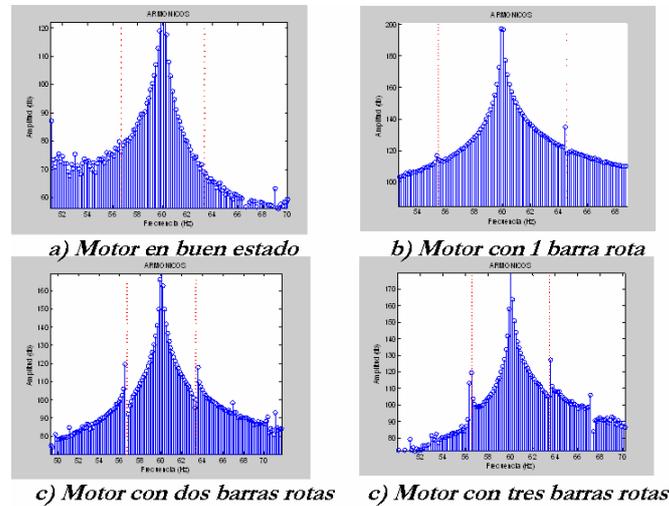


Fig. 6. Resultados obtenidos alrededor de la frecuencia fundamental.

6. Análisis de resultados

Las pruebas realizadas en el laboratorio, se realizaron a diferentes valores de carga mecánica, de forma que incrementara la corriente en el estator, pero debido a que la presencia de los inter-armónicos de interés son dependientes del deslizamiento del motor, esto es, cuando la carga es mínima casi no existe deslizamiento, presentándose los inter-armónicos muy cerca de la frecuencia fundamental ocasionando que esta los enmascare, pero a mayor demanda de corriente del motor, los inter-armónicos se muestran más alejados de la frecuencia fundamental. Es por eso que para el análisis nos enfocamos en las pruebas realizadas a 21 Amp. (corriente nominal del motor).

Con las gráficas obtenidas durante las pruebas, podemos conocer la magnitud tanto de la frecuencia fundamental como la de los inter-armónicos, los cuales se muestran en la tabla para la cual se hizo un estimado entre todas las pruebas realizadas a 21 Amp.

Una vez capturas las diferentes formas de onda correspondientes a las condiciones del motor en buen estado y con barras rotas. Se realiza una referencia para las características del tipo de motor utilizado como se ilustra en la figura 5, esto es, tomamos la magnitud de la potencia en decibelios de la componente fundamental de la señal para compararla con la de los inter-armónicos por medio de la ecuación (5):

$$\%dif = \frac{Amp. fund - Amp. inter arm \times 100\%}{Amp. De la fundamental} \quad (5)$$

Existen dos razones fundamentales para realizar esto, la primera es que, aunque idealmente la forma de onda sea una señal perfectamente senoidal, existe la presencia de los inter-armónicos de interés, debido a imperfecciones en la construcción del motor, condiciones de la carga y la presencia de otros fenómenos que originan ruido en la

Tabla 2. Resultados del análisis del motor.

| Estado del motor | Relación inter armónico lateral izq. | Relación inter armónico lateral der. |
|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Buen estado. | 49.32 % | 56.36 % |
| 1 barra rota | 46.12 % | 47.19 % |
| 2 barras rotas | 40.88 % | 41.69 % |
| 3 barras rotas | 38.73 % | 38.80 % |

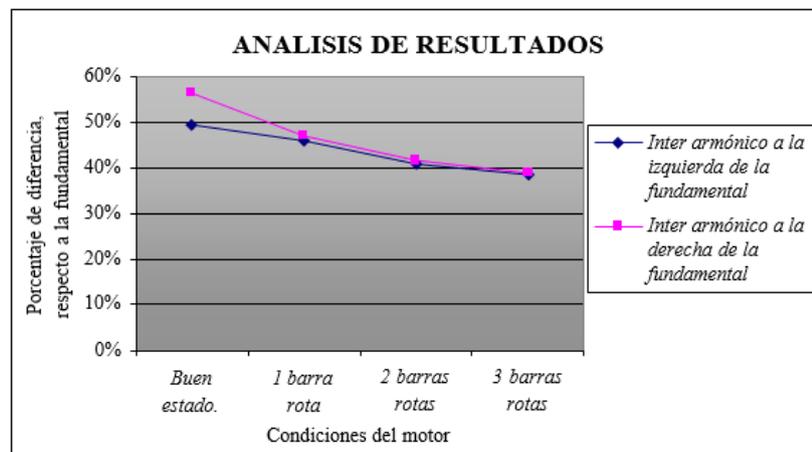


Fig. 7. Grafica de los resultados obtenidos.

señal. La segunda razón es ocasionada al utilizar la transformada de Fourier, la cual realiza una aproximación por sumatorias a determinados valores, pero cuando no coincide este valor con uno real de la señal, se genera un efecto de chorreamiento que compensa este valor de forma gradual a los extremos del mismo, lo que ocasiona que exista un valor a la frecuencia de interés.

Por otra parte, es necesario un filtrado de la señal que discrimine frecuencias indeseables para mantener una mejor pureza de la señal, ya que principalmente los inter armónicos cerca del 5° y 7° armónico se ven contaminados, además de poseer una amplitud mucho menor que dificulta su análisis. Es por eso que se concentra nuestro estudio alrededor de la frecuencia fundamental.

Un acercamiento alrededor de los 60 Hz se muestra en la figura 6.

Las gráficas de los resultados obtenidos en la ruptura de barras en el rotor muestran el incremento de la amplitud de los armónicos en dB, observando que dicho aumento es mayor entre más barras rotas existan en el rotor.

Corroborando esto de manera numérica y tomando las consideraciones mencionadas, se muestra la siguiente tabla, la cual como se mencionó muestra la relación existente entre la fundamental y los inter-armónicos en porcentaje:

Los valores de la tabla anterior, de manera gráfica se muestran en la figura 7.

Tabla 3. Valores del estado transitorio bajo condiciones de barras rotas.

| Estado del motor | Amplitud máxima (A) | Tiempo (s) |
|------------------|---------------------|------------|
| Bueno | 200 | 0.86 |
| 1 barra rota | 183 | 1.05 |
| 2 barras rotas | 168 | 1.16 |
| 3 barras rotas | 160 | 1.28 |

En la figura 7 vemos una disminución del porcentaje de diferencia entre la amplitud de la frecuencia fundamental y los inter armónicos a los lados de la misma, lo que equivale a un aumento de la amplitud de dichos inter armónicos a medida que existen problemas de barras rotas en el rotor, lo cual confirma lo expuesto en la parte teórica.

Otro de los fenómenos observados durante presente trabajo es una disminución de la corriente de arranque en presencia de barras rotas, y un aumento en el tiempo de duración del estado transitorio, la tabla 3 muestra los resultados obtenidos. Además, con la presencia de barras rotas en el rotor se manifestó un incremento en las vibraciones y variaciones en la magnitud de corriente rms equivalentes a fluctuaciones de la forma de onda, las cuales son debidas además por la excentricidad del rotor generada por las perforaciones realizadas.

7. Conclusiones

La des-uniformidad del flujo del estator debido a las barras rotas se ve reflejada en la distorsión de la forma de onda de la corriente en el estator, lo cual es un incremento de armónicos en la corriente

De las mediciones realizadas se comprobó la aparición de componentes armónicas en la corriente del estator y la existencia de barras rotas en la jaula de ardilla del rotor, del motor bajo prueba.

Pudiéndose implementar un método simple de medición a través de un transformador de corriente tipo gancho, una tarjeta de adquisición de datos tipo comercial, y el uso de una computadora portátil (laptop), ejecutando un programa de uso comercial (Matlab), lo que permite su empleo en cualquier industria, con un mínimo de costo de inversión. Ya que esta técnica en la actualidad es muy utilizada dentro de compañías eléctricas que ofrecen sus servicios a las empresas, pero que desafortunadamente no son factibles económicamente.

El monitoreo en línea que se realiza para conocer las condiciones del motor, proporciona además a los sistemas que lo utilizan la confianza necesaria para determinar si existe un problema en alguna parte específica del motor, lo que equivale a ahorrar tiempo a los encargados de los sistemas y no verse sometidos a la presión de realizar la detención de los procesos de manera errada, o en su defecto planear el paro oportuno del equipo en tiempos que no afecten a su producción y al mismo tiempo no se ocasione un efecto en cadena reflejado en fallas más severas.

Quedo evidenciado que puede emplearse este sistema de medición para buscar otras áreas de aplicación, como es la detección de anomalías mecánicas como desalineamiento, desbalanceo, vibraciones de la carga impulsada, etc.

También es área de mejora, la aplicación de otros métodos de manipulación de la información obtenida, ya que la transformada rápida de Fourier, no es la herramienta más idónea. El utilizar métodos alternativos como la transformada Wavelet, ventaneado y periodogramas [4], ayudaría a un mejor procesamiento de la señal, realizando la transformación de la señal en frecuencia disminuyendo el chorro y haciendo de esta técnica más precisa. Además de implementar filtros que eliminen frecuencias indeseables en el sistema.

Referencias

1. Nagwa, M. E., Anthony, R. E.: Detection of Broken Bars in the Cage Rotor on an Induction Machine. IEEE transactions on industry applications, 28 (1992)
2. Von Konigslow, A.: Teoría, cálculo y construcción de las máquinas de corriente alterna asíncronas. Editorial Labor, S.A. (1973)
3. William, T., Mark, F.: Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults. IEEE Industry Applications Magazine (2001)