



DETECCIÓN DE FALLAS EN MÁQUINAS DE INDUCCIÓN BASADA EN STFT Y TRANSFORMADA WAVELET

FAILURE DETECTION IN INDUCTION MACHINES BASED ON WAVELET TRANSFORM AND STFT

Javier Rosero García¹

Esteban Rosero García²

José Luis Romeral³

Fecha de envío: Enero de 2011
Fecha de recepción: Febrero de 2011
Fecha de aceptación: Marzo de 2011

Resumen:

En el análisis espectral de señales corriente-estator, MCSA por sus siglas en inglés, no siempre se obtiene buenos resultados cuando hay variaciones de torque y velocidades bajas, causando dificultades en el cálculo de la FFT. Este artículo propone la detección de fallas basada en: análisis de espectrograma de la transformada rápida de Fourier (STFT) y la transformada wavelet, que consumen menos tiempo de procesamiento. Se realiza un desarrollo teórico y se muestran resultados experimentales para mostrar la técnica.

Palabras clave:

Maquina inducción, cortocircuito, detección de fallo, Wavelet, FFT.

Abstract:

Motor Current Signature Analysis does not always achieve good results when there is variation in torque and motor slip, making FFT difficult to calculate due to a non-stationary signal. This paper proposes a new approach to motor failure detection through spectrogram analysis based on Short Time Fourier Transform (STFT) and Wavelet

Transform, which requires less processing time. Theoretical development and experimental results are presented to illustrate the technique.

Key Words:

Short circuit, Fault detection, Induction motor, Electrical drives, Wavelet, FFT.

1. Introducción

Se han desarrollado varias técnicas de diagnóstico en las últimas décadas para detec-

¹ Ingeniero Eléctrico. PhD en Ingeniería Eléctrica. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Correo j-rosereg@unal.edu.co

² Ingeniero Mecánico. MsC en automática. Universidad del Valle, Cali. Correo emilros@univalle.edu.co

³ Ingeniero Eléctrico y PhD en Ingeniería Electrónica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Correo romeral@eel.upc.edu

ción de fallas en máquinas de inducción [1-5]. Desafortunadamente, debido a la variedad de efectos producidos por los tipos diferentes de fallas, una técnica de diagnóstico que se muestra eficaz para el diagnóstico de una falla particular no puede trabajar en absoluto cuando diagnostica más de una falla. Es más, en la actualidad el amplio uso de convertidores para alimentación de motores dificulta aún más la efectividad de estas técnicas de diagnóstico. En general, los esquemas de supervisión se han concentrado en modos de falla específicos, por ejemplo, para motores de inducción: de estator, rotor o cojinetes. Aunque los análisis térmicos y de vibración [4] se han utilizado durante décadas, la mayoría de la investigación reciente se ha dirigido a supervisar las señales eléctricas del motor con énfasis en la corriente de estator (MCSA) [1-2]. Sin embargo, el espectro de corriente es influenciado por muchos factores, incluyendo la fuente de alimentación, las condiciones de carga dinámica y estática, ruido, geometría de motor y condiciones de falla. Estas condiciones pueden llevar a errores en el descubrimiento de la falla [5-8].

Entre las técnicas de detección de fallo en máquinas de inducción, la MCSA es una de las más usadas, pues enfoca su esfuerzo en el análisis espectral de la corriente de estator [1-2,5], y se ha usado con éxito en el descubrimiento de barras rotas del rotor, daño en cojinetes y excentricidad dinámica. El procedimiento consiste en evaluar la amplitud relativa de los armónicos de corriente. El método descrito funciona bien para torque de carga constante y con motores de alta potencia, pero presenta dificultades cuando este método se aplica a motores de mediana y baja potencia que están trabajando a velocidad baja o torque de carga bajo.

2. Análisis de armónicos en motores de inducción

Las frecuencias características para cada tipo de fallo en el análisis de señal de corriente motor (MCSA) para motor de inducción se presentan en las ecuaciones (1) a (8).

Fallo en cojinetes:

$$f_{bng} = |f_s \pm fm_{i,o}| \quad (1)$$

$$f_{i,o} = \frac{n}{2} f_r \left[1 \pm \frac{bd}{pd} \cos \beta \right] \quad (2)$$

Donde f_s es frecuencia fundamental, m : 1, 2, 3..., n es el número de bolas de cojinete, $f_{i,o}$ son las frecuencias características de vibración, f_r es la velocidad mecánica del rotor en Hz, bd es diámetro de bola, pd es diámetro de circunferencia media y β es el ángulo de contacto de las bolas. Para la ecuación (2) se requiere información específica de la construcción de los cojinetes o pueden ser aproximadas por la ecuación (3) para cojinetes de 6 a 20 bolas [3].

$$f_o = 0.4 n f_r \quad f_i = 0.6 n f_r \quad (3)$$

Falla de excentricidad [5]:

$$f_{slot-ecc} = f_s \left[\left(kR \pm n_d \right) \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n_w \right] \quad (4)$$

Donde k : 1, 2, 3..., R es el número de ranuras rotor, n_d es el orden de excentricidad de rotación, $n_d = 0$ para excentricidad estática y $n_d = 1, 2, 3...$ para excentricidad dinámica, s es el deslizamiento, p es el número de pares de polos y n_w es el orden de armónico de fuerza magnetomotriz del estator. La ecuación (5) presenta un segundo método alrededor de la frecuencia fundamental [2,5].

$$f_{ecc} = f_s \left[1 \pm m \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (5)$$

Donde m : 1, 2, 3...

Fallo en barras y anillo del rotor [1,5]:

$$f_{bdb} = f_s \left[k \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm s \right] \quad (6)$$

Donde k/p : 1, 5, 7, 11, 13...

Las frecuencias anteriores son iguales a las frecuencias por fallas de excentricidades. Además, el análisis de corriente no es capaz de proveer información cuando las barras rotas no están continuas [2].

Cortocircuito en el devanado estator [5, 9]:

$$f_{sh} = f_s \left[m \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm k \right] \quad (7)$$

Donde k : 1, 2, 3...

Torque de carga pulsante:

$$f_{carga} = f_s \left[1 \pm m \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (8)$$

Cuando el motor de inducción opere con torque variante en el tiempo, para algunos casos, la frecuencia de fallo se puede sobreponer disminuyendo y traslapando el armónico debido al torque oscilante. Para estos casos, el análisis wavelet [6, 10-12] se puede utilizar en la detección de fallos y se aplica para ver la variación de los armónicos de frecuencia durante el tiempo, así como la densidad espectral de potencia (PSD). En [7] se muestra mejor la distribución de los armónicos. Por otra parte, en el caso de los controladores eléctricos el problema es mucho más com-

plicado, ya que la frecuencia fundamental no es fija y puede alcanzar valores muy bajos. Entonces la resolución de frecuencia puede ser insuficiente para encontrar un buen ancho de banda para la detección.

A continuación se revisarán algunos conceptos de armónicos en máquinas eléctricas que posteriormente ayudarán a visualizar los fallos, así: considerando la alimentación de la red sinusoidal, ellas giran a una frecuencia de alimentación (f_s); y a un armónico espacial de orden ν tienen un período de espacio ν veces menor y, por tanto, un número ν veces mayor de pares de polos. Así la frecuencia de los armónicos espacial de orden ν con respecto al rotor de la máquina es [8]:

$$f_\nu = \nu p \left[n f_1 \pm \frac{f_1}{\nu} \right] \quad (09)$$

Donde n es el armónico de la corriente de alimentación y f_1 es la frecuencia fundamental de alimentación, $n = 1$. El signo positivo corresponde al giro del armónico en sentido contrario y el negativo al sentido del primer armónico. Se puede ver, entonces, que los armónicos 5 y 7 giran a frecuencia $6 f_1$, y los 11 y 13 giran a frecuencia $12 f_1$, etc.

2.1. Armónicos de onda de diente

El orden de los armónicos están relacionados con el número de ranuras por doble paso polar y su magnitud depende del factor de distribución del tipo de devanado. Todos los armónicos del estator que crean pares síncronos toman especial atención en la onda de diente, los armónicos de este tipo tiene el orden de:

$$f_{slot} = f_s \left[k \frac{Z_1}{p} \pm 1 \right] \quad (10)$$

Donde k es entero, Z_1 es número de ranuras de estator, p son pares de polos.

2.2. Pares parásitos asíncronos

El armónico ν gira en el rotor a una frecuencia $f_{1\nu} = \pm \frac{f_1}{\nu}$ de la frecuencia fundamental (f_1), y el deslizamiento del armónico es:

$$s_\nu = \frac{f_{1\nu} - f_r}{\pm f_{1\nu}} = 1 \pm (1-s)\nu \quad (11)$$

Donde s_ν es el deslizamiento del armónico ν de fem del estator y f_r es la frecuencia del rotor. Así, la frecuencia de la corriente inducida en el rotor por el flujo del armónico ν de fem del estator está determinada por:

$$f_{2\nu} = f_1 [1 \pm (1-s)]\nu \quad (12)$$

2.3. Frecuencia de cortocircuito en máquinas de inducción [9]

Esta componente de frecuencia podría ser dependiente del número de pares de polos de la onda de campo magnético. La componente de campo magnético más significativa ocurre cuando el número de pares de polos es igual al número de polos en el devanado del estator. Teniendo en cuenta las ranuras del rotor y el estator en función de la permeancia del entrehierro, se pueden mostrar solo los cambios en el número de pares de polos de la densidad de flujo magnético. Así, como resultado de la naturaleza del devanado del rotor o jaula de ardilla, la densidad de campo magnético del lado del estator puede reflejar los cambios, que solo pueden ocurrir en las siguientes frecuencias:

$$f_{sh} = f_1 \left[1 \pm kZ_2 \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (13)$$

Donde $k = 1, 2, 3, \dots$ y Z_2 es el número ranuras de estator.

Este artículo propone la detección de fallos basada en análisis de espectrograma de la transformada rápida de Fourier (STFT) para variaciones de cargas en caso de máquina en cortocircuito y utilizar la transformada wavelet para la detección de fallos en condición nominal de operación; además, establece un parámetro de detección de falla que pueda ser integrado en sistemas de supervisión y control del convertidor de potencia.

3. Método propuesto

Para la variación de carga en el tiempo se realizará el análisis de frecuencia-tiempo, basado en Fourier (STFT), y un análisis de transformada wavelet tipo Meyer para determinar cambios y parámetros que permitan identificar fallos. El análisis de Fourier se explica ampliamente en trabajos anteriores [1-3,5]. El análisis wavelet es capaz de revelar aspectos como tendencias, puntos de avería, discontinuidad [10-7].

3.1. Transformada wavelet

La transformación wavelet consiste en la descomposición de la señal en un conjunto de niveles, cada uno de los cuales debe tener una aproximación de la señal y una señal de desviación. llamada detalle [12]. Dentro de las familias wavelet se escogió la transformada wavelet Meyer, que se muestra en la Figura 2 y es la que mejor se acomoda a los objetivos del artículo. La wavelet Meyer y la función escalar están definidas en el dominio de la frecuencia.

Función wavelet:

$$si \quad \frac{3}{2\pi} \leq |\omega| \leq \frac{2\pi}{3},$$

$$\hat{\psi}(\omega) = (2\pi)^{-1/2} e^{j\omega/2} \sin \left[\frac{\pi}{2} v \left(\frac{3}{2\pi} |\omega| - 1 \right) \right]$$

$$si \quad \frac{4\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{8\pi}{3},$$

$$\hat{\psi}(\omega) = (2\pi)^{-1/2} e^{j\omega/2} \cos \left[\frac{\pi}{2} v \left(\frac{3}{4\pi} |\omega| - 1 \right) \right]$$

$$si \quad |\omega| \notin \left[\frac{2\pi}{3}, \frac{8\pi}{3} \right], \quad \hat{\psi}(\omega) = 0 \quad (14)$$

$$v(a) = a^4 (35 - 84a + 70a^2 - 20a^3),$$

$$a \in [0, 1] \quad (15)$$

Función escalar.

$$si \quad |\omega| \leq \frac{2\pi}{3}, \quad \hat{\phi}(\omega) = (2\pi)^{-1/2}$$

$$si \quad \frac{2\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{4\pi}{3},$$

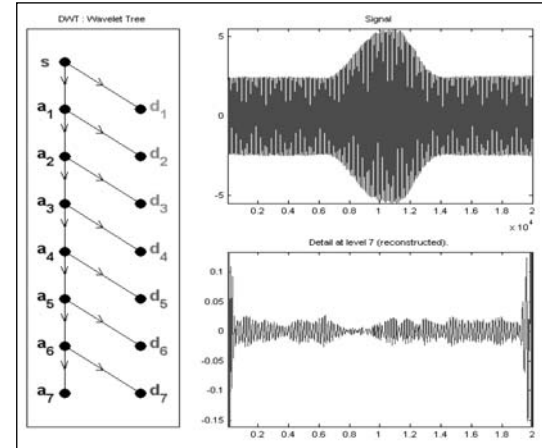
$$\hat{\phi}(\omega) = (2\pi)^{-1/2} \cos \left[\frac{\pi}{2} v \left(\frac{3}{2\pi} |\omega| - 1 \right) \right]$$

$$si \quad |\omega| \geq \frac{4\pi}{3}, \quad \hat{\phi}(\omega) = 0 \quad (16)$$

Donde ψ y ϕ se definen en el dominio de la frecuencia, iniciando con una función auxiliar v [6].

La función ψ no tiene soporte finito, pero decrece a 0 cuando $x \rightarrow \infty$ más rápido que un polinomio inverso y las transformadas wavelet son derivables infinitamente. Se realiza una transformada Meyer wavelet de siete niveles para obtener siete aproximaciones y siete detalles, como se muestra en la Figura 1. Las frecuencias de corte se muestran en la Tabla 1, para cada aproximación y detalle y se calculan a partir de

Figura 1. Árbol de transformada wavelet Meyer para señal de corriente de estator en máquina de inducción sana.



su frecuencia de muestreo, que en este caso es de 5 kHz con tarjeta de adquisición de señal de National Instruments® y posterior procesamiento en MatLab®.

Tabla 1. Árbol de descomposición Wavelet

| Descomposición en detalles | Frecuencia (Hz) | |
|----------------------------|-----------------|--------|
| | Detalle 1 | 2.500 |
| Detalle 2 | 1.250 | 675 |
| Detalle 3 | 675 | 337,5 |
| Detalle 4 | 337,5 | 168,25 |
| Detalle 5 | 168,25 | 84,37 |
| Detalle 6 | 84,37 | 42,2 |
| Detalle 7 | 42,2 | 21,1 |

4. Resultados

Se realiza la medición de corriente de estator para la operación nominal estable en una máquina de inducción sana y una en cortocircuito. Además, se prueba la variación de carga partiendo de un punto de operación

nominal de la máquina y se aumenta linealmente la carga un 40 % de la misma, como se muestra en la Figura 2. Las características del motor de inducción son: 220/380 V, 1,1 kW, 2 pares de polos, 50 Hz, velocidad nominal 1.410 rpm.

4.1. Análisis de Fourier de corrientes de estator

En las Figuras 3 a 5 se muestran las corrientes de estator y espectro para la máquina de inducción sana y en corto circuito. Aquí se nota la disminución de corriente de una de las fases para la máquina en cortocircuito y, de igual forma ello se refleja en la componente fundamental del espectro. Para la máquina en cortocircuito en las frecuencias de 125, 150 y 175 Hz, se incrementan en 5, 5 y 2 veces, respectivamente. Es de aclarar que las frecuencias anteriores están presentes en las dos máquinas y también en los fallos de excentricidades; para el caso del tercer armónico, se nota su incremento de valor por desbalance de fases de cualquier índole.

En la Figura 5 también se puede ver la corriente de estator para máquina en cortocircuito; en las frecuencias de 550, 650 y 950 Hz el valor de la corriente del motor disminuye a 30% y en la de 850 Hz disminuye a 4% para máquina en falla. Las frecuencias anteriores corresponden a los armónicos 11, 13, 17 y 19, que forman parte de la ecuación que rige los armónicos por ranura del estator.

La transformada de Fourier presenta un inconveniente en la variación de carga, porque los valores del espectro de falla varían debido a su dependencia del deslizamiento: como se ve en la Figura 6, en valores de 600 ó 800 Hz; de igual forma, esto se nota en las Figuras 7 y 8, donde se muestra un espectrograma y curvas de nivel de corriente de estator para máquina de inducción en variación

Figura 2. Variación de corriente de estator de máquina de inducción en el tiempo para variación de carga.

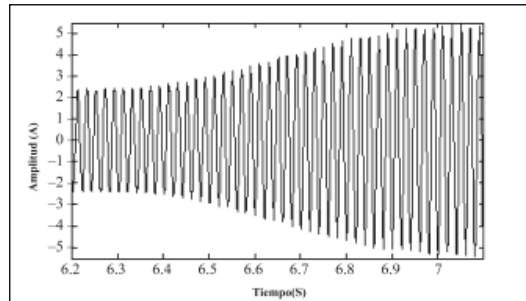


Figura 3. Corrientes de estator para máquina de inducción en cortocircuito.

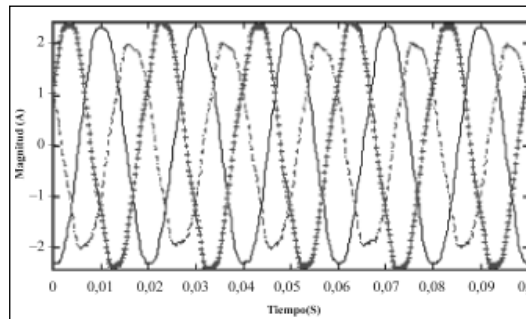


Figura 4. Espectro de corriente de estator para máquina de inducción sana.

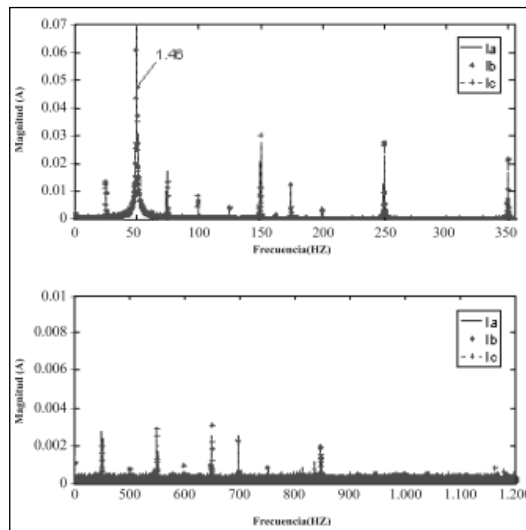


Figura 5. Espectro de corriente de estator para máquina de inducción en cortocircuito.

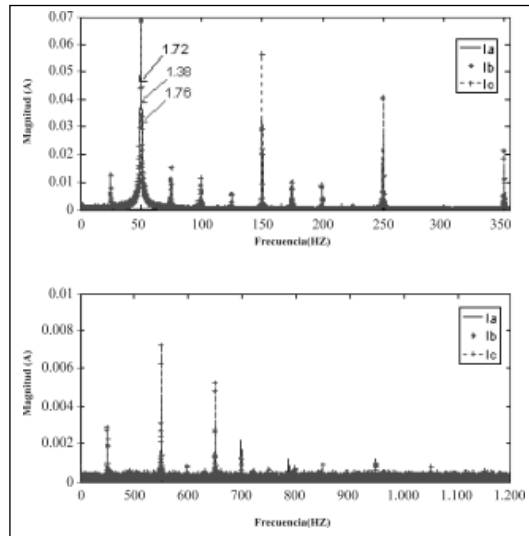
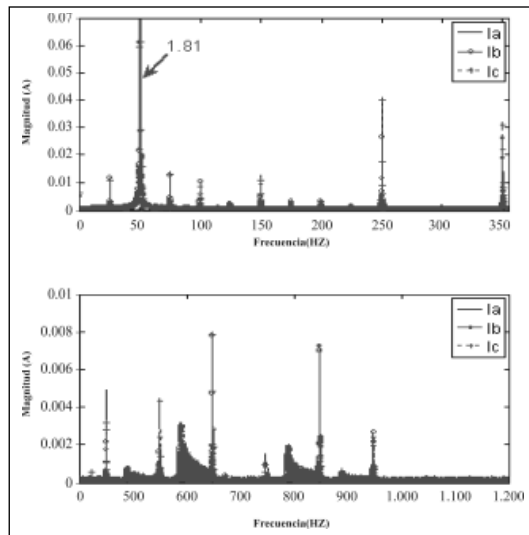


Figura 6. Espectro de corriente de estator para la máquina de inducción en cortocircuito. Variación de carga.



de carga. En estas figuras se observa cómo cambian los valores del deslizamiento para una variación de carga positiva. Para el caso del espectrograma de las señales, se puede

Figura 7. Espectrograma de corriente de estator para una máquina de inducción en cortocircuito. Variación de carga.

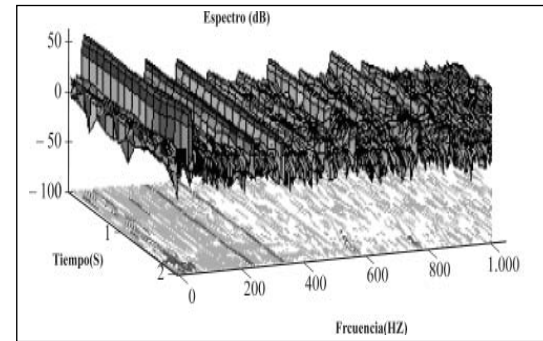
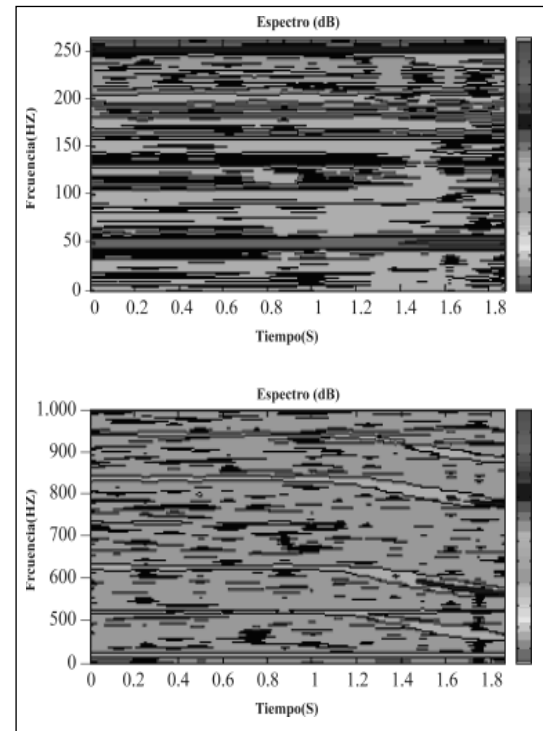


Figura 8. Curvas de nivel de corriente de estator para máquina de inducción en cortocircuito. Variación de carga.



observar el cambio de valor de las frecuencias desde 500 a 950 Hz, que pertenecen a los fallos de cortocircuito y a los armónicos de estator 11, 13, 17 y 19.

Figura 9. Transformada wavelet para corriente de estator en máquina de inducción sana. Variación de carga.

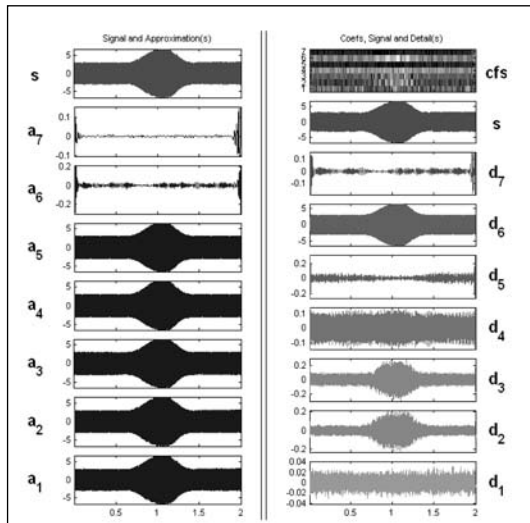
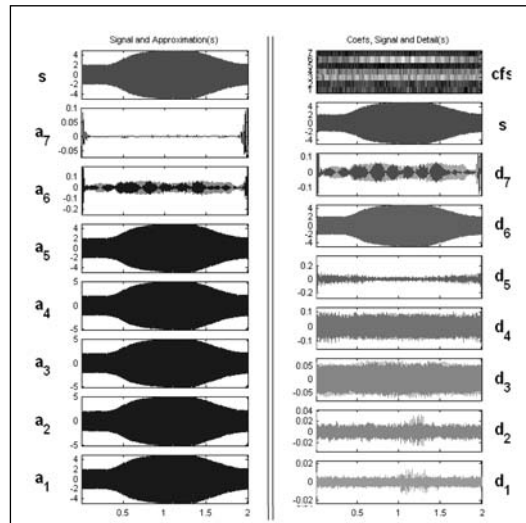


Figura 10b. Transformada wavelet para corriente de estator en máquina de inducción en cortocircuito. Fase B.



4.2 Análisis de transformada wavelet de corrientes de estator con variación de carga

En las Figuras 9 y 10 se muestran los detalles de la transformada wavelet para corriente de

estator de una máquina de inducción sana y una en cortocircuito, para condiciones de operación estable. Cada detalle muestra el rango de frecuencia, dividido según la frecuencia de muestra, lo que permite estable-

Figura 10a. Transformada wavelet para corriente de estator en máquina de inducción en cortocircuito. Fase A.

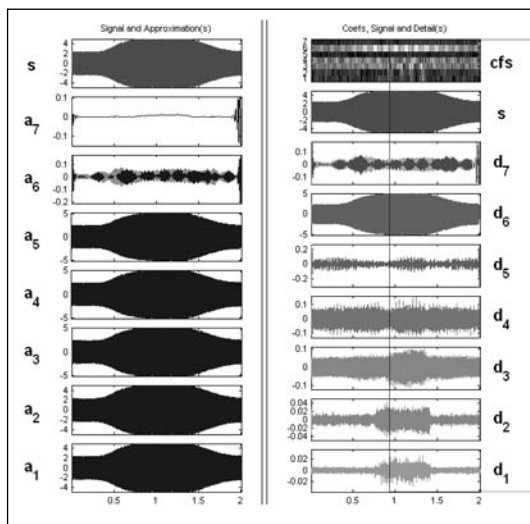


Figura 10c. Transformada wavelet para corriente de estator en máquina de inducción en cortocircuito. Fase C.

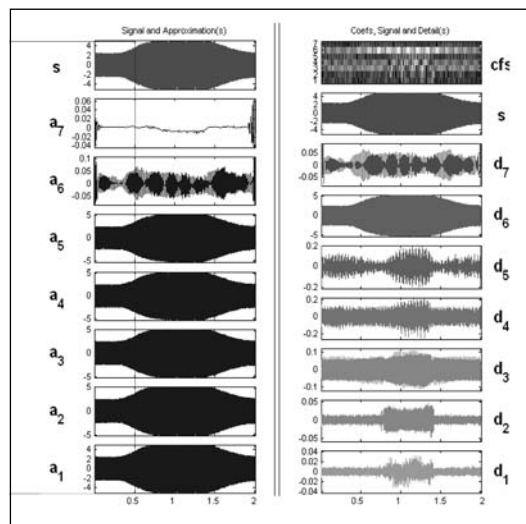


Tabla 2. Energía para detalles y aproximaciones de transformada wavelet.

| Energía (1e-3) | | | | | | | | | |
|------------------|---|---------|------|------|------|------|-------|------|-----|
| Fase | | A Total | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 |
| M. sana | A | 24e3 | 0,39 | 0,37 | 19,1 | 70,1 | 1,1e3 | 14e3 | 231 |
| | B | 18e3 | 0,41 | 0,43 | 21,3 | 67,5 | 181 | 13e3 | 317 |
| | C | 33e3 | 0,44 | 0,43 | 26,9 | 90,5 | 1,6e3 | 12e3 | 392 |
| M. cortocircuito | A | 19e3 | 1,51 | 1,13 | 7,90 | 59,1 | 1.4e3 | 15e3 | 249 |
| | B | 14e3 | 2,03 | 1,36 | 13,4 | 53,1 | 742 | 16e3 | 524 |
| | C | 23e3 | 2,34 | 1,65 | 11,3 | 87,3 | 1,8e3 | 13e3 | 488 |

cer un número diferente de detalle para la frecuencia de los armónicos de falla.

En la Tabla 2 se muestra la energía según detalles y aproximaciones de transformada wavelet Meyer de siete niveles. Allí se puede ver que la energía, para el caso de la máquina en cortocircuito, es mayor en los detalles 1, 2, 6 y 7.

En la Tabla 3 se nota que el valor rms es mayor para una máquina en cortocircuito en los detalles 1 a 7 y la aproximación 6.

5. Conclusiones

Mediante el análisis de transformada de Fourier se puede centrar la atención en los armónicos de alta frecuencia y determinar la falla de cortocircuito, aunque se dificulta su análisis para señales cambiantes en el tiempo y se hace necesario recurrir a análisis en el tiempo-frecuencia como wavelet. Las transformadas wavelet para torques variables permiten calcular un parámetro de decisión como la energía o valor rms que evidencia el tipo de falla de la máquina de forma segura.

Tabla 3. Valor rms para detalles y aproximaciones de transformada wavelet.

| Tipo de máquina | | rms (mA) | | | | | |
|------------------|------|----------|------|------|-----|-------|-----|
| | | A6 | D1 | D2 | D5 | D6 | D7 |
| M. sana | F. A | 122 | 5,80 | 7,49 | 157 | 2,6e3 | 175 |
| | F. B | 104 | 5,85 | 8,21 | 169 | 2,7e3 | 140 |
| | F. C | 122 | 6,25 | 7,63 | 237 | 2,6e3 | 188 |
| M. Cortocircuito | F. A | 174 | 15,6 | 18,5 | 227 | 3,6e3 | 254 |
| | F. B | 163 | 16,3 | 18,6 | 168 | 3,2e3 | 256 |
| | F. C | 181 | 21,7 | 24,7 | 271 | 3,8e3 | 334 |

La transformada wavelet obtiene buenos resultados para la separación de frecuencias de las señales no estacionarias y aplica para detección de fallos incipientes. La transformada wavelet, por tanto, presenta mayor capacidad de síntesis e identificación de fallas de cortocircuito en motores de inducción que la técnica MCSA que, por enfocarse en el análisis espectral de la corriente de estator, requiere transformada de Fourier.

Referencias

- [1] S. Nandi, H. A. Toliyat. "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines - a review". IEEE-IAS Thirty-Fourth Meeting Industry Applications Annual Conference, vol. 1, 3-7 de octubre de 1999, pp. 197-204.
- [2] M. E. H. Benbouzid. "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection". *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 47(5) (octubre 2000): 984-993.
- [3] W. Deleroi. "Broken bars in squirrel cage rotor of an induction motor- Part 1: Description by superimposed fault currents". *Arch. Elektrotech*, 67 (1984): 91-99. En alemán.
- [4] J. R. Cameron, W. T. Thomson y A. B. Dow. "Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors". *IEE Proceedings*, 133(3) (mayo 1986): 155-163.
- [5] Mohamed El Hachemi Benbouzid. "A Review of Induction Motor Signature Analysis as a Medium for Faults Detection". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(5) (octubre 2000): 984-993.
- [6] Tommy W. S. Chow y Shi Hai. "Induction Machine Fault Diagnostic Analysis with Wavelet Technique". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(3) (junio 2004).
- [7] B. Ayhan, M. Y. Chow, H. J. Trussell, M. H. Song, E. S. Kang, H. J. Woe. "Statistical Analysis on a Case Study of Load Effect on PSD Technique for Induction Motor Broken Rotor Bar Fault Detection". Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2003, Atlanta, 24-26 de agosto de 2003.
- [8] M. Kostenko y L. Piotrovski. *Electrical Machines*. Moscú: MIR, 1973.
- [9] G. M. Joksimovic y J. Penman. "The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(5) (octubre 2000): 1078-1084
- [10] J. C. Goswami. *Fundamental of wavelet*. Canadá: Jhon Wiley & Sons, 1999.
- [11] I. Daubechies. *Ten lectures on wavelets*. Filadelfia: SIAM, 1992, pp. 117-152.
- [12] H. Douglas, P. Pillay y A. K. Ziarani. "A new algorithm for transient motor current signature analysis using wavelets". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(5) (septiembre-octubre 2004): 1361-1368.