

Recibido 27 Septiembre 2018, aceptado 4 Diciembre 2018, fecha de publicación 16 Diciembre 2018

ISSN 2448-7775

Plataforma experimental para la detección de fallas eléctricas en estator de aerogeneradores de baja potencia

RAÚL ARTURO ORTIZ MEDINA¹, FRANCISCO JAVIER VILLALOBOS PIÑA²,
RICARDO ÁLVAREZ SALAS³

¹Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Aguascalientes, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags., México.

²Ingeniería Eléctrica Electrónica, Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags., México.

³Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, SLP, México.

raul.ortiz@upa.edu.mx

fvillalobos@mail.ita.mx

ralvarez@uaslp.mx

RESUMEN En este trabajo se presenta una plataforma experimental para la detección de fallas eléctricas, como lo es el corto circuito entre vueltas del estator en máquinas eléctricas para aerogeneradores de baja potencia, que son destinados a generación de energía en zonas aisladas o como parte de la generación distribuida en zonas urbanas. La plataforma experimental consta de un sistema electrónico de potencia y un motor de CD, a este último se acopla la máquina eléctrica del aerogenerador a probar, también cuenta con un sistema de adquisición de corrientes. En este trabajo, la plataforma experimental se acopla a un aerogenerador con máquina síncrona de imanes permanentes de 400W. Al cual se le conecta una carga y se analizan las corrientes del generador en estado sano y con el generador alterado para simular una falla de corto circuito entre vueltas. El análisis para detectar la falla se lleva a cabo a través del muestreo de la corriente del estator en las tres fases, que son obtenidas con sensores de efecto Hall, lo que hace que el sistema sea no invasivo. Las señales digitales de las corrientes son procesadas con un procesador de señales digitales (DSP, por sus siglas en inglés) y analizadas con técnicas de análisis espectral como la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) y la transformada discreta de Wavelet (WDT, por sus siglas en inglés).

PALABRAS CLAVE Aerogeneradores, detección de fallas, banco de pruebas, vector de Park, WDT, FFT.

I. INTRODUCCIÓN

La energía eólica es una tecnología que fue estudiada hace más de 100 años, pero debido a los beneficios inmediatos que los combustibles fósiles ofrecían en esa época, la energía eólica no pudo avanzar. Es hasta ahora que la energía eólica retoma importancia entre las opciones que hay como generadora de energía, convirtiéndose en una alternativa a los mismos combustibles fósiles, que en el largo plazo fueron dañinos y finitos. En los últimos 10 años, la capacidad instalada de energía eólica por medio de aerogeneradores a nivel mundial es 5 veces mayor, alcanzando una capacidad instalada de 539,123 MW [1]. Aun así, la capacidad instalada de energías renovables representa solo el 2.7 % de la capacidad instalada total en el mundo [2]. La investigación en la mayoría de los campos relacionados con la energía eólica está enfocándose en la inserción de esta última a la red eléctrica y en potencias

menores para su uso en sistemas aislados o distribuidos. Son muchas las disciplinas de la ciencia y la tecnología que se han involucrado en el uso de la energía eólica como fuente primaria de energía debido al uso cada vez mayor de aerogeneradores. Una de las necesidades derivadas del creciente uso es el mantenimiento, ya que son máquinas con partes móviles, propensas a desgaste, calentamiento y por lo tanto fallas, tanto de carácter mecánico, como eléctrico.

El mantenimiento de aerogeneradores a nivel de investigación se encuentra reportado en varias publicaciones como [3-6] que abundan en estadísticas de fallas, tipos de fallas, frecuencia de ocurrencia de las fallas y componentes en los que ocurren las fallas. Se reportan también 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, para analizarlas con diferentes técnicas de análisis de señales y así determinar los criterios de mantenimiento de acuerdo con el resultado de dicho análisis.

La investigación en aerogeneradores y el análisis de sus fallas, se han concentrado en aerogeneradores de gran capacidad, de esta forma la mayoría de los trabajos publicados [7-10]. Aun así, existe en la literatura, muy poca información estadística de fallas en aerogeneradores de baja potencia, utilizados para aplicaciones rurales y generación distribuida. La generación distribuida de energía eléctrica por medio de energía eólica, se hace a través de aerogeneradores pequeños y micro aerogeneradores. Estos, 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. En trabajos publicados se pueden encontrar estudios de pequeños y micro aerogeneradores [11-13] con respecto a su funcionamiento o su conveniencia en la red eléctrica. Aunque en lo que concierne a fallas en este tipo de aerogeneradores existen muy pocos trabajos, como [14], que aborda fallas mecánicas o [15] que abordan las fallas de manera general con respecto a los aerogeneradores en micro redes eléctricas. En lo que respecta a detección de fallas eléctricas de cortocircuito en estator de máquinas eléctricas, de pequeños y micro aerogeneradores, es un área poco explorada 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 de una plataforma experimental diseñada para obtener la corriente que fluye del estator de la máquina a una carga balanceada. A partir de las señales de corrientes adquiridas por medio de un DSP, se analiza el vector de Park resultante de las corrientes de estator empleando la FFT y la WDT. El artículo está organizado de la siguiente manera: En la Sección II se abordan los detalles del diseño, la construcción y el control de la plataforma experimental. La Sección III explica brevemente la teoría del vector de Park como herramienta para la detección de desbalances entre las fases de una máquina eléctrica trifásica. Se explica el uso de la FFT para el análisis espectral de frecuencias que se generan durante la falla y de la WDT, se explica su uso como herramienta de análisis multirresolución. La Sección IV describe la forma en que se llevan a término las pruebas y los resultados obtenidos con el PMSG del aerogenerador utilizado. Finalmente, se concluye en la sección V de este trabajo.

II. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

A. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE POTENCIA

El sistema electrónico de potencia se diseñó y se construyó para poder controlar un motor de corriente directa (CD) que simula la energía mecánica proveniente del viento. El sistema electrónico de potencia se diseñó con un voltaje de entrada de 180V, y con velocidad y potencia nominales de hasta 1800rpm

y 3hp respectivamente. En Fig. 1, se observan las etapas de rectificación, bus de CD, el puente de potencia en topología H, basado en transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT, por sus siglas en inglés).

El sistema electrónico de potencia se conecta a una línea de corriente alterna (CA) de 127Vrms que, a través de un rectificador de onda completa, entrega un voltaje de CD de 180V, que es valor de amplitud máximo de la onda de voltaje en CA. De ahí se pasa a la carga de capacitores que conforman el bus de CD para mantener el voltaje de CD durante los cambios de signo de la onda de voltaje de CA. El arreglo del rectificador y del bus de CD se aprecian en Fig. 2.

Los contactores señalados como C1, C2 y C3 en la Fig. 2, tienen tres contactos abiertos y bobina de 24V, que permiten hacer la carga lenta del bus de CD y la descarga rápida. La activación de la carga del bus de CD, la realiza como tarea principal en el CPU del sistema y se puede descargar en cualquier punto de operación del motor. La conexión de la etapa digital con la etapa de potencia se realiza por medio de aisladores ópticos (opto-acopladores) que protegen la etapa de control ante una sobrecorriente.

La electrónica de potencia que controla la dirección de giro del motor se realiza por medio de una topología H, estructurada con 4 transistores de potencia tipo IGBT. El puente H permite el giro del motor en dos sentidos, intercambiando las polaridades según sea el ramal y el IGBT por el que pase. El circuito del puente ilustrado en Fig. 3, para este sistema de electrónica de potencia en específico, se usan dos módulos de IGBT Mitsubishi CM200DY-12H con una rama de dos IGBTs cada uno. Cada IGBT del puente es controlado por un circuito impulsor. Este funciona para controlar el disparo del IGBT [16]. Para el control en la velocidad, el circuito impulsor de los IGBTs se alimenta por moduladores de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés), generados en el DSP.

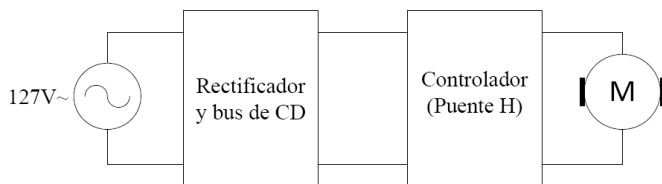


Fig. 1. Esquema general de la plataforma experimental para la detección de fallas eléctricas en estator de aerogeneradores.

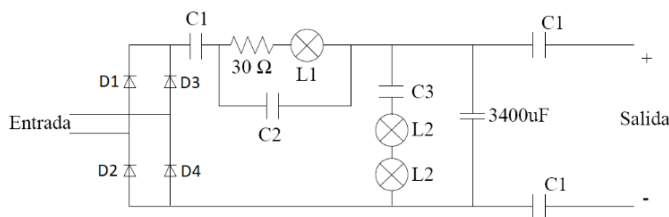


Fig. 2. Circuito de rectificación y bus de CD.

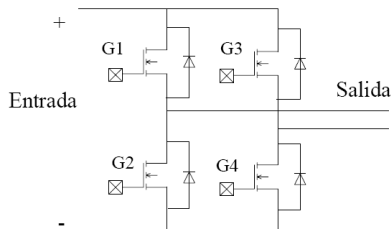


Fig. 3. Circuito del puente en topología H.

B. CONTROL

La etapa de control del sistema de electrónica de potencia se realiza utilizando el DSP modelo dsPIC30F4011 de la compañía Microchip. El procesador se usa como unidad central de procesamiento, y cumple con todas las funciones necesarias para el funcionamiento del sistema electrónico de potencia.

En la parte del bus de CD, en el procesador se programa la secuencia de carga y descarga. Se encarga de generar los PWM para los circuitos impulsores de los IGBTs del puente H, así como la elección de que IGBT y de que rama se activa. Esta función regula la velocidad y define el sentido de giro del motor con la activación de las salidas de PWM del DSP [17].

El procesador también sirve como medio de comunicación entre el sistema de reproducción de patrones de viento y el usuario a través de una computadora personal (PC), por medio de un puerto USB. Desde la PC conectada a la plataforma experimental, el usuario es capaz de controlar el encendido y apagado del sistema, la velocidad del motor y la dirección del giro. El seguimiento de velocidad de un patrón de viento, se hace con la misma lógica que se tiene para el control de la velocidad, la diferencia es que, en vez de tener una velocidad fija, se hacen cambios cada cierto tiempo, introduciendo como velocidad deseada la consecución de velocidades correspondientes al patrón.

Se diseñó e implementó un controlador del tipo PI discreto para efectuar el control de la velocidad del motor de CD, el cual se encuentra incrustado en el código de programa del DSP. El diseño y la sintonización del controlador PI se basa en la adquisición de la curva de reacción de velocidad del motor de CD. Esta herramienta fue incorporada al programa de computadora y la sintonización se efectuó en la herramienta Matlab Simulink. El lazo cerrado se obtiene retroalimentando la velocidad por medio de un tacogenerador que tiene una relación de 1800rpm/5V. El control le permite al motor mover el generador con diferentes regímenes de carga manteniendo el par en la flecha [18].

C. ADQUISICIÓN DE SEÑALES

La plataforma experimental tiene como última etapa la adquisición de señales de corriente provenientes del estator del generador a la carga. El sistema es capaz de sensar y almacenar señales de corriente en CA. En el sistema, se emplearon tres sensores de efecto Hall marca Honeywell modelo CSNA111, el cual es un sensor de lazo cerrado de corriente que presenta características de respuesta dinámica adecuadas para la

adquisición de señales de corriente necesarias para efectuar el diagnóstico de fallas de acuerdo a las características de los aerogeneradores. El sensor de corriente presenta salida a corriente con un rango de operación de 70A, alimentación a $\pm 15V_{cd}$, salida equivalente a 1mA por cada ampere medido [19].

Para el procesamiento de las señales digitales provenientes de los sensores, se requiere un arreglo de tres etapas de amplificadores operacionales para el acondicionamiento de la señal. La primera convierte la señal de corriente a voltaje proporcionando una ganancia de -120, lo cual implica que por cada ampere sensado en la línea del estator del generador se tendrán 0.12 Vcd, al mismo tiempo invierte la señal debido a la ganancia negativa. En la segunda etapa se genera una señal de 2.5 Vcd, con el objetivo de montar la señal sobre esa componente de corriente directa y evitar así los voltajes negativos que no pueden ser interpretados correctamente por el procesador de señales. La tercera etapa, un sumador inversor de ganancia unitaria con el cual la señal proveniente de la etapa uno es montada sobre la componente de corriente directa proveniente de la etapa dos, de este modo el cero real se encuentra en 2.5 Vcd y las corrientes quedarán asociadas a un valor de voltaje de 0 a 5 Vcd. El acondicionamiento anteriormente mencionado se lleva a cabo para cada una de las fases del generador, que en este caso son tres, es decir, en esta tarjeta se presentan tres arreglos idénticos para la correcta adquisición de las señales [20].

Una vez acondicionada las señales se usa como unidad de procesamiento el procesador de señales digitales (DSP por sus siglas en inglés) dsPIC30F4011, que recibe la señal en forma de voltaje de 0 a 5V para su correcto procesamiento. El sistema de adquisición de datos cuenta con el recurso de almacenamiento de datos de alta capacidad mediante el uso de memorias comerciales micro SD. El sistema de adquisición de corriente se complementa con el programa de computadora diseñado para enviar los comandos de guardado y extracción de datos de la memoria SD del sistema. Así mismo funciona para visualizar las señales sensadas y para crear un archivo tipo texto para su análisis en el equipo de cómputo. La Fig. 4 muestra una imagen de la plataforma experimental terminada con todos los componentes acoplados.



Fig. 4. Plataforma experimental para la detección de fallas eléctricas en estator de aerogeneradores.

III. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE SEÑALES

Una vez adquiridas las señales de corriente del estator, estas se procesan utilizando una herramienta conocida como el vector de Park. El vector de Park se utiliza como herramienta de detección de desbalance en sistemas trifásicos y puede ser analizado con herramientas que sustraen información de las señales, como lo son la FFT y la WDT.

A. VECTOR DE PARK

El vector de Park, también llamado fasor espacial instantáneo, es una herramienta utilizada en la teoría de máquinas eléctricas [21], 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 [22], 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 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 por (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) [23].

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

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. [24-27].

B. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

La FFT es un algoritmo para implementar la transformada discreta de Fourier (DFT, por sus siglas en inglés). La DFT es la forma discreta de la transformada de Fourier (FT, por sus siglas en inglés), esta última es una herramienta de análisis espectral que permite conocer las diferentes frecuencias que componen una señal que está representada en el dominio temporal. La diferencia entre la FT y la DFT es la función de entrada que se asigna, en el caso de la FT se necesita una señal periódica en tiempo continuo, puede tener un número infinito de componentes de frecuencia donde la separación en frecuencia de 2 componentes armónicas sucesivas es $1/T_p$ en donde T_p es el período de la componente fundamental. Por el contrario, el rango de frecuencias de señales en tiempo discreto es limitado al intervalo $(-\pi, \pi)$ o $(0, 2\pi)$. Una señal discreta de período fundamental N puede tener componentes de frecuencias separadas $2\pi/N$ radianes a una frecuencia $f=1/N$ ciclos.

La adquisición de señales que se hace en este trabajo tiene una cantidad limitada de datos representando la señal

adquirida a través de un DSP, es por eso por lo que se usa la DFT a través del algoritmo FFT [28].

C. 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. 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 $\langle x(t), \psi_{j,k}(t) \rangle$ es 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 [28].

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.

IV. RESULTADOS

Las pruebas al PMSG del aerogenerador llevadas a cabo en la plataforma experimental requieren de dos situaciones particulares, la primera con el PMSG en estado sano y la segunda con la alteración al PMSG que simula una falla de corto circuito entre devanados. La alteración se realiza agregando 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. 5, 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.

Las corrientes trifásicas del PMSG para el caso sin falla (antes de someter a la máquina al desbalance controlado) se muestran en la Fig. 6, y después de ser sometida al desbalance en la Fig. 7. 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 de corto circuito que provoca a la postre un circuito abierto.

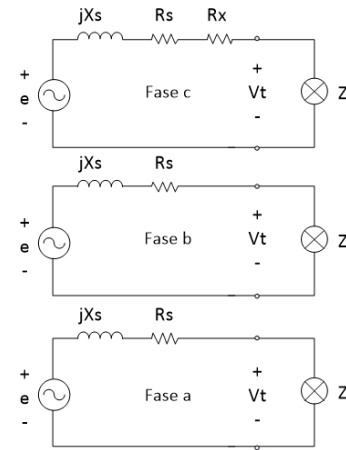


Fig. 5. Modificación del PMSG para introducir un desbalance.

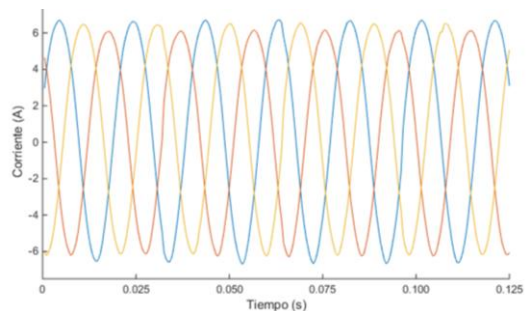


Fig. 6. Corrientes trifásicas del devanado del estator sano del PMSG del aerogenerador.

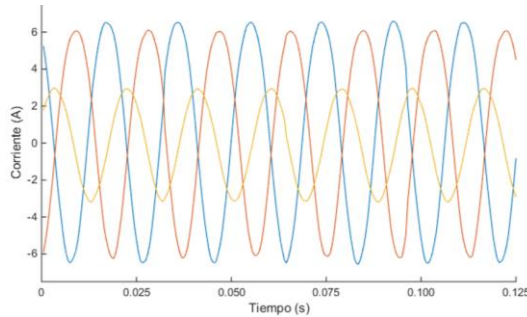


Fig. 7. Corrientes trifásicas del devanado del estator con falla del PMSG del aerogenerador.

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 [24-27].

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

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 600 rpm las corrientes del estator de la máquina tienen una frecuencia de operación de 51 Hz y a 1200 rpm la frecuencia de operación es de 111 Hz , estas dos velocidades se trabajaron en el PMSG sano y con desbalance provocado por una resistencia externa de 0.5Ω . La comparación de los casos sano y con falla de la FFT del vector de Park de corrientes a 600 rpm (Fig. 8), se presentó una variación notoria el espectro de la señal con falla una componente de frecuencia de 102 Hz , valor que corresponde al doble de la frecuencia de operación. Para el caso de la falla simulada a una velocidad de 1200 rpm (Fig. 9), el cambio en el espectro se presentó en la frecuencia de 222 Hz , que igualmente corresponde al doble de la frecuencia de operación, se tienen dos diferentes velocidades con una misma severidad de falla y el espectro tiene el mismo comportamiento en lo que respecta al doble de su frecuencia de operación.

En el análisis a través de la WDT, 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 WDT, 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 WDT 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 WDT con el desbalance provocado con la resistencia de 0.5Ω para la velocidad de 600 rpm , se sintetizan en la Tabla I, donde se observan los valores RMS mencionados para las diferentes Wavelets que se utilizaron para analizar las señales. Los valores RMS de la Tabla I se calcularon con las muestras de la cuarta banda de la señal, que corresponde al rango de frecuencias de 62.5 a 125 Hz . Para este caso, la WDT con la Wavelet Haar es la que muestra mayor sensibilidad.

La Tabla II presenta los resultados para la velocidad de 1200 rpm con el desbalance de 0.5Ω . Existen diferencias en los valores RMS con respecto al caso anterior, ahora la falla se puede observar en la tercera banda, que va de 125 a 250 Hz y la WDT con la Wavelet Haar sigue dando la mayor diferencia y por lo tanto el mejor resultado.

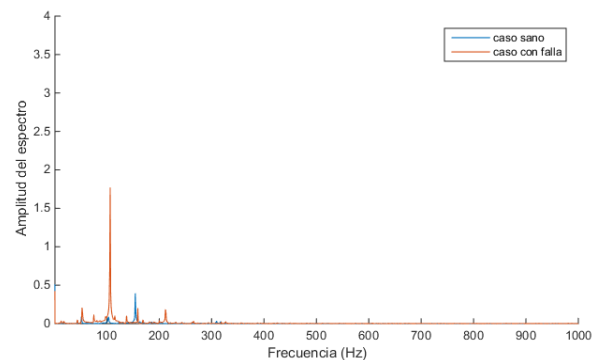


Fig. 8. Corrientes trifásicas del devanado del estator con falla del PMSG del aerogenerador.

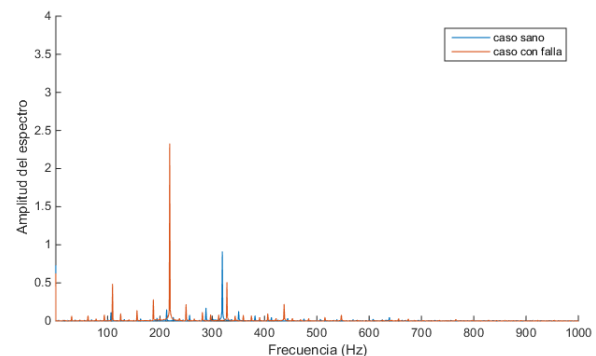


Fig. 9. Corrientes trifásicas del devanado del estator con falla del PMSG del aerogenerador.

TABLA I. VALOR RMS DE LAS MUESTRAS DE LA SEÑAL TRANSFORMADA MEDIANTE LA WDT EN LA BANDA DE FRECUENCIA DE LA COMPONENTE DE FALLA PARA LOS CASOS SANO Y CON FALLA (DESBALANCE DE 0.5 Ω).

WDT	RMS sin falla	RMS con falla	Diferencia
Haar	0.772688	5.236975	4.464287
Daub2	0.542989	2.242956	1.699967
Daub3	0.802827	2.127818	1.324991
Coif5	0.855393	2.415882	1.560489

TABLA II. VALOR RMS DE LAS MUESTRAS DE LA SEÑAL TRANSFORMADA MEDIANTE LA WDT EN LA BANDA DE FRECUENCIA DE LA COMPONENTE DE FALLA PARA LOS CASOS SANO Y CON FALLA (DESBALANCE DE 3 Ω).

WDT	RMS sin falla	RMS con falla	Diferencia
Haar	0.859046	3.537447	2.678401
Daub2	2.893344	4.049159	1.155815
Daub3	1.460041	2.892993	1.432952
Coif5	2.580994	4.263207	1.682213

V. CONCLUSIONES

La plataforma experimental desarrollada en este trabajo, en combinación con las técnicas de análisis de señales basadas en el módulo del vector de Park, mostraron ser útiles para la detección de desbalances en corrientes del estator en un PMSG utilizado para aerogeneración en aplicaciones de pequeña escala. 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. También se realizó la detección de fallas utilizando la WDT del vector de Park de la corriente, obteniendo una variación significativa del valor RMS de las muestras de la señal transformada en la banda de frecuencia donde se ubicó el 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.

REFERENCIAS

- [1] Global Wind Energy Council GWEC, Global Report: Annual Market, actualizado 25 Abril de 2018 Brussels, <http://files.gwec.net/files/GWR2017.pdf>, revisado en Agosto de 2018.
- [2] British Petroleum (2017). BP Statistical Review of World Energy, 66th edition.
- [3] J. Ribrant and L. Bertling, "Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005," Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, Tampa, FL, 2007, pp. 1-8.
- [4] B. Lu, Y. Li, X. Wu and Z. Yang, "A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis," Power Electronics and Machines in Wind Applications, 2009. PEMWA 2009. IEEE, Lincoln, NE, 2009, pp. 1-7.
- [5] Z. Daneshi-Far, G. A. Capolino and H. Henao, "Review of failures and condition monitoring in wind turbine generators," Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on, Rome, 2010, pp. 1-6.
- [6] Y. Amirat, M. E. H. Benbouzid, E. Al-Ahmar, B. Bensaker, S. Turri, "A Brief Status on Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Wind Energy Conversion Systems" Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 13, 2009, Páginas 2629-2636

- [7] R. W. Hyers, J. G. McGowan, K. L. Sullivan, J. F. Manwell & B. C. Syrett (2013), Condition monitoring and prognosis of utility scale wind turbines, Energy Materials, 1:3, 187-203
- [8] Y. J. Ko, K. B. Lee, D. C. Lee, J. M. Kim, "Fault diagnosis of three parallel voltage source converter for a high-power wind turbine", IET Power Electron., 2012, Vol. 5, Iss. 7, pp. 1058-1067
- [9] 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
- [10] 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
- [11] Tummala A., Kishore R., Dipankur V., Sinha K., Indraj V., Krishna V. H. (2016). A review on small scale wind turbines, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 56, Pages 1351-1371
- [12] 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.
- [13] Lubitz W. D. (2014). Impact of ambient turbulence on performance of a small wind turbine, Renewable Energy, vol. 61, pp. 69-73..
- [14] 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.
- [15] M. Hosseinzadeh and F. R. Salmasi, Analysis and detection of a wind system failure in a micro-grid, journal of Renewable Sustainable Energy 8, 043302 (2016); doi: 10.1063/1.4960190
- [16] Rashid M. H., "Electrónica de potencia", Pearson, Cuarta edición, 2015
- [17] Microchip, "dsPIC30F4011/4012 High Performance Digital Signal Controllers", Data Sheet, Microchip Technology Inc. 2005.
- [18] Pyrhönen, J., Hrabovcová V., Scott-Semken R. "Electrical Machine Drive Control", John Wiley & Sons, 2016
- [19] Honeywell, CSNA111 CSN Series closed loop current sensor, measures AC, DC or impulse current, Data Sheet, Honeywell Inc. 2007.
- [20] Microchip, "dsPIC30F4011/4012 High Performance Digital Signal Controllers", Data Sheet, Microchip Technology Inc. 2005.
- [21] 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.
- [22] Grainger J. J. y Stevenson Jr W. D. (1996). Análisis de sistemas eléctricos de potencia, McGraw Hill.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Weeks M., (2007) Digital signal processing using MATLAB and wavelets, Electrical Engineering Series, Infinity Science Press LLC.