

Detección de fallas de un aerogenerador basado en un PMSG

Raúl A. Ortiz-Medina* ** Francisco J. Villalobos-Piña** Ricardo Alvarez-Salas***
Mario Esparza-González** Carlos H. Saucedo-Zarate** Victor A. Maldonado-Ruelas**

*Universidad Politécnica de Aguascalientes, Aguascalientes, México

(Tel: 01 (449)4421400 ext.1650; e-mail: raul.ortiz@upa.edu.mx).

** Tecnológico Nacional de México / I. T. Aguascalientes, Aguascalientes, México

(e-mail: fvillalobos@mail.ita.mx)

*** Facultad de Ingeniería / Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México,

(e-mail: ralvarez@uaslp.mx)

Resumen: En este trabajo se realizó la detección de fallas de estator de un generador síncrono de imanes permanente (PMSG, por sus siglas en inglés) trifásico de un aerogenerador para aplicaciones pequeñas en generación distribuida. La detección de fallas se efectuó a través de la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) y de la transformada wavelet discreta (TWD) aplicadas al módulo del vector de Park de las corrientes de estator. Se desarrolló un banco de pruebas donde las aspas del aerogenerador encargadas de captar la energía del viento se sustituyeron por un motor de CD controlado por un sistema electrónico de potencia, el cual permite al motor imitar la acción del viento. El banco de pruebas incluye la instrumentación para la adquisición de las señales de corriente del estator, a partir de las señales de corriente adquiridas se determinó el módulo del vector de Park, el cual se analizó con la FFT y la TWD con diversas wavelets. Así se obtuvieron las firmas de falla por medio de las componentes de frecuencia con la FFT y a través del cálculo del valor RMS de las muestras de la señal transformada en diferentes bandas de frecuencia con la TWD.

Palabras clave: Detección de fallas, Aerogenerador, Vector de Park, FFT, TDW

1. INTRODUCTION

La energía eólica ha sido otra vez objeto de investigación en los recientes años, ya que se había avanzado en esta tecnología hace más de 100 años, pero el auge de los combustibles fósiles desincentivó el avance. Ahora, la energía eólica ha tomado un papel muy importante entre las opciones existentes y viables. Sólo en la última década, la capacidad instalada de energía eólica por medio de aerogeneradores a nivel mundial se ha quintuplicado, llegando a una capacidad instalada de 539,123 MW (Global Wind Energy Council (2017)). Esto pareciera ser mucho, pero la capacidad instalada de energías renovables representa tan solo el 2.7 % de la capacidad instalada total en el mundo (British Petroleum (2017)). Naturalmente, la investigación en muchos de los campos relacionados con la energía eólica también está creciendo, enfocándose en la inserción de esta última a la red eléctrica y su uso para sistemas aislados o distribuidos. El aumento en el uso de generadores implica avances en muchos campos de la ciencia y la tecnología, involucrando disciplinas como la mecánica, eléctrica, electrónica, materiales, entre otras. Así mismo, el desarrollo de aerogeneradores implica cubrir necesidades derivadas del su uso. Una de ellas es el mantenimiento, ya que son máquinas en constante movimiento y calentamiento mecánico y eléctrico, lo que las hace propensas a fallas.

El trabajo en mantenimiento de aerogeneradores basado en el avance científico-tecnológico lo abordan trabajos como (Ribrant et al. (2007), Lu et. al. (2009), Daneshi-Far et. al.

(2010) y Amirat et. al. (2014)) que abundan en estadísticas de fallas, tipos de fallas, frecuencia de ocurrencia de las fallas y componentes en los que ocurren las fallas. Los mismos autores reportan sistemas de monitoreo, detección y diagnóstico de fallas, que usan sensores de vibración externos en algunos componentes, cuyas señales se tratan con diferentes técnicas de análisis de señales, mientras que otros sistemas usan las propias señales de corriente del aerogenerador sin elementos invasivos, ni la interrupción de la señal y a partir de ahí se utilizan técnicas de análisis de señales para determinar los criterios de mantenimiento según aparezcan las fallas.

El uso de los aerogeneradores se ha concentrado en las granjas eólicas de gran capacidad y la mayoría de los trabajos publicados con respecto a fallas son en aerogeneradores de gran capacidad (Hyers et. al. (2013), Ko et. al. (2012), Shahriar et. al. (2017), Peeters et. al. (2018)). Aun así, existe en la literatura, muy poca información estadística de fallas en aerogeneradores de baja potencia, utilizados para generación distribuida. La generación distribuida de energía eléctrica a partir de medios eólicos, se lleva a cabo a través de pequeños aerogeneradores y micro aerogeneradores. Los aerogeneradores de este tipo se encuentran tanto en zonas urbanas como en lugares aislados y pueden ser o no interconectados a la red, además de que el recurso eólico que necesitan es mínimo comparado con el de aerogeneradores de gran capacidad. Existe gran cantidad de literatura acerca de pequeños y micro aerogeneradores (Tummala et. al. (2016), Grieser et. al. (2015), Lubitz (2014)). Pero existen muy pocos

en materia de fallas en este tipo de aerogeneradores como (Cai et. al. (2016)) que aborda fallas mecánicas o (Hosseinzadeh et. al. (2016)) que abordan las fallas de manera general en micro redes eléctricas. La detección de fallas eléctricas de cortocircuito en estator de máquinas eléctricas de pequeños y micro aerogeneradores es un área poco abordada en la literatura.

Este trabajo aborda la detección de fallas en el estator de un generador síncrono de imanes permanente (PMSG, por sus siglas en inglés) de baja potencia a través del análisis del vector de Park de las corrientes de estator empleando la transformada wavelet discreta (TWD). El artículo está organizado de la siguiente manera: En la sección 2 se aborda la teoría del vector de Park como herramienta para la detección de desbalances entre las fases de una máquina eléctrica trifásica. La TWD como herramienta de análisis multiresolución se revisa en la sección 3. En la sección 4 se describe el PMSG del aerogenerador utilizado y el desbalance introducido al estator de la máquina. La sección 5 describe un banco de pruebas para evaluar algoritmos de detección de fallas en el PMSG. En la sección 6 se presentan los resultados experimentales empleando la FFT y la TWD aplicados al módulo del vector de Park de las señales de corriente del estator del PMSG. Finalmente, se dan las conclusiones de este trabajo.

2. VECTOR DE PARK

El vector de Park, también llamado fasor espacial instantáneo, es una herramienta utilizada en la teoría de máquinas eléctricas (Milanez et al. (2003)), se parte de las corrientes de magnetización que se muestran en (1) que son, en principio, las corrientes de un sistema trifásico balanceado con $\omega = 2\pi f$, donde f es la frecuencia eléctrica.

$$\begin{aligned} i_a &= I \cos(\omega t + \varphi) \\ i_b &= I \cos(\omega t + \varphi - 120) \\ i_c &= I \cos(\omega t + \varphi + 120) \end{aligned} \quad (1)$$

El sistema trifásico, independientemente de la perturbación, cumple con el teorema de Fortescue, que establece que una señal trifásica puede generarse a partir de las componentes de secuencia positiva, negativa y cero (Grainger et al. (1996)), como se muestra en (2)

$$\begin{aligned} i_a &= i_a^+ + i_a^- + i_a^0 \\ i_b &= i_b^+ + i_b^- + i_b^0 \\ i_c &= i_c^+ + i_c^- + i_c^0 \end{aligned} \quad (2)$$

El vector de Park de corrientes se define de acuerdo a (3)

$$\tilde{I} = \tilde{I}^+ + \tilde{I}^- + \tilde{I}^0 \quad (3)$$

donde las corrientes de secuencia positiva, negativa y cero, se definen en (4)

$$\begin{aligned} \tilde{I}^+ &= (2/3)(i_a^+ + ai_b^+ + a^2i_c^+) = \hat{I}^+ e^{j(\omega t + \varphi^+)} \\ \tilde{I}^- &= (2/3)(i_a^- + ai_b^- + a^2i_c^-) = \hat{I}^- e^{j(\omega t + \varphi^-)} \\ \tilde{I}^0 &= (2/3)(i_a^0 + ai_b^0 + a^2i_c^0) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

El vector de Park es que se puede expresar sólo en términos de su secuencia positiva y negativa por separado y el cuadrado de la magnitud del vector de Park de corriente se obtiene (5)

$$\begin{aligned} |\tilde{I}|^2 &= |\tilde{I}^+ + \tilde{I}^-|^2 = (\hat{I}^+)^2 + (\hat{I}^-)^2 \\ &\quad + 2(\hat{I}^+ \hat{I}^-) \cos(2\omega t + \varphi^+ + \varphi^-) \end{aligned} \quad (5)$$

Se encuentra entonces que el valor promedio del cuadrado del vector de Park es

$$|\tilde{I}|^2 = (\hat{I}^+)^2 + (\hat{I}^-)^2 \quad (6)$$

De (5) y (6) se infiere que el cuadrado de la magnitud del vector de Park tiene valores que oscilan entre un máximo de

$$|\tilde{I}|_M^2 = (\hat{I}^+ + \hat{I}^-)^2 \quad (7)$$

Y un mínimo de

$$|\tilde{I}|_m^2 = (\hat{I}^+ - \hat{I}^-)^2 \quad (8)$$

Resolviendo (7) y (8) para las componentes de secuencias positiva y negativa, quedan las ecuaciones (9) y (10) respectivamente

$$\hat{I}^+ = (|\tilde{I}|_M + |\tilde{I}|_m)/2 \quad (9)$$

$$\hat{I}^- = (|\tilde{I}|_M - |\tilde{I}|_m)/2 \quad (10)$$

De esta manera, las componentes de secuencia positiva y negativa se obtienen a partir de los valores extremos del vector de Park, por lo que el monitoreo de estas señales permite la estimación de desbalance, como se observa en (11).

$$\%IU = 100 \hat{I}^+ / \hat{I}^- = 100 (|\tilde{I}|_M - |\tilde{I}|_m) / (|\tilde{I}|_M + |\tilde{I}|_m) \quad (11)$$

Eventualmente, para determinar el efecto que tiene un desbalance en la señal de corriente de una máquina eléctrica, el vector de corriente se mapea a un marco de referencia fijo con respecto al estator de la máquina, denominado α - β , por medio de la transformación de Concordia (12) (Abad et. al., 2011).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos(-2\pi/3) & \cos(2\pi/3) \\ 0 & -\text{sen}(-2\pi/3) & -\text{sen}(-2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

De esta manera, el módulo del vector de Park de una señal trifásica queda como se indica en (13)

$$|\tilde{I}| = (i_\alpha^2 + i_\beta^2)^{1/2} \quad (13)$$

El módulo del vector de Park es una manera de detectar un desbalance y, por ende, una falla, ya que cada condición que presenta una máquina eléctrica en sus señales genera diferentes formas de onda en el módulo del vector de Park, por lo que puede emplearse como un indicador o firma de falla (residuo) para el sistema en cuestión. El módulo de vector de Park puede analizarse por diferentes métodos de procesamiento de señales, que han sido comprobados para la detección de fallas para motores de inducción de uso industrial y motores brushless DC en aplicaciones industriales y de vehículos eléctricos. (Benbouzid et al. (2003), Maldonado-Ruelas et. al. (2016), Gritli et. al. (2017), Craciunescu et. al. (2012)). En este trabajo se utiliza para analizar un PMSG de un aerogenerador de baja potencia.

3. TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

La transformada wavelet es una herramienta matemática que aplicada a una señal cambia la forma de ésta, la transformación tiene el objetivo de mostrar características que pueden no ser evidentes en la señal original en una primera instancia (Walker (2008)). Para aplicar la transformada wavelet se necesita una wavelet base. Una wavelet es una onda que puede tener una forma irregular y una duración limitada en tiempo, en la cual se concentra la energía la señal. La wavelet se define como el cuadrado de una función integrable $\psi(t)$ que cumple con la condición de admisibilidad que implica que la transformada de Fourier de la función $\psi(t)$ se desvanece en el valor de frecuencia cero. Otra característica es que la wavelet es oscilatoria y una familia de wavelets con escalas y traslaciones se puede obtener estirando o compactando con el término $1/s$ y se puede desplazar a lo largo del eje del tiempo con el término τ de acuerdo con (14)

$$\psi_{s,\tau}(t) = s^{-1/2} \psi(t - \tau/s), \quad s > 0, \tau \in R \quad (14)$$

El propósito del factor $s^{-1/2}$ en (14), es asegurar que la energía de la familia wavelet se mantenga igual incluso bajo diferentes escalas. Para analizar señales discretas en el tiempo con las wavelets se requiere que la wavelet sea también discreta en el tiempo o digital. La expresión discreta de la wavelet se muestra en (15), donde j y k son números enteros.

$$\psi_{j,k}(t) = s_0^{j-1/2} \psi(t - k\tau_0 s_0^j / s_0^j), \quad s_0 > 1, \tau_0 \neq 0 \quad (15)$$

Generalmente en la forma discreta de la wavelet se adoptan los valores de $s_0=2$ y $\tau_0=1$, que corresponden a la discretización diádica. Entonces, el proceso a través del cual una señal se descompone analizándola con una familia de wavelets escaladas y trasladadas es lo que se conoce como transformada wavelet. Cuando la transformada se realiza en forma discreta se conoce como transformada wavelet discreta (TWD) y se presenta en (16)

$$wt(j, k) = \langle x(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \quad (16)$$

$$wt(j, k) = s_0^{j-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi * (t - k2^j / 2^j) dt$$

donde $\langle x(t), \psi_{j,k}(t) \rangle$ denota la convolución de las funciones.

La TWD se puede entender como una representación de escala tiempo de una señal digital que se obtiene usando técnicas de filtrado digital que equivale a realizar la convolución de la señal con la respuesta al impulso de ciertos filtros. La señal pasa a través de una serie de filtros pasa altas para analizar las frecuencias altas y otra serie de filtros pasa bajas para las frecuencias bajas. Esto se conoce también como análisis multi-resolución, lo cual permite analizar la señal de interés en diferentes bandas de frecuencias y con diferentes resoluciones (Weeks, 2007).

En este trabajo la TWD del vector de Park de las corrientes del estator del PMSG se emplea para generar también una firma de falla a través del cálculo del valor RMS de las muestras de la señal transformada en diferentes bandas de frecuencia.

4. AEROGENERADOR CON FALLAS

El aerogenerador utilizado para evaluar el algoritmo de detección de fallas en el estator, es un Air 30 para aplicaciones de generación distribuida. Las características son potencia nominal de $400 W$, $33.33 A$ y una velocidad nominal de $1800 rpm$. La máquina eléctrica del aerogenerador es un PMSG, trifásico, de 6 polos y alimenta la carga a través de un convertidor CA-CD. Para realizar la detección de fallas, se intervino la máquina para poder medir las corrientes trifásicas del estator. La implementación de las fallas en el estator se realizó de manera que se generará una anomalía controlada. Con este fin, se provocó un desbalance en una de las fases conectando una resistencia externa en serie con la línea que va del estator del generador a la carga. El desbalance introducido fue equivalente al de una falla de circuito abierto, que puede ser producido por un corto circuito entre espiras del estator de la máquina. La modificación realizada a la máquina es reversible, lo que permite regresar al generador a su estado sano una vez concluidas las pruebas con fallas. El diagrama eléctrico que ilustra la introducción del desbalance (Fig.1), muestra las fases a y b del estator de la máquina en estado normal y en la fase c se observa la resistencia externa que se coloca para introducir el desbalance.

5. BANCO DE PRUEBAS

Un banco de pruebas se diseñó y construyó con el objetivo de evaluar esquemas de detección de fallas en el PMSG de un aerogenerador (Fig. 2). El banco consta además de un motor de CD acoplado al aerogenerador, de un sistema de electrónica de potencia basado en puentes H con dos ramas de IGBTs controlado por un sistema basado en un procesador

de señales digitales (DSP, por sus siglas en inglés). El DSP efectúa también el control del motor de CD para lograr el seguimiento de perfiles de velocidad. La retroalimentación se realiza con un tacogenerador acoplado al motor de CD. El DSP es capaz de comunicarse de forma bidireccional con un equipo de cómputo.

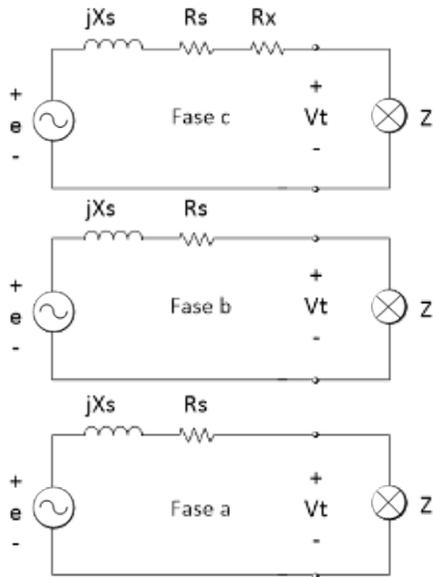


Fig. 1. Modificación del PMSG para introducir un desbalance.



Fig. 2. Banco de pruebas para la detección de fallas de estator del PMSG de un aerogenerador.

La salida de la máquina eléctrica del aerogenerador se conectó a una carga resistiva trifásica balanceada, para el caso de esta prueba la carga trifásica fue de $330W$. Las señales de corriente del estator del PMSG se adquirieron mediante el convertidor analógico-digital del DSP empleando sensores de efecto Hall, lo que implica que la corriente se obtiene de manera no invasiva para el aerogenerador.

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las corrientes trifásicas del PMSG para el caso sin falla (antes de someter a la máquina al desbalance controlado) se muestran en la Fig. 3 y después de ser sometida al desbalance en la Fig. 4. La diferencia entre las fases c, mostradas en amarillo, de ambas señales trifásicas es evidente, debido a

que el desbalance se asocia a una falla crítica como lo es el circuito abierto.

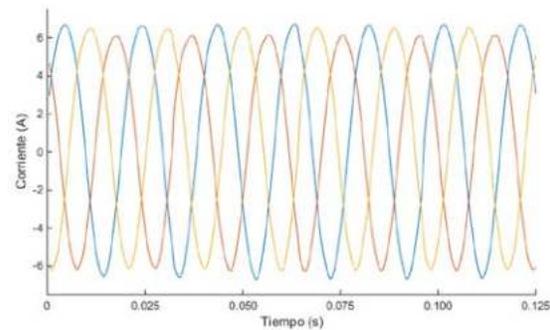


Fig. 3. Corrientes trifásicas del devanado del estator sano del PMSG del aerogenerador.

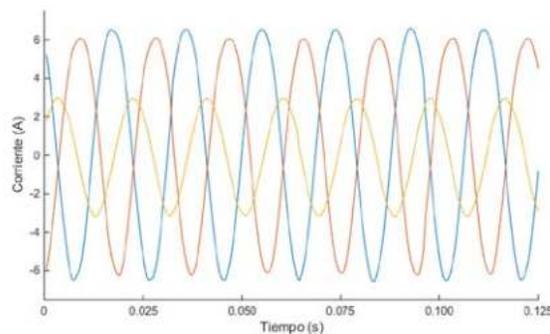


Fig. 4. Corrientes trifásicas del devanado del estator con falla del PMSG del aerogenerador.

El análisis espectral de las señales de corriente del PMSG en los casos sano y con falla se realizó con la FFT del vector de Park. La falla en el estator de la máquina eléctrica, da como resultado que en el espectro del vector de Park de las corrientes aparezcan componentes ubicadas en múltiplos del doble de la frecuencia de operación de la máquina eléctrica, como se menciona en (Benbouzid et al. (2003), Maldonado-Ruelas et al. (2016), Gritli et al (2017), Craciunescu et al (2012))

$$f_f = 2nf_s \quad (17)$$

donde $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$, f_f es la frecuencia de las componentes que se generan por la falla y f_s es la frecuencia de operación del PMSG del aerogenerador. La magnitud del espectro de falla decrece mientras n aumenta. En la práctica se toma solamente $n = 1$, ya que es la frecuencia en donde el espectro tiene mayor magnitud, por lo que (17) se reduce a

$$f_f = 2f_s \quad (18)$$

El resultado de las pruebas para la detección de fallas controladas del PMSG del aerogenerador mostró que a una velocidad de 1600 rpm las corrientes del estator de la máquina tienen una frecuencia de operación de 148 Hz . Las pruebas se llevaron a cabo con desbalances con resistencias

de 0.5Ω y de 3Ω . La comparación de los casos sano y con falla de la FFT del vector de Park de corrientes para 0.5Ω (Fig. 5), presentó en el espectro de la señal con falla una componente de frecuencia de 296 Hz , valor que corresponde al doble de la frecuencia de operación. Para el caso de la falla simulada con el desbalance de 3Ω (Fig. 6), ocurrió la misma situación con respecto a la frecuencia en la cual aparece el espectro de 296 Hz que igualmente corresponde al doble de la frecuencia de operación, pero como la falla es más severa, la amplitud del espectro crece con respecto al desbalance provocado por la resistencia externa de 0.5Ω .

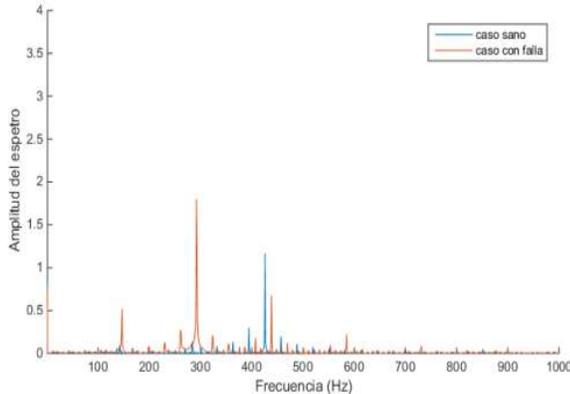


Fig. 5. Espectro de frecuencia de los casos sano y con falla (desbalance de 0.5Ω) a 1600 rpm .

Se realizó el análisis a través de la TWD. Las wavelets utilizadas fueron Haar, Daubechies 2 (Daub2), Daubechies 3 (Daub3) y Coiflet 5 (Coif5), las diferencias entre estas wavelets se encuentran en los coeficientes wavelet y de escala. La señal que resulta de aplicar la TWD, independientemente de la wavelet utilizada, genera una señal con información en diferentes bandas de frecuencia correspondientes a los diferentes niveles de descomposición; en las cuales puede haber componentes de frecuencia que cambian de amplitud para diversas condiciones de operación del sistema del que se extrajo la señal. Una manera de detectar esas variaciones consiste en calcular el valor RMS de las muestras de la señal transformada en la banda de interés. En este caso se aplicó la TWD al vector de Park de las corrientes del estator, dado que cuando se presenta una falla de estator aparece al menos una componente al doble de la frecuencia de operación del PMSG, entonces el valor RMS de las muestras de la señal en la banda de frecuencia donde se ubica dicha componente debe variar con respecto al caso sin falla.

Los resultados con la TWD con el desbalance provocado por la resistencia de 0.5Ω , se sintetizan en la tabla 1, donde se observan los valores RMS mencionados para las diferentes wavelets que se utilizaron para analizar las señales. Los valores RMS de la tabla 1 se calcularon con las muestras de la segunda banda de la señal, que corresponde al rango de frecuencias de 250 a 500 Hz . Para este caso, la TWD con la wavelet Coiflet 5 es la que muestra mayor sensibilidad.

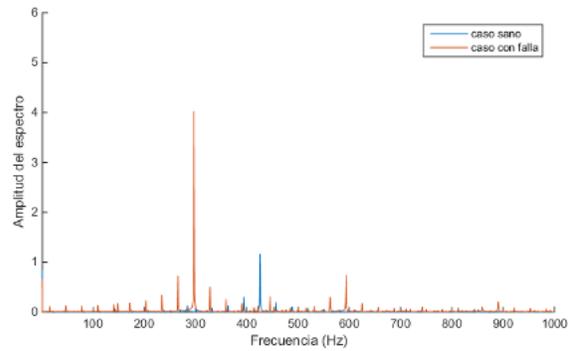


Fig. 6. Espectro de frecuencia de los casos sano y con falla (desbalance de 3Ω) a 1600 rpm .

Tabla 1. Valor RMS de las muestras de la señal transformada mediante la TWD en la banda de frecuencia de la componente de falla para los casos sano y con falla (desbalance de 0.5Ω).

TWD	Valor RMS sin falla	Valor RMS con falla	Diferencia
Harr	1.21773	2.63595	1.41822
Daub2	0.67647	7.10395	6.427483
Daub3	1.31015	6.25821	4.948055
Coif5	0.82397	7.99767	7.1737

La tabla 2 presenta los resultados para el desbalance de 3Ω . Las diferencias en los valores RMS varían con respecto al caso anterior, la falla se mantiene en la segunda banda de 250 a 500 Hz y la TWD con la wavelet Coiflet 5 sigue dando el mejor resultado.

Tabla 2. Valor RMS de las muestras de la señal transformada mediante la TWD en la banda de frecuencia de la componente de falla para los casos sano y con falla (desbalance de 3Ω).

TWD	Valor RMS sin falla	Valor RMS con falla	Diferencia
Harr	1.21773	4.68005	3.462323
Daub2	0.67647	5.97793	5.30146
Daub3	1.31015	7.62877	6.318614
Coif5	0.82397	9.21257	8.388603

7. CONCLUSIONES

El módulo del vector de Park, ampliamente utilizado para detectar fallas en máquinas eléctricas de inducción, mostró también ser útil para la detección de desbalances en corrientes del estator en un PMSG utilizado para aerogeneración en aplicaciones pequeña, que es una técnica de detección poco explorada en literatura. Una ventaja experimental es que la forma de detección es no invasiva, ya que las corrientes se pueden obtener con sensores de efecto Hall para ser procesadas por un DSP externamente. De acuerdo a los resultados de la FFT, se mostró la presencia de

una componente de frecuencia al doble de la frecuencia de operación en el espectro de frecuencias.

Se realizó la detección de fallas utilizando la TWD del vector de Park de la corriente de estator del PMSG, obteniendo una variación significativa del valor RMS de las muestras de la señal transformada en la banda de frecuencia donde se ubicó la frecuencia al doble de la frecuencia de operación. El cambio se detectó con las distintas wavelets lo que permite tener redundancia en la detección de la falla. La detección de la falla de circuito abierto abre la posibilidad de explorar la posibilidad de diagnóstico de fallas de cortos circuitos internos de naturaleza incipiente en los devanados del estator del PMSG a través de las técnicas mostradas.

REFERENCIAS

- Abad G., López J., Rodríguez M. A., Marroyo L., Iwanski G. (2011). *Doubly Fed Induction Machine, Modelling and Control for Wind Energy Generation*, IEEE Press.
- Amirat Y., Benbouzid M. E. H., Al-Ahmar E., Bensaker B., Turri S. (2009). A Brief Status on Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Wind Energy Conversion Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2629-2636
- Benbouzid M. E. H. and Kliman G. B. (2003). What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis?, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, no. 2, pp. 238-244.
- British Petroleum (2017). *BP Statistical Review of World Energy*, 66th edition.
- Cai H., Sun Q., Wood D. (2016). Condition monitoring and fault diagnosis of small permanent magnet generator, *Wind engineering*, Vol. 40(3), pp. 270-282.
- Craciunescu A., Ciumbulea G., Media M. (2012). Phase-modulus diagram of instantaneous current's space phasor as diagnosis tool of induction motor's stator windings, *International conference of renewable energies and power quality*, Santiago de Compostela, España.
- Daneshi-Far Z., Capolino G. A. and Henao H. (2010). Review of failures and condition monitoring in wind turbine generators, *XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Rome, Italy, pp. 1-6,
- Global Wind Energy Council (2017). *Global Wind Report - Annual Market Update 2017*.
- Grainger J. J. y Stevenson Jr W. D. (1996). *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*, McGraw Hill.
- Grieser B., Sunak Y. and Madlener R., (2015), Economics of small wind turbines in urban settings: An empirical investigation for Germany, *Renewable Energy*, vol. 78, issue C, pp. 334-350.
- Gritli Y., Bellini A., Rossi C., Casadei D., Filippetti F. and Capolino G. A. (2017). Condition monitoring of mechanical faults in induction machines from electrical signatures: Review of different techniques, *11th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Tinos, Greece, pp. 77-84.
- Hosseinzadeh M. and Salmasi F. R. (2016). Fault-Tolerant Supervisory Controller for a Hybrid AC/DC Micro-Grid, in *IEEE Transactions on Smart Grid*.
- Hyers R. W., McGowan J. G., Sullivan K. L., Manwell J. F. & Syrett B. C. (2013), Condition monitoring and prognosis of utility scale wind turbines, *Energy Materials*, Vol. 1:3, pp. 187-203.
- Ko Y. J., Lee K. B., Lee D. C., Kim J. M. (2012). Fault diagnosis of three parallel voltage source converter for a high-power wind turbine, *IET Power Electronics*, vol. 5, no. 7, pp. 1058-1067.
- Lu B., Li Y., Wu X. and Yang Z. (2009). A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis, *IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA)*, Lincoln, NE, pp. 1-7.
- Lubitz W. D. (2014). Impact of ambient turbulence on performance of a small wind turbine, *Renewable Energy*, vol. 61, pp. 69-73.
- Maldonado-Ruelas V. A., Villalobos-Piña F. J., Sosa-Serna G. A., Alvarez-Salas R., Pazos-Flores F. and Alvarez-Salas J. A. (2016). In-wheel brushless DC motor test-bed for control and fault detection, *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, pp. 1-5.
- Milanez D. L. and Emanuel A. E. (2003). The instantaneous-space-phasor: a powerful diagnosis tool, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 52, no. 1, pp. 143-148.
- Peeters C., Guillaume P., Helsen J., (2018,) Vibration-based bearing fault detection for operations and maintenance cost reduction in wind energy, *Renewable Energy*, Volume 116, Part B, Pages 74-87
- Ribrant J. and Bertling L. (2007). Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, FL, pp. 1-8.
- Shahriar M. R., Borghesani P., Ledwich G., Tan A. C.C., (2018) Performance analysis of electrical signature analysis-based diagnostics using an electromechanical model of wind turbine, *Renewable Energy*, Volume 116, Part B, Pages 15-41
- Tummala A., Kishore R., Dipankur V., Sinha K., Indraja V., Krishna V. H. (2016). A review on small scale wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 56, Pages 1351-1371
- Walker J. S., (2008) *A primer o wavelets and their scientific applications*, Second edition, Chapman & Hall/CRC.
- Weeks M., (2007) *Digital signal processing using MATLAB and wavelets*, Infinity Science Press.