

ANÁLISIS DEL VECTOR DE PARK PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS ELÉCTRICAS EN EL ESTATOR DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA

PARK'S VECTOR ANALYSIS FOR ELECTRICAL FAULT DETECTION IN STATOR OF LOW POWER WIND TURBINE

Raúl Arturo Ortiz Medina

Universidad Politécnica de Aguascalientes
raul.ortiz@upa.edu.mx

Francisco Javier Villalobos Piña

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes
fvillalobospia@yahoo.com

Victor Arturo Maldonado Ruelas

Universidad Politécnica de Aguascalientes
victor.maldonado@upa.edu.mx

Ricardo Álvarez Salas

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
ricardo.alvarez.salas@gmail.com

Resumen

En este trabajo se realizó la detección de falla eléctrica de estator de una máquina síncrona de imanes permanentes (PMSM, por sus siglas en inglés) trifásica, funcionando como máquina eléctrica de un aerogenerador de baja potencia a diferentes velocidades. La falla eléctrica a detectar, son los circuitos abiertos provocados por cortos-circuitos entre vueltas de los devanados del estator de la PMSM. La detección de falla se realiza experimentalmente en un banco de pruebas diseñado y construido con base en una máquina de cd y un sistema electrónico de potencia que permite al motor imitar la energía mecánica del viento. Las señales trifásicas de corriente del estator de la PMSM son transformadas al marco de referencia $\alpha\beta$ para obtener el módulo del vector de Park de las corrientes. El vector de Park se analiza con la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) para obtener la firma de falla.

Palabras Claves: Aerogenerador, detección de falla, vector de Park FFT.

Abstract

In this work, the detection of stator electrical failure of a three-phase synchronous permanent magnet machine (PMSM), as an electric machine of a low power wind turbine, was performed at different speeds. The electrical fault to be detected are the open circuits caused by interturns short circuits of the stator windings of the PMSM. The fault detection is made experimentally in a test bench designed and built based on a dc machine and electronic power system that allows the motor to imitate the mechanical energy of the wind. The current signals of the stator of the PMSM are transformed to the $\alpha\beta$ reference frame, in order to obtain the modulus of the Park vector of the currents. The Park vector is analyzed with the fast Fourier transform and thus obtain the fault signature.

Keywords: *Fault detection, FFT, park vector, wind turbine.*

1. Introducción

La energía eólica ha sido objeto de investigación desde hace más de 100 años, pero el auge de los combustibles fósiles desincentivó el avance. Debido al calentamiento global, 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 [GWEC, 2018]. Naturalmente, la investigación en muchos de los campos relacionados con la energía eólica también está creciendo, enfocándose en la naturaleza del viento, en la transformación de la energía eólica a energía eléctrica, la inserción de esta energía a la red eléctrica y su uso para sistemas aislados o distribuidos.

El aumento en el uso de generadores implica avances en pro de hacer más eficiente el uso de la energía eólica. Así mismo, el desarrollo de aerogeneradores implica cubrir necesidades derivadas del su uso como el mantenimiento de los aerogeneradores, 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, 2007], [Lu, 2009], [Daneshi-Far, 2010] y [Amirat, 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, 2006,] [Miguelañez, 2010], [Ko, 2012]. Aun así, existe en la literatura, muy poca información estadística de fallas en aerogeneradores grandes y existen aún menos para aerogeneradores de baja potencia. Los aerogeneradores de este tipo, conocidos como pequeños aerogeneradores y micro aerogeneradores, 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, 2016], [Grieser, 2015], [Lubitz, 2014]. Pero existen muy pocos en materia de fallas en este tipo de aerogeneradores como [Cai, 2016] que aborda fallas mecánicas o [Hosseinzadeh, 2016] que abordan las fallas de manera general en micro redes eléctricas.

Este trabajo tiene su aportación en el análisis de fallas eléctricas de estator en máquinas de baja potencia de aerogenerador a diferentes velocidades, a través del análisis de la FFT del vector de Park como herramienta para detectar fallas por medio de las corrientes de estator de la máquina eléctrica.

2. Métodos

Vector de Park

Las señales trifásicas de corriente del estator de la máquina eléctrica del aerogenerador, se extraen a través del sistema de adquisición de corriente y del

programa de computadora diseñado, para cada experimento que se realice. Las señales adquiridas se analizan haciendo uso del vector de Park, que engloba la información de la señal trifásica en ese solo vector, dando la facilidad de evidenciar el desbalance que pudiera existir en la señal trifásica [Milanez, 2003].

El vector de Park, en este caso de corrientes, también llamado fasor de espacio instantáneo, es una herramienta utilizada en la teoría de máquinas eléctricas, que toma como base las corrientes de magnetización que se muestran en ecuaciones 1 que son, en principio, las corrientes de un sistema trifásico balanceado en estado estable.

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

Donde:

i_a Corriente de estator de la fase a.

i_b Corriente de estator de la fase c.

i_c Corriente de estator de la fase d.

\hat{I} Magnitud de la corriente.

ω Velocidad angular eléctrica ($\omega = 2\pi f$).

f Frecuencia eléctrica.

ϕ Ángulo de fase de la señal senoidal.

El sistema trifásico, independientemente de la perturbación, cumple con el teorema de Fortescue, que dice que una señal trifásica puede componerse a partir de las componentes de secuencia positiva, negativa y cero [Grainger, 1996], estas componentes son representadas a través de los superíndices $+$ para positivo, $-$ para negativo y 0 para secuencia cero como es el caso en en el sistema de ecuaciones 2.

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

El vector de Park de corrientes se define como se muestra en la ecuación 3.

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

Donde las corrientes de secuencia positiva, negativa y cero, son definidas en el sistema de ecuaciones 4.

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

Una característica importante del vector de Park es que puede expresarse sólo en términos de su secuencia positiva y negativa por separado, y al hacer el cuadrado de la magnitud del vector de Park de corrientes se obtiene la ecuación 5.

$$|\tilde{I}|^2 = |\tilde{I}^+ + \tilde{I}^-|^2 = (\hat{I}^+)^2 + (\hat{I}^-)^2 + 2(\hat{I}^+ \hat{I}^-) \cos(2\omega t + \phi^+ + \phi^-) \quad (5)$$

Se encuentra entonces que el valor promedio del cuadrado del vector de Park está mostrado en la ecuación 6.

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

De las expresiones 5 y 6 se infiere que $|\tilde{I}|^2$ tiene valores definidos en las ecuaciones 7 y 8 que oscilan entre un máximo de

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

Y un mínimo de (ecuación 8).

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

Resolviendo 7 y 8 para las 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 la ecuación 11.

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

Para que el efecto que tiene un desbalance en la señal de corriente de una máquina eléctrica, por facilidad matemática, las corrientes se trasladan al marco de referencia $\alpha - \beta$ por medio de la transformación de Concordia, mostrada en la ecuación 12 [Abad, 2011].

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

Donde:

i_α Componente de corriente α .

i_β Componente de corriente β .

i_0 Componente de corriente 0.

De esta manera, el módulo del vector de Park de corrientes de una señal trifásica queda como se indica en la ecuación 13.

$$ISP = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \quad (13)$$

La obtención del 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 trifásicas se producen también diferentes formas de onda del módulo vector de Park, a esto se le denomina firma de falla 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 o motores brushless con aplicaciones industriales o de vehículos eléctricos. [Bembouzid, 2003], [Maldonado, 2016], [Gritli, 2017], [Craciunescu, 2012]

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 procesador de señales digitales (DSP por sus siglas en inglés), es por eso que se usa la DFT a través del algoritmo FFT [Weeks, 2007].

Banco de pruebas

Las pruebas experimentales se llevan a cabo en un banco de pruebas diseñado y construido con el objetivo de detectar pruebas en máquinas eléctricas de aerogenerador mostrado en la figura 1. El banco de pruebas consta de un sistema de electrónica de potencia basado en puentes de topología H con dos ramas de IGBTs, capaz de tener de comunicación bidireccional entre el equipo de cómputo y

la unidad central de procesamiento basada en el DSP a través de una computadora personal. El sistema electrónico de potencia cuenta con un control PI discreto, insertado en el mismo DSP, para efectuar el control y lograr el seguimiento de velocidad de un motor de cd que se conecta al sistema como parte del banco de pruebas. La retroalimentación se da por medio de un tacogenerador acoplado al motor de cd.

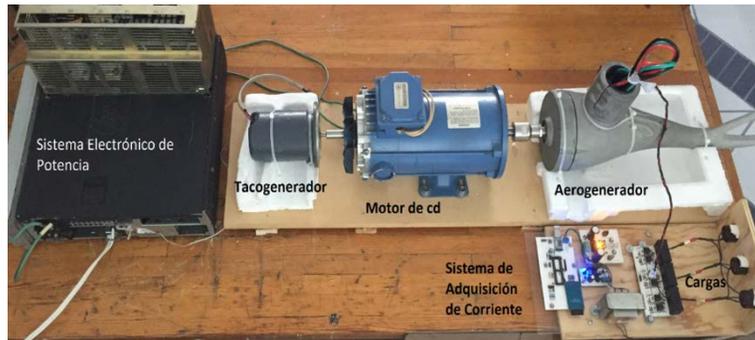


Figura 1 Banco de pruebas para detección de falla eléctrica de estator de aerogenerador.

El motor de cd está acoplado mecánicamente con el aerogenerador en análisis. En el banco de pruebas, la máquina de cd se encarga de proveer la energía mecánica al aerogenerador la cual normalmente proviene del viento. La salida de la máquina eléctrica del aerogenerador se conecta a una carga resistiva trifásica balanceada, para el caso de esta prueba la carga trifásica es de 330 W. Las señales de corriente que van del estator de la máquina a la carga son adquiridas con un sistema basado en sensores de efecto hall, diseñado y construido con un DSP y un módulo de memoria SD con la capacidad de recolección de una gran cantidad de datos.

Introducción de falla eléctrica

El aerogenerador que se utiliza para la experimentación de la detección de fallas eléctricas de estator, es un aerogenerador modelo air 30, para aplicaciones de generación distribuida con datos nominales de potencia de 400 W, 33.33 A y una velocidad nominal de 1800 rpm.

La máquina eléctrica del aerogenerador es de tipo síncrona de imanes permanentes, trifásica, de 6 polos y alimenta su carga a través de un convertidor

ca-cd. Para realizar la detección de falla a través del vector de Park y la FFT, se intervino la máquina para que tener acceso a las corrientes trifásicas del estator y al sensado de las mismas. La intención de implementar una falla, se trata de establecer anomalías controladas consistentes con fallas eléctricas en estator de la máquina. Con este fin, se provoca 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 es consistente con una falla de circuito abierto, que puede ser producido por un corto circuito no atendido en el mantenimiento de la máquina. La modificación a la máquina es reversible, lo que permite regresar a la máquina a su estado sano cuando las pruebas con falla finalizan. El diagrama eléctrico que ilustra la introducción del desbalance se encuentra en la figura 2, muestra las fases a y b del estator de la máquina en estado normal y en la fase c se observa R_x , la cual para esta serie de pruebas tiene un valor de 0.5Ω y se coloca para introducir el desbalance.

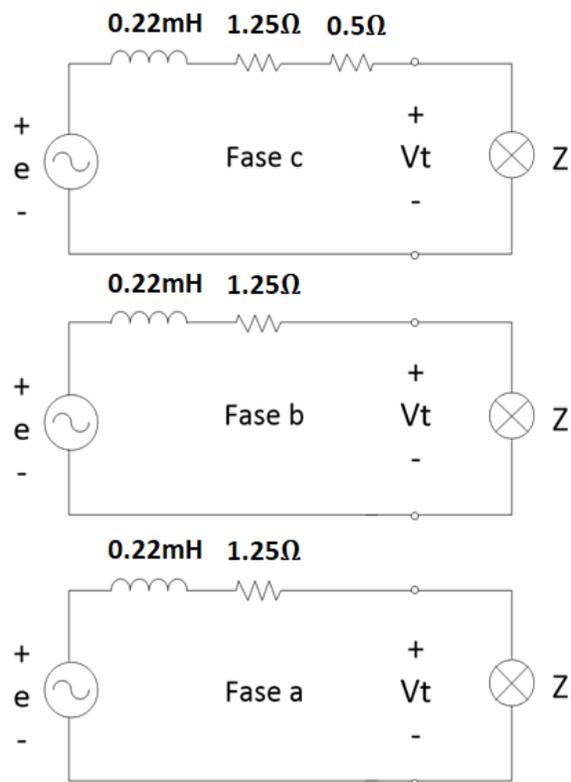


Figura 2 diagrama eléctrico que ilustra la introducción del desbalance.

3. Resultados

El banco de pruebas para la detección de falla eléctrica de estator de aerogenerador entrega los datos de las corrientes trifásicas antes de someter a la máquina al desbalance controlado y después de ser sometida al desbalance, estas corrientes se muestran en la figura 3 y 4 respectivamente. 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. Ambas señales trifásicas fueron tomadas de la prueba a 600rpm como ejemplo para ilustrar como se ven las señales de corriente, las gráficas de las pruebas de 900, 1200 y 1600 rpm se omiten por la similitud que hay entre ellas

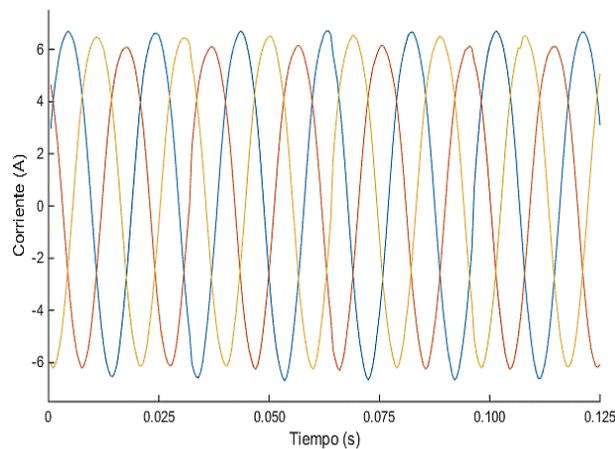


Figura 3 Corrientes trifásicas del devanado del estator sin falla de la máquina de imanes permanentes para aerogenerador.

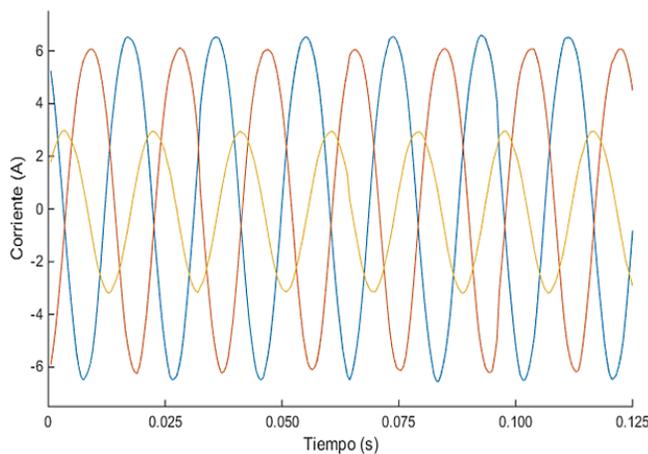


Figura 4 Corrientes trifásicas del devanado del estator con falla de la máquina de imanes permanentes para aerogenerador.

Las señales obtenidas a través de la experimentación se someten a procesamiento a través de la FFT, esta herramienta permite observar los componentes de frecuencia que hay en cada señal, tanto para el caso sin falla como para el caso con falla o desbalance, de esta manera se puede observar si existe o no, un cambio en las componentes de frecuencia de la señal sana con respecto a la señal con falla y si existe diferencia, se puede ver en qué frecuencia se produce el cambio.

FFT para una velocidad de 600 rpm

A esta velocidad, la frecuencia eléctrica fundamental de operación de las corrientes del estator es de 51.28 Hz. La figura 5 muestra las componentes de frecuencia que aparecen en el vector de Park de corrientes para el sin falla y el caso con falla, en este último se observa la aparición de una componente de frecuencia de 102.56 Hz que corresponde al doble de la frecuencia de operación normal.

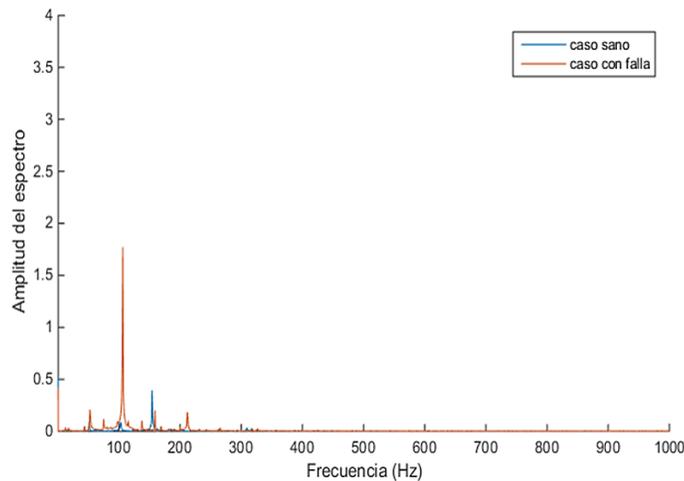


Figura 5 Análisis comparativo de la FFT, casos sin falla y con falla a 600 rpm.

FFT para una velocidad de 900 rpm

A esta velocidad, la frecuencia eléctrica fundamental de operación de las corrientes del estator es de 80.01 Hz. La figura 6 muestra las componentes de frecuencia que aparecen en el vector de Park de corrientes para el caso sin falla y el caso con falla, en este último se observa la aparición de una componente de frecuencia de 160.02 Hz que corresponde al doble de la frecuencia de operación normal.

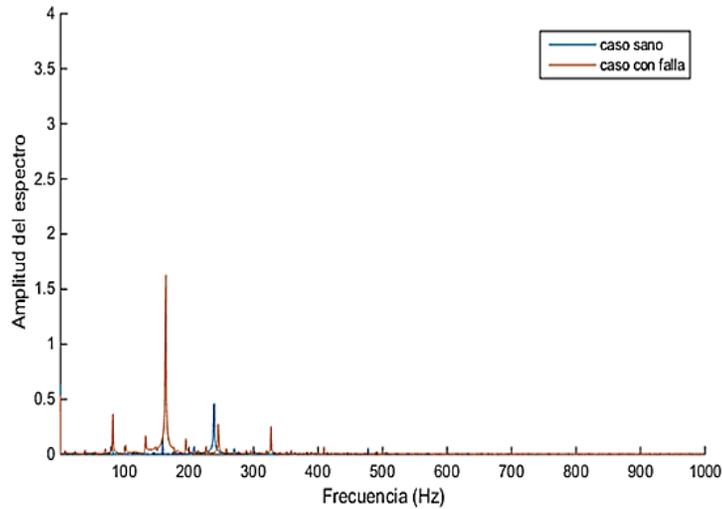


Figura 6 Análisis comparativo de la FFT, casos sin falla y con falla a 900 rpm.

FFT para una velocidad de 1200 rpm

A esta velocidad, la frecuencia eléctrica fundamental de operación de las corrientes del estator es de 111.11 Hz. La figura 7 muestra las componentes de frecuencia que aparecen en el vector de Park de corrientes para el caso sin falla y el caso con falla, en este último se observa la aparición de una componente de frecuencia de 222.22 Hz que corresponde al doble de la frecuencia de operación normal.

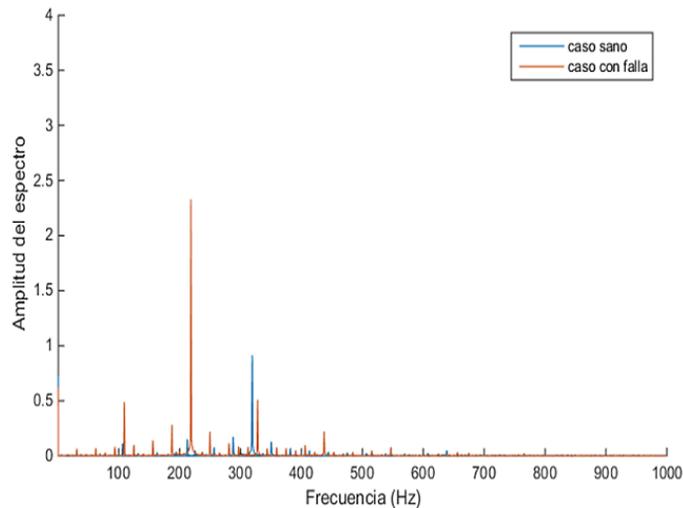


Figura 7 Análisis comparativo de la FFT, casos sin falla y con falla a 1200 rpm.

FFT para una velocidad de 1600 rpm

A esta velocidad, la frecuencia eléctrica fundamental de operación de las corrientes del estator es de 142.85 Hz. La figura 8 muestra las componentes de frecuencia que aparecen en el vector de Park de corrientes para el caso sin falla y el caso con falla, en este último se observa la aparición de una componente de frecuencia de 285.7 Hz que corresponde al doble de la frecuencia de operación normal.

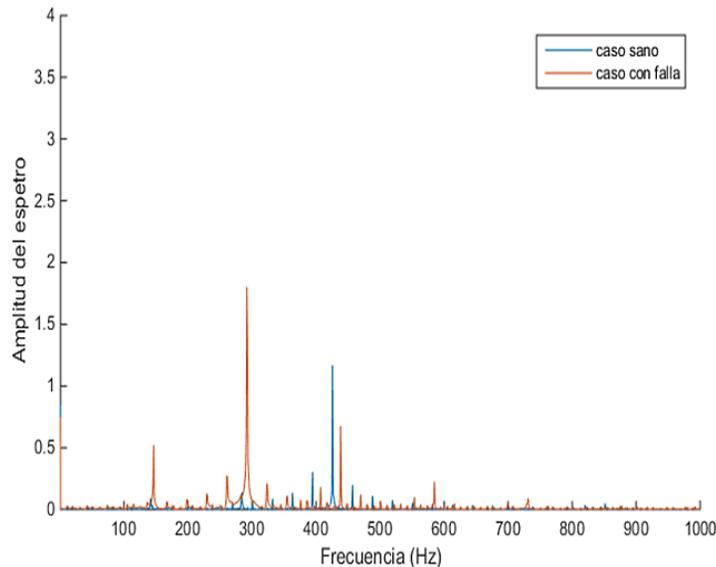


Figura 8 Análisis comparativo de la FFT, casos sin falla y con falla a 1600 rpm.

4. Discusión

El análisis espectral de las señales de corriente obtenidas del banco de pruebas en los casos sin falla y con falla, se analizan a través de la FFT. De los experimentos realizados se obtiene que el análisis del espectro de firma de falla para el caso de falla eléctrica del estator de la máquina eléctrica, resulta en que los espectros se encuentran en múltiplos del doble de la frecuencia de operación de la máquina eléctrica, este patrón es coincidente con los resultados mencionados en [Bembouزيد, 2003], [Maldonado, 2016], [Gritli, 2017], [Craciunescu, 2012], la expresión correspondiente de este resultado se muestra en la ecuación 14.

$$f_f = 2nf_s \tag{14}$$

Donde $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$, f_f es la frecuencia donde aparece la mayor magnitud de espectro 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 la ecuación 14 queda como se muestra en la ecuación 15.

$$f_f = 2f_s \quad (15)$$

El resultado de las pruebas para la detección de falla controlada de la PMSM del aerogenerador de 400 W para los cuatro casos de velocidad analizados por con la FFT del vector de Park son satisfactorios y evidentes de acuerdo al a severidad de la falla presentada según el desbalance introducido.

5. Conclusiones

El banco de pruebas diseñado y construido resultó ser una herramienta muy de gran utilidad en este trabajo y podrá ser utilizado con otras máquinas y para otros análisis en futuras investigaciones.

El vector de Park ampliamente probado para máquinas de inducción, mostró también ser útil para la detección de desbalances en corrientes del estator en máquinas síncronas de imanes permanentes utilizadas para aerogeneración, de acuerdo a los resultados de la FFT que mostró la aparición del espectro de frecuencias al doble de la frecuencia de operación.

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 devanados de estator a través de las técnicas mostradas.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] 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*, Volume 13, Páginas 2629-2636.

- [2] 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 Series on Power Engineering.
- [3] 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.
- [4] Cai H., Sun Q., Wood D., (2016) Condition monitoring and fault diagnosis of small permanent magnet generator, Wind engineering, Vol 40(3) 270-282.
- [5] 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.
- [6] Daneshi-Far Z., Capolino G. A. and Henao H., (2010) Review of failures and condition monitoring in wind turbine generators, Electrical Machines (ICEM), XIX International Conference on, Rome, 2010, pp. 1-6.
- [7] Global Wind Energy Council GWEC, Global Report: Annual Market Brussels, <http://files.gwec.net/files/GWR2017.pdf>, revisado en Junio de 2018.
- [8] Grainger J. J. and. Stevenson Jr W. D., Análisis de sistemas eléctricos de potencia, McGraw Hill, USA, 1996.
- [9] Grieser B., Sunak Y. and Madlener R., (2015), Economics of small wind turbines in urban settings: An empirical investigation for Germany, Renewable Energy, 78, issue C, p. 334-350.
- [10] Hosseinzadeh M. and Salmasi F. R., (2016) Fault-Tolerant Supervisory Controller for a Hybrid AC/DC Micro-Grid, in IEEE Transactions on Smart Grid.
- [11] Hyers R. W., MCGowan J. G., Sullivan K. L., Manwell J. F. & Syrett B. C., (2006), Condition monitoring and prognosis of utility scale wind turbines, Energy Materials, 1:3, 187-203.
- [12] 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 Electron., Vol. 5, Iss. 7, pp. 1058–1067.

- [13] 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, 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Tinos, pp. 77-84.
- [14] Lu B., Li Y., Wu X. and Yang Z., (2009) A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis, Power Electronics and Machines in Wind Applications, PEMWA 2009. IEEE, Lincoln, NE, 2009, pp. 1-7.
- [15] Lubitz W. D., (2014) Impact of ambient turbulence on performance of a small wind turbine, *Renewable Energy*, Volume 61, Pages 69-73.
- [16] 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, pp. 1-5.
- [17] Migueláñez E. and Lane D., (2010) Predictive diagnosis for offshore wind turbines using holistic condition monitoring, OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE, Seattle, WA, pp. 1-7.
- [18] Milanez D. L. and Emanuel A. E. (2003), The instantaneous-space-phasor: a powerful diagnosis tool, in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 52, no. 1, pp. 143-148.
- [19] Ribrant J. and Bertling L., (2007) Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005 Power Engineering Society General Meeting. IEEE, Tampa, FL, 2007, pp. 1-8.
- [20] 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.
- [21] Weeks M., (2007) Digital signal processing using MATLAB and wavelets, *Electrical Engineering Series*, Infinity Science Press LLC.