

Model-Based Validation of Grid-connected DFIG-based Wind Turbine using an Experimental Back-to-Back System for Harmonic and Inter-harmonic Analysis

E. Hernández-Mayoral, *Member, IEEE*, J.D. Mina-Antonio, *Member, IEEE*, V. Torres-García, *Member, IEEE*, R. Iracheta-Cortez, *Member, IEEE*

Abstract—Nowadays, the electricity generation study through wind resources is of great importance, because it is presented as a solution to reduce environmental pollution by replacing electrical systems based on conventional generation with clean energy. However, the increasing problems associated with power quality must be considered, mainly harmonic distortion, derived from the interconnection of wind turbines with the electrical grid, and even more because of their included power electronics converters. Therefore, in this article a DFIG-based wind turbine model connected to the electrical grid for harmonic and inter-harmonic analysis is developed. The proposed model is validated with a low-power experimental prototype (175 W and 3 kW). Both, simulation and experimental results agree with the analytical results.

Index Terms— Back-to-back power converter, DFIG, harmonic and inter-harmonic analysis.

I. INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica a partir de la energía cinética presente en el movimiento horizontal del aire (energía eólica) es una contribución importante en la transición global hacia un sistema energético sostenible. Sin embargo, la integración de la energía eólica en la red eléctrica presenta una serie de desafíos asociados con el elemento de conversión de energía electromecánica, las características aleatorias del viento y las condiciones de la red eléctrica. Uno de los desafíos más preocupantes es la distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés) generada en las terminales de los aerogeneradores debido a la presencia de convertidores de potencia, los cuales enlazan los parámetros del aerogenerador a los de la red eléctrica.

Los grandes parques eólicos que contienen aerogeneradores de velocidad variable basados en el Generador de Inducción Doblemente Alimentado (DFIG, por sus siglas en inglés) producen señales armónicas e inter-armónicas de voltaje y corriente. El DFIG consta esencialmente de una máquina de inducción de rotor devanado con anillos deslizantes.

El devanado del estator se encuentra directamente conectado a la red eléctrica, mientras que el devanado del rotor se conecta al sistema mediante un convertidor de potencia, el cual maneja una fracción (25–30 %) de la potencia total del DFIG para lograr el control total del generador [1]. Un requisito clave del DFIG es tener al devanado del rotor excitado con un voltaje CA a una frecuencia y magnitud controlables, el cual se puede sintetizar utilizando varias técnicas de conmutación, incluida la conmutación de seis pasos [2] y la modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) [3], la cual genera voltajes CA cuasi-senoidales. Bajo tales condiciones, las corrientes del rotor contienen componentes armónicas e inter-armónicas que, a su vez, inducen armónicas en el estator, lo cual genera pares pulsantes.

Relacionado a este tema se han publicado similares estudios del DFIG conectado a la red eléctrica para análisis de propagación armónica. Por ejemplo, en [4] los autores presentan uno de los primeros modelos dinámicos de aerogeneradores basados en DFIG. En [5] los autores presentan un modelo de DFIG específico para análisis de armónicas así como un método novedoso para la mitigación de las mismas. En [6] los autores presentan algunas pautas sobre las señales armónicas e inter-armónicas resultantes en el punto de interconexión de alto voltaje de un aerogenerador DFIG. En [7] los autores presentan mediciones de armónicas e inter-armónicas de un aerogenerador moderno durante un período de varios días, utilizando un monitor de calidad de energía convencional. En [8] los autores presentan el diseño, implementación y validación de un prototipo experimental de un sistema de medición de armónicas para parques eólicos. En [9] los autores analizan los diferentes modelos de sistemas de potencia basados en electrónica de potencia y su clasificación dependiendo del tipo de estudio a realizar (incluye linealización armónica y modelo de espacios de estado armónico). En [10] los autores analizan el contenido armónico de un DFIG de 175 W considerando la operación de la máquina como motor y/o generador variando los valores de deslizamiento. Finalmente, en [11] los autores presentan el estándar actualizado de adición de armónicas e inter-armónicas en parques eólicos con turbinas tipo III (DFIG). En ese sentido, la motivación de este artículo se centra en desarrollar un modelo más allá de lo publicado donde se analiza el impacto de las armónicas, inter-armónicas y/o sub-armónicas generadas en las corrientes del estator

E. Hernández Mayoral está con Cátedras CONACYT-IER-UNAM, Cuernavaca, Morelos, México. (e-mail: emhema@ier.unam.mx)

J.D. Mina Antonio está con Tecnológico Nacional de México, Cuernavaca, Morelos, México. (e-mail: jesus.ma@cenidet.tecnm.mx)

V. Torres-García está con Facultad de Ingeniería de la UNAM, México. (e-mail: vtg_1982@hotmail.com)

R. Iracheta-Cortez está con Cátedras-CONACYT-UNISTMO, Tehuantepec, Oaxaca, México. (e-mail: irachetacortez97@gmail.com)

y rotor cuando el DFIG se excita mediante fuentes de voltaje no senoidales. En resumen, las principales contribuciones de este trabajo se señalan a continuación:

1. Se desarrolla un modelo completo del DFIG, en estado estable, a frecuencia fundamental el cual es directamente aplicable al análisis de flujo de potencia considerando la velocidad del viento como variable de entrada.
2. Se desarrolla un modelo del DFIG, en estado estable, para estudios de propagación de armónicas, inter-armónica y/o sub-armónicas. Este modelo considera los efectos de cada fuente de voltaje (estator y rotor), y así obtener una solución completa para un DFIG.
3. Debido a las dificultades que existen para realizar investigaciones de energía eólica con generadores reales, es necesario implementar prototipos que sean capaces de emular el comportamiento de aerogeneradores que serán utilizados en el trabajo de laboratorio. Por lo que, se construye el prototipo experimental del DFIG conectado a la red eléctrica para validar los resultados obtenidos con el modelo propuesto. El prototipo es de baja potencia (3 kW) el cual se desarrolla en el Laboratorio de Energía Eólica de la UNAM.
4. Finalmente, el prototipo experimental implementado logra presentar un escenario cercano a la realidad de generación eólica con conexión a la red eléctrica por medio de un interface de electrónica de potencia. Su importancia radica en la validación de los resultados experimentales, en la habilidad para testear cada uno de los componentes que conforman el sistema implementado y realizar futuras investigaciones a cada uno de ellos de manera rigurosa. Además, es objeto de integración a otros sistemas, como por ejemplo, al de una microrred cuando opera en modo isla y en modo red.

La distribución de este artículo es la siguiente: Sección II se desarrolla el modelo del DFIG, en estado estable, a frecuencia fundamental. Sección III describe el modelo del DFIG para estudios de flujos de potencia. Sección IV desarrolla el modelo del DFIG, en estado estable, a frecuencias armónicas e inter-armónicas. Sección V describe el modelo del convertidor de potencia utilizado y la configuración de la red eléctrica propuesta. Sección VI desarrolla el prototipo experimental del DFIG conectado a la red y se validan los resultados obtenidos con el modelo propuesto. Finalmente, Sección VII enlista las conclusiones de esta investigación.

II. ANÁLISIS DEL DFIG A FRECUENCIA FUNDAMENTAL

La configuración general del DFIG conectado a la red eléctrica se muestra en la Fig. 1 y el circuito eléctrico monofásico equivalente se muestra en la Fig. 2. La ecuación de voltaje que describe al circuito equivalente de la Fig. 2, visto desde el estator, está dado por:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_s &= -(R_s + jX_s)\mathbf{I}_s + jX_M\mathbf{I}'_r \\ \mathbf{V}'_r/s &= R'_r/s + j(X'_r + X_M)\mathbf{I}'_r - jX_M\mathbf{I}_s \end{aligned} \quad (1)$$

Sabiendo que $X_s = \omega_{es}L_{ls}$ y $X'_r = \omega_{er}L'_{lr}$ donde ω_{es} es la velocidad angular eléctrica que equivale a $\omega_{es} = 2\pi f$ siendo f la frecuencia de la fuente de excitación. \mathbf{V}_s y \mathbf{V}'_r corresponden

a los voltajes fasoriales del estator y rotor, respectivamente. \mathbf{I}_s e \mathbf{I}'_r son las corrientes fasoriales tanto del estator y del rotor. De (1), el deslizamiento s está definido por:

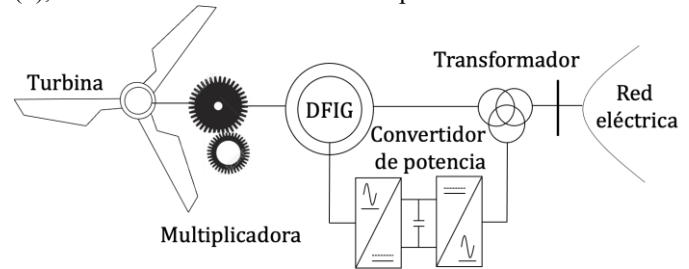


Fig. 1. Configuración del DFIG conectado a la red eléctrica.

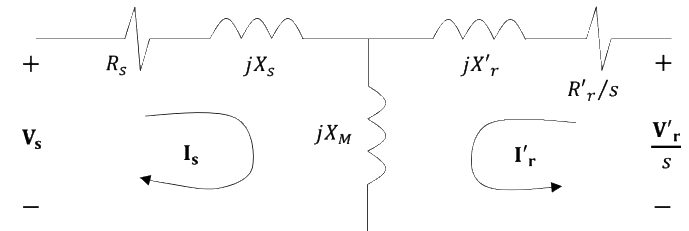


Fig. 2. Circuito equivalente monofásico del DFIG en estado estable.

$$s = \frac{\omega_{es} - \omega_{er}}{\omega_{es}} \quad (2)$$

Si en el DFIG el rotor se encuentra corto-circuitado, una corriente se inducirá en el rotor a una frecuencia eléctrica igual a $f_r = \omega_{er}/2\pi$. Esta frecuencia se expresa como una función del deslizamiento y de la frecuencia del estator, es decir, $f_r = sf$. Ahora, si el rotor es excitado con una fuente de frecuencia f_r , se inducirá una corriente en el estator de frecuencia $f = f_r/s$. Esto es importante cuando la máquina de inducción es excitada desde ambos devanados, estator y rotor. Además, se debe notar que el circuito equivalente de la Fig. 2 solo es válido si ambas fuentes de voltaje tienen la misma frecuencia, es decir, que la fuente de voltaje del rotor tenga una frecuencia de sf . Es común que un DFIG, con una fuente de frecuencia constante en el rotor induzca diferentes frecuencias en el estator dependiendo del funcionamiento del generador, es decir, dependiendo del valor de s . Esas frecuencias inducidas en el estator no pueden llamarse armónicas debido a que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental f . Se debe notar que (1) es válida sólo si la frecuencia de la fuente de voltaje en el rotor tiene una frecuencia igual a sf . Por esa razón, se debe analizar el DFIG usando el teorema de superposición, tal y como se describe en las siguientes subsecciones.

A. Efectos del DFIG Analizado desde el Estator

Considerando que el DFIG es excitado desde el estator con una fuente de voltaje \mathbf{V}_s de frecuencia f y el rotor se encuentra corto-circuitado como se muestra en la Fig. 3. La expresión que describe el sistema está dado por:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_s &= -(R_s + jX_s)\mathbf{I}_s + jX_M\mathbf{I}'_r \\ 0 &= R'_r/s + j(X'_r + X_M)\mathbf{I}'_r - jX_M\mathbf{I}_s \end{aligned} \quad (3)$$

De (3) se obtienen las corrientes fasoriales en el dominio del tiempo, tanto del estator como del rotor, las cuales están dadas por:

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_s &= |I_s| \cos(\omega_{es}t + \varphi_s) \\ \mathbf{i}_r &= |I'_r| \cos(s\omega_{es}t + \varphi'_r - \theta_{eff}) \end{aligned} \quad (4)$$

donde $\theta_{eff} = \theta_r - \omega_r t$ es el ángulo de fase entre el rotor y el estator en estado estable. θ_r y $\omega_r t$ incrementan con el tiempo.

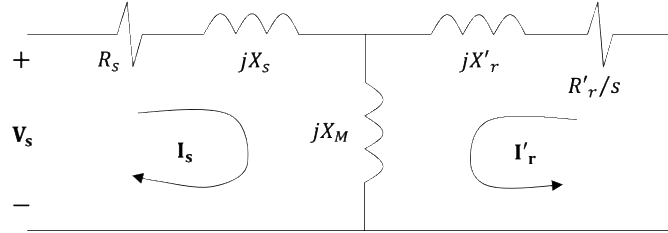


Fig. 3. Circuito equivalente monofásico del DFIG visto desde el estator.

B. Efectos del DFIG Analizado desde el Rotor

Para este caso se considera al DFIG excitado desde el rotor con una fuente de voltaje V'_r de frecuencia f_r estando el estator en corto-circuito como se muestra en la Fig. 4. La expresión que describe el sistema está dado por (5).

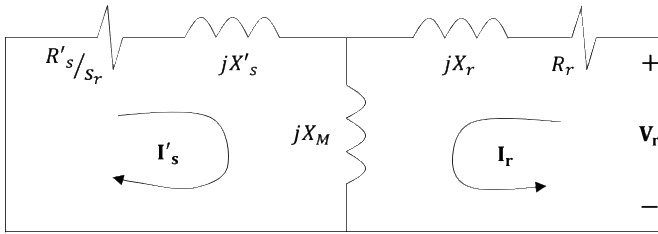


Fig. 4. Circuito equivalente monofásico del DFIG visto desde el rotor.

$$\begin{aligned} 0 &= -(R'_s/s_r + jX'_s)\mathbf{I}'_s + jX_M\mathbf{I}_r \\ \mathbf{V}_r &= R_r + j(X_r + X_M)\mathbf{I}_r - jX_M\mathbf{I}'_s \end{aligned} \quad (5)$$

De (5) se obtienen las corrientes fasoriales en el dominio del tiempo, tanto del estator como del rotor, y el deslizamiento del rotor, las cuales están dadas por:

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_r &= |I_s| \cos(\omega_{er}t + \varphi_r) \\ \mathbf{i}_s &= |I'_s| \cos(s_r\omega_{er}t + \varphi'_s + \theta_{eff}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$s_r = \frac{\omega_{er} + \omega_r}{\omega_{er}} \quad (7)$$

Además, la solución del DFIG está dada por la suma de los dos efectos, es decir,

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_s &= |I_s| \cos(\omega_{es}t + \varphi_s) + |I'_s| \cos(s_r\omega_{er}t + \varphi'_s + \theta_{eff}) \\ \mathbf{i}_r &= |I_r| \cos(\omega_{er}t + \varphi_r) + |I'_r| \cos(s\omega_{es}t + \varphi'_r - \theta_{eff}) \end{aligned} \quad (8)$$

III. ANÁLISIS DE FLUJO DE POTENCIA EN EL DFIG

Para el análisis de flujo de potencia, el DFIG se modela como un nodo PV o PQ [12], dependiendo del esquema de control previsto, es decir, se aplica una representación PV cuando el objetivo es controlar el voltaje en las terminales. Esto es útil cuando se considera la velocidad del viento como variable de entrada. Por el contrario, se emplea una representación PQ

cuando el objetivo es controlar el factor de potencia. A través del análisis del flujo de potencia se obtienen los voltajes en el nodo del DFIG, la potencia activa entregada a la red y la potencia reactiva consumida por el DFIG. Según la potencia generada, el par eléctrico se expresa: $T_e = P_e/\omega_r$. Finalmente, se calculan las variables resultantes del método de inicialización. Sin embargo, si el DFIG opera a su velocidad nominal, se requieren la velocidad nominal del rotor, la velocidad del viento o el ángulo de inclinación de la pala.

La potencia mecánica P_m proporciona el balance de potencia en el DFIG entre las potencia en el estator P_s , en el rotor P_r y las pérdidas P_{loss} , como se observa a continuación:

$$P_m = P_s + P_r + P_{loss} = P_s + P_r + (I_s^2 R_s + I_r^2 R_r) \quad (9)$$

Ahora, las potencias del estator y rotor están dadas por: $P_s = V_s I_s \cos(\delta_s - \varphi_s)$ y $P_r = V'_r I'_r \cos(\delta_r - \varphi_r)$, respectivamente. De esta manera, la potencia activa total inyectada hacia la red eléctrica por el DFIG viene dada por:

$$P = P_s + P_r \quad (10)$$

La potencia reactiva Q es controlable en rangos especificados del intercambio acordado entre el generador y la red eléctrica, es decir, si Q está predeterminado en cero ($Q = 0$), entonces el intercambio de potencia ocurre a través del estator del generador, produciendo una potencia reactiva dada por,

$$Q = V_s I_s \sin(\delta_s - \varphi_s) \quad (11)$$

Existe una relación entre la potencia mecánica y la velocidad del rotor, la cual está dada por:

$$P_m = \psi_0 (1 - s)^3 \quad (12)$$

Considerando (1)–(12) se obtienen una serie de ecuaciones que describen el comportamiento del DFIG en estado estable. La solución se establece de la siguiente manera:

$$\Gamma_1 = V_s \cos \delta_s - R_s I_s \cos \varphi_s + (X_s + X_M) I_s \sin \varphi_s + X_M I'_r \sin \varphi_r \quad (13)$$

$$\Gamma_2 = V_s \sin \delta_s - R_s I_s \sin \varphi_s + (X_s + X_M) I_s \cos \varphi_s + X_M I'_r \cos \varphi_r \quad (14)$$

$$\Gamma_3 = V'_r \cos \delta_r - R'_r I'_r \cos \varphi_r + s(X'_r + X_M) I'_r \sin \varphi_r + sX_M I_s \sin \varphi_s \quad (15)$$

$$\Gamma_4 = V'_r \sin \delta_r - R'_r I'_r \sin \varphi_r + s(X'_r + X_M) I'_r \cos \varphi_r + sX_M I_s \cos \varphi_s \quad (16)$$

$$\Gamma_5 = P - V_s I_s \cos(\delta_s - \varphi_s) - V_r I_r \cos(\delta_r - \varphi_r) \quad (17)$$

$$\Gamma_6 = Q - P_s = Q - V_s I_s \cos(\delta_s - \varphi_s) \quad (18)$$

$$\Gamma_7 = P - \psi_0 (1 - s)^3 + (I_s^2 R_s + I_r^2 R_r) \quad (19)$$

De esta manera, se declaran once variables desconocidas: V_s , δ_s , V_r , δ_r , I_s , φ_s , I_r , φ_r , s , P , Q . Para resolver (13) – (19), se requieren cuatro variables conocidas. Para este caso se consideran a V_s , δ_s , P y Q como variables fijas. Las soluciones para (13) –

(19) se obtienen utilizando el método de Newton–Raphson Desacoplado como se expresa a continuación:

$$\Delta x = J^{-1} \Delta \Gamma \quad (20)$$

donde Δx y $\Delta \Gamma$ son las variables incrementales definidas por:

$$\Delta \Gamma = \Delta(\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \dots, \Gamma_7)^T \quad (21)$$

$$\Delta x = \Delta(V_r, \delta_r, I_s, \varphi_s, I_r, \varphi_r, s)^T \quad (22)$$

Finalmente, la matriz Jacobiana (23) contiene las derivadas parciales de las funciones (13)–(19) para las variables de Δx en (22). Usando las condiciones iniciales adecuadas, la solución de (22) se dará con un mínimo de iteraciones. El cálculo de las condiciones iniciales depende de los resultados del análisis de flujo de potencia. Por lo que se establece lo siguiente:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial \Gamma_1}{\partial V_r} & \frac{\partial \Gamma_1}{\partial \delta_r} & \dots & \frac{\partial \Gamma_1}{\partial s} \\ \frac{\partial \Gamma_2}{\partial V_r} & \frac{\partial \Gamma_2}{\partial \delta_r} & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \Gamma_7}{\partial V_r} & \frac{\partial \Gamma_7}{\partial \delta_r} & \dots & \frac{\partial \Gamma_7}{\partial s} \end{pmatrix} \quad (23)$$

IV. ANÁLISIS DEL DFIG A FRECUENCIAS ARMÓNICAS

El DFIG genera armónicas a través de las fuentes de voltaje del estator o del rotor donde las frecuencias armónicas para cada devanado son: $f_h = hf$ y $f_{rh} = hf_r$, respectivamente donde h es un entero. Las frecuencias inducidas en el rotor, sin embargo, debido a las armónicas en el estator, no pueden llamarse armónicas de la frecuencia fundamental del rotor y viceversa.

A. Efectos del DFIG Analizado desde el Estator

Considerando que el DFIG es excitado desde el estator con una fuente de voltaje armónica V_{sh} de frecuencia hf estando el rotor en corto-circuito, como se muestra en la Fig. 5.

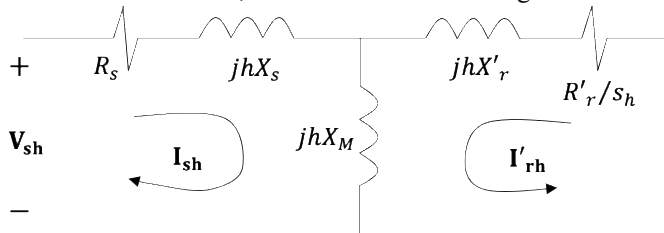


Fig. 5. Circuito equivalente armónico del DFIG visto desde el estator.

La expresión que describe el sistema esta dado por:

$$\begin{aligned} V_{sh} &= -(R_s + jhX_s)I_{sh} + jhX_M I'_{rh} \\ 0 &= R'_r/s_h + jh(X'_r + X_M)I'_{rh} - jhX_M I_{sh} \end{aligned} \quad (24)$$

donde:

$$s_h = \frac{\pm h\omega_{es} - \omega_r}{\pm h\omega_{es}} \quad (25)$$

El signo (\pm) es usado para la secuencia positiva o negativa, según corresponda. Ahora, las armónicas de secuencia positiva tienen un comportamiento $h = 3k + 1$ y las de secuencia negativa son $h = 3k - 1$ para $k = 1, 2, 3, \dots$ donde las armónicas más comunes son 5, 7, 11, 13, 15, 17, ... llamadas armónicas ca-

racterísticas. De (24) se obtienen las corrientes armónicas fasoriales derivadas de una fuente de voltaje armónica en el estator, es decir, $I_{sh} = |I_{sh}| \angle \varphi_{sh}$ y $I'_{rh} = |I'_{rh}| \angle \varphi'_{rh}$ para el rotor. Sus representaciones en el dominio del tiempo, para cada uno de los devandos, son:

$$\begin{aligned} i_{sh} &= |I_{sh}| \cos(h\omega_{est} + \varphi_{sh}) \\ i_{rh} &= |I'_{rh}| \cos(s_h h\omega_{es} t + \varphi'_{rh} \pm \theta_{eff}) \end{aligned} \quad (26)$$

B. Efectos del DFIG Analizado desde el Rotor

Para este caso se considera al DFIG excitado desde el rotor con una fuente de voltaje V'_{rh} de frecuencia f_{rh} estando el rotor en corto-circuito, como se muestra en la Fig. 6. La expresión que describe el sistema esta dado por:

$$\begin{aligned} 0 &= -(R'_r/s_{rh} + jhX'_r)I'_{rh} + jhX_M I_{sh} \\ V'_{rh} &= R_r + jh(X_r + X_M)I_{rh} - jhX_M I'_{sh} \end{aligned} \quad (27)$$

donde:

$$s_{rh} = \frac{\pm h\omega_{er} + \omega_r}{\pm h\omega_{er}} \quad (28)$$

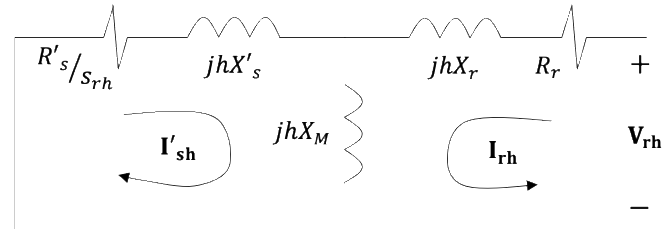


Fig. 6. Circuito equivalente armónico monofásico del DFIG visto desde el rotor.

Al igual que la subsección previa, el signo (\pm) es usado para la secuencia positiva o negativa, según corresponda. De (27) se obtienen las corrientes armónicas fasoriales derivadas de una fuente de voltaje armónica en el rotor, es decir, $I_{rh} = |I_{rh}| \angle \varphi_{rh}$ y $I'_{sh} = |I'_{sh}| \angle \varphi'_{sh}$. Sus representaciones en el dominio del tiempo, para cada uno de los devandos, son:

$$\begin{aligned} i_{rh} &= |I_{rh}| \cos(h\omega_{er} t + \varphi_{rh}) \\ i_{sh} &= |I'_{sh}| \cos(s_{rh} h\omega_{er} t + \varphi'_{sh} \pm \theta_{eff}) \end{aligned} \quad (29)$$

Entonces, la solución completa para el DFIG está dada por la suma de los efectos de las dos fuentes de voltaje armónicas, es decir,

$$\begin{aligned} i_{sh} &= |I_{sh}| \cos(h\omega_{est} + \varphi_{sh}) + |I'_{sh}| \cos(s_{rh} h\omega_{er} t + \varphi'_{sh} \pm \theta_{eff}) \\ i_{rh} &= |I_{rh}| \cos(h\omega_{er} t + \varphi_{rh}) + |I'_{rh}| \cos(s_h h\omega_{es} t + \varphi'_{rh} \pm \theta_{eff}) \end{aligned} \quad (30)$$

C. Armónicas de Secuencia Cero

Las ecs. (25) y (28) se utilizan para las armónicas que tienen el mismo comportamiento en secuencia positiva y negativa, y solo son válidas en condiciones balanceadas. Para el caso de secuencia cero, correspondiente a las armónicas $h = 3k$, el circuito de la Fig. 2 no es válido ya que para secuencia cero el DFIG trabaja con los devandos desacoplados, resultando en el circuito de la Fig. 7 donde los voltajes están dados por:

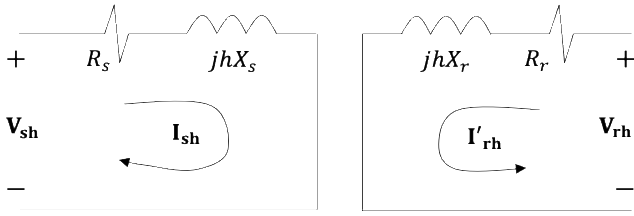


Fig. 7. Circuito armónico equivalente monofásico del DFIG para terceras armónicas vista desde el estator y rotor, respectivamente.

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{sh} &= (R_s + jhX_s)\mathbf{I}_{sh} \\ \mathbf{V}_{rh} &= (R_r + jhX_r)\mathbf{I}'_{rh} \end{aligned} \quad (31)$$

De (31) se obtiene las corrientes armónicas fasoriales derivadas de sus respectivas fuentes de voltaje, es decir, $I_{sh} = |I_{sh}|\angle\varphi_{sh}$ y $I_{rh} = |I_{rh}|\angle\varphi_{rh}$. Sus representaciones en el dominio del tiempo en sus respectivos devanados son:

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_{sh} &= |I_{sh}|\cos(h\omega_{es}t + \varphi_{sh}) \\ \mathbf{i}'_{rh} &= |I_{rh}|\cos(h\omega_{er}t + \varphi_{rh}) \end{aligned} \quad (32)$$

Finalmente, la solución general para condiciones balanceadas incluyendo fuentes de voltaje a frecuencia fundamental y frecuencia armónicas en el estator y rotor están dados por:

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_s &= \sum_{h=1}^H |I_{sh}|\cos(h\omega_{es}t + \varphi_{sh}) \\ &+ \sum_{h=1,3k+1}^H |I'_{sh}|\cos(s_{rh}h\omega_{er}t + \varphi'_{sh} + \theta_{eff}) \\ &+ \sum_{h=1,3k-1}^H |I'_{sh}|\cos(s_{rh}h\omega_{er}t + \varphi'_{sh} - \theta_{eff}) \end{aligned} \quad (33)$$

La primera sumatoria de (33) viene dada por todas las armónicas de la corriente debido a una fuente de voltaje no senoidal en el estator que incluye las armónicas de secuencia positiva, negativa y cero. La segunda sumatoria de (33) viene dada por todas las armónicas de la corriente debido al efecto de inducción de las armónicas de la fuente de voltaje de secuencia positiva en el rotor. La última sumatoria de (33) viene dada por todas las armónicas de la corriente debido al efecto de inducción de las armónicas de la fuente de voltaje de secuencia negativa en el rotor. La misma interpretación es para (34).

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_r &= \sum_{h=1}^H |I_{rh}|\cos(h\omega_{er}t + \varphi_{rh}) \\ &+ \sum_{h=1,3k+1}^H |I'_{rh}|\cos(s_h h\omega_{es}t + \varphi'_{rh} - \theta_{eff}) \\ &+ \sum_{h=1,3k-1}^H |I'_{rh}|\cos(s_h h\omega_{es}t + \varphi'_{rh} + \theta_{eff}) \end{aligned} \quad (34)$$

V. INTEGRACIÓN A LA RED ELÉCTRICA

La integración de parques eólicos a la red eléctrica sigue siendo un desafío en materia de calidad de la energía. Se han publicado numerosos artículos acerca del impacto de la penetración eólica en sistemas de potencia [13–16] incluyendo los rela-

cionados con estudios de estabilidad [17, 18], y con las protecciones eléctricas [19]. Por lo que, este artículo se enfoca en analizar el impacto de la THD generada por el convertidor de potencia en la red eléctrica.

A. Convertidor de Potencia

El convertidor de potencia *back to back* es la topología seleccionada en esta investigación que consiste de un rectificador y un inversor conectados a un bus de CD en paralelo con un capacitor. Este tipo de convertidor es bidireccional, por lo que ambos convertidores funcionan como rectificadores o inversores. Las potencias activa y reactiva a través del rotor y el estator se controlan ajustando la amplitud, fase y frecuencia del voltaje del rotor. El convertidor del lado del rotor (CLR) proporciona un voltaje trifásico de amplitud y frecuencia variables, controlando el par del generador y el intercambio de potencia reactiva entre el estator y la red eléctrica. El convertidor del lado de la red (CLRE) intercambia potencia activa con la red eléctrica obtenida o inyectada por el CLR. La frecuencia de salida del CLRE es constante, mientras que el voltaje de salida varía en función del intercambio de las potencias activa y reactiva con la red eléctrica. Para la sincronización e inyección de potencia del convertidor de potencia *back to back* hacia la red eléctrica, es necesario conocer la secuencia de fases y sincronizar una de las fases de la red mediante el método Phase Locked-Loop (PLL, por sus siglas en inglés). Este método requiere estimar el ángulo de la red para lograr las transformaciones necesarias utilizando el marco de referencia *dq* del voltaje de la red. Cabe mencionar que los mecanismos de control del convertidor de potencia *back to back* no es el punto principal de este trabajo, sin embargo se utilizan los controladores PI síncronos y la técnica SPWM como técnicas de conmutación aplicada al convertidor de potencia *back to back*.

B. Configuración de la Red Eléctrica

En este análisis, la red eléctrica está representada por un circuito equivalente de Thevenin, que consta de una potencia de corto-circuito $S_{cc}=10$ kVA de magnitud constante y un ángulo de impedancia de la red $\vartheta_{cc} = 80^\circ$. Para simplificar el análisis, el sistema eléctrico está representado por un código sencillo utilizando el programa MATLAB-Simulink®. Para conectar el DFIG con la red eléctrica, se utiliza un transformador de tres devanados para ajustar los valores del voltaje generado al valor de distribución de la red eléctrica. Esto establece un punto de interconexión donde tanto el voltaje del estator como el del CLRE están en bajo voltaje teniendo diferentes magnitudes.

VI. VALIDACIÓN DEL MODELO

Se realizaron dos pruebas experimentales con dos DFIG's de diferente capacidad, 175 W y 3 kW, respectivamente. Los parámetros de diseño de estos generadores se muestran en la Tabla I. Además, se construyó un prototipo experimental que contiene: un motor de inducción de 10 HP usado para accionar la caja multiplicadora y esta a su vez al DFIG. Un variador de frecuencia trifásico es usado para accionar al motor de inducción a diferentes velocidades de giro y así representar las diferentes velocidades de viento. Cabe mencionar que estas veloci-

dades se consideran como datos de entrada asumiendo un factor de potencia unitario ya que la potencia reactiva es cero, lo que significa que el CLRE transmite potencia activa en ambas direcciones (positiva y negativa). Es importante notar que si el factor de potencia es positivo, la red eléctrica consume la potencia activa del convertidor de potencia. De esta manera tanto la corriente como el voltaje estarán en fase con la red eléctrica. Finalmente, el convertidor de potencia *back to back* se conecta la devanado del rotor del DFIG. Al final de esta prueba, los resultados experimentales se obtienen mediante el osciloscopio y llevados al programa MATLAB-Simulink® y así compararlos con los obtenidos por el modelo propuesto. Los parámetros del prototipo experimental están listados en la Tabla II.

TABLA I.
PARÁMETROS DE LOS DFIG'S

Parámetros	175 W	3 kW
Número de polos	4	4
Coefficiente de Inercia	0.0068 kg · m ²	0.089 kg · m ²
Corriente de línea nominal	1.3 A	5.8 A
Voltaje de línea a línea	120 Vrms	230/400 V
Par nominal	2.481 N.m	11.9 N.m
Frecuencia nominal	60 Hz	60 Hz
Resistencia del estator (R_s)	14 Ω	0.435 Ω
Resistencia del rotor (R_r)	7.7 Ω	0.816 Ω
Reactancia del estator (X_s)	3.4 kΩ	7.5 Ω
Reactancia del rotor (X_r)	3.4 kΩ	7.5 Ω
Reactancia de magnetización (X_M)	58.4 kΩ	26 Ω
Velocidad del rotor	1500 rpm	1500 rpm

TABLA II.
PARÁMETROS DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL

No.	Equipo	Parámetros
1	Red eléctrica	450 V, 18 A, 60 Hz.
2	Variador de frecuencia	480 V, 35.5 A, Motor: 20 HP.
3	Motor de inducción	10 HP, 460 V, 17.3 A.
4	Caja multiplicadora	Relación 4.5:1, 12.5 kW
5	DFIG de 175W	110/220 V, Δ/Y, 1.3 A
	DFIG de 3 kW	230/400 V, Δ/Y, 4.5 A.
6	CLR	IGBT: 1MBH30D, 4.5 kW, 5 kHz
7	CLRE	IGBT: 1MBH30D, 4.5 kW, 2.5 kHz
8	Transformador	480 V, conexión Δ-Y-Y
9	Analizador de redes	PowerPad, Mod. 3945-B.
10	Computadora	Software MATLAB-Simulink® v. 2020a

A. Caso de Estudio: DFIG de 175 W Conectado a la Red

Para este caso de estudio se considera un DFIG excitado con un voltaje trifásico balanceado senoidal de 80 V a 60 Hz por el estator, un voltaje trifásico cuasisenoidal de 22.5 V a 45 Hz como se muestra en la Fig. 9 y una velocidad de viento de 10 m/s. La magnitud y el ángulo de las componentes armónicas del voltaje del rotor se enlistan en la Tabla III. Las corrientes del estator y rotor del modelo propuesto y las obtenidas por el prototipo experimental se observan en las Figs. 10 y 12, respectivamente. Se utilizó un par mecánico de 2.41 N×m.

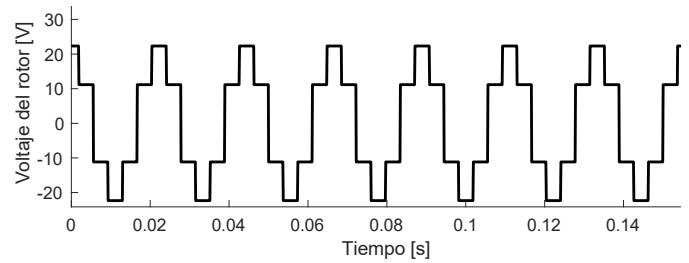


Fig. 9. Voltaje en el rotor.

TABLA III.
COMPONENTES ARMÓNICAS DEL VOLTAJE EN EL ROTOR

	Componentes armónicas							
	5 ^a	7 ^a	11 ^a	13 ^a	17 ^a	19 ^a	23 ^a	25 ^a
Volts.	4.3	3.1	1.95	1.63	1.03	0.88	0.73	0.67
Grados	-84	63	161.3	100.7	-7.9	26.3	40.1	251.6

Las componentes armónicas de la corriente del rotor generadas por las conmutaciones del CLR aparecen en frecuencias de $f_{rh} = (6k \pm 1)sf$, $k = 0,1,2,3, \dots$ es decir, la 5^a, 7^a, 11^a, 13^a,... de la frecuencia fundamental tal como se resumen en la Tabla IV.

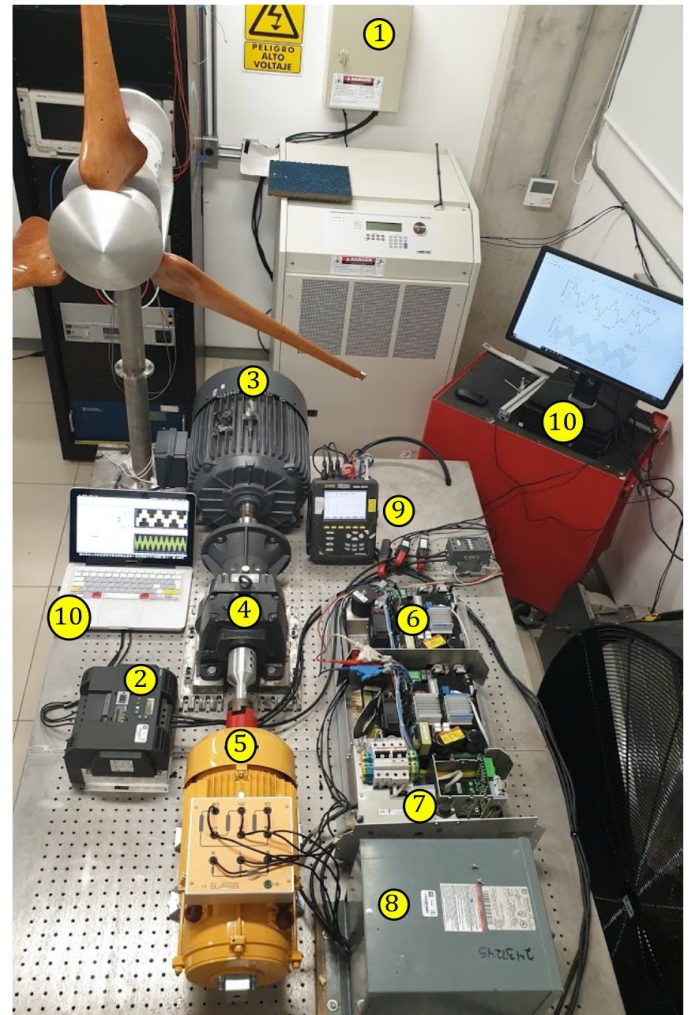


Fig. 8. Configuración experimental del DFIG conectado a la red eléctrica.

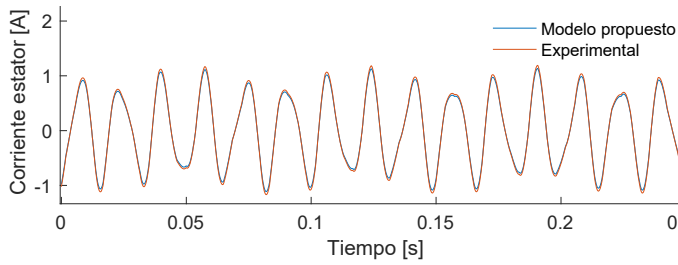


Fig. 10. Corriente en el estator.

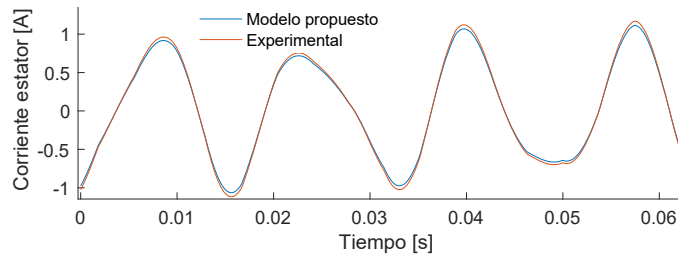


Fig. 11. Zoom de la Fig. 10.

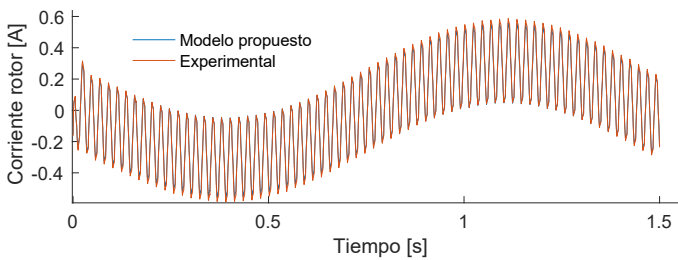


Fig. 12. Corriente en el rotor.

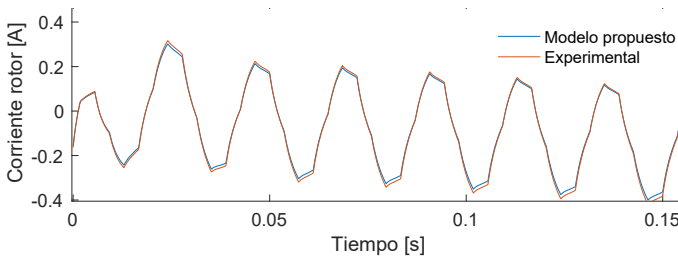


Fig. 13. Zoom de la Fig. 12.

Las formas de onda de las corrientes presentadas en las Figs. 10 y 12 se consiguen aplicando la solución de (33) y (34) de la sección anterior las cuales se resumen en la Tabla IV así como el índice de la THD.

TABLA IV.
RESUMEN DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS DE ESTE CASO DE ESTUDIO

Corriente en el estator			Corriente en el rotor				
Sec.	Mag.	Ang.	Frec.	Sec.	Mag.	Ang.	Frec.
+	0.15	-46°	60	+	0.2	172.8°	45
+	0.937	55.2°	65.11	-	0.313	187.8°	225
-	0.086	-72.5°	81.21	+	0.184	188°	315
+	0.049	81.8°	95.6	-	0.073	166.3°	495
-	0.019	-95.5°	110	+	0.146	178.2°	585
+	0.01	-99.3°	129.4	-	0.07	212.6°	765
-	0.007	-106.7°	139.8	+	0.101	173.7°	855
+	0.007	-110.4°	145.6	-	0.08	205°	1035
+	0.007	-106.8°	156.2	-	0.55	-48°	1215
THD del estator = 25.9%			THD del rotor = 33.6%				

*Sec. → Secuencia, **Mag. → Magnitud (%), ***Ang. → Ángulo (°),
****Frec. → Frecuencia (Hz).

En la Tabla IV se observa que las corrientes armónicas del rotor establecen campos magnéticos giratorios en el entrehierro, induciendo corrientes de frecuencias correspondientes al estator. La distorsión de la corriente en el enlace de CD introducida por el CLRE también se refleja en las corrientes del rotor, lo que provoca la aparición de armónicas adicionales. Entonces, el contenido armónico total de la corriente del rotor viene dado por $f_{rh} = |(6k \pm 1)s \pm 6m|f$, donde $h, m = 0, 1, 2, 3, \dots$ estableciendo que $m = 0$ producen frecuencias armónicas convencionales causadas por el CLR. Esta última expresión explica las frecuencias armónicas a 45 Hz (frecuencia fundamental del rotor), 225, 315, 495, 585, 765 y 855 Hz, que corresponden a las armónicas 5, 7, 11, 13, 17, 19. El mismo principio es aplicable para las armónicas generadas por el CLRE, que aparecen en las frecuencias $f_h = |(6m \pm 1)s \pm 6ks|f$, donde $h, m = 0, 1, 2, 3, \dots$ con las armónicas “enteras” mostradas en la Tabla IV. Para $k \neq 0$, se derivan los contenidos inter-armónicos y sub-armónicos de las corrientes en cascada y que son bastante significativos dependiendo del deslizamiento de operación.

Éstas corrientes armónicas en el rotor establecen campos magnéticos giratorios en el entrehierro, induciendo corrientes de frecuencias correspondientes al devanado del estator. Dado que el deslizamiento s no es un número entero, el contenido armónico de la corriente del estator consiste principalmente de inter-armónicas y sub-armónicas, creando efectos no deseados en la red eléctrica. Por ejemplo, las componentes sub-armónicas de baja frecuencia aparecen como componentes unidireccionales superpuestos a las corrientes de fase, mientras que las sub-armónicas e inter-armónicas cerca de la frecuencia de la red pueden crear un efecto negativo en la magnitud de la corriente del estator.

B. Caso de Estudio: DFIG de 3 kW Conectado a la Red

Se propone un caso de prueba adicional considerando un DFIG de mayor potencia, es decir, 3 kW, 230/400 V y 11.5 A. Para este caso, el DFIG se excita con un voltaje trifásico balanceado senoidal de 400 V a 60 Hz en el estator y un voltaje trifásico no senoidal (cuasicuadrado) de 60 V a 45 Hz generado por el convertidor de potencia *back to back*. La magnitud y el ángulo de fase de las componentes armónicas del voltaje se muestran en la Tabla V. La forma de onda del voltaje en el rotor es similar a la Fig. 9 solo que con magnitud de 60 V. Para este caso se utilizó un par mecánico de 11.9 N·m.

TABLA V.
COMPONENTES ARMÓNICAS DEL VOLTAJE EN EL ROTOR

	Componentes armónicas							
	5 ^a	7 ^a	11 ^a	13 ^a	17 ^a	19 ^a	23 ^a	25 ^a
Volts.	79.8	55	36.6	31.3	23.2	21.2	17.5	16
Grados	14.1	4.2	178	16.9	-16.4	-24.3	150.1	-38.6

Las corrientes del estator y rotor obtenidas del modelo propuesto y del prototipo experimental se observan en las Figs. 14 y 16, respectivamente. La Tabla VI resume las corrientes armónicas en el DFIG de este caso de estudio así como el índice THD de las formas de onda de corrientes presentadas.

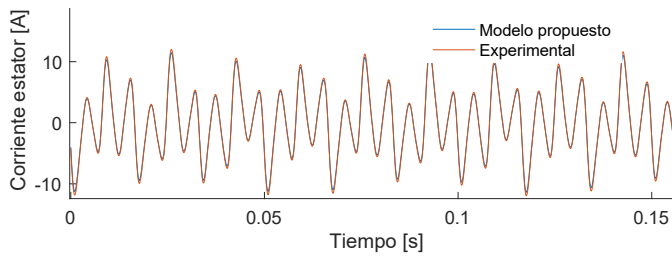


Fig. 14. Corriente en el estator.

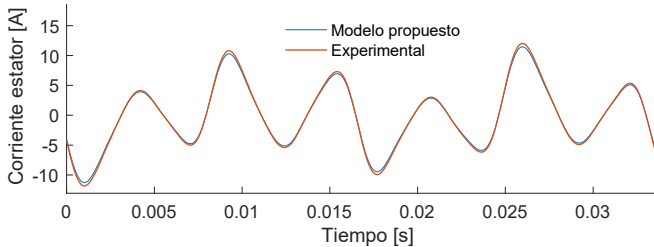


Fig. 15. Zoom de la Fig. 14.

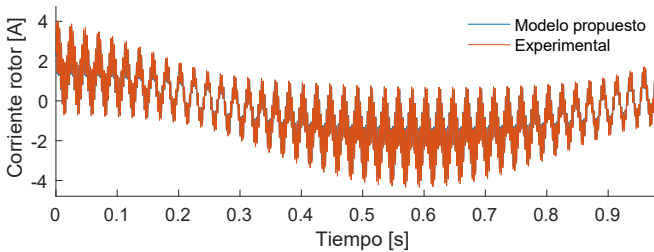


Fig. 16. Corriente en el rotor.

TABLA VI.

RESUMEN DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS DE ESTE CASO DE ESTUDIO

Corriente en el estator				Corriente en el rotor			
Sec.	Mag.	Ang.	Frec.	Sec.	Mag.	Ang.	Frec.
+	52.1	-41.2°	60	+	41.4	3.6°	45
0	12.42	90.4°	313.8	+	16.4	-0.8°	238.5
-	7.44	68.4°	463.6	-	10.53	271°	325.3
+	5.42	-31°	588	+	7.83	55.3°	411.3
-	4.42	77.3°	683.2	+	6.12	-83°	515.2
+	3.98	95.6°	816	+	5.11	44°	612
-	3.40	-41.6°	1064.6	-	3.85	-3.6°	730.3
+	2.46	25.3°	1158	+	2.79	17.8°	971.8
-	1.98	233°	1521.2	+	2.21	-99.2°	1071.6
THD del estator = 17.8%				THD del rotor = 23.1%			

*Sec. → Secuencia, **Mag. → Magnitud (%), ***Ang. → Ángulo (°),
 ****Frec. → Frecuencia (Hz).

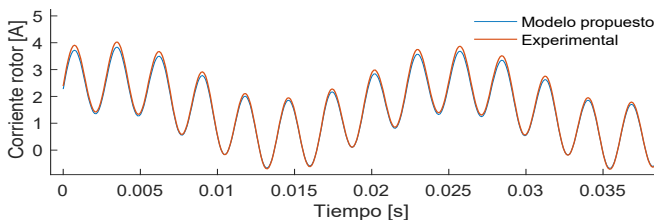


Fig. 17. Zoom de la Fig. 16.

VII. CONCLUSIÓN

En este artículo se demuestra que un modelo de un DFIG de 175 W y 3 kW conectado a la red eléctrica para el análisis armónico e inter-armónico es capaz de reproducir el comportamiento en estado estable del mismo con una alta efectividad, ya que

el modelo propuesto coincide adecuadamente con las mediciones reales obtenidas del prototipo experimental descrito. Los principales resultados de esta investigación se resumen en las siguientes observaciones finales.

1. Se analizó el modelo de dos DFIG's de baja potencia a frecuencia fundamental considerando fuentes de voltaje trifásicas senoidales balanceadas en ambos devanados de la máquina para determinar la respuesta de corriente.
2. Se presentó un análisis de flujos de potencia de la operación en estado estable del DFIG. Para este análisis se consideraron a las potencias activa y reactiva, así como a la velocidad de viento como variables de entrada. Los resultados obtenidos son útiles como valores iniciales del DFIG.
3. Análogamente, se analizó el modelo del DFIG a frecuencias armónicas considerando fuentes de voltaje trifásicas no senoidales en ambos devanados de la máquina. Se generaron corrientes armónicas e inter-armónicas en ambos lados de la máquina dependiendo del deslizamiento y la frecuencia fundamental.
4. Finalmente, se construye un prototipo experimental de baja potencia para validar los resultados obtenidos por el modelo propuesto y se concluye que son muy parecidos en forma de onda, magnitud y frecuencia.

En ese sentido, el análisis del DFIG conectado a la red eléctrica, en estado estable, ofrece un claro análisis de las frecuencias generadas por el DFIG, lo que da como resultado un modelo adecuado para el análisis armónico e inter-armónico del DFIG que se puede utilizar en sistema eléctricos de potencia.

REFERENCIAS

- [1]. J. Murphy and F. Turnbull, *Power Electronics Control of AC Motors*. New York: Pergamon, 1988.
- [2]. N. Mohan, *First Course on Power Electronics*. Englewood Cliffs, NJ: MNPERE/Prentice-Hall, 2005
- [3]. M. Yin, Y. Xu, C. Shen, J. Liu, Z. Yang, and Y. Zou, "Turbine Stability-Constrained Available Wind Power of Variable Speed Wind Turbines for Active Power Control," *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 32, no. 3, pp. 2487-2488, 2017.
- [4]. I. Erlich and F. Shewarega, "Modeling of Wind Turbines Equipped with Doubly-Fed Induction Machines for Power System Stability Studies," 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2006, pp. 978-985.
- [5]. A. Gaillard, P. Poure, S. Saadate, and M. Machmoum, "Variable speed DFIG wind energy system for power generation and harmonic current mitigation," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 6, pp. 1545-1553, Jun. 2009.
- [6]. C. Larose, R. Gagnon, P. Prud'Homme, M. Fecteau, M. Asmine, "Type III Wind Power Plant Harmonic Emissions: Field Measurements and Aggregation Guidelines for Adequate Representation of Harmonics," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 797-804, July 2013.
- [7]. K. Yang, M. H. J. Bollen, E. O. Anders, M. Wahlberg, "A statistic study of harmonics and interharmonics at a modern wind turbine," in Proc. The 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 25-28 May 2014, Bucharest, Romania.
- [8]. A. J. C. Mello, T. F. Moraes, I. F. Visconti, R. P. D. Ross, L. N. Vilela, "Prototype, design, implementation and validation of a harmonics measurement system for wind generators," in Proc. The 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 16-19 October, Belo Horizonte, Brazil.
- [9]. X. Wang and F. Blaabjerg, "Harmonic Stability in Power Electronic-Based Power Systems: Concept, Modeling, and Analysis," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2858-2870, May 2019.

- [10]. E. Hernández, and M. Madrigal. "A Step Forward in the Modeling of the Doubly-fed Induction Machine for Harmonic Analysis", *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 29, no. 1, pp. 149–157, March 2014.
- [11]. H. Ghanavati, L. Kocewiak, A. Jalilian, "Updated Harmonic and Interharmonic Current Summation Rule in Wind Power Plants with Type III Wind Turbines," in Proc. The 18th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems, Energynautics, 16-18 October 2019, Dublin, Ireland.
- [12]. J. Zhu, Y. Zhang, and H. Chen, "Probabilistic Load Flow with Wind Farms using a Frequency and Duration Method," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 74812–74827, 2018.
- [13]. X. Wang, X. Wei, and Y. Meng, "Experiment on Grid-connection Process of Wind Turbines in Fractional Frequency Wind Power System," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 30, no. 1, pp. 22–31, 2014.
- [14]. A. Thakallapelli, S. Kamalasadani, K. Muttaqi, and M. T. Hagh, "A Synchronization Control Technique for Soft Connection of Doubly Fed Induction Generator based Wind Turbines to the Power Grids," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 55, no. 5, pp. 5277–5288, 2019.
- [15]. J. Ouyang, T. Tang, J. Yao, and M. Li, "Active Voltage Control for DFIG-based Wind Farm Integrated Power System by Coordinating Active and Reactive Powers Under Wind Speed Variations," *IEEE Trans on Energy Conversion*, vol. 34, no. 3, pp. 1504–1511, 2019.
- [16]. K. Yang, M. H. J. Bollen, E. O. A. Larsson, and M. Wahlberg, "Measurements of harmonic emission versus active power from wind turbines," *Electr. Power Systems Research*, vol. 108, pp. 304–314, 2014.
- [17]. E. Vittal, M. O'Malley, and A. Keane, "Rotor angle stability with high penetrations of wind generation," *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 27, pp. 353–362, 2012.
- [18]. M. Edrah, K. L. Lo, O. Anaya, "Impacts of high penetration of DFIG wind turbines on rotor angle stability of power systems," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, pp. 759–766, 2015.
- [19]. W. Du, J. Bi, J. Cao, and H. F. Wang, "A Method to Examine the Impact of Grid connection of the DFIGs on Power System Electromechanical Oscillation Modes," *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 31, no. 5, pp. 37



E. Hernández. Obtuvo el grado de Maestro y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Instituto Tecnológico de Morelia en el año 2010 y 2015, respectivamente. Trabajó como investigador en la Universidad del Istmo campus Tehuantepec en Oaxaca, Méx. Actualmente es Cátedra-CONACyT adscrito al Instituto de Energías Renovables de la UNAM. Sus principales líneas de investigación son el análisis de la Calidad de la Energía en la Interconexión de Parques Eólicos a la Red Eléctrica y a las Microredes Eléctricas Inteligentes.



J. D. Mina. Obtuvo el grado de ingeniero eléctrico en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México en 1999. Obtuvo el grado de maestro en ciencias en ingeniería electrónica (área de control automático) del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET), Cuernavaca, México; El grado de doctor lo obtuvo en el 2008 en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Desde 2009 es investigador del Grupo de Electrónica de Potencia, Departamento de Ingeniería Electrónica, CENIDET, donde ha trabajado en análisis y control aplicado a generación a partir de energías renovables, generación distribuida y microrredes.



V. Torres. Nació en Morelia, Michoacán, se graduó de la carrera de ingeniería eléctrica del Instituto Tecnológico de Morelia en el 2008. Recibió el grado de Maestro y Doctor en Ciencias de la ingeniería eléctrica en la misma institución en 2009 y 2014, respectivamente. Actualmente se desempeña como profesor de carrera en la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, sus áreas de interés son sistemas de potencia y distribución, transitorios electromagnéticos y protecciones eléctricas



R. Iracheta Cortez obtuvo en 2013 el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica en CINVESTAV Guadalajara, Méx. Realizó estudios de licenciatura en Ingeniería Mecánica y Eléctrica y Maestría en Ingeniería Eléctrica en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Actualmente, es profesor investigador Cátedras CONACyT adscrito a la Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec. Sus principales líneas de investigación son el análisis de la Calidad de la Energía en la Interconexión de Parques Eólicos a la Red Eléctrica.