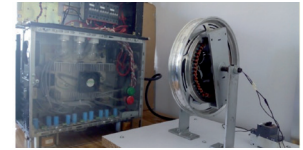


Detección de fallos multicriterio de un motor BLDC (Brushless Direct Current)



Multiple criteria fault detection of a BLDC (Brushless Direct Current) motor



Víctor Arturo Maldonado Ruelas¹, Francisco Javier Villalobos Piña¹, Ricardo Alvarez Salas², José Alejandro Morones Alba¹ y Raúl Arturo Ortiz Medina^{1,3}

¹ Tecnológico Nacional de México/I.T. Aguascalientes. Dpto. de Ingeniería Eléctrica-Electrónica. Av. López Mateos 1801, Fracc. Bonagens - 20256 Aguascalientes (México). Tfno: +52 14499105002.

² Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería. Av. Manuel Nava 8, Zona Universitaria - 78290 San Luis Potosí (México). Tfno: +52 14448173381.

³ Universidad Politécnica de Aguascalientes. Dpto. Ingeniería en Energía. Calle Paseo San Gerardo 207, Fracc. San Gerardo - 20342 Aguascalientes (México). Tfno: +52 1449 4421400, ext. 1650.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8714> | Recibido: 04/01/2018 • Inicio Evaluación: 10/01/2018 • Aceptado: 24/04/2018 • Publicado online: 03/07/2018

ABSTRACT

- This work presents a multiple criteria approach for stator fault detection (FD) in an in-wheel brushless DC (BLDC) motor for electric vehicles. The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of the BLDC is studied. The fault detection scheme is performed based on the instantaneous space phasor (ISP). The fault signature (residual) is built using the fast Fourier transform (FFT) and discrete wavelet transform (DWT). An experimental setup comprising a modified in-wheel BLDC was used to validate this approach. The results of signal processing based FD are verified by an analysis made with thermographic techniques.
- **Key Words:** in-wheel BLDC motor, fault detection, FFT, DWT, infrared image, electric vehicle.

RESUMEN

Este trabajo presenta un esquema de detección de fallos (DF) del estator de un motor de DC sin escobillas (BLDC por sus siglas en inglés) tipo rueda para vehículos eléctricos basado en varios criterios, los fallos que se consideran son cortocircuitos entre espiras en los devanados del estator.

El análisis para determinar los fallos se efectúa a través del cálculo del fasor espacial instantáneo (FEI) de las corrientes del estator. El indicador de fallo (residuo) se determina por varios métodos utilizando la transformada rápida de Fourier (TRF) y la transformada discreta wavelet (TDW).

Los algoritmos de DF se validan en una maqueta experimental con un motor BLDC modificado que permite emular diferentes fallos en el estator.

Se realiza también un análisis con imágenes infrarrojas del motor para corroborar los resultados obtenidos mediante las técnicas basadas en procesamiento de señales.

Palabras Clave: motor BLDC en rueda, detección de fallos, transformada rápida de Fourier, transformada discreta wavelet, imagen infrarroja, vehículo eléctrico.

1. INTRODUCCIÓN

Los motores eléctricos, elementos ampliamente utilizados en el sector industrial y doméstico, consumen la mayor parte de la energía eléctrica generada a nivel mundial. En las últimas década-

das se han introducido nuevos tipos de motores para reducir este consumo entre los que destaca el motor de corriente directa sin escobillas o BLDC por sus siglas en inglés. El motor BLDC ha ganado una popularidad significativa debido a su alta densidad de potencia y elevada eficiencia gracias al uso de imanes permanentes, por lo anterior ocupa una posición privilegiada en el sector de vehículos eléctricos e híbridos [1]. Una variante de este tipo de motor es el llamado BLDC en rueda (*in-wheel* en inglés), éste tiene el estator fijo en el centro y el rotor exterior giratorio. Su principal ventaja es la de no requerir de engranes para su instalación ya que se monta directamente en la rueda del vehículo.

El motor BLDC, como todos los procesos industriales, puede experimentar fallos por diversas causas. Considerando que un fallo es una condición anormal que puede causar una reducción en, o pérdida de, la capacidad de un sistema para desempeñar una tarea determinada. La detección de fallos (DF) determina la presencia de fallos en un sistema así como el instante de su aparición. Para determinar la aparición de un fallo se utiliza un residuo, que es una señal que contiene información basada en la desviación entre las medidas de las entradas/salidas del sistema y estimaciones obtenidas mediante un modelo del mismo u otro método [2].

La DF en motores eléctricos se ha investigado intensamente en los últimos años con el fin de reducir costos de mantenimiento y prevenir paros no programados en procesos industriales, los cuales dan como resultados pérdidas económicas [3-4]. En este trabajo se aborda el problema de la DF en el motor BLDC en rueda motivado por la posibilidad de ser utilizado en vehículos eléctricos ligeros [5] y en sillas de ruedas [6]. Una cantidad importante de trabajos han abordado el problema de la DF en motores BLDC [7-10], sin embargo las investigaciones sobre la DF en el BLDC en rueda son menos frecuentes [11-12].

Los fallos en el motor BLDC pueden ocurrir en el estator, rotor y/o inversor. Dentro de los fallos más comunes se encuentran los del estator, generalmente causados debido al desgaste del aislamiento del devanado [4]. Esto ocurre con frecuencia en las zonas donde los terminales de los devanados entran en las ranuras del motor. La razón del desgaste puede ser provocado por:

- Defectos de manufactura.
- Operación a altas temperaturas.
- Sobrecargas.
- Transitorios elevados de tensión.
- Fricción por vibración.

Los fallos de mayor interés para evitar la degradación del motor son los de tipo incipiente, éstos se manifiestan como un

mal funcionamiento cuya magnitud crece conforme transcurre el tiempo pudiendo convertirse un fallo catastrófico (avería) con la consiguiente destrucción de la máquina [2].

2. TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE FALLOS Y MÁQUETA EXPERIMENTAL

Existen diferentes enfoques para la DF en los motores BLDC, los más populares son los de carácter no invasivo, por ejemplo, mediante la adquisición de señales de corriente del estator únicamente y su análisis con técnicas de procesamiento de señales como la transformada rápida de Fourier (TRF) y la transformada discreta wavelet (TDW) [3-4]. Otra opción para realizar la DF de manera no invasiva es monitoreando la temperatura de la máquina mediante una cámara termográfica [13].

En la Tabla 1 se presentan algunos esquemas de DF en el motor BLDC, así como las ventajas y las desventajas de cada una de ellas y la instrumentación necesaria.

2.1. FASOR ESPACIAL INSTANTÁNEO

El fasor espacial instantáneo (FEI) permite cuantificar el desequilibrio en sistemas trifásicos [15]. Para un sistema trifásico desequilibrado de cuatro hilos las corrientes de línea en las fases A, B y C y el neutro son

$$\begin{aligned} i_A &= i_A^+ + i_A^- + i_A^0 \\ i_B &= i_B^+ + i_B^- + i_B^0 \\ i_C &= i_C^+ + i_C^- + i_C^0 \\ i_N &= i_A + i_B + i_C \end{aligned}$$

donde i_A^+ , i_B^+ , i_C^+ son las corrientes instantáneas de secuencia positiva, i_A^- , i_B^- , i_C^- son las corrientes instantáneas de secuencia negativa y $i_A^0 = i_B^0 = i_C^0$ son las corrientes instantáneas de secuencia cero.

El FEI de la corriente en las fases A, B, and C es

$$\tilde{i} = \tilde{i}^+ + \tilde{i}^- + \tilde{i}^0$$

con

$$\tilde{i}^+ = \sqrt{3}(i_A^+ + a i_B^+ + a^2 i_C^+) = \hat{i}^+ e^{j(\omega t + \varphi^+)}$$

$$\tilde{i}^- = \sqrt{3}(i_A^- + a i_B^- + a^2 i_C^-) = \hat{i}^- e^{j(\omega t + \varphi^-)}$$

$$\tilde{i}^0 = \sqrt{3}(i_A^0 + a i_B^0 + a^2 i_C^0) = 0$$

$$\text{y } \omega = 2\pi f, a = 1 \angle 120^\circ \text{ y } \hat{i} = \sqrt{2} I.$$

Una propiedad importante del FEI es que permite separar las componentes de secuencia positiva y negativa, para el caso de la magnitud al cuadrado del FEI de la corriente se tiene

$$\begin{aligned} |\tilde{i}|^2 &= |\tilde{i}^+ + \tilde{i}^-|^2 \\ &= (\tilde{i}^+)^2 + (\tilde{i}^-)^2 + 2(\tilde{i}^+ \tilde{i}^-) \cos(2\omega t + \varphi^+ + \varphi^-) \end{aligned} \quad (1)$$

Y el valor medio de la magnitud al cuadrado del FEI es

$$\langle |\tilde{i}|^2 \rangle = (\tilde{i}^+)^2 + (\tilde{i}^-)^2$$

De la ecuación (1) se puede observar que $|\tilde{i}|^2$ tiene un valor máximo dado por

$$|\tilde{i}|_M^2 = (\tilde{i}^+ + \tilde{i}^-)^2$$

y un valor mínimo

$$|\tilde{i}|_m^2 = (\tilde{i}^+ - \tilde{i}^-)^2$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores se obtienen las componentes de secuencia positiva y negativa como

$$\tilde{i}^+ = (|\tilde{i}|_M + |\tilde{i}|_m) / 2$$

$$\tilde{i}^- = (|\tilde{i}|_M - |\tilde{i}|_m) / 2$$

Esto permite determinar las corrientes de secuencia positiva \tilde{i}^+ y negativa \tilde{i}^- a partir de la medición de los extremos del FEI. El monitoreo de estas cantidades posibilita calcular el desequilibrio de las corrientes de acuerdo a

$$I_{des} \% = 100 (\tilde{i}^- / \tilde{i}^+) = 100 [(|\tilde{i}|_M - |\tilde{i}|_m) / (|\tilde{i}|_M + |\tilde{i}|_m)]$$

El FEI se puede aplicar también para determinar el desequilibrio en las corrientes provocado por un fallo en el estator en el motor BLDC en rueda. Diversas investigaciones han caracterizado el comportamiento del módulo del FEI a través de espectros de firma de fallo para diferentes casos en máquinas trifásicas rotatorias [3].

El análisis de fallos con el módulo del FEI se efectúa, primeramente, refiriendo las corrientes de las fases del motor a un sistema de dos ejes en cuadratura (marco de referencia fijo con respecto al estator) utilizando la transformación de Concordia, la cual se presenta en la expresión (2):

$$\begin{aligned} i_\alpha &= \sqrt{\frac{2}{3}} i_A - \frac{1}{\sqrt{6}} i_B - \frac{1}{\sqrt{6}} i_C \\ i_\beta &= \frac{1}{\sqrt{2}} i_B - \frac{1}{\sqrt{2}} i_C \\ i_0 &= \frac{1}{\sqrt{3}} (i_A + i_B + i_C) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

donde i_A , i_B , i_C son las corrientes de las fases A, B y C del estator del motor BLDC, i_α , i_β son las componentes de las corrientes en el marco de referencia bifásico, i_0 es la componente homopolar, la

Tipo de métodos	Tipo de fallos en el motor BLDC					
	Rodamiento	Excentricidad	Cortocircuito Circuito abierto	Desmagnetización	Equipo requerido	Desventajas
Análisis espectral de la corriente	■	■	■	■	Sensores de corriente, codificador óptico	Variación con la velocidad
Análisis espectral de vibración mecánica	■	■			Acelerómetro, codificador óptico	Indicadores de fallos a la misma frecuencia
Estimación paramétrica			■	■	Sensores de corriente y tensión	Conocimiento de los parámetros del motor
Monitoreo de temperatura			■		Cámara termográfica	Variación de la temperatura por diversos factores
Monitoreo de flujo directo	■	■	■		Sensores de flujo magnético	Sensores especializados

Tabla 1: Comparación de clases y técnicas de diagnóstico en el motor BLDC [14]

cual es ortogonal al plano de las componentes i_{α} , i_{β} . El módulo del FEL $|\tilde{I}|$ se calcula de acuerdo con la expresión (3):

$$|\tilde{I}| = \sqrt{i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2} \quad (3)$$

En [16] se demuestra que las componentes en frecuencias asociadas a los fallos de estator (F_{EST}) empleando el módulo del FEL de las corrientes del estator se presentan en múltiplos del doble de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación F_L . Debido a que la magnitud de las componentes en frecuencia asociadas al fallo decrecen conforme se incrementa la frecuencia, la frecuencia distintiva del fallo se determina por simplicidad con la magnitud de la primera componente de acuerdo a la expresión (4):

$$F_{EST} = 2F_L \quad (4)$$

2.2. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

La TRF es una herramienta que permite obtener la transformada discreta de Fourier de una señal con un mínimo de operaciones. El número de muestras de la señal y el modo de agrupación de operaciones (radix) define la cantidad de éstas que se realizan para cada transformación. Así mismo, el tamaño de las muestras está en función del radix de la transformación. El esfuerzo computacional para la transformada rápida de Fourier radix 2 es de $O =$

$N \log_2(N)$ donde O es el número de operaciones resultantes y N el tamaño de la muestra en potencias de 2 [17].

2.3. TRANSFORMADA DISCRETA WAVELET

La TDW es una técnica que permite analizar las propiedades tiempo-frecuencia de una señal. El análisis de una señal $y(k)$ con $k=1,2,\dots$ mediante la TDW es equivalente a efectuar la convolución de ésta, en el dominio del tiempo, con las secuencias de la respuesta al impulso de una serie de filtros pasa bajos $h(k)$ y pasa altos $g(k)$ seguida por un submuestreo de un factor 2 como se muestra en la Fig. 1. Así al filtrar de manera recursiva cada nivel j , se genera el coeficiente de aproximación a_j de baja frecuencia y de detalle d_j de alta frecuencia dando lugar al llamado análisis multiresolución. Los coeficientes d_j generados por la wavelet a un cierto nivel proporcionan información de la energía de la señal en esa banda de frecuencias [18].

Existen diferentes wavelets que permiten calcular la TDW de una señal, en este trabajo se consideren las siguientes: Haar, Daubechies 4 (Daub4), Daubechies 6 (Daub6) y Coiflet 6 (Coif6). La wavelet Haar es la más simple, en tanto que las Daub4 y Daub6 son dos de las más empleadas en el procesamiento de señales y la Coif6 fue diseñada para mantener una relación estrecha entre los valores de la aproximación a_j y los valores de la señal original [19].

Los coeficientes de los filtros $h(k)$ y $g(k)$ para los casos mencionados se presentan a continuación.

Haar: $h = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right\}$ y $g = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right\}$.

Daub4: $h = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4\}$ y $g = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4\}$

donde $\alpha_1 = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$ $\alpha_2 = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$ $\alpha_3 = \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$ $\alpha_4 = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$ y

$\beta_1 = \alpha_4$ $\beta_2 = -\alpha_3$ $\beta_3 = \alpha_2$ $\beta_4 = -\alpha_1$.

Daub6: $h = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6\}$ y $g = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6\}$

donde $\alpha_1 = 0.332670552950083$ $\alpha_2 = 0.806891509311092$ $\alpha_3 = 0.459877502118491$

$\alpha_4 = -0.135011020010255$ $\alpha_5 = -0.0854412738820267$ $\alpha_6 = 0.0352262918857095$ y

$\beta_1 = \alpha_6$ $\beta_2 = -\alpha_5$ $\beta_3 = \alpha_4$ $\beta_4 = -\alpha_3$ $\beta_5 = \alpha_2$ $\beta_6 = -\alpha_1$.

Coif6: $h = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6\}$ y $g = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6\}$

donde $\alpha_1 = \frac{1-\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$ $\alpha_2 = \frac{5+\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$ $\alpha_3 = \frac{14+2\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$

$\alpha_4 = \frac{14-2\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$ $\alpha_5 = \frac{1-\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$ $\alpha_6 = \frac{-3+\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$ y

$\beta_1 = \alpha_6$ $\beta_2 = -\alpha_5$ $\beta_3 = \alpha_4$ $\beta_4 = -\alpha_3$ $\beta_5 = \alpha_2$ $\beta_6 = -\alpha_1$.

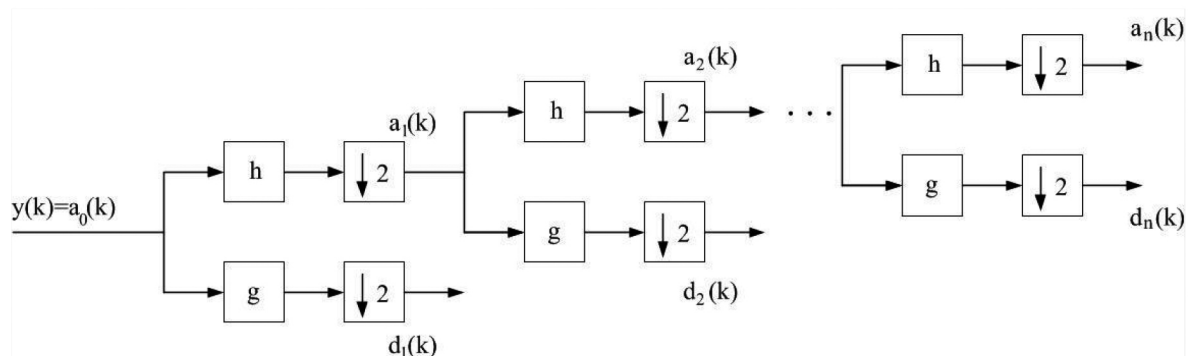


Fig. 1: Análisis multiresolución con la TDW

2.4. INDICADOR DE FALLO O RESIDUO

El indicador de fallo o residuo para la DF se determina de dos formas:

- Componente en frecuencia dada por la ecuación (4) calculada con la TRF del módulo del FEI.
- Valor eficaz de los coeficientes generados para el nivel j obtenido a partir de la descomposición con la TDW del módulo del FEI donde $j = 1, 2, \dots, o N/2$ usando las diferentes wavelets propuestas, la banda debe contener a la frecuencia dada por la ecuación (4). El valor eficaz se determina de acuerdo con la ecuación (5):

$$V_{eficaz,j} = \sqrt{\frac{1}{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} d_{j,k}^2} \quad (5)$$

donde $d_{j,k}$ es el k -ésimo coeficiente calculado para el nivel j y N_j es el número de coeficientes de dicho nivel.

2.5. ANÁLISIS TERMOGRÁFICO

La termografía permite identificar cuándo y dónde se necesita mantenimiento en una instalación industrial, ya que los elementos mecánicos y eléctricos suelen calentarse antes de fallar. Las cámaras termográficas funcionan capturando la energía infrarroja irradiada por un objeto mediante un detector y un sistema óptico de enfoque. El detector envía los datos a un sensor electrónico para procesar la imagen. Una vez completado este paso el sensor genera una imagen compatible con el visor. Un análisis termográfico en un motor permite detectar un sobrecalentamiento, el cual puede deberse a un desequilibrio de tensión, fallo de un rodamiento, fallo del aislamiento, alineación inadecuada del eje, etc. [13].

2.6. MAQUETA EXPERIMENTAL

En la Fig. 2 se muestra el diagrama de bloques y la fotografía de una maqueta experimental con un motor BLDC en rueda para la evaluación de los algoritmos de DF y, eventualmente, de control. Consta de los siguientes elementos:

- Motor BLDC en rueda: Motor trifásico de 14" de diámetro de flujo axial de 0.5 kW, 12V, 8 A, 225 rpm (a 60 Hz) y 10 polos.
- Módulo de DF y control: Etapa basada en el procesador digital de señales (PDS) dsPIC30F4011, el PDS realiza las tareas que se describen a continuación:
 - Procesamiento de las señales de corriente del estator para calcular el FEI.
 - Procesamiento de las señales de los sensores de efecto Hall del motor para determinar la posición del rotor del motor.
 - Ejecución de los algoritmos de DF.

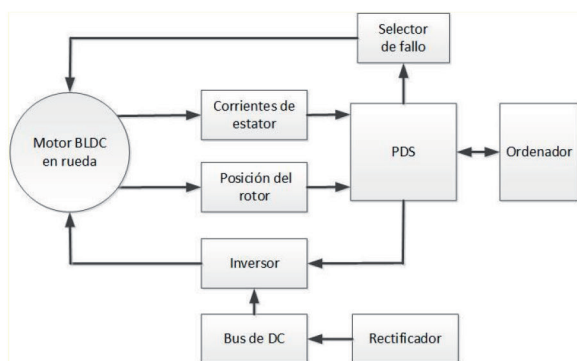


Fig. 2: Maqueta experimental del motor BLDC en rueda modificado

- Generación del patrón de modulación por ancho de pulso para el inversor trifásico.
- Selección del tipo de fallo en el motor a través del accionamiento de uno de varios contactores que ponen en cortocircuito diferentes secciones de los devanados del estator (ver Fig. 3).
- Comunicación con el ordenador personal a través de una interfaz RS-232.

- Módulo de electrónica de potencia: Etapa constituida por un rectificador con un condensador a la salida (bus de DC), el cual provee de potencia al inversor trifásico que alimenta el motor y permite operar a velocidad variable.
- Módulo de adquisición de señales: Etapa que realiza la medición de las corrientes de fase del motor y las acondiciona para que sean adquiridas por el convertidor analógico-digital del PDS, así como el acondicionamiento de las señales de los sensores de efecto Hall del motor para leerse con puerto de entrada/salida del PDS.
- Ordenador personal: Ordenador que ejecuta un programa en lenguaje Embarcadero que permite la comunicación con el PDS vía la interfaz RS-232 para mostrar la información del motor y realizar un análisis redundante de la DF en el motor.

Las modificaciones del motor BLDC en rueda para emular los fallos de diferente magnitud en el estator se muestran en la Fig. 3. Se detalla también, como ejemplo, los posibles cortocircuitos que se pueden generar en la fase A del motor (R_{FA1} , R_{FA2} y R_{FA3}) a través de las derivaciones introducidas en el devanado.

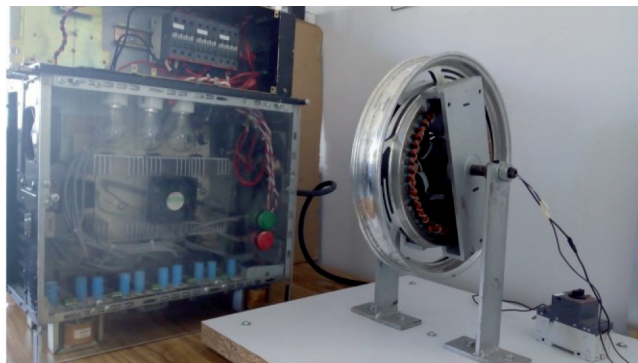
3. RESULTADOS

Las señales de corriente del estator permiten determinar el módulo del FEI. La DF en el estator del motor BLDC en rueda se efectúa de manera redundante con tres métodos para garantizar una detección confiable:

- Análisis espectral del módulo del FEI de las corrientes del estator con la TRF.
- Análisis con el valor eficaz de los coeficientes dados por la TDW del módulo del FEI de las corrientes del estator.
- Análisis de imágenes infrarrojas provenientes de una cámara termográfica.

Se consideró un caso de fallo que consistió en cortocircuitar un 1/17 del devanado de la fase A del motor BLDC en rueda (3.5% de cambio en la magnitud de la resistencia total del devanado con respecto al caso sin fallo). Este fallo es de interés ya que debido a su magnitud se considera como un fallo de tipo incipiente (cambio de la resistencia de la fase menor al 5%).

La Fig. 4 muestra la magnitud de la TRF del módulo del FEI de las



corrientes de estator del motor alimentado con una tensión a 60 Hz, la cual corresponde a una velocidad mecánica de 225 rpm, para los casos a) sin fallo y b) con fallo. Se puede observar que el indicador de fallo o residuo en el espectro de frecuencia aparece como una componente al doble de la frecuencia de operación del motor (120 Hz).

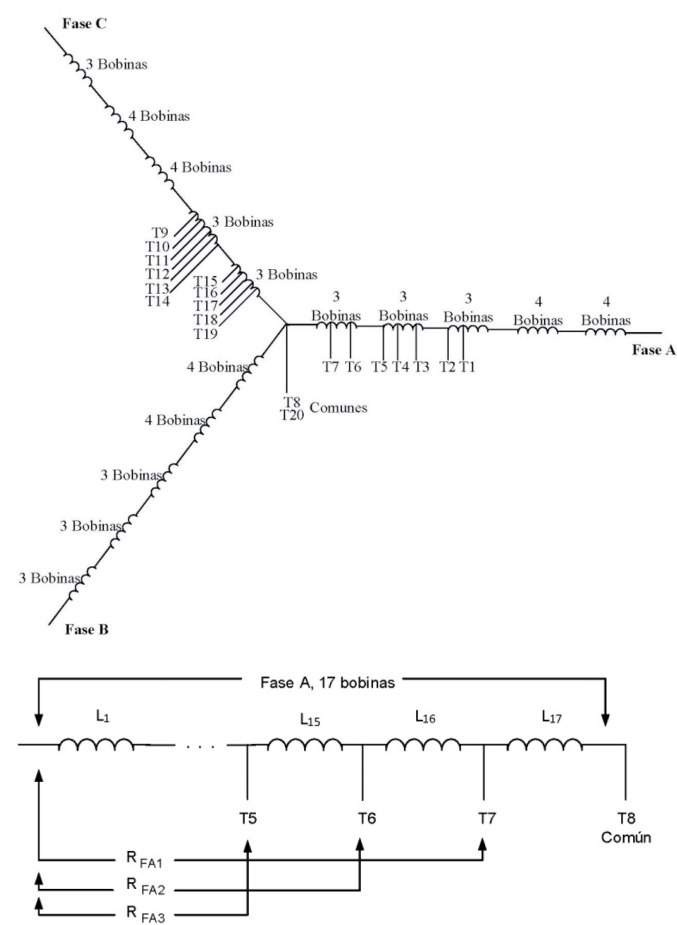


Fig. 3: Estator del motor BLDC en rueda modificada para emular fallos

Respecto al análisis con el valor eficaz de los coeficientes dados por la TDW del módulo del FEI, se implementó un algoritmo que efectúa la cuantificación, bajo las mismas condiciones de operación previas (con el mismo fallo) en el motor BLDC en rueda alimentado por una tensión a una frecuencia de 60 Hz. Se emplearon las wavelets Haar, Daub4, Daub6 y Coif6 para realizar el análisis.

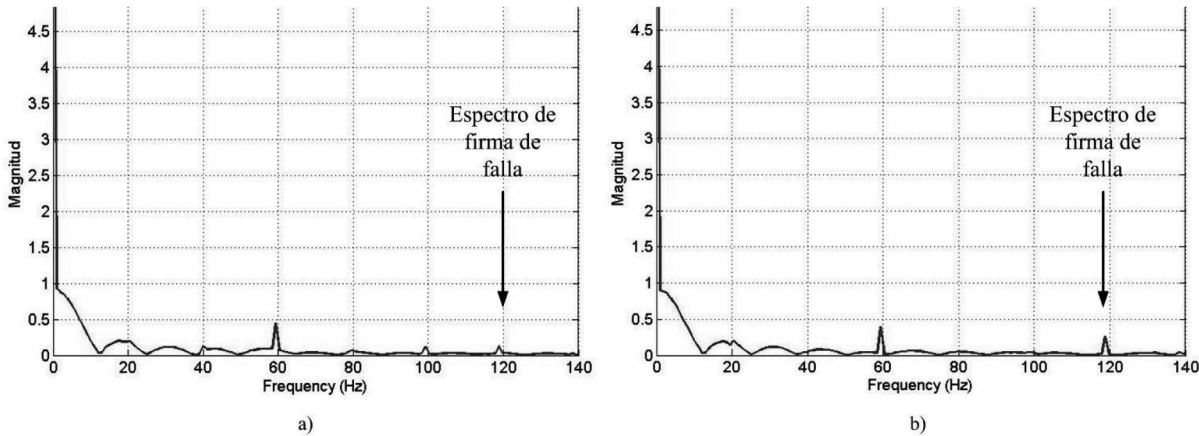


Fig. 4: Análisis espectral del módulo del FEI de las corrientes de estator con la TRF a) sin fallo y b) con fallo

Cuando se presenta un fallo en el estator del motor por cortocircuito entre espiras, se genera un desbalance en las corrientes de éste, y por consiguiente, se produce un cambio en el valor eficaz de los coeficientes de detalle d_j dados por la TDW del módulo del FEI en la banda donde se encuentra la frecuencia al doble de la frecuencia de la tensión de alimentación del motor.

Para la detección del fallo en el estator se calculó la TDW del módulo del FEI de las corrientes de estator con cada wavelet. A continuación se ubicó la banda de interés de los coeficientes wavelet. Para este caso, con la frecuencia de muestreo dada, correspondió a la quinta banda de descomposición (de 61 Hz a 122 Hz). Enseguida se efectuó la cuantificación calculando el valor eficaz de los coeficientes de esa banda para el escenario sin y con fallo. En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos usando la TDW con las cuatro wavelets propuestas.

Para evaluar la efectividad de la técnica de DF utilizando el valor eficaz de los coeficientes dados por la TDW del módulo del FEI de las corrientes de estator se utilizó la regla empírica (ver [20]), con este análisis es posible validar la aislabilidad de los fallos. La cantidad de experimentos efectuados para cada caso empleando las diferentes wavelets fue de diez experimentos para los escenarios sin y con fallo.

El método de la regla empírica consiste en obtener la media aritmética (μ) y la desviación estándar (σ) de los valores eficaces de los coeficientes de detalle d_j dados por la TDW del módulo del FEI de las corrientes de estator en la banda de interés para el número total de experimentos para los casos sin y con fallo, con estos datos se genera una distribución normal que se grafica con una extensión de 3σ . Para cada una de las wavelets (Haar, Daub4, Daub6 y Coif6) se determinaron las distribuciones normales para ambos casos, las cuales se presentan en la Fig. 5. Se puede observar que los intervalos en los que están definidas las distribuciones normales para los casos sin y con fallo para todas las wavelets no coinciden, por lo que se tiene más de un 99.7% de probabilidad que ambos eventos estén aislados y se pueda detectar el fallo.

TDW	Valor eficaz Caso a (sin fallo)	Valor eficaz Caso b (con fallo)	Diferencia del valor eficaz Caso a – Caso b
Haar	0.3041	0.3494	0.0453
Daub4	1.8202	2.4814	0.6612
Daub6	1.5689	2.0418	0.4729
Coif6	1.7582	2.1215	0.3633

Tabla 2: Valor eficaz de los coeficientes de detalle d_j de la TDW del módulo del FEI de las corrientes de estator sin y con fallo, 5ta. banda (61–122 Hz)

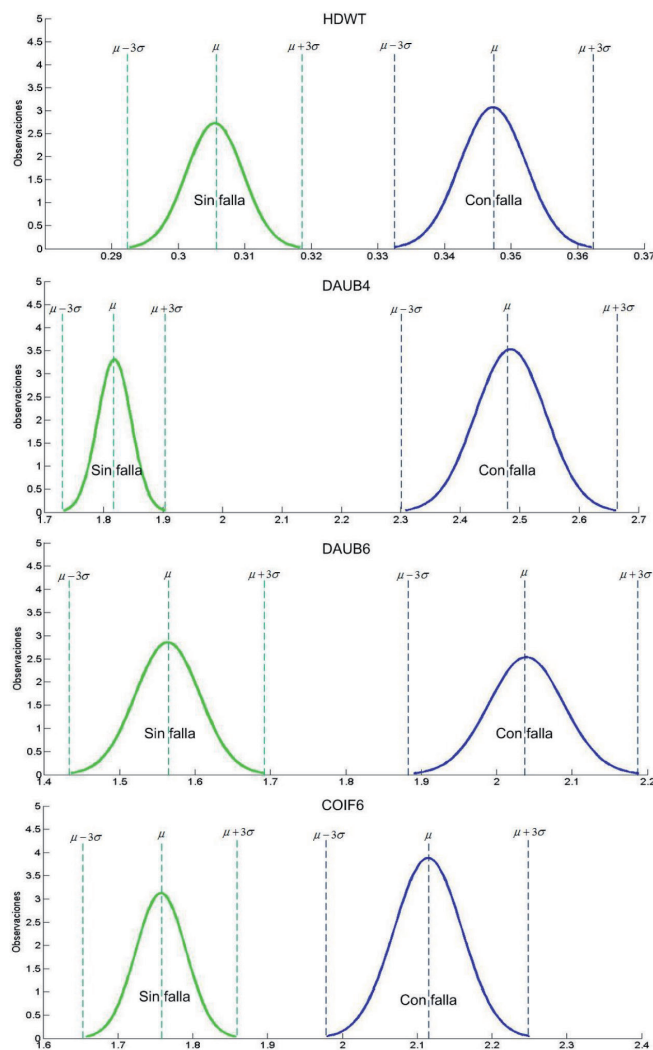
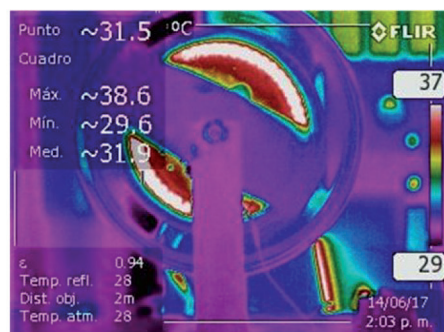


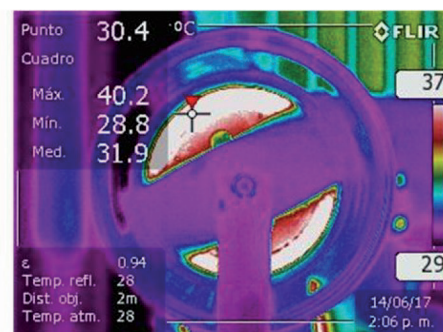
Fig. 5: Distribuciones normales de los valores eficaces de los coeficientes de detalle dados por la TDW del módulo del FEI de las corrientes de estator sin y con fallo, 5ta. banda (61-122 Hz)

Finalmente, mediante el uso de una cámara termográfica se estudió la evolución de la temperatura del motor BLDC en rueda para el caso de fallo de cortocircuito en el estator. Los resultados se muestran en la Fig. 6, las condiciones en las que se tomaron las imágenes para determinar la temperatura fueron las siguientes:

- Sin fallo en estado estable y operando a 60 Hz.
- Con fallo, el fallo con las mismas características establecida anteriormente, operando a 60 Hz. Cabe señalar que la imagen se capturó en el momento justo que se presentó el fallo de cortocircuito en el devanado del estator.



a)



b)

Fig. 6: Imágenes termográficas del BLDC en rueda a) sin fallo y b) con fallo

La temperatura en estado estable del motor sin fallo fue casi constante con un valor de 38.4° C. Esta condición de operación del motor se mantuvo por un lapso de tres minutos, presentando posteriormente un aumento de temperatura de 0.2°C. La temperatura se incrementó inmediatamente a 40.2°C al momento en que ocurrió el fallo de cortocircuito en el estator del motor. Este cambio de temperatura repentino indicó la presencia de un problema eléctrico en el estator.

Las características de la cámara termográfica utilizada son resolución infrarroja de 320 x 240 píxeles, sensibilidad térmica menor a 0.05°C, precisión ±2°C y rango de medición de temperatura de -20°C a +120°C.

4. DISCUSIÓN

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a una condición de fallo de cortocircuito en el estator del motor de tipo incipiente, esto es, un cortocircuito de 1/17 del devanado de la fase A.

Los enfoques utilizados para la DF, basados en el procesamiento de señales, analizan el módulo del FEI de las corrientes de estator para detectar el cambio de magnitud de la componente al doble de la frecuencia de operación (120 Hz). La diferencia de la DF entre las diversas técnicas se describe a continuación:

- La detección por medio de la TRF del módulo del FEI es difícil cuando los fallos son incipientes ya que la magnitud de la componente en frecuencia a 120 Hz es pequeña cuando ocurre el fallo y de un valor próximo al caso sin fallo lo cual se puede apreciar en la Fig. 4. Lo anterior hace necesario añadir un clasificador que garantice que la variación en el espectro de frecuencia es un fallo provocado por un cortocircuito y no por una variación en las corrientes de fases debida a cambios de carga o por variación de la temperatura en el motor.
- El valor eficaz de los coeficientes dados por la TDW del módulo del FEI para cada una de las wavelets analizadas permitió detectar el fallo de cortocircuito. El procedimiento consistió en obtener el valor eficaz de los coeficientes de detalle de cada banda de descomposición para cada wavelet bajo condiciones sin y con fallo, se determinó el valor eficaz máximo para el caso con fallo así como el valor correspondiente al escenario sin fallo para la misma banda y se calculó la diferencia (máxima) de ambos valores como se muestra en la Tabla 2. La banda de frecuencia de interés para este caso fue la quinta con un rango de frecuencia de 61 Hz a 122 Hz.
- El análisis efectuado con valor eficaz de los coeficientes dados por la TDW del módulo del FEI mostró que el uso de la

wavelet Daub4 presentó la mayor efectividad de acuerdo a la Tabla 2 y la Fig. 5, de esta última se puede constatar que la separación entre las distribuciones normales es mayor para el caso en el que se emplea esta wavelet. Además la carga computacional para efectuar la TDW con la wavelet Daub4 es menor que con las wavelets Daub6 y Coif6.

- La DF de cortocircuito en el estator del motor por medio de las imágenes infrarrojas de la cámara termográfica se utiliza como medio cualitativo para corroborar los resultados obtenidos con el análisis de señales. Este método de DF es utilizado a nivel industrial en las máquinas eléctricas rotatorias debido a su sencillez y a no ser invasivo. Sin embargo el costo del equipo, la necesidad de conocer las condiciones ambientales y los rangos de operación limitados han restringido el uso de estos sistemas para la DF en línea.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se implementó una metodología experimental basada en diferentes criterios para la DF de cortocircuito en los devanados del estator de un motor BLDC en rueda a través de mediciones no invasivas. Se emplearon dos enfoques para efectuar una DF redundante y lograr una mayor confiabilidad en el dictamen en caso de un fallo.

Las técnicas de análisis de señales se compararon contra métodos usualmente utilizados a nivel industrial en la DF producidas por cortocircuitos en los devanados de los motores como es la termografía.

El enfoque basado en procesamiento de señales de corrientes del estator del motor BLDC en rueda permitió no sólo detectar un fallo, sino también monitorear continuamente el sistema de manera económica a diferencia del método de la termografía. Además, estas técnicas se pueden incorporar eventualmente en el procesador digital que realice el control del motor.

La DF de cortocircuito en los devanados del estator del motor BLDC utilizando la TDW fue más efectiva con la wavelet Daub4 y computacionalmente más conveniente que las wavelets Daub6 y Coif6.

Como trabajo futuro se propone explorar la aplicación de los métodos estudiados para detectar otros tipos de fallos en el motor BLDC como son los problemas de desmagnetización del rotor, excentricidad y fallos en los rodamientos, o bien, analizar la factibilidad de su aplicación a otros tipos de máquinas eléctricas como los aerogeneradores [21].

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Boglietti A, El-Refaie AM, Drubel O, et al. "Electrical machine topologies: hottest topics in the electrical machine research community", IEEE Industrial Electronics Magazine. Junio 2014. Vol.8-2 p.18-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MIE.2013.2294077>
- [2] Isermann R. Fault-Diagnosis Systems An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Germany: Springer, 2006. 475 p. ISBN: 3-540-24112-4
- [3] Henaio H, Capolino GA, Fernandez-Cabanas M, et al. "Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques", IEEE Industrial Electronics Magazine. Junio 2014. Vol.8-2 p.18-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MIE.2013.2287651>
- [4] Riera-Guasp M, Antonino-Daviu JA, Capolino GA. "Advances in electrical machine, power electronic, and drive condition monitoring and fault detection: state of the art", IEEE Transactions on Industrial Electronics. Marzo 2015. Vol. 62-3 p.1746-1759. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2014.2375853>
- [5] Chanpeng W, Hachanont P. "Design of efficient in-wheel motor for vehicle". Energy Procedia. 2014. Vol. 56. p.525-531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.188>

- [6] Gottipati P, Dobzhanskyi O, Mendrela EA. "In-wheel brushless DC motor for a wheel chair drive". En: 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2010. P. 1-4.
- [7] Da Y, Shi X, Krishnamurthy M. "Health monitoring, fault diagnosis and failure prognosis techniques for brushless permanent magnet machines", En: 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011. P. 1-7.
- [8] Li Z, Fan X, Mao H, Cui J. "Simulation and fault diagnosis for BLDCM". En: 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2013. P. 3085-3090.
- [9] Liu D, Yang B, Zhao Y, et al. "Time-frequency analysis based on BLDC motor fault detection using Hermite S-method". En: IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE), 2012. P. 592-596.
- [10] Abed WR, Sharma SK, Sutton R. "Fault diagnosis of brushless DC motor for an aircraft actuator using a neural wavelet network". En: IET Conference on Control and Automation 2013: Uniting Problems and Solutions, 2013. P. 1-6.
- [11] Tashakori A, Ektesabi M. "Fault diagnosis of in-wheel BLDC motor drive for electric vehicle application". En: 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2013. P. 925-930.
- [12] Maldonado-Ruelas VA, Villalobos-Piña FJ, Sosa-Serna GA, Alvarez-Salas R, Pazos-Flores F, Alvarez-Salas JA. "In-wheel brushless DC motor test-bed for control and fault detection". En: IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, 2016. P. 1-5.
- [13] Garcia-Ramirez AG, Morales-Hernandez LA, Osornio-Rios RA, et al. "Fault detection in induction motors and the impact on the kinematic chain through thermographic analysis". Electric Power Systems Research. 2014. Vol. 114. P. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.03.031>
- [14] Krishnan R. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. USA: CRC Press, 2009. 611 p. ISBN: 9780824753849
- [15] Milanez DL, Emanuel AE. "The instantaneous-space-phasor: a powerful diagnosis tool". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. February 2003. Vol. 52-1. p.143-148. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2003.809069>
- [16] Verucchi CJ, Acosta GG. "Fault detection and diagnosis techniques in induction electrical machines". IEEE Latin America Transactions. March 2007. Vol. 5-1. P. 41-49. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/T-LA.2007.4444532>
- [17] Villalobos Piña FJ, Alvarez-Salas R. "Algoritmo robusto para el diagnóstico de fallas eléctricas en el motor de inducción trifásico basado en herramientas espectrales y ondeletas", Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI). Julio 2015. Vol.12-3 p. 292-303. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2015.04.003>
- [18] Mallat S. A wavelet tour of signal processing. Second Edition. USA: Academic Press, 1999. 637 p. ISBN: 0-12-466606-X
- [19] Walker J. A primer on wavelets and their scientific applications. Second Edition. USA: Chapman and Hall/CRC Press, 2008. 293 p. ISBN: 978-1-58488
- [20] Garcia-Guevara FM, Villalobos-Piña FJ, Alvarez-Salas R, et al. "Stator fault detection in induction motors by autoregressive modeling". Mathematical Problems in Engineering. 2016. Vol. 2016 p.7 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3409756>
- [21] Martínez-Cámara E, Jiménez-Macias E, Blanco-Fernández J, et al. "Failure detection and prediction in wind turbines by using Scada data". DYNA Energía y Sostenibilidad. Enero-Diciembre 2013. Vol. 2-1. P. 10. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES5708>

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Tecnológico Nacional de México / I. T. Aguascalientes a través del Departamento de Posgrado e Investigación.