



## Análisis y modelado del generador de inducción doblemente alimentado

### *Analysis and Modeling of Doubly Fed Induction Generators*

Lesyani T- León Viltre  
Francisco de Assis - Dos Santos Neves  
Miriam – Vilaragut Llanes

**Recibido: julio de 2013**

**Aprobado: noviembre de 2013**

#### **Resumen/ Abstract**

Uno de los generadores eólicos de velocidad variable más utilizados en la actualidad es el generador de inducción doblemente alimentado (DFIG). En el presente trabajo se presenta un esquema de control del DFIG. El convertidor de potencia del lado de la red es modelado y controlado usando el vector de tensión orientado a los ejes dq, lo que garantiza que con la componente del eje d de la corriente se pueda controlar la potencia activa y, por consiguiente, la tensión del bus DC. La componente del eje q es forzada a cero para mantener un factor de potencia unitario. En el convertidor del lado del rotor se utiliza un control orientado al flujo del estator. Para la sincronización con la red se utiliza un método novedoso basado en el método GDSC-PLL (Generalized delayed signal cancellation). Además, se presenta un análisis del comportamiento del DFIG, ante huecos de tensión.

**Palabras clave:** generador de inducción doblemente alimentado, sistemas de control.

*One of the variable speed wind turbines most commonly used today is the doubly feed induction generator(DFIG).A control scheme of DFIG is discussed in this paper. The power converter connected to the grid side (bus) is modeled and controlled using voltage vectororiented dq reference frame, whichguarantees that the active power can be controlled by the daxiscurrent component and consequently the DC bus voltage. The qaxis component is forced to be zero in order to ensurethe unitary power factor. Astator flux oriented control in the rotor circuit converter is used.A novel GDSC-PLL method is used in order to achieve an efficient synchronization with the grid.Onthe order hand, this paper presents an analysis about the DFIG (Double Feed Induction Generator) behavior during voltages sags*

**Key words:** doubly fed Induction generators, control system.

#### INTRODUCCIÓN

En los últimos años se está produciendo un crecimiento de demanda energética y un aumento de los niveles de contaminación, debido en parte a la industrialización de países en vías de desarrollo. Para controlar la problemática actual y contribuir al desarrollo sostenible se hace uso, cada vez más, de sistemas de conversión eléctrica mediante fuentes renovables. En particular una de ellas está sufriendo un aumento considerable y se prevé seguirá creciendo, la energía eólica.

El generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) es una máquina de inducción de velocidad variable, muy utilizada en generadores eólicos. Este tipo de máquina está formada por dos circuitos, circuito del estator y circuito del rotor, el estator de la máquina se conecta directamente a la red, mientras que el rotor se conecta a la red mediante un convertidor AC/DC/AC. La gran ventaja de este sistema frente a otros sistemas eólicos, es que la potencia circulante por el convertidor rotórico, para velocidades en torno a la de sincronismo, es solo una pequeña fracción de la potencia total de la máquina, lo que supone un ahorro importantísimo en los convertidores electrónicos necesarios.

El principal problema en el sistema surge cuando se produce un fallo en la red, las corrientes en el convertidor conectado al rotor se elevan pudiendo provocar la rotura de éste.

Hoy día el uso de generadores eólicos ha aumentado considerablemente, como consecuencia las turbinas deben permanecer conectadas a la red a pesar de que se produzcan fallos y contribuir a la regeneración del sistema una vez el fallo se haya solucionado [1].

El presente trabajo está estructurado de la siguiente forma: En la sección A se parten de las ecuaciones generales de la máquina para exponer las estrategias de control utilizadas en los convertidores del lado de la red y del lado de la máquina. En la sección B se exponen las principales características del método de sincronización con la red utilizado, mientras que en la sección C se presenta un análisis del comportamiento del DFIG ante un hueco de tensión, En el apartado D se presentan los resultados de las simulaciones realizadas.

## DESARROLLO

### A. Ecuaciones de la máquina

Si consideramos que  $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$  son las tensiones de fase del sistema trifásico y que  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  son las corrientes de fase de entrada, la potencia desarrollada por el circuito es la representada en la ecuación (1):

$$P = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (1)$$

Si la componente de secuencia cero es nula, la potencia instantánea puede ser escrita usando la tensión y la corriente en los ejes de referencia dq como se observa en las siguientes ecuaciones (2 y 3), [2].

$$P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \quad (2)$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q) \quad (3)$$

Las ecuaciones vectoriales de la máquina son representadas por las ecuaciones (4 y 5):

$$v_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega \psi_s \quad (4)$$

$$v_r = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega - \omega_r) \psi_r \quad (5)$$

Donde  $\omega$  y  $\omega_r$  son la velocidad angular y del rotor respectivamente,  $\Psi_s$  y  $\Psi_r$  son los vectores de flujo del estator y el rotor,  $R$  resistencia,  $L$  inductancia, el subíndice  $s$  indica que son parámetros del estator y el subíndice  $r$  que son parámetros del rotor.

El control del convertidor del lado de la red es el encargado de mantener la tensión nominal en el bus DC, El control del convertidor del lado del rotor se encarga de regular el intercambio de la potencia activa y reactiva con la red. La potencia reactiva total que puede ser absorbida por la máquina puede determinarse a partir de la ecuación (6):

$$Q = Q_s + Q_r = \frac{3}{2} \text{Im}\{V_s i_s^*\} + \frac{3}{2} \text{Im}\{V_r i_r^*\} \quad (6)$$

Sustituyendo las ecuaciones de la máquina en la ecuación (6) obtenemos las ecuaciones (7 y 8):

$$Q_s = \frac{3}{2} \frac{w}{L_s} \left[ |\psi_s|^2 - L_m \operatorname{Re}\{\psi_s i_r^*\} \right] \quad (7)$$

$$Q_r = (w - w_r) \left[ \frac{3}{2} \sigma L_r |i_r|^2 + \frac{3}{2} \operatorname{Re}\{\psi_s i_r^*\} \right] \quad (8)$$

donde:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r},$$

el subíndice \* indica complejo conjugado y el subíndice m indica parámetros mutuos.

### Control del convertidor del lado de la red

En [3-4], aparecen varios controladores de corrientes utilizados en convertidores conectados a la red, de esos en este trabajo se emplea el controlador lineal vectorial síncrono, basado en dos PIs como se muestra en la figura 1, que trabajan en los ejes de referencia rotatorios *d q*. Una ventaja fundamental de esta estructura de control es que permite un control desacoplado de las potencias activa y reactiva que se comparten con la red eléctrica. Por otro lado, algunas de las desventajas son: la sobrecarga computacional debido a las transformaciones, la presencia de términos de acoplamiento cruzado entre las corrientes de los ejes *d* y *q* y la necesidad de conocer los valores de los parámetros del filtro para implementar de forma óptima el desacoplamiento de ejes. A pesar de esto, los controladores vectoriales en los ejes de referencia rotatorios son los más empleados hoy en día en los sistemas bajo estudio, y se siguen presentando numerosos trabajos de investigación relacionados con este controlador. Con la componente del eje *d* se puede controlar la potencia activa y por consiguiente la tensión del bus DC, mientras que con la componente del eje *q* se puede controlar la potencia reactiva.

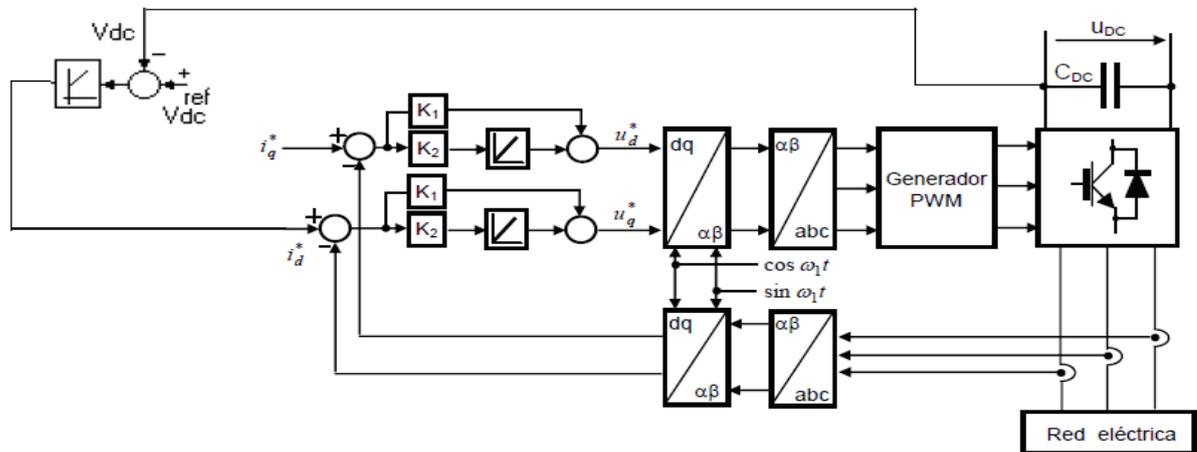


Fig. 1. Controlador de corrientes del convertidor del lado de la red.

Las 3 ecuaciones escalares que describen el comportamiento de la figura 1, son las que se representan de la ecuación (9, 10 y 11):

$$v_a(t) = R_1 i_a(t) + L_1 \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad (9)$$

$$v_b(t) = R_1 i_b(t) + L_1 \frac{di_b(t)}{dt} + e_b(t) \quad (10)$$

$$v_c(t) = R_1 i_c(t) + L_1 \frac{di_c(t)}{dt} + e_c(t) \quad (11)$$

donde:  $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$  son las tensiones de salida de cada rama del convertidor,  $L_1$  es el valor de la inductancia del filtro de salida del convertidor,  $R_1$  es la resistencia del filtro de salida,  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$  e  $i_c(t)$  son las corrientes de cada fase del convertidor y  $e_a(t)$ ,  $e_b(t)$  y  $e_c(t)$  y son las tensiones de cada fase de la red eléctrica.

Las ecuaciones (9, 10 y 11), se pueden expresar en forma vectorial en los ejes  $\alpha\beta$  como se muestra en las siguientes ecuaciones (12, 13 y 14):

$$v_{\alpha\beta}(t) = R_1 i_{\alpha\beta}(t) + L_1 \frac{di_{g\alpha\beta}(t)}{dt} + e_{\alpha\beta}(t) \quad (12)$$

$$v_\alpha(t) = R_1 i_\alpha(t) + L_1 \frac{di_\alpha(t)}{dt} + e_\alpha(t) \quad (13)$$

$$v_\beta(t) = R_1 i_\beta(t) + L_1 \frac{di_\beta(t)}{dt} + e_\beta(t) \quad (14)$$

Las ecuaciones (12, 13 y 14), se transforman a los ejes de referencias  $dq$  mediante las siguientes ecuaciones (15, 16 y 17).

$$v(t) = R_1 i_g(t) + L_1 \frac{di_g(t)}{dt} + jw_1 L_1 i_1(t) + e_g(t) \quad (15)$$

$$v_q(t) = R_1 i_q(t) + L_1 \frac{di_q(t)}{dt} + w_1 L_1 i_d(t) + e_q(t) \quad (16)$$

$$v_d(t) = R_1 i_d(t) + L_1 \frac{di_d(t)}{dt} - w_1 L_1 i_q(t) + e_d(t) \quad (17)$$

Para el diseño del controlador es necesario eliminar el acoplamiento cruzado entre los ejes  $d$  y  $q$ , debido al término  $jw_1 L_1$ . Un método para eliminar este acoplamiento consiste en añadir un lazo de realimentación negativa interno con una ganancia  $-jw_1 L_1$ . Además, es necesario cancelar el efecto de la tensión de red  $e_g$  sobre el controlador, lo que se logra mediante una compensación "feedforward". Esto puede realizarse porque la dinámica de  $e_g$  es muy lenta comparada con la corriente de red  $i_g$  y por tanto puede ser tratada como una perturbación en el sistema de control.

### Control del convertidor del lado del rotor

Para la realización del control vectorial del convertidor del lado del rotor se ha elegido una orientación de los ejes  $dq$  con el eje  $d$  siguiendo el flujo del estator.

La potencia mecánica que se convierte en eléctrica en la turbina eólica responde a la siguiente ecuación (18).

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p V^3 \quad (18)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  es el área de la turbina del rotor,  $C_p$  es el coeficiente de potencia, este último es una función compleja de la distribución del flujo de aire sobre la superficie de las palas, y a su vez se relaciona con el ángulo de inclinación de la pala y  $\lambda$  es conocida como razón de velocidad del punto de pala y responde a la ecuación (19):

$$\lambda = \frac{w_r R}{V} \quad (19)$$

Siendo  $W_r R$  la velocidad del punto de pala y el radio de la turbina del rotor respectivamente. Para cada velocidad del viento existe una velocidad angular del rotor que consigue extraer la máxima potencia. Teniendo esto en cuenta se utilizan las curvas de  $C_p$  contra  $\lambda$  para determinar el óptimo valor de  $\lambda$  para la velocidad del viento medida y de esta forma calcular la velocidad óptima del rotor según la ecuación (20), [5]:

$$W_r^{OPT} = \frac{\lambda^{OPT} V}{R} \quad (20)$$

El control de velocidad debe ser usado para imponer la velocidad óptima del rotor para extraer la máxima potencia.

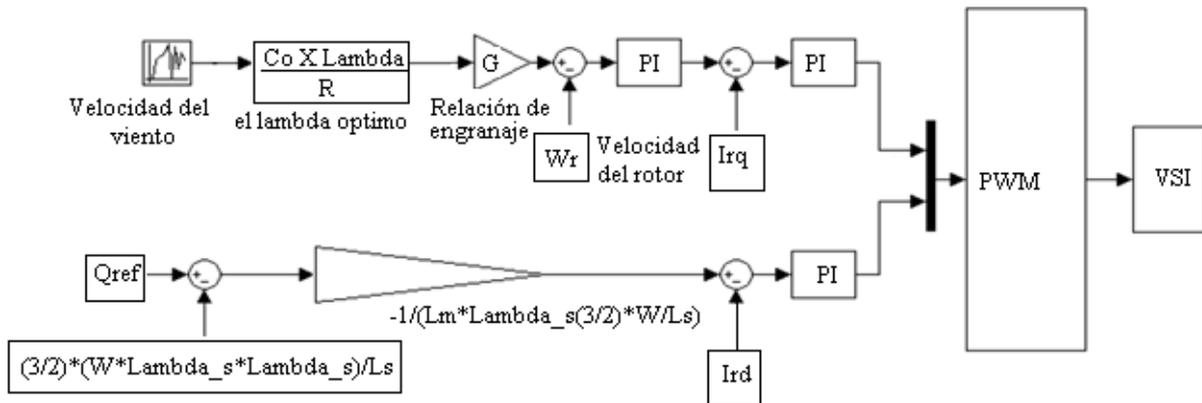
Orientando el eje  $d$  según el flujo del estator, su componente es nula y  $\Psi_{sd} = \Psi_s$  [6]:

Escribiendo la ecuación (7), en un sistema de referencia orientado al flujo del estator, la potencia reactiva absorbida por el generador es la representada en la ecuación (21):

$$Q_s = \frac{3}{2} \frac{w}{L_s} [\psi_s^2 - L_m \psi_s i_{rd}] \quad (21)$$

Teniendo en cuenta la ecuación anterior podemos controlar la potencia reactiva absorbida con la componente  $d$  de la corriente del rotor.

En la figura 2, se observa el diagrama de bloques del esquema de control utilizado en el convertidor del lado de la máquina.



**Fig. 2. Diagrama de bloques del control del convertidor del lado de la máquina.**

La ecuación del rotor de la máquina separada en sus dos componentes  $d$  y  $q$  se representa por las ecuaciones (22 y 23), [7]:

$$V_{rd} = R_r i_{rd} - (w_s - w_r) \psi_{rq} + \frac{d}{dt} \psi_{rd} \quad (22)$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + (w_s - w_r) \psi_{rd} + \frac{d}{dt} \psi_{rq} \quad (23)$$

A la diferencia entre la velocidad de sincronismo y la velocidad del rotor de la máquina ( $W_s - W_r$ ) se la denominará de ahora en adelante  $W_{slip}$ .

Suponiendo que la máquina trabaje sin saturarse, el flujo del estator será la suma del flujo producido por la corriente circulante por él mismo más una parte del producido por las corrientes del rotor [8]. Lo mismo se cumple con el flujo del rotor. Esto queda reflejado en las siguientes ecuaciones (24 y 25):

$$\psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (24)$$

$$\psi_r = L_r i_r + L_m i_s \quad (25)$$

donde  $L_s$ ,  $L_r$  y  $L_m$  son las inductancias de los enrollados de estator y rotor y la inductancia magnetizante respectivamente.

Despejando  $i_s$  en ambas, igualando y operando, se obtiene la relación entre  $\Psi_s$  y  $\Psi_r$ , representada por la ecuación (26):

$$\psi_r = \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_r + \psi_s \frac{L_m}{L_s} \quad (26)$$

que puede fácilmente ser separada en sus dos componentes  $d$  y  $q$ , recordando que el flujo del estator en eje  $q$  es nulo por la orientación utilizada

Definiendo  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$  se puede simplificar la ecuación (26) y obtener la ecuación (27):

$$\left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) = \sigma L_r \quad (27)$$

Introduciendo la ecuación (4), en la ecuación (2), obtenemos las ecuaciones (28 y 29):

$$V_{rd} = R_r i_{rd} - w_{slip} \sigma L_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \psi_{sd} \quad (28)$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + w_{slip} \sigma L_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rq} + w_{slip} \frac{L_m}{L_s} \psi_{sd} \quad (29)$$

En la ecuación de la tensión del rotor en eje  $d$  existen dos sumandos que dependen directamente de  $i_{rd}$ . Lo mismo ocurre en la segunda ecuación en el eje  $q$ . La misión del regulador PI será ajustar la salida para que estos dos sumandos obtengan el valor que deban. El resto de sumandos, a excepción de la derivada del flujo en la primera ecuación que es nula en régimen permanente, se denominan términos de compensación, o términos cruzados, pues dependen cada uno de la corriente obtenida en la otra ecuación.

## B. Sincronización con la red eléctrica

Determinar el valor correcto de la secuencia positiva de la frecuencia fundamental (FFPS) del vector tensión de la red, es esencial para un buen control en los sistemas conectados a la red eléctrica. Esta información es usada en los PLL (phase locked loop) por lo que en la actualidad existen muchas investigaciones encaminadas a lograr PLL más rápidos y con comportamientos adecuados ante distorsiones en la red. En [9] aparece un análisis de diferentes algoritmos utilizados en PLL y se propone una técnica novedosa basada en GDSC, que presenta resultados relevantes ante distorsiones de la tensión de la red. Teniendo en cuenta que el DFIG es muy sensible a huecos de tensión consideramos importante proponer utilizar este tipo de PLL para la sincronización del DFIG con la red eléctrica. Un detector del vector de tensión FFPS ideal debe ser capaz de eliminar el vector de secuencia negativa de la secuencia fundamental con todos los armónicos de los vectores de secuencia negativa y positiva. Por otra parte, la ganancia para el vector FFPS debe ser igual a uno. No es posible cancelar todos los vectores de las componentes armónicas usando solo la transformación del tipo de la descrita en [10]. Por lo tanto, se deben seleccionar algunas transformaciones y colocarse en cascada con el propósito de eliminar los vectores de componentes armónicas alrededor del vector FFPS. Como se muestra en [11] todos los vectores de componentes armónicas impares pueden ser eliminados por una transformación matemática. La ganancia  $G_A^{(hs)}$  sobre el vector componente armónico de orden  $hs$  para esta primera transformación es representada en la ecuación (30):

$$G_A^{(h_s)} = \frac{1}{2}[1 + e^{j\pi(h_s-1)}] \quad (30)$$

Se aplican otras cuatro transformaciones (B, C, D y E) con el objetivo de eliminar los vectores armónicos de orden  $h_s=3+4n$ ,  $h_s=5+8n$ ,  $h_s=9+16n$  y  $h_s=17+32n$  respectivamente. El resto de las ganancias se muestran en las ecuaciones (31, 32, 33 y 34):

$$G_B^{(h_s)} = \frac{1}{2}[1 + e^{j\frac{\pi}{2}(h_s-1)}] \quad (31)$$

$$G_C^{(h_s)} = \frac{1}{2}[1 + e^{j\frac{\pi}{4}(h_s-1)}] \quad (32)$$

$$G_D^{(h_s)} = \frac{1}{2}[1 + e^{j\frac{\pi}{8}(h_s-1)}] \quad (33)$$

$$G_E^{(h_s)} = \frac{1}{2}[1 + e^{j\frac{\pi}{16}(h_s-1)}] \quad (34)$$

En la figura 3, se representa el diagrama de bloques del GDSC-PLL utilizado en este trabajo.

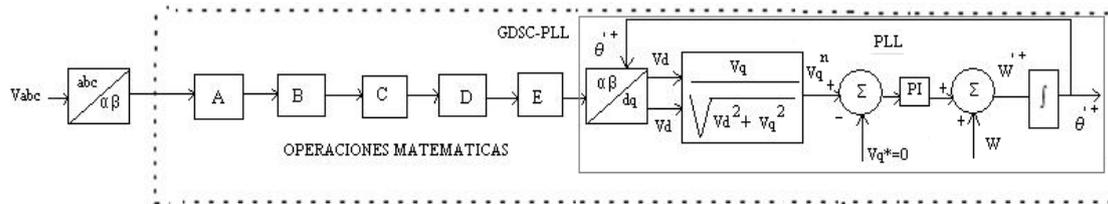


Fig. 3. Diagrama de bloques del GDSC-PLL utilizado.

### C. Comportamiento del DFIG ante huecos de tensión

Las turbinas de vientos basadas en DFIG son muy sensibles a los disturbios de red, fundamentalmente a los huecos de tensión. Una caída abrupta en la tensión de la red causa una componente dc en el flujo del estator resultando en altas tensiones inducidos en el rotor [12 - 13]. Para no perder el control de las corrientes del rotor el convertidor debe diseñarse para ser capaz de generar una tensión igual o mayor que el máximo valor de tensión inducido en el rotor. Por otro lado en el DFIG, la tensión nominal del convertidor es solo una fracción de la tensión nominal de la máquina, esto hace que se eleve la corriente por el rotor y puede llegar a dañarse el convertidor por lo que para protegerlo los fabricantes han desarrollado el denominado crowbar, que cortocircuita los devanadores del rotor e imposibilita el control. Los más recientes códigos de red imponen que la turbina debe mantenerse conectada durante un hueco de tensión y en adición, deben ser capaz de contribuir a la restauración de la tensión inyectando reactivo durante este disturbio. En la actualidad un considerable número de trabajos ha estado dirigido a lograr este objetivo, [14-17] pero resulta interesante observar el comportamiento de las variables eléctricas de la máquina cuando ocurre un hueco de tensión. Si para este análisis partimos de la ecuación (4) trasformada en los ejes de referencia  $dq$  obtenemos las ecuaciones (35 y 36):

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} \quad (35)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_e \psi_{sd} \quad (36)$$

Despejando  $i_s$  de la ecuación (24), obtenemos la ecuación (37):

$$i_s = \frac{\psi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_r \quad (37)$$

Sustituyendo  $i_s$  en la ecuación (25), obtenemos la ecuación (38):

$$\psi_r = L_r i_r + L_m \left( \frac{\psi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_r \right) = \frac{L_m}{L_s} \psi_s + L_r \left( 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \right) i_r = \frac{L_m}{L_s} \psi_s + \sigma L_r i_r \quad (38)$$

Sustituyendo el flujo en las ecuaciones (22 y 23), obtenemos las ecuaciones (39 y 40):

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d\psi_{sd}}{dt} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - (w_e - w_r) \sigma L_r i_{rq} \quad (39)$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + (w_e - w_r) \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \psi_{sd} + (w_e - w_r) \sigma L_r i_{rd} \quad (40)$$

De la ecuación (39), obtenemos la ecuación (41):

$$R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} = V_{rd} + (w_e - w_r) \sigma L_r i_{rq} - \frac{L_m}{L_s} \frac{d\psi_{sd}}{dt} \quad (41)$$

En la ecuación (41), podemos definir  $e_d$  como la fuerza electromotriz de eje directo, que aparece en los disturbios y que responde a la ecuación (42):

$$e_d = -\frac{L_m}{L_s} \frac{d\psi_{sd}}{dt} \quad (42)$$

De la ecuación (40), obtenemos la ecuación (43):

$$R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} = V_{rq} - (w_e - w_r) \sigma L_r i_{rd} - (w_e - w_r) \frac{L_m}{L_s} \psi_{sd} \quad (43)$$

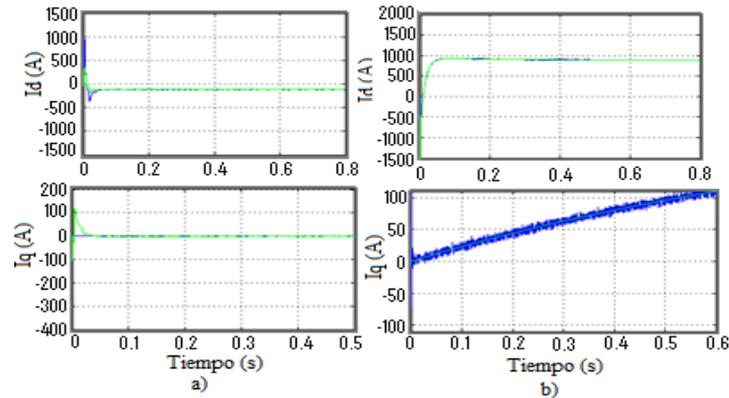
En la ecuación (43), podemos definir  $e_q$  como la fuerza electromotriz de eje en cuadratura, y que responde a la ecuación (44):

$$e_q = -(w_e - w_r) \frac{L_m}{L_s} \psi_{sd} \quad (44)$$

La fuerza electromotriz  $e_r = e_d + j e_q$  durante un disturbio en la red puede ser superior a la máxima tensión que puede ser sintetizada por el convertidor del lado de la red, la cual es limitada por la tensión del bus DC. Por tanto, puede no ser posible controlar las corrientes del rotor durante una variación momentánea de la tensión de la red. Ese hecho justifica el uso de la protección decrowbar.

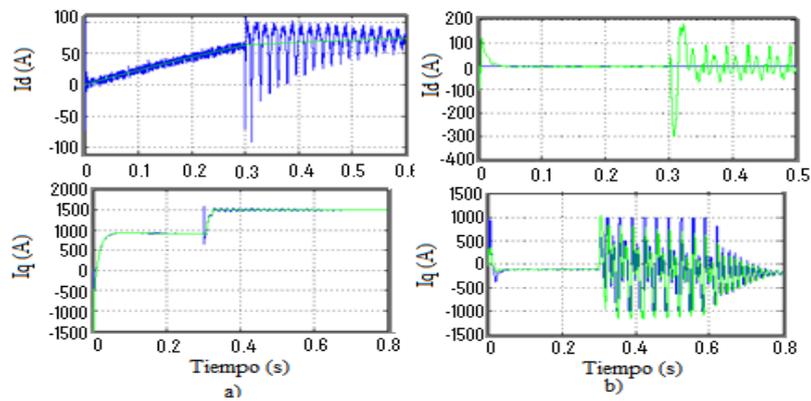
#### D. Resultados de las simulaciones

Para verificar las estrategias de control propuestas y el comportamiento del DFIG ante huecos de tensión se presentan en esta sección los resultados de las simulaciones realizadas en el Matlab. Para las simulaciones se utilizaron los datos de un generador eólico de potencia nominal 850 kW y tensión del estator/frecuencia, 690V/60 Hz. En la figura 4, se representan el control de las corrientes en los ejes de referencia  $dq$  en estado estable, en la figura a se representa el control de las corrientes en el convertidor del lado del rotor, mientras que en la b se representa el control de las corrientes en el convertidor del lado de la red.



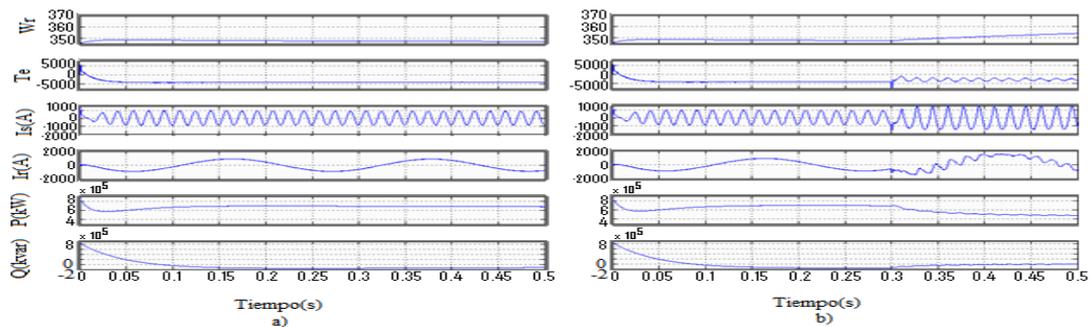
**Fig. 4. Control de las corrientes en el DFIG en condiciones de estado estable. a) en el convertidor del lado del rotor b) en el convertidor del lado de la red.**

Para observar el comportamiento ante huecos de tensión se provocó un hueco trifásico de tensión a los 0.3 s, observando en la figura 5, el comportamiento del control de las corrientes.

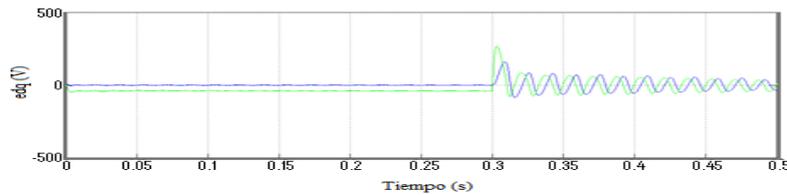


**Fig. 5. Control de las corrientes del DFIG ante un hueco de tensión provocado a los 0.3 s. a) en el convertidor del lado del rotor, b) en el convertidor del lado de la red.**

En la figura 6, se representan algunas variables de la máquina en condiciones de estado estable (a) y cuando ocurre un hueco de tensión (b). Los parámetros medidos son: velocidad del rotor ( $W_r$ ), torque electromagnético ( $T_e$ ), corriente del estator en la fase a ( $I_s$ ), corriente del rotor de la fase a ( $I_r$ ) y por último la potencia activa ( $P$ ) y reactiva ( $Q$ ) respectivamente. Como se puede observar en la figura 6, cuando ocurre el hueco de tensión a los 0.3 s, las corrientes del rotor aumentan considerablemente y aparecen oscilaciones en los diferentes parámetros debido a que aparecen las fuerzas electromotrices que se obtuvieron en las ecuaciones (39 y 40). En la figura 7, se representan las formas de ondas de estas fuerzas en los ejes directo y cuadratura.



**Fig. 6. Comportamiento de algunos parámetros del DFIG a) en condiciones de estado estable, b) ante un hueco de tensión.**



**Fig. 7. Formas de ondas obtenidas de las fuerzas electromotrices en los ejes  $dq$ , que aparecen cuando ocurre un hueco de tensión.**

## CONCLUSIONES

En este artículo se presentan las estrategias de control de un generador de inducción doblemente alimentado, orientadas a los ejes  $dq$ . Los resultados obtenidos en las simulaciones muestran el buen comportamiento de las estrategias de control propuestas. También mediante las simulaciones observamos el comportamiento de algunos parámetros del DFIG cuando ocurre un hueco de tensión y obtuvimos la forma de onda de la fuerza electromotriz que aparece en la máquina cuando ocurre un hueco de tensión.

## REFERENCIAS

- [1]. SANTOS, A.; *et al.*, "Penetración eólica con diferentes tecnologías de aerogeneradores en presencia de una red débil." Ingeniería Energética, 2012 vol.33, n.2, [consulta: 7 de octubre de 2013], Disponible en: <http://www.rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/330>, ISSN 1815-5901.
- [2]. MOHAN, N.; *et al.*, "Control of a Doubly Fed Induction Wind Generator Under Unbalanced Grid Voltage Conditions". IEEE Transaction Energy Conversion. 2007, vol.22 n.1, p. 129-135, ISSN 0885-8969.
- [3]. ZHOU, Y.; BAUER, P., "Control of DFIG under Unsymmetrical Voltage dips". Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007, 17-21 June, p. 933-938, ISSN 0275-9306.
- [4]. KAZMIERKOWSKI, M.P; MALESANI, L., "Current Control Techniques for Three-Phase Voltage-Source PWM Converters: A Survey". IEEE Transaction on Industrial Electronics. 1998, vol.45, n.5, p. 691-703, ISSN 0278-0046.
- [5]. AKHMATOV, V., "Analysis of Dynamic Behavior of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power." [PhD Thesis], Denmark: Technical University, April 2003, [consulta: 7 de octubre de 2013], Disponible en: <http://www.oersted.dtu.dk/publications>
- [6]. TABERNA, J.L., "Comportamiento de generadores eólicos con máquina asíncrona doblemente alimentada frente a huecos de voltaje". Tesis Doctorado, Universidad Politécnica de Navarra, 2008. Falta fecha de consulta y sitio en internet disponible
- [7]. PENA, R.; *et al.*, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation". IEEE Proc.-Electr. Power Appl. 1996, vol.143, n.3, p. 231-241, ISSN 1350-2352.
- [8]. KRAUSE, P.C.; *et al.*, "Analysis of electric machinery and drive systems". Wiley-IEEE Press, vol.43, n.6, p. 2555-2557, ISBN: 0470544163.
- [9]. NEVES, F.A. S.; *et al.*, "A Generalized Delayed Signal Cancellation Method for Detecting Fundamental- frequency Positive-Sequence Three-Phase Signals". IEEE Transactions on power delivery. 2010, vol.25, n.3, p. 1816-1825, ISSN 0885-8977.

- [10]. SVENSSON, J.; *et al.*, "Practical implementation of delayed signal cancellation method for phase-sequence separation". IEEE Transactions on Power Delivery. 2007, vol.22, n.1, p. 18-26, ISSN 0885-8977.
- [11]. YAO, Z., "Fundamental phasor calculation with short delay". IEEE Transactions Power Delivery. 2008, vol.23, n.3, p. 1280-1287, ISSN 0885-8977.
- [12]. MARQUES, G.D.; *et al.*, "Understanding the Doubly Fed Induction Generator during Voltage Dips". IEEE Transactions on Energy Conversion. 2012, vol.27, n.2, ISSN 0885-8969.
- [13]. LOPEZ, J.; *et al.*, "Dynamic Behavior of the Doubly Fed Induction Generator during Three-Phase Voltage Dips". IEEE Transactions on Energy Conversion. 2007, vol.22, n.3, ISSN 0885-8969.
- [14]. SEMAN, S.; *et al.*, "Ride-through analysis of doubly fed induction wind-power generator under unsymmetrical network disturbance". IEEE Transactions on Power Systems. 2006, vol.21, n.4, p. 1782-1789, ISSN 0885-8950.
- [15]. LOPEZ, J.; *et al.*, "Ride through of wind turbines with doubly fed induction generator under symmetrical voltage dips". IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009, vol.56, n.10, p. 4246-4254, ISSN 0278-0046.
- [16]. MARQUES, G. D.; *et al.*, "A DFIG sensorless rotor position detector based on a hysteresis controller". IEEE Transactions on Energy Conversion. 2011, vol.26, n.1, p. 9-17, ISSN 0885-8969.
- [17]. HU, J.; *et al.*, "Dynamic modeling and improved control of DFIG under distorted grid voltage conditions". IEEE Transactions on Energy Conversion. 2011, vol.26, n.1, p. 163-175, ISSN 0885-8969.

## AUTORES

### **Lesyani T. León Viltre**

Ingeniera Electricista, Máster en Ciencias, Profesora Auxiliar de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba

e-mail: [lesyani@uclv.edu.cu](mailto:lesyani@uclv.edu.cu)

### **Francisco de Assis dos Santos Neves**

Ingeniero Eléctrico Master en Ciencias Doctor en Ciencias. Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Federal de Pernambuco. Recife Brasil.

e-mail: [fneves@ufpe.br](mailto:fneves@ufpe.br)

### **Miriam Vilaragut Llanes**

Ingeniera Eléctrica Master en Ciencias Doctora en Ciencias. Profesora del Departamento de Ingeniería Eléctrica del CIPEL, CUJAE, Habana Cuba.

e-mail: [miriamv@electrica.cujae.edu.cu](mailto:miriamv@electrica.cujae.edu.cu)