

Fault Detection in the NPC Converter of a DFIG-based Wind Generation System with Field-Oriented Control

S.J. de la Rosa-Mendoza * R. Alvarez-Salas *
M. Gonzalez-Garcia ** V. Cardenas * F.J. Villalobos-Piña ***
A.G. Silva-Trujillo *

* *Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P., 78290 México (sanjouaslp@gmail.com, ralvarez@uaslp.mx, vcardena@uaslp.mx, asilva@uaslp.mx).*

** *CONACyT - Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P., 78290 México (mgonzale@uaslp.mx).*

*** *TecNM/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, DEPI-Depto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Aguascalientes, Ags., 20256 México (fvillalobos@mail.ita.mx).*

Abstract: This work presents a fault detection scheme for a wind generation system, which is composed of a doubly-fed induction generator (DFIG) interconnected to the electric grid using a neutral-point-clamped (NPC) power electronic converter in a back-to-back (BTB) configuration. The converter operates in a closed-loop with field-oriented control (FOC). The type of faults that are analyzed is open-circuit in the switching devices. A fault detection strategy is proposed based on the discrete wavelet transform (DWT) with the Haar wavelet.

Keywords: Fault detection, NPC converter, BTB converter, DFIG, FOC, DWT.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se ha tenido un desarrollo importante en el área de las energías renovables, incluyendo de manera significativa a la energía eólica, la cual es una opción viable para disminuir el consumo de los combustibles fósiles empleados para la generación de energía eléctrica (Leiby et al. (2019)). En el año 2019 se tenía una capacidad de potencia eléctrica instalada en el mundo de 650 GW (presentando un crecimiento del 19% con respecto al año 2018), de la cual la energía eólica instalada en tierra tuvo un crecimiento de 54.2 GW, mientras que la instalada en mar tuvo un incremento de 6 GW (GLOBAL (2019)). Los países con mayor potencia eólica instalada en la actualidad son China, Estados Unidos, Reino Unido, India y España, estos cinco países poseen el 70% de la instalación total a nivel mundial.

Hay trabajos recientes en la literatura que consideran problemas sobre la detección y el diagnóstico de fallas, pero sólo en elementos específicos del sistema, por ejemplo en el convertidor NPC o en el generador de inducción doblemente alimentado (DFIG). En (Abari et al. (2017)) se presentan dos métodos para la detección de fallas en el convertidor NPC de tres niveles, los cuales requieren la colocación de dos sensores adicionales a los empleados para su control. Un sensor mide las señales electromagnéticas

conducidas y radiadas en el bus de CD, mientras que el otro emplea una antena externa para medir la firma electromagnética. Con este método se logran detectar las fallas de circuito abierto. Otro trabajo que estudia un esquema de operación tolerante a fallas en el convertidor NPC es (Farnesi et al. (2011)), pero este caso el convertidor se utiliza para alimentar motores de inducción. Los resultados muestran una correcta detección con los elementos adicionales incorporados al sistema, pero tienen el inconveniente de requerir más sensores y dispositivos extra.

Existen diversas propuestas que consideran las fallas de los convertidores de electrónica de potencia en sistemas más complejos en cuanto a generación eólica (Lee et al. (2014)), aquí se presenta un esquema para detectar fallas en los dispositivos de conmutación del convertidor de un aerogenerador basado en un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG, por sus siglas en inglés). El trabajo considera sólo fallas simples y no analiza el caso de fallas múltiples.

En (Ortiz-Medina et al. (2018)) se estudia el problema de detección de fallas en un PMSG de un aerogenerador de baja potencia. La detección de fallas se realiza por medio de la Transformada Rápida Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) y de la transformada wavelet discreta (DWT, por sus siglas en inglés) aplicadas al módulo del

vector de Park de las corrientes de estator. En (Leahy et al. (2016)) se presenta un análisis para detectar fallas en aerogeneradores utilizando técnicas de Machine Learning aplicadas a los datos generados por un sistema de tipo SCADA. Por otra parte, el problema del control tolerante a fallas de un convertidor NPC-BTB para aplicaciones hidráulicas se estudia en (Selvaraj et al. (2018)).

En (Ma et al. (2013)) se aborda la problemática desde el punto de vista de fallas que ocurren en la red eléctrica, las cuales comparten similitudes con las que suceden en el convertidor.

En (Giaourakis et al. (2012)) y (Gonçalves et al. (2017)) se estudia la dinámica de un sistema de generación eólica con transitorio de carga donde se puede observar que se tiene una respuesta rápida. Bajo condiciones de falla se reporta una respuesta más lenta en (Ni et al. (2018)), lo cual se debe a la configuración del sistema de control, ya que en una condición de falla sigue operando el sistema, aunque en algunos escenarios de falla le sea imposible seguir una referencia.

Los aerogeneradores son sistemas electromecánicos en constante movimiento, en los que diversos elementos sufren un desgaste natural y, por lo tanto, son propensos a fallas. Lo anterior a suscitado un interés creciente en desarrollar técnicas confiables de detección de fallas y que no requieran de sensores adicionales a los empleados en el control, siendo de preferencia de tipo no invasivo.

En este trabajo se propone un esquema de detección de fallas en los dispositivos de conmutación del convertidor de electrónica de potencia basado en técnicas de procesamiento de señales. En la sección 2 se explica brevemente el modelado del convertidor NPC-BTB y del DFIG, así como el esquema de control empleado en el convertidor. La sección 3 describe las características principales de la DWT. La sección 4 presenta los tipos de fallas en el convertidor NPC-BTB, considerando fallas de circuito abierto en los dispositivos de conmutación, pudiendo presentarse en un solo interruptor o en múltiples interruptores. En la sección 5 se reportan los resultados de este análisis. Finalmente, en la última sección se discuten las principales conclusiones obtenidas de este trabajo.

2. MODELADO Y CONTROL DEL SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA

2.1 Modelo promedio del convertidor NPC-BTB

La figura 1 muestra el diagrama a bloques del aerogenerador acoplado al DFIG y a la red eléctrica mediante un convertidor NPC-BTB operando con el control de campo orientado (FOC, por sus siglas en inglés).

La figura 2 muestra la topología del convertidor NPC-BTB donde se pueden apreciar los 24 dispositivos de conmutación propensos a fallar.

Primeramente se presenta el modelo del convertidor NPC-BTB en el marco de referencia síncrono DQ, de acuerdo

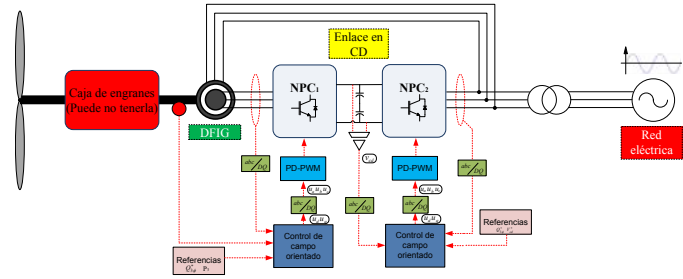


Figura 1. Sistema de generación eólica con control de campo orientado.

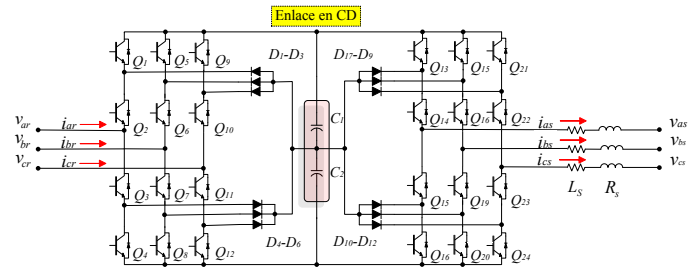


Figura 2. Diagrama esquemático del convertidor NPC-BTB.

a (Kouro et al. (2010), Mohan and Undeland (2007)) y del análisis de la figura 1 donde se asumen las siguientes consideraciones: la frecuencia de conmutación de los interruptores del convertidor es mucho mayor que la de la operación de la red, las pérdidas en los elementos de conmutación se consideran nulas y se asume un sistema trifásico balanceado. De esta manera se puede determinar el modelo dado por las ecuaciones (1)-(6).

$$L_r \dot{i}_{dr} = -R i_{dr} + L_r \omega i_{qr} + v_{dr} - \frac{u_{dr} v_{cd}}{2} \quad (1)$$

$$L_r \dot{i}_{qr} = -R i_{qr} - L_r \omega i_{dr} + v_{qr} - \frac{u_{qr} v_{cd}}{2} \quad (2)$$

$$L_s \dot{i}_{ds} = -R i_{ds} + L_s \omega i_{qs} + v_{ds} - \frac{u_{ds} v_{cd}}{2} \quad (3)$$

$$L_s \dot{i}_{qs} = -R i_{qs} - L_s \omega i_{ds} + v_{qs} - \frac{u_{qs} v_{cd}}{2} \quad (4)$$

$$C_1 \dot{v}_{c1} = \frac{3}{4} (u_{dr} i_{dr} + u_{qr} i_{qr} - u_{ds} i_{ds} - u_{qs} i_{qs}) \quad (5)$$

$$C_2 \dot{v}_{c2} = -\frac{3}{4} (u_{dr} i_{dr} + u_{qr} i_{qr} + u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs}) \quad (6)$$

El esquema eléctrico de la figura 2 tiene tres inductancias de enlace L_s entre el convertidor del lado del estator y la red. Las tensiones v_{ar} , v_{br} y v_{cr} corresponden a las vistas en el lado del rotor, las tensiones v_{as} , v_{bs} y v_{cs} se ubican del lado del estator, la resistencia R_s es el valor asociado al cableado del inductor de enlace; su valor es pequeño ya que se considera que la inductancia es de

un alto factor de calidad, v_{cd} es la tensión del bus de CD, la cual corresponde a la suma de las tensiones en los condensadores C_1 y C_2 ; por otro lado las corrientes i_{ar} , i_{br} e i_{cr} corresponden a las vistas en las líneas del rotor, mientras que i_{as} , i_{bs} e i_{cs} son las corrientes de línea vistas en el estator.

2.2 Modelo del DFIG

Las ecuaciones (7)-(11) constituyen el modelo del DFIG en el marco de referencia síncrono DQ (Ackermann (2005)).

$$v_{ds} = -r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + \dot{\lambda}_{ds} \quad (7)$$

$$v_{qs} = -r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + \dot{\lambda}_{qs} \quad (8)$$

$$v_{dr} = -r_r i_{dr} - s\omega \lambda_{qr} + \dot{\lambda}_{dr} \quad (9)$$

$$v_{qr} = -r_r i_{qr} + s\omega \lambda_{dr} + \dot{\lambda}_{qr} \quad (10)$$

$$\tau_e = \frac{3p}{4} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (11)$$

Las tensiones v_{ds} , v_{qs} , v_{dr} , v_{qr} y las corrientes i_{qs} , i_{dr} , i_{ds} e i_{qr} corresponden a las variables eléctricas que están asociadas a los enlaces de flujo λ_{ds} , λ_{qs} , λ_{dr} y λ_{qr} , y la última expresión corresponde a la ecuación del par en función de las corrientes, la inductancia de magnetización L_m y el número de polos p .

2.3 Esquema de modulación

Para la topología convertidor NPC se pueden utilizar diversas técnicas de modulación, la que se emplea en este trabajo es la de disposición de fase (PD-PWM, por sus siglas en inglés) (Holmes and Lipo (2003)) descrita en la figura 3.

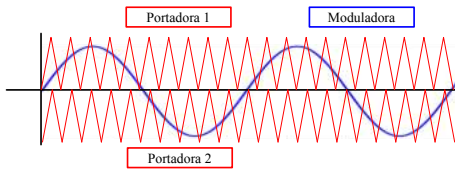


Figura 3. Técnica de modulación PD-PWM de 3 niveles.

Una consecuencia de emplear la modulación PD-PWM es que los tiempos de detección de un algoritmo de detección de fallas pueden verse afectados negativamente, ya que hay semiciclos completos en los que no operan ciertos interruptores de potencia.

2.4 Control de campo orientado

De acuerdo con el esquema de la figura 1, los convertidores NPC del sistema de generación eólica tienen propósitos específicos que deben de cumplir para mantenerse en operación.

- El convertidor del lado del rotor controla la potencia activa y reactiva que sale del rotor del DFIG.

- El convertidor del lado de la red controla la tensión del bus de CD y la potencia reactiva a la salida del convertidor.

Estos objetivos de control se logran mediante el uso del FOC, el cual se basa en la representación del sistema de generación mediante un modelo ortogonal, análogo al modelo de un motor de CD de excitación separada, en el cual es posible aplicar controladores PI independientes para lograr cada objetivo de control.

3. TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

La transformada wavelet, a diferencia de la FFT, permite analizar señales no estacionarias. La transformación tiene el objetivo de mostrar características que pueden no ser evidentes en la señal original en una primera instancia. La forma continua en el tiempo está dada por:

$$W_f(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \Phi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (12)$$

donde s es la escala, u denota la traslación, $f(t)$ una función de energía finita y $\Phi(t)$ es la función wavelet madre.

La transformada wavelet puede implementarse en tiempo discreto y se le denomina DWT. La DWT con la wavelet Haar es la más simple (Walker (2008)).

La DWT, con la wavelet Haar, se aplica a una señal \mathbf{f} discreta en el tiempo como se muestra en (13).

$$\mathbf{f} = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_N) \quad (13)$$

donde N es un entero par positivo. Estos valores se obtienen muestreando una señal analógica en instantes de tiempo $t_1, t_2, t_3, \dots, t_N$, por lo tanto, \mathbf{f} también se puede representar por (14).

$$\mathbf{f} = (g(t_1), g(t_2), g(t_3), \dots, g(t_N)) \quad (14)$$

La DWT descompone la señal en dos partes, la primera conocida como tendencia \mathbf{a}^1 y la segunda como fluctuación \mathbf{d}^1 . Lo anterior se describe con la expresión (15).

$$\mathbf{f} \xrightarrow{H_1} (\mathbf{a}^1 | \mathbf{d}^1) \quad (15)$$

Las componentes quedan definidas como:

$$\mathbf{a}^1 = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_{N/2}) \quad \mathbf{d}^1 = (d_1, d_2, d_3, \dots, d_{N/2}) \quad (16)$$

Los términos \mathbf{a}^1 y \mathbf{d}^1 se obtienen de las expresiones dadas por (17).

$$a_m = \frac{f_{2m-1} + f_{2m}}{\sqrt{2}} \quad d_m = \frac{f_{2m-1} - f_{2m}}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

donde $m = 1, 2, 3, \dots, \frac{N}{2}$.

La descomposición de las señales puede extenderse a niveles mayores, tal como se muestra en (De la Rosa et al. (2017)).

4. AEROGENERADOR EN CONDICIONES DE FALLA

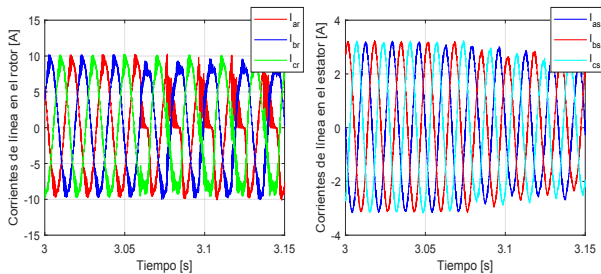
El convertidor NPC-BTB de la figura 2 tiene como elementos de conmutación interruptores de tipo IGBT con diodos antiparalelo representados por $Q_1 - Q_{24}$. Para el presente análisis se asume el correcto funcionamiento de los diodos, y se consideran solamente fallas de circuito abierto en los interruptores de potencia.

Para las pruebas en simulación se utilizó un convertidor NPC-BTB trifásico interconectado a la red, con los parámetros que se muestran en la Tabla 1. La máquina utilizada corresponde a un DFIG marca De Lorenzo, modelo DL2053A de 3kW.

Tabla 1. Parámetros de operación del sistema de generación eólica.

Tensiones en la carga (v_a, v_b y v_c)	127 V_{rms}
Tensión en el bus de CD (v_{cd})	600 V
Inductor de enlace (L)	10 mH
Condensadores (C_1 y C_2)	2200 μF
Potencia nominal (P)	3 kW
Frecuencia de conmutación (f_s)	5 kHz
Inductor de enlace rotor (L_r)	29.54m
Resistencia de enlace rotor (R_r)	5.79 Ω
Inductor de enlace estator (L_s)	27.14 mH
Resistencia de enlace estator (R_s)	5.38 Ω
Inductor de enlace (L_m)	150 mH
Momento de inercia (J)	0.4 kg/m^2
Frecuencia de operación de la red (f_s)	60 Hz
Velocidad del viento V_v	12 m/s
Angulo del Pitch θ_p	15°

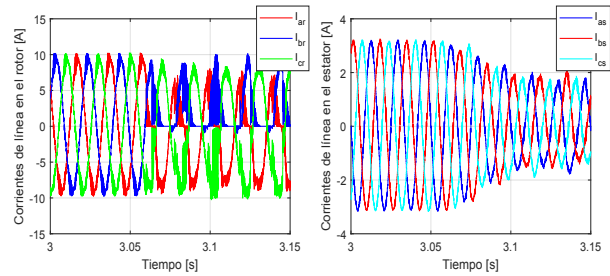
Caso I Primeramente se estudia la situación en la que se tiene una falla de circuito abierto en el interruptor Q_1 . La figura 4 muestra las formas de onda de las corrientes de línea bajo la condición de falla en el interruptor Q_1 la cual comienza en $t = 3.06$ s.



(a) Corrientes del rotor. (b) Corrientes del estator.

Figura 4. Caso I. Corrientes de línea en el rotor y estator para la falla de circuito abierto en Q_1 .

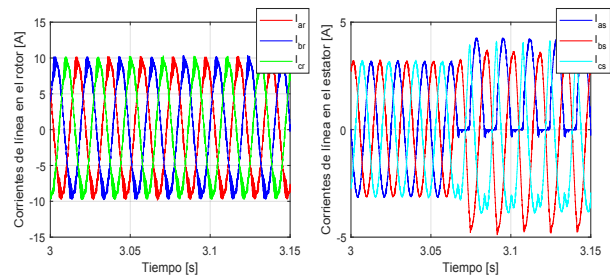
Caso II Para este caso se considera una falla simultánea de circuito abierto en los interruptores Q_2 y Q_5 . Las corrientes del convertidor bajo esta condición de falla se muestran en la figura 5.



(a) Corrientes del rotor. (b) Corrientes del estator.

Figura 5. Caso II. Corrientes de línea para la falla simultánea en Q_2 y Q_5 .

Caso III En este caso se estudia la falla de circuito abierto en Q_{13} , el cual pertenece al convertidor conectado a la red eléctrica. En la figura 6 se observa que esta falla afecta principalmente a las corrientes del estator, a diferencia de los dos primeros casos.



(a) Corrientes del rotor. (b) Corrientes del estator.

Figura 6. Caso III. Corrientes de línea en el rotor y estator para la falla de circuito abierto en Q_{13} .

5. DETECCIÓN DE FALLAS

El esquema de detección de fallas consiste en calcular el valor promedio de la componente de tendencia de nivel dos de las corrientes de línea del estator y rotor, éste se compara con cierto umbral para cada caso y si se supera, se genera una señal binaria que indica la presencia de una falla. Para todos los casos se empleó la DWT con la wavelet Haar.

Los umbrales F_{a+} , F_{a-} , F_{b+} , F_{b-} , F_{c+} y F_{c-} utilizados en la detección de fallas se determinaron analizando el comportamiento de las corrientes de línea del estator y rotor para los diferentes casos de falla.

5.1 Caso I

Empleando la DWT con la wavelet Haar de nivel dos aplicada a las corrientes de línea del rotor, se obtienen

los resultados que se muestran en la figura 7. El trazo en naranja muestra el valor promedio de la componente de tendencia de nivel dos, también se muestran dos señales binarias que indican los instantes de tiempo en el que inicia la falla y cuando se detecta. En todos los casos, la señal 1 indica el inicio de la falla y la señal 2 corresponde al periodo de tiempo que transcurre para que el valor promedio de la componente de tendencia de nivel dos de la corriente de línea supere el umbral, en este caso F_{a-} en el lado del rotor.

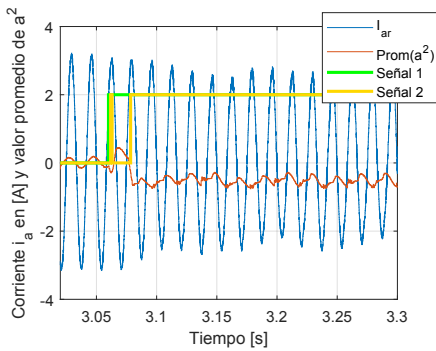


Figura 7. Detección de la falla para el caso I (falla de circuito abierto en Q_1).

5.2 Caso II

En la figura 8 se muestra el desempeño del algoritmo de detección para la falla simultánea en Q_2 y Q_5 , la falla se refleja en las corrientes del rotor principalmente ya que en este convertidor es donde ocurrió. Es posible realizar la detección de la falla en un tiempo relativamente breve, de 12.5 ms para una señal de 50 Hz. En este caso la señal 2 indica el tiempo que transcurre para que se supere el umbral F_{a-} en el lado del rotor.

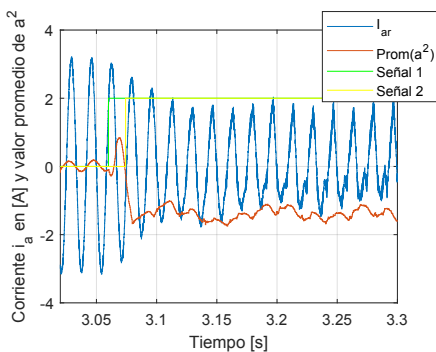


Figura 8. Detección de la falla para el caso II (falla simultánea en Q_2 y Q_5).

5.3 Caso III

Los resultados del algoritmo de detección cuando sucede la falla en Q_{13} se presentan en la figura 9, es posible

observar que el tiempo requerido para llevar a cabo la detección depende del momento del periodo de la señal en que sucede la falla activando la señal 2, para este caso se empleó el umbral F_{a-} en el lado del estator.

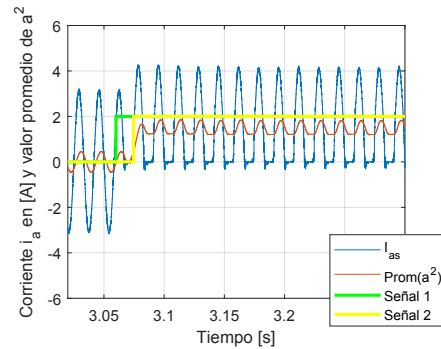


Figura 9. Detección de la falla para el caso III (falla de circuito abierto en Q_{13}).

Tabla 2. Tiempos de detección de fallas cortos.

Fallas	F_{a+}	F_{b+}	F_{c+}	F_a	F_b	F_c
Caso I	N/A	N/A	N/A	3.5 ms	N/A	N/A
Caso II	N/A	3.4 ms	N/A	3.3 ms	N/A	N/A
Caso III	2.9 ms	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tabla 3. Tiempos de detección de fallas largos.

Fallas	F_{a+}	F_{b+}	F_{c+}	F_a	F_b	F_c
Caso I	N/A	N/A	N/A	12.1 ms	N/A	N/A
Caso II	N/A	13.1 ms	N/A	13.1 ms	N/A	N/A
Caso III	10.8 ms	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Las tablas 2 y 3 describen los tiempos en los que el algoritmo detecta las fallas analizadas a partir de que éstas se originan, estos tiempos se ven afectados por el esquema de modulación empleado presentando dos escenarios, uno en el que se tienen tiempos cortos de detección de la falla ya que suceden en un instante donde las corrientes van en sentido contrario al valor promedio de la señal que determinará en la falla, mientras que en el otro escenario se tienen tiempos más largos de detección debido a que la falla se origina cuando el dispositivo de conmutación no está en operación (por la técnica de modulación), por lo que es necesario esperar a que finalice el ciclo de la modulación para poder tener información de la falla.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el desarrollo de un algoritmo de detección de fallas basado en la utilización de la DWT para un sistema de generación eólica operando con un FOC. Las fallas abordadas fueron del tipo de circuito abierto en los interruptores de potencia, presentando tres casos relevantes. El análisis se realizó utilizando las señales de corriente y la tensión en el bus de CD y fue posible identificar las fallas en todos los casos.

REFERENCES

- Abari, I., Lahouar, A., Hamouda, M., Slama, J.B.H., and Al-Haddad, K. (2017). Fault detection methods for three-level NPC inverter based on DC-bus electromagnetic signatures. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(7), 5224–5236.
- Ackermann, T. (2005). *Wind power in power systems*. John Wiley & Sons.
- de la Rosa Mendoza, S.J., Alvarez Salas, R., Gonzalez Garcia, M., Cardenas, V., Pazos Flores, F., and Villalobos Pina, F.J. (2017). Diagnóstico de fallas de circuito abierto en un inversor trifásico basado en la transformada wavelet discreta. *Revista Digital Memorias del Congreso de Control Automático*, 483–488.
- Farnesi, S., Fazio, P., and Marchesoni, M. (2011). A new fault tolerant NPC converter system for high power induction motor drives. In *8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives*, 337–343. IEEE.
- Giaourakis, D.G., Safacas, A.N., and Tsotoulidis, S.N. (2012). Dynamic behaviour of a wind energy conversion system including doubly-fed induction generator in fault conditions. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 2(2), 227–235.
- GLOBAL, W.E.C. (2019). GWEC— global wind report 2019.
- Gonçalves, P., Cruz, S., Caseiro, L., Abadi, M., and Mendes, A. (2017). Predictive power control of a dfig driven by a back-to-back three-level neutral-point clamped converter. In *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 1–7. IEEE.
- Holmes, D.G. and Lipo, T.A. (2003). *Pulse width modulation for power converters: principles and practice*, volume 18. John Wiley & Sons.
- Kouro, S., Malinowski, M., Gopakumar, K., Pou, J., Franquelo, L.G., Wu, B., Rodriguez, J., Pérez, M.A., and Leon, J.I. (2010). Recent advances and industrial applications of multilevel converters. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 57(8), 2553–2580.
- Leahy, K., Hu, R.L., Konstantakopoulos, I.C., Spanos, C.J., and Agogino, A.M. (2016). Diagnosing wind turbine faults using machine learning techniques applied to operational data. In *2016 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)*, 1–8. IEEE.
- Lee, J.S., Lee, K.B., and Blaabjerg, F. (2014). Open-switch fault detection method of a back-to-back converter using NPC topology for wind turbine systems. *IEEE transactions on industry applications*, 51(1), 325–335.
- Leiby, P.N., Oladosu, G.A., Uria Martinez, R., and Johnson, M. (2019). 2018 Benefits study of emergency IEA oil stocks: Final CRADA report. Technical report, Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).
- Ma, K., Liserre, M., and Blaabjerg, F. (2013). Operating and loading conditions of a three-level neutral-point-clamped wind power converter under various grid faults. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(1), 520–530.
- Mohan, N. and Undeland, T.M. (2007). *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & Sons.
- Ni, K., Hu, Y., Chen, G., Gan, C., and Li, X. (2018). Fault-tolerant operation of dfig-wt with four-switch three-phase grid-side converter by using simplified svpwm technique and compensation schemes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(1), 659–669.
- Ortiz-Medina, R.A., Villalobos-Piña, F.J., Alvarez-Salas, R., Esparza-González, M., Saucedo-Zarate, C.H., and Maldonado-Ruelas, V.A. (2018). Detección de fallas de un aerogenerador basado en un PMSG. *Revista Digital Memorias del Congreso de Control Automático*, 477–482.
- Selvaraj, R., Desingu, K., Chelliah, T.R., Khare, D., and Bharatiraja, C. (2018). Fault tolerant operation of parallel-connected 3l-neutral-point clamped back-to-back converters serving to large hydro-generating units. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(5), 5429–5443.
- Walker, J.S. (2008). *A primer on wavelets and their scientific applications*. CRC press.