

Open-circuit fault detection in the power electronic converter of a wind generation system under sudden grid disturbances

S. J. de la Rosa-Mendoza * R. Alvarez-Salas *
M. González-García ** V. Cárdenas * F. J. Villalobos-Piña ***
J. Rodríguez-Rodríguez *

* 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, jorge.rodez@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, Aguascalientes,
Ags. 20256 México (fvillalobos@mail.ita.mx).

Abstract: In this work, an open-circuit fault detection algorithm is presented for the power electronic converter of a wind generation system under voltage sags and swells. The system is based on a doubly-fed induction generator (DFIG) and supplies power to the grid through a three-phase back-to-back neutral-point clamped (NPC) converter. The power electronic converter is controlled using a field-oriented control (FOC) scheme. The fault detection method is based on the discrete wavelet transform of the DFIG current signals.

Keywords: Fault detection, NPC converter, open-circuit, DFIG, FOC, wavelet, sag, swell.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día se ha tenido un desarrollo importante en el campo de las energías renovables, en particular en la energía eólica, por lo que cobra importancia el estudio de la interacción de las turbinas eólicas o aerogeneradores con la red especialmente cuando ocurre alguna falla en el sistema y, además, se presentan perturbaciones como es el aumento en la amplitud de la tensión (swell) de la red o una disminución de ésta (sag). En (Chakraborty et al. (2017)) y (Das et al. (2016)) se aborda la problemática de los sistemas de generación eólica con perturbaciones del tipo mencionado previamente, en el primer trabajo se analiza el impacto de los sags y swell en turbinas eólicas equipadas con generadores de inducción doblemente alimentado (DFIG, por sus siglas en inglés). En el segundo trabajo se realiza una comparación de la respuesta ante perturbaciones en la tensión de turbinas eólicas basadas en DFIGs y en generadores síncronos de imanes permanentes (PMSG, por sus siglas en inglés), la cuantificación se realiza en términos de la distorsión de las corrientes de línea en ambos sistemas.

Otros trabajos que abordan el problema de la mitigación de las perturbaciones de tensión en los sistemas de generación eólica basados en PMSGs son (Das and Zhang (2017), Mohamed et al. (2018)). En el primer trabajo se trata de mitigar las perturbaciones inyectando amor-

tiguamiento en el sistema, lo cual incrementa la estabilidad del sistema. En el segundo trabajo, mediante el uso de un DSTATCOM se minimizan los efectos de los sags y swells. En (Patel et al. (2011)) se emplea un STATCOM para el mismo propósito.

En trabajos más actuales como (Thakurand Bobade (2020)) describen las técnicas utilizadas en el sistema eólico para minimizar los problemas de calidad de la energía. En (Jabbour and Tsioumas (2020)) se propone un sistema mejorado de recuperación de fallas (FRT) para una turbina eólica valiéndose de un DFIG que se basa en el control adecuado de voltaje del estator para abordar las caídas de tensión en la red. En el caso de (Khan and Zeb (2020)) se muestra un esquema de control basado en un PI adaptativo el cual trata de mitigar las variaciones de tensión, en este caso sólo se explora lo que pasa con las variaciones de tensión y no se analiza un caso donde se proponga discernir si la falla es interna como es el caso de una falla en el convertidor o si solo es una perturbación en la red.

En (Kadandani and Maiwada (2015)) se realiza un análisis de las perturbaciones en la calidad de la energía eléctrica y la clasificación detallada de éstas.

Con base a lo anterior, se encontró que los trabajos reportados no consideran los casos de falla en alguna parte del aerogenerador, como puede ser el convertidor de

electrónica de potencia, en presencia de perturbaciones de la red. El poder discernir si el funcionamiento inadecuado de un sistema de generación eólica se debe a una falla o alguna perturbación en la red toma una relevancia importante y se aborda en este trabajo.

El presente artículo está organizado de la siguiente forma, en la sección 2 se describe el modelado del convertidor trifásico con diodos de enclavamiento (NPC, por sus siglas en inglés) en configuración back-to-back (BTB) y del DFIG, así como el esquema de modulación utilizado en el convertidor NPC y el algoritmo de control. La sección 3 describe las perturbaciones en la red consideradas en este trabajo. La sección 4 presenta el algoritmo propuesto para la detección de fallas basado en la transformada wavelet discreta (TWD), se describen también los tipos de fallas en el convertidor NPC-BTB, considerando fallas de circuito abierto 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 del trabajo.

2. MODELADO Y CONTROL DEL SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA

2.1 Modelo promedio del convertidor NPC-BTB

En la Figura 1 se muestra el diagrama a bloques del aerogenerador acoplado al DFIG donde se suministra energía a la red eléctrica mediante un convertidor NPC-BTB, en el punto de conexión común se ve la interacción de la tensión en la red y las perturbaciones propuestas mientras el sistema opera con el control de campo orientado.

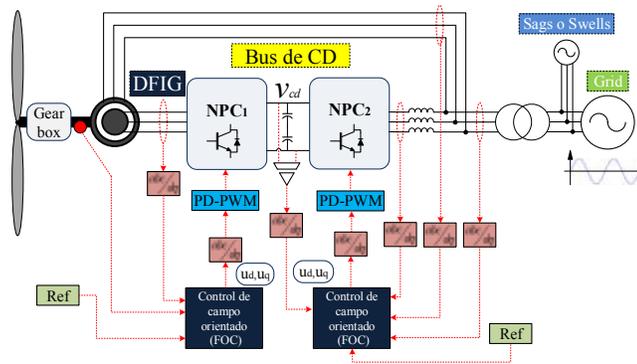


Figura 1. Sistema de generación eólica con control de campo orientado.

La Figura 2 presenta la topología del convertidor NPC-BTB el cual muestra los elementos que pueden tener una falla como lo son los interruptores de potencia, diodos de enclavamiento y los condensador del bus de CD.

Posteriormente se detalla el modelo del convertidor NPC-BTB en las coordenadas del marco de referencia DQ, obtenido en (Kouro et al. (2010)). De acuerdo a (Mohan and Undeland (2007)) y del análisis de la Figura 1 donde

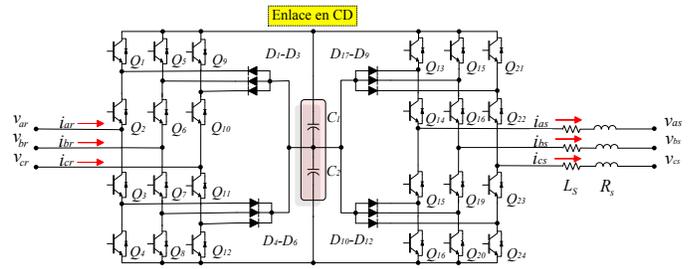


Figura 2. Diagrama esquemático del convertidor NPC-BTB.

se asumen las siguientes consideraciones: la frecuencia de conmutación de los interruptores del convertidor es mucho mayor que la frecuencia de red y las pérdidas en los elementos de conmutación se consideran nulas. 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 que están 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 la red, 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 , i_{ar} , i_{br} e i_{cr} corresponden a las corrientes de línea en el rotor, mientras que i_{as} , i_{bs} e i_{cs} son las corrientes de línea en el estator.

2.2 Modelo del DFIG

En (Ackermann (2005)) está detallado el desarrollo para obtener el modelo del DFIG a partir de su representación equivalente en el marco de referencia síncrono DQ. Dicho modelo está dado por las ecuaciones (7)-(11).

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

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

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

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

$$\tau_e = \frac{3p}{4} L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (11)$$

Las tensiones son v_{ds} , v_{qs} , v_{dr} y v_{qr} , las corrientes son i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} e i_{qr} y los enlaces de flujo son λ_{ds} , λ_{qs} , λ_{dr} y λ_{qr} . La última expresión corresponde a la ecuación mecánica 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 del convertidor NPC pueden aplicarse diversas técnicas de modulación (Holmes and Lipo (2003)). La técnica que se emplea en este trabajo es la de disposición de fase (PD-PWM, por sus siglas en inglés), la cual se ilustra en la Figura 3.

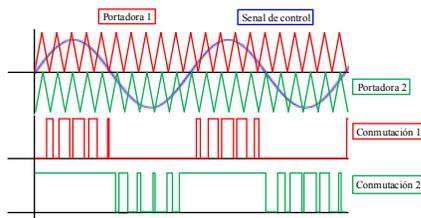


Figura 3. Técnica de modulación PD-PWM de 3 niveles.

Una consecuencia que se ha observado de emplear este tipo de modulación es que los tiempos de detección de un algoritmo de diagnóstico de fallas pueden verse afectados.

2.4 Control

De acuerdo con el esquema de la Figura 1, los convertidores NPC del sistema de generación eólica tienen tareas específicas:

- 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 control de campo orientado (FOC, por sus siglas en inglés), el cual está basado 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 alcanzar cada objetivo de control.

3. PERTURBACIONES EN LA RED

Las perturbaciones consideradas de tipo sag y swell en este análisis son del 15%, 30% y 50% de la tensión nominal

de la red con una duración de seis ciclos de red, lo cual de acuerdo a (Campos (2005), Bollen (2000)) son eventos no deseables en los sistemas y equipos eléctricos.

4. SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS

El método de la transformada wavelet discreta (TWD) permite analizar de señales no estacionarias. La TWD tiene el objetivo de mostrar características que pueden no ser evidentes en la señal original en una primera instancia.

En este caso se emplea la transformada wavelet Haar, que desacopla la señal en dos partes una de alta frecuencia y otra de baja. También es la wavelet más sencilla y sirve como un punto de comparación para las demás wavelets.

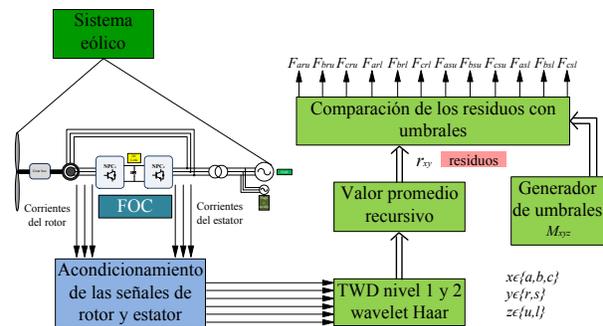


Figura 4. Algoritmo de detección de fallas.

La Figura 4 muestra el algoritmo de detección de fallas propuesto para fallas de circuito abierto en los interruptores del convertidor, incluidos los lados del rotor y del estator. Sólo se consideran estas corrientes, que se utilizan en el esquema de control de campo orientado. El algoritmo consiste en adquirir las señales de corriente y realizar un tratamiento a través del TWD, utilizando la wavelet de Haar, luego se calculan los valores promedio de la señal de tendencia de nivel 2 de cada corriente, estos se comparan con los umbrales M_{aru} , M_{bru} , M_{cru} , M_{arl} , M_{brl} y M_{crl} para el caso del rotor, M_{asu} , M_{bsu} , M_{csu} , M_{asl} , M_{bsl} y M_{csl} para el caso del estator, donde el primer subíndice denota la fase, el segundo se refiere al lado del rotor o del estator y el tercero indica un umbral superior o inferior. Los residuos se definen como R_{ar} , R_{br} , R_{cr} , R_{as} , R_{bs} y R_{cs} , que corresponden al valor promedio del componente de tendencia de segundo nivel de las ondas en las corrientes de línea del rotor y del estator.

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

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. Para la máquina se utilizaron los datos que corresponden a un DFIG marca De Lorenzo modelo DL2053A de 3kW (Sierra (2012)).

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 μ F |
| 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° |

5.1 Casos de estudio

Las pruebas simulación del sistema eólico se realizaron en el software PSIM y el esquema de detección de fallas en MATLAB. En la tabla 2 se detallan las características de las pruebas con sags y swells monofásicos en la fase a y fallas en los interruptores del convertidor de electrónica de potencia. Por otro lado, todas las perturbaciones se presentan de $t = 3.05$ s a $t = 3.15$ s en la fase a y la falla múltiple en los interruptores del convertidor aparece en $t = 3.2$ s, de manera que se pueda evaluar el desempeño del algoritmo de detección de fallas durante el transitorio debido a las perturbaciones. Para todos los casos se empleó la wavelet Haar, analizando la componente de tendencia de nivel 2 aplicada a las señales corrientes de línea en estator y rotor.

Tabla 2. Casos de estudio.

| | Perturbación | Falla |
|----------|--------------|----------|
| Caso I | Sag 15% | Múltiple |
| Caso II | Sag 30% | Múltiple |
| Caso III | Swell 15% | Múltiple |
| Caso IV | Swell 50% | Múltiple |

5.2 Resultados de simulación con sags

Caso I Primeramente, en la prueba de la Figura 5 se muestran las tensiones en la red, corrientes de rotor y estator. En la última Figura se presenta el comportamiento de la corriente i_{as} y el valor promedio de la componente de tendencia de nivel 2 de dicha corriente obtenida mediante la TWD, se puede apreciar los efectos de la perturbación de un sag del 15% en la señal de corriente. Este evento no habilita ninguna señal indicadora de falla en el algoritmo de detección. Por el contrario, esto sucede hasta que aparece la falla en los interruptores Q_{13} y Q_{18} en $t = 3.2$ s, lo cual se indica con la señal roja y la señal amarilla es el indicador de la falla.

Caso II En la Figura 6 se muestran los resultados con un sag de un 30%, la detección de la falla es similar al de la sección anterior; el algoritmo de detección no percibe a la perturbación como una falla.

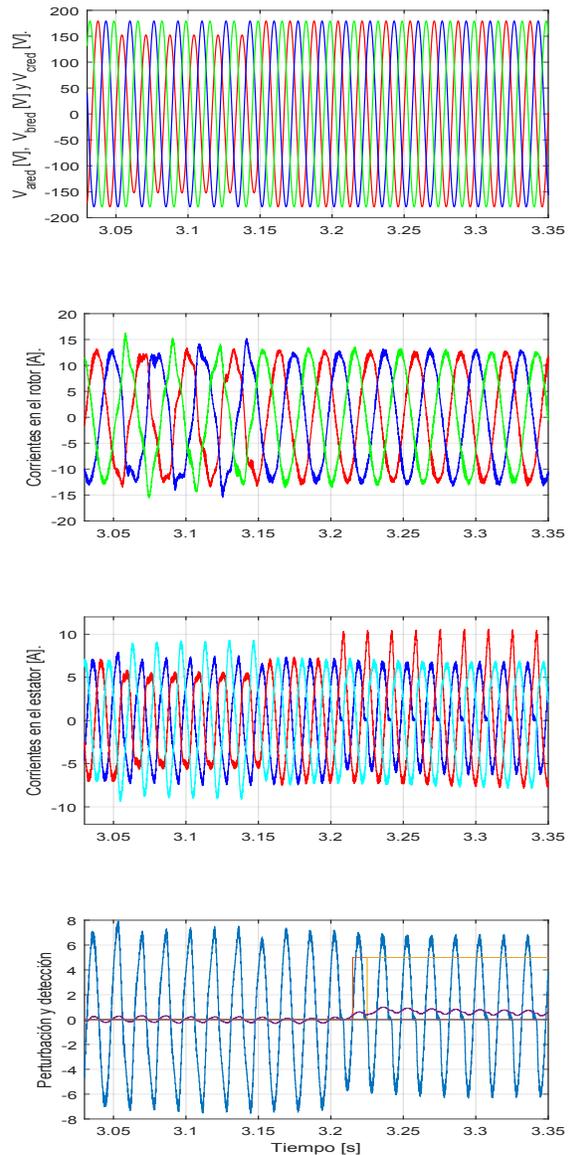


Figura 5. Caso I: Resultados en presencia de un sag del 15% con falla múltiple en $t = 3.2$ s.

5.3 Resultados de simulación con swells

Caso III En la Figura 7 se presentan las mismas señales que en los casos previos cuando se presenta una perturbación de tipo swell del 15%, en este caso tampoco sucede la habilitación de ningún indicador de falla debido a la perturbación, ya que en valor promedio de la componente de tendencia de la señal de corriente obtenida con la TWD no se refleja este comportamiento.

Caso IV Finalmente, en la prueba de la Figura 8 se muestran los resultados con una perturbación de tipo swell del 50%, debido al incremento considerable en la

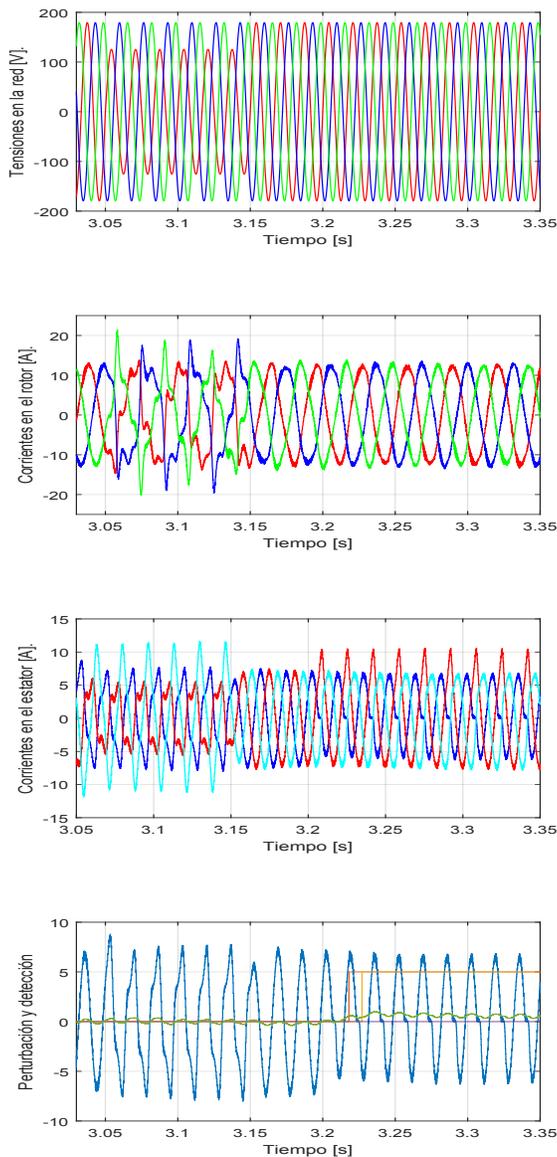


Figura 6. Caso II: Resultados en presencia de un sag del 30% con falla múltiple en $t = 3.2$ s.

amplitud de la tensión se genera un falso positivo, por lo que este evento se puede confundir con una falla.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el desempeño de un algoritmo de detección de fallas utilizando la TWD con la wavelet Haar, para un sistema de generación eólica operando con control de campo orientado. El algoritmo se probó en cuatro escenarios con perturbaciones de tipo sag y swell de diferente intensidad y de una duración prolongada de seis ciclos de red obteniéndose resultados satisfactorios en la detección para los casos I, II y III, ya que no se tuvo alguna detección errónea de falla a pesar de la

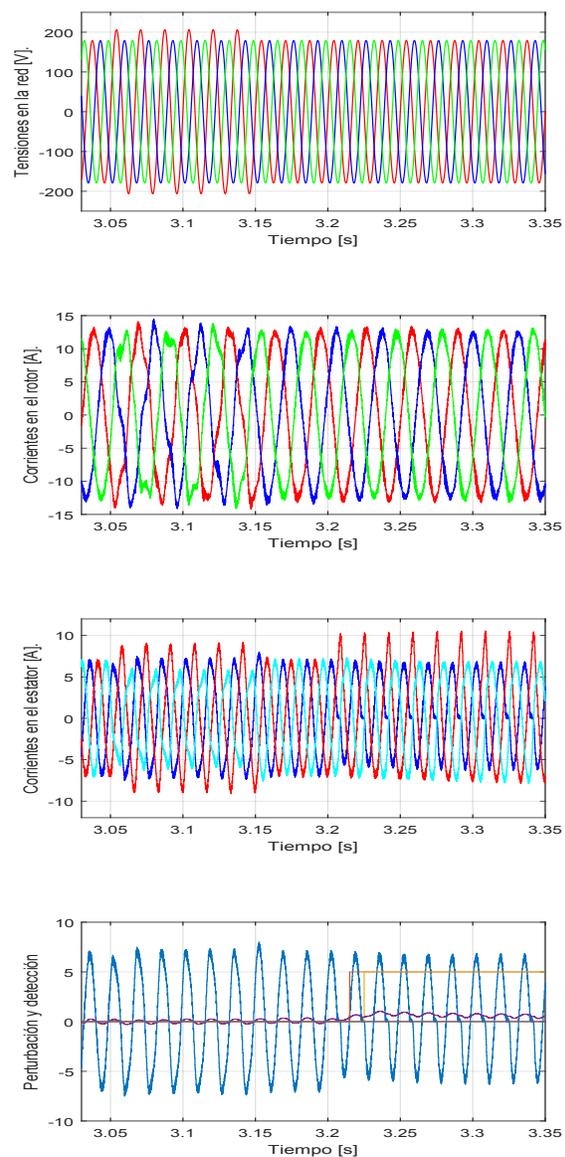


Figura 7. Caso III: Resultados en presencia de un swell del 15% con falla múltiple en $t = 3.2$ s.

perturbación en la red. En el caso IV se sometió el sistema a una prueba demasiado demandante donde el swell fue lo suficientemente grande como para generar una falsa detección de falla.

REFERENCES

- Ackermann, T. (2005). *Wind power in power systems*. John Wiley & Sons.
- Bollen, M.H. (2000). Understanding power quality problems. In *Voltage sags and Interruptions*. IEEE press.
- Campos, S. (2005). IEEE Recommended practice for powering and grounding electronic equipment, (color book series-emerald book). 98–101.

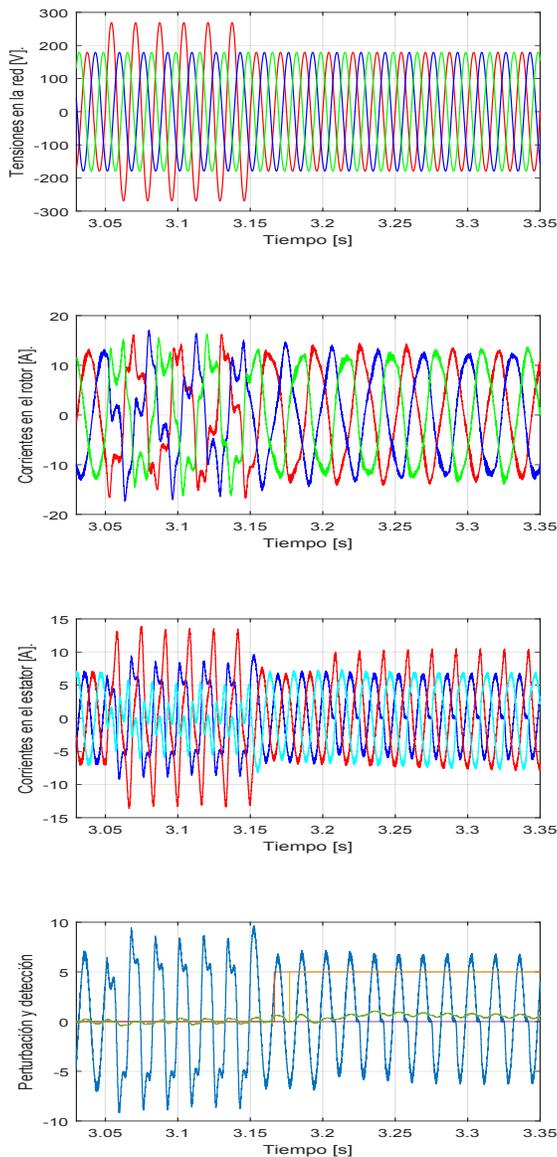


Figura 8. Caso IV: Resultados en presencia de un swell del 50% con falla múltiple en $t = 3.2$ s.

Chakraborty, A., Kumar, S., Tudu, B., and Mandai, K. (2017). Analyzing the dynamic behavior of a DFIG-based wind farm under sudden grid disturbances. In *2017 IEEE International conference on intelligent sustainable systems*, 336–341.

Das, T.K. and Zhang, J. (2017). Mitigating the impact of voltage sags and swells on type IV wind generator systems. In *2017 IEEE Australasian universities power engineering conference*, 1–5.

Das, T.K., Zhang, J., and Pota, H.R. (2016). Comparative study of the response of wind turbine generators to voltage sags and swells. In *2016 IEEE Australasian universities power engineering conference*, 1–6.

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*, 2(2), 227–235.

Gonzalez, M., Cardenas, V., and Pazos, F. (2004). DQ transformation development for single-phase systems to compensate harmonic distortion and reactive power. In *9th IEEE International Power Electronics Congress*, 177–182.

Holmes, D.G. and Lipo, T.A. (2003). *Pulse width modulation for power converters: principles and practice*, volume 18. John Wiley & Sons.

Kadandani, N. and Maiwada, Y. (2015). Impact of voltage sag and swell on the power quality of grid connected wind power plant. *the International Journal of Engineering and Science*, 4(7), 56–64.

Komal D and Bobade, CM. (2020). Challenges in Power Quality and its Mitigation in Wind Integrated Generating Power System. *2020 2nd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)*, 475–478.

Nikolaos, J., Evangelos, T. (2020). A highly effective fault-ride-through strategy for a wind energy conversion system with a doubly fed induction generator. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(8), 8154–8164.

Imran, K., Kamran, Z. (2020). Robust Control Design for DFIG based Wind Turbine under Voltage Sags. *2020 3rd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET) IEEE*, 1–6.

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.

Mohamed, H.F., Saad, N.H., and Eldin, K.A.A.S. (2018). Moderation of voltage sag and swell in grid connected wind energy based PMSG by DSTATCOM. In *2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference*, 433–439. IEEE.

Mohan, N. and Undeland, T.M. (2007). *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & Sons.

Patel, D.M., Nagera, A., and Joshi, D.Y. (2011). Power quality improvement with static compensator on grid integration of wind energy system. In *2011 Nirma University International Conference on Engineering*, 1–6. IEEE.

Sierra, R. (2012). Operación del convertidor ca/cd/ca trifásico operando con desbalances de tensión aplicado a un generador eléctrico doblemente alimentado. Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Walker, J.S. (2008). *A primer on wavelets and their scientific applications*. CRC press.