

# Detección de fallas en el convertidor de potencia con diodos de enclavamiento back-to-back de un sistema de generación eólica

S. J. de la Rosa Mendoza \* R. Alvarez Salas \*  
M. González García \*\* V. Cárdenas \* F. Pazos Flores \*  
F. J. Villalobos Piña \*\*\*

\* Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P. 78290 México (e-mail: sanjouaslp@gmail.com, ralvarez@uaslp.mx, vcardena@uaslp.mx, fpazos@uaslp.mx).

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

\*\*\* Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags. 20256 México (e-mail: fvillalobos@mail.ita.mx).

---

**Abstract:** En este trabajo se aborda la detección de fallas en un aerogenerador, el cual consta de un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG, por sus siglas en inglés) interconectado a la red mediante un convertidor de electrónica de potencia con diodos de enclavamiento (NPC, por sus siglas en inglés). Se presentan algunos casos de falla en el convertidor, las fallas que se abordan son de circuito abierto en los dispositivos de conmutación, en los diodos de enclavamiento y en los condensadores del enlace en corriente directa (CD). Posteriormente, mediante un procesamiento de señales empleando la transformada wavelet discreta (TWD) se detectan las fallas.

*Keywords:* Detección de fallas, convertidor NPC, DFIG, wavelets.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La investigación en el área de la energía eólica ha tenido un gran desarrollo en los últimos años debido al incremento de los gases de efecto invernadero y a la disminución de los combustibles fósiles a nivel mundial (Leiby et al. (2019)). La energía eólica ha tomado un papel muy importante entre las opciones existentes para generar energía eléctrica de forma segura y limpia. Para el año 2018 se tenía una capacidad instalada en el mundo de 591 GW (un crecimiento del 9% en comparación con 2017), de la cual la energía eólica en tierra fue de 46.8 GW, y la de alta mar de 4.5 GW (GWEC (2018)). Esto refleja un claro incremento en la aceptación de este tipo de tecnología como una opción viable para el suministro eléctrico.

En la literatura existen diversos trabajos recientes sobre la detección y el diagnóstico de fallas, pero sólo en el convertidor NPC. 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 extras. El primer sensor mide las señales electromagnéticas conducidas y radiadas en el bus de CD y el segundo utiliza una antena externa para medir la

firma electromagnética del campo cercano. Se reporta que se detectaron de forma satisfactoria las fallas de circuito abierto. Otro trabajo sobre tolerancia a fallas en el convertidor NPC es (Farnesi et al. (2011)), en este caso el convertidor se utiliza para alimentar motores de inducción. Los resultados son satisfactorios, pero tienen el inconveniente de incluir más sensores y dispositivos extra.

Hay otros trabajos que consideran las fallas de los convertidores de electrónica de potencia en sistemas más complejos como son los sistemas de 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). El trabajo considera sólo fallas simples y no aborda el caso de fallas múltiples.

Otro trabajo que aborda la problemática desde el punto de vista de fallas en la red eléctrica es el expuesto en (Ma et al. (2013)), donde las fallas son parecidas a las que suceden en el convertidor. Los autores muestran resultados favorables solo cuando se consideran fallas en la red. 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) y de la TWD 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 Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA). El problema del control tolerante a fallas de un convertidor NPC back-to-back (BTB) para aplicaciones hidráulicas se estudia en (Selvaraj et al. (2018)).

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, de ahí el interés de contar con técnicas confiables de detección de fallas y que no requieran de sensores adicionales a los que usualmente se emplean para realizar el control del sistema.

El presente artículo está organizado de la siguiente manera. La sección 2 explica brevemente el modelado del convertidor NPC-BTB y del DFIG. La sección 3 aborda los tipos de fallas en el convertidor NPC-BTB, se consideran fallas de circuito abierto en los dispositivos de conmutación, en los diodos de enclavamiento y en los condensadores del bus de CD; las fallas pueden ser en un solo interruptor o en múltiples interruptores. La sección 4 presenta el algoritmo propuesto para la detección de fallas basado en la TWD. En la sección 5 se reportan los resultados de simulación. Finalmente, en la última sección se dan las conclusiones.

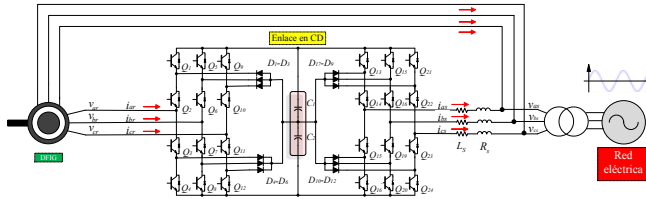


Figura 1. Diagrama esquemático del sistema de generación eólica.

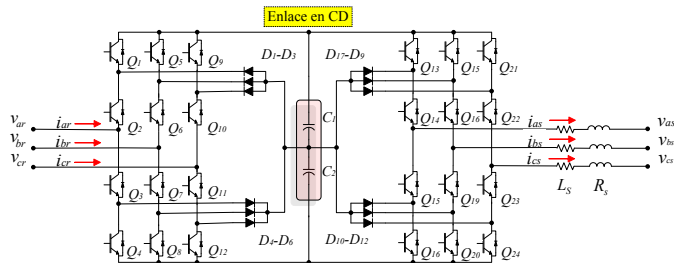


Figura 2. Diagrama esquemático del convertidor NPC-BTB.

## 2. MODELADO DEL CONVERTIDOR NPC-BTB Y DEL DFIG

### 2.1 Modelo promedio del convertidor NPC-BTB

La figura 1 muestra el diagrama del aerogenerador acoplado al DFIG y a la red eléctrica mediante un convertidor NPC-BTB y la figura 2 muestra sólo el convertidor NPC-BTB.

El modelo del convertidor NPC-BTB se puede obtener a partir de su representación equivalente del modelo promedio, de acuerdo a (Kouro et al. (2010)) y (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 cuenta con una inductancia de enlace  $L$  entre el convertidor y la red. Las tensiones  $v_{ar}$ ,  $v_{br}$  y  $v_{cr}$  están asociadas al lado del rotor, Las tensiones  $v_{as}$ ,  $v_{bs}$  y  $v_{cs}$  son las del lado del estator, la resistencia  $R$  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 las suma de las tensiones en los condensadores  $C_1$  y  $C_2$ ;  $i_{ar}$ ,  $i_{br}$  y  $i_{cr}$  corresponden a las corrientes de línea rotor y  $i_{as}$ ,  $i_{bs}$  y  $i_{cs}$  son las corrientes de línea del estator.

### 2.2 Modelo del DFIG

El modelo del DFIG, dado por las ecuaciones (7)-(11), se puede obtener a partir de su representación equivalente en el marco de referencia síncrono DQ, de acuerdo a (Ackermann (2005)) y del análisis de la figura 3.

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

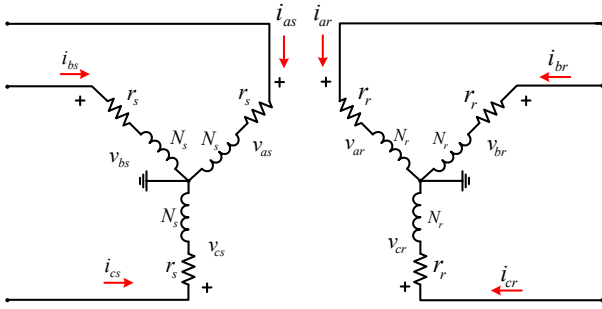


Figura 3. Diagrama equivalente del DFIG.

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

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

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

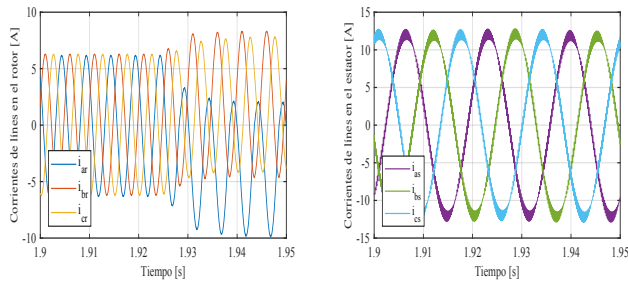
$$\tau_e = \frac{3p}{4} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (11)$$

Donde aparecen representadas las tensiones  $v_{ds}, v_{qs}, v_{dr}, v_{qr}$  y las corrientes  $i_{qs}, i_{dr}, i_{ds}$  y  $i_{qr}$  que están asociadas a los enlaces de flujo  $\lambda_{ds}, \lambda_{qs}, \lambda_{dr}$  y  $\lambda_{qr}$ , y la ecuación 11 corresponde a las variables mecánicas en función de corrientes, inductancia de magnetización  $L_m$  y el número de polos  $p$ .

### 3. TIPOS DE FALLAS

El convertidor NPC-BTB tiene como elementos de conmutación interruptores de tipo IGBT con diodos antiparalelo dados por los elementos  $Q_1 - Q_{24}$ , para el presente análisis se asume el correcto funcionamiento de dichos diodos. Se consideran solo fallas de circuito abierto en los interruptores  $Q_1 - Q_{24}$ , en los diodos de enclavamiento  $D_1 - D_{12}$  y en los condensadores  $C_1$  y  $C_2$ . Se contemplan seis casos en este estudio.

*Caso I.* Primeramente se propone la situación donde se tiene una falla de circuito abierto en el interruptor  $Q_1$  de la figura 1. La figura 4a presenta las corrientes de línea en el rotor bajo la condición de falla en el interruptor  $Q_1$ .

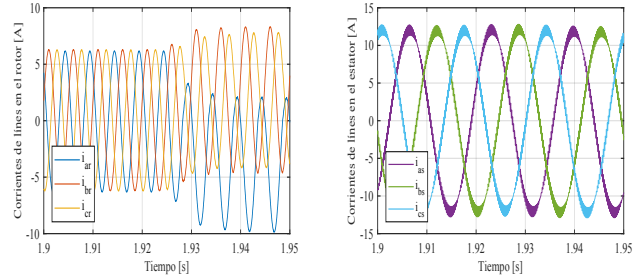


(a) Corrientes del rotor. (b) Corrientes del estator.

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

La figura 4b muestra las corrientes de línea en el estator, se puede observar que las corrientes del lado del estator no sufren un cambio significativo ya que la falla sucede del otro lado del convertidor.

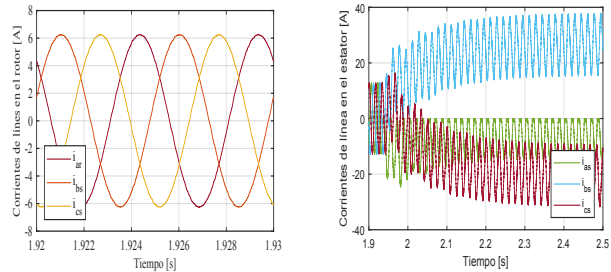
*Caso II.* Para este caso se considera una falla en el interruptor  $Q_2$ . Las corrientes se muestran en la figura 5, la respuesta es similar al caso I ya que los interruptores  $Q_1$  y  $Q_2$  están en la misma rama; por lo que es difícil discernir entre ambas fallas.



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

Figura 5. Caso II. Corrientes de línea en el rotor y estator para la falla en  $Q_2$ .

*Caso III.* En esta caso la falla ocurre en  $Q_{13}$ , el cual pertenece al convertidor conectado a la red. En la figura 6 se observa que la falla afecta principalmente a las corrientes de estator.

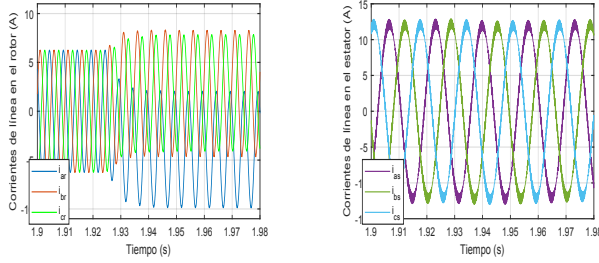


(a) Corrientes del rotor. (b) Corrientes del estator.

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

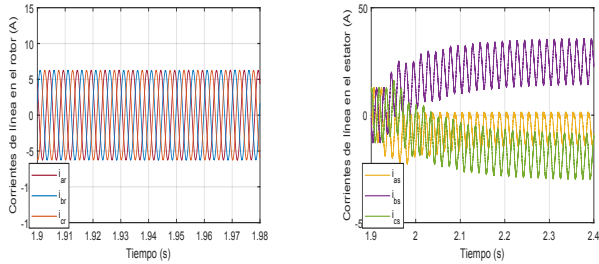
*Caso IV.* Ahora se considera una falla de circuito abierto en el diodo de enclavamiento  $D_1$ , la figura 7 muestra las corrientes de rotor y estator. Se puede observar que se presenta un patrón muy similar al caso de las fallas en los interruptores de la misma rama.

*Caso V.* En este caso se considera la falla en el diodo  $D_7$  del lado del convertidor conectado al estator (figura 8), las corrientes del lado del rotor no se ven afectadas notablemente.



(a) Corrientes de línea en el rotor. (b) Corrientes de línea en el estator.

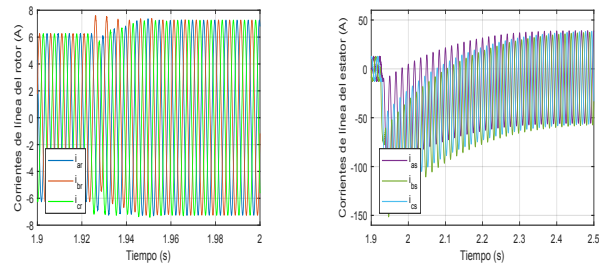
Figura 7. Caso IV. Corrientes de línea en el rotor y estator para la fallas en  $D_1$ .



(a) Corrientes de línea en el rotor. (b) Corrientes de línea en el estator.

Figura 8. Caso V. Corrientes de línea en el rotor y estator para la fallas en  $D_7$ .

*Caso VI.* El último caso corresponde a la falla en el condensador  $C_1$  (figura 9).



(a) Corrientes de línea en el rotor. (b) Corrientes de línea en el estator.

Figura 9. Caso VI. Corrientes de línea en el rotor y estator para la fallas en  $C_1$ .

#### 4. ALGORITMO PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS

El método de la transformada wavelet (TW) a diferencia de la transformada FFT, permite análisis de señales no

estacionarias. 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 y  $u$  denota la traslación.

La TW puede implementarse en tiempo discreto y se le denomina TWD. La TWD con la wavelet Haar es el tipo más simple y también sirve como un punto de comparación para todas las otras TWDs (Walker (2008)).

A continuación, se muestra la aplicación de la TWD con la wavelet Haar, partiendo de una señal  $\mathbf{f}$  discreta con notación vectorial 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 pueden obtener de 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 TWD descompone la señal en dos partes. La primera contiene el promedio o tendencia  $\mathbf{a}^1$  y la segunda contiene la diferencia o fluctuación  $\mathbf{d}^1$ . Lo anterior se describe mediante 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 se puede realizar a mayores niveles como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &\xrightarrow{H_1} (\mathbf{a}^1 | \mathbf{d}^1) \\ \mathbf{f} &\xrightarrow{H_1} (\mathbf{a}^2 | \mathbf{d}^2 | \mathbf{d}^1) \\ \mathbf{f} &\xrightarrow{H_1} (\mathbf{a}^3 | \mathbf{d}^3 | \mathbf{d}^2 | \mathbf{d}^1) \\ \mathbf{f} &\xrightarrow{H_1} (\mathbf{a}^4 | \mathbf{d}^4 | \mathbf{d}^3 | \mathbf{d}^2 | \mathbf{d}^1) \\ \mathbf{f} &\xrightarrow{H_1} (\mathbf{a}^5 | \mathbf{d}^5 | \mathbf{d}^4 | \mathbf{d}^3 | \mathbf{d}^2 | \mathbf{d}^1) \\ &\vdots \\ \mathbf{f} &\xrightarrow{H_1} (|\mathbf{a}^n | \mathbf{d}^n | \mathbf{d}^{n-1} | \dots | \mathbf{d}^5 | \mathbf{d}^4 | \mathbf{d}^3 | \mathbf{d}^2 | \mathbf{d}^1) \end{aligned} \quad (18)$$

donde el superíndice denota el nivel de descomposición.

Ahora, generalizando para cualquier componente  $\mathbf{a}_m$  y  $\mathbf{d}_m$ , se utilizan las señales de escalamiento y wavelets de Haar de primer nivel, las cuales están dadas por:

$$\mathbf{v}_1^1 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0\right) \quad \mathbf{w}_1^1 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0\right)$$

$$\mathbf{v}_2^1 = (0, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, \dots, 0) \quad \mathbf{w}_2^1 = (0, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, \dots, 0)$$

$$\vdots \quad \vdots$$

$$\mathbf{v}_{N/2}^1 = (0, 0, \dots, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}) \quad \mathbf{w}_{N/2}^1 = (0, 0, \dots, \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}})$$

De esta manera, quedan definidas las componentes  $\mathbf{a}_m$  y  $\mathbf{d}_m$  como:

$$\mathbf{a}_m = \mathbf{f} \cdot \mathbf{v}_m^1 \quad \mathbf{d}_m = \mathbf{f} \cdot \mathbf{w}_m^1 \quad (19)$$

Una descripción gráfica de la transformación de una señal con la TWD se presenta en la figura 10. Se observa la descomposición de la señal en diferentes niveles y la distribución de los datos en cada nivel. +Puede observarse que solo se emplea la señal de tendencia en cada descomposición de nivel. Con los datos de los diferentes niveles de descomposición se puede obtener información para la detección de fallas.

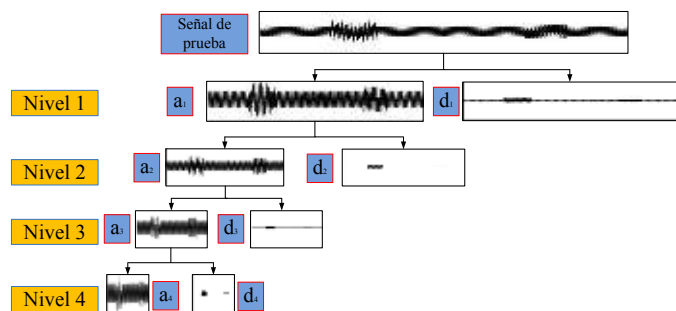


Figura 10. Análisis de una señal mediante la TWD.

## 5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Para las pruebas en simulación se utilizó un convertidor NPC-BTB trifásico interconectado a la red, con los parámetros de la Tabla 1. Para la máquina se utilizaron los parámetros de la Tabla 2, que son los datos que corresponden a un DFIG marca De Lorenzo, modelo DL2053A de 3kW (Sierra and Galindo (2012)).

Tabla 1. Parámetros de operación del convertidor NPC-BTB.

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 $\mu\text{F}$
Potencia nominal ( $P$ )	3 kW
Frecuencia de conmutación ( $f_s$ )	5 kHz

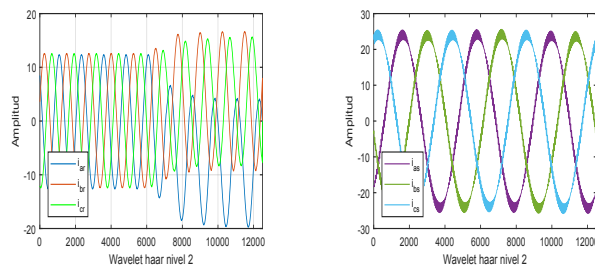
Los siguientes casos se obtuvieron para la TWD con la wavelet Haar, por cuestiones de espacio solo se muestran los resultados para los casos I, IV y VI que corresponden a fallas en distintos tipos dispositivos. En todos los casos se analizó la componente de tendencia aplicada a las señales corrientes de línea en estator y rotor.

Tabla 2. Parámetros de operación del DFIG.

Inductor de enlace rotor ( $L_r$ )	29.54m
Resistencia de enlace rotor ( $R_r$ )	5.79 $\Omega$
Inductor de enlace estator ( $L_s$ )	27.14 mH
Resistencia de enlace estator ( $R_s$ )	5.38 $\Omega$
Inductor de enlace ( $L_m$ )	150 mH
Momento de inercia (J)	0.4 $\text{kg/m}^2$
Frecuencia de operación estator ( $f_s$ )	60 Hz
Frecuencia de operación rotor ( $f_r$ )	200 Hz

### 5.1 Caso I

Empleando la TWD Haar de nivel 2 aplicada a las corrientes de línea de estator y rotor, se obtienen los resultados que se muestran en la figura 11. Se puede observar como la componente de tendencia se amplifica para las señales de rotor, por lo que facilita la selección de los umbrales para detectar la falla.



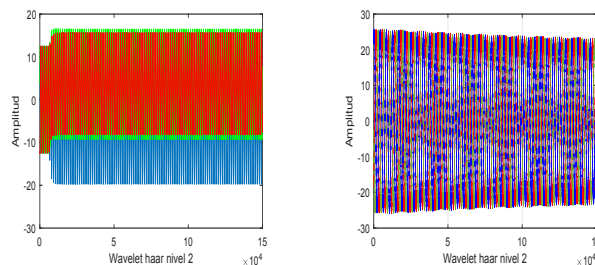
(a) Señales del rotor.

(b) Señales del estator.

Figura 11. TWD Haar de nivel 2 de las corrientes de línea afectada por la falla de  $Q_1$ .

### 5.2 Caso IV

En la figura 12 se muestran los resultados para la falla en  $D_1$ , la falla se refleja en el rotor principalmente.



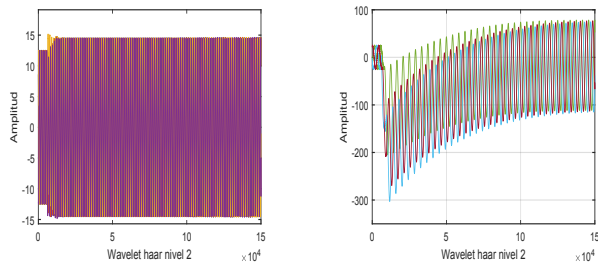
(a) Señales del rotor.

(b) Señales del estator.

Figura 12. TWD Haar de nivel 2 de las corrientes de línea afectada por la falla de  $D_1$ .

### 5.3 Caso VI

Los resultados de la falla en  $C_1$  se presentan en la figura 13 y su desbalance en las corrientes del rotor.



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

Figura 13. TWD Haar de nivel 2 con falla de  $C_1$ .

#### 5.4 Detección de fallas con la TWD Haar

Con los datos obtenidos previamente de la TWD es posible realizar un análisis con descriptores estadísticos tales como el valor promedio, RMS, desviación estándar, curtosis entre otros, y así poder determinar no solo que hay una falla si no también determinar cual dispositivo es el responsable de ella. En la tabla 3 se muestran los valores promedio de la señal de tendencia de nivel 2 obtenida con la TWD Haar de las señales de corriente bajo todas las condiciones de falla y sin falla. Se puede observar que con el valor promedio es posible caracterizar todas las fallas a excepción de la falla en interruptores de la misma rama, esto se puede caracterizar con dos umbrales  $K_{1r} = -2$  y  $K_{2r} = 2$  para el lado del rotor y  $K_{1s} = -2$  y  $K_{2s} = 2$  para el lado del estator.

Tabla 3. Valores promedio de la señal  $a^2$  de la señales de corriente.

Haar	$i_{ar}$	$i_{br}$	$i_{cr}$	$i_{as}$	$i_{bs}$	$i_{cs}$
Sin falla	0.01	-0.01	0.00	0.02	-0.01	-0.01
Caso I	-7.56	3.96	3.6	0.00	0.01	-0.01
Caso II	-7.56	3.96	3.6	0.00	0.01	-0.01
Caso III	0.00	0.01	0.00	12.6	53.6	-41.0
Caso IV	-7.64	3.84	3.78	0.00	0.01	0.00
Caso V	0.01	-0.01	0.00	-12.02	49.6	37.8
Caso VI	0.01	0.00	0.00	17.68	18.5	19.22

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la detección de fallas de un sistema de generación eólica. Las fallas estudiadas son del tipo de circuito abierto en los interruptores, en los diodos de enclavamiento y en los condensadores. Se evaluaron 30 escenarios de falla, pero solo se presentaron seis casos relevantes. Por otro lado, el análisis se realizó con señales de corriente y tensión en el bus de CD, obteniéndose resultados satisfactorios con los métodos basados en el valor promedio de los datos. Es posible identificar las fallas en todos los pares de interruptores de potencia, los diodos de enclavamiento y los condensadores.

## 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.
- 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.
- GWEC (2018). Global wind report. Annual market update (april 2018).
- 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.
- 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. *Memorias del Congreso de Control Automático*, 1(1), 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.
- Sierra, R. and Galindo, V.M.C. (2012). Operación del convertidor ca/cd/ca trifásico operando con desbalances de tensión aplicado a un generador eléctrico doblemente alimentado. *Universidad Autónoma de San Luis Potosí*.
- Walker, J.S. (2008). *A primer on wavelets and their scientific applications*. CRC press.