

# Control IDA - PBC de un convertidor trifásico de frente activo para un sistema de generación eólica autónomo

Por Federico M. Serra, Cristian H. de Angelo, Daniel G. Forchetti  
Grupo de Electrónica Aplicada (GEA)  
Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba

### Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un controlador para un convertidor trifásico de frente activo utilizado en un sistema de generación de energía eléctrica autónomo, a partir de un recurso eólico. El objetivo de control consiste en mantener la tensión de salida con amplitud y frecuencia constante independientemente de la carga solicitada. El controlador es diseñado utilizando la estrategia de asignación de interconexión y amortiguamiento y la estabilidad del sistema es asegurada mediante la elección de la función de energía del sistema a lazo cerrado. El desempeño de la estrategia de control propuesta es validado mediante simulaciones realizadas usando un modelo realista del convertidor.

### Palabras claves

Energía eólica, convertidor de

frente activo, IDA, PBC, sistemas aislados.

### 1. Introducción

Debido al cambio climático producido por la contaminación ambiental y la creciente demanda de energía eléctrica, se ha incrementado la necesidad de utilizar sistemas de generación basados en recursos renovables. De todas estas formas de generación, la energía eólica es quizá la más prometedora para ayudar a solucionar los problemas energéticos. Entre las diferentes configuraciones de sistemas de generación eólica, los sistemas autónomos son generalmente utilizados en aplicaciones de baja potencia tales como bombeo de agua, electrificación rural y sistemas de telecomunicaciones; donde la conexión a la red eléctrica resulta difícil y/o antieconómica debido a las condiciones del terreno y clima.

Los sistemas de generación eólica autónomos están formados por una turbina eólica acoplada a un generador eléctrico, el cual convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica de tensión y frecuencia variables. La energía entregada por este generador debe ser acondicionada para poder ser utilizada por las cargas que se conecten al sistema. La etapa de acondicionamiento de la energía está formada generalmente por diferentes combinaciones de convertidores de potencia; una de las configuraciones más usadas es la que se muestra en la figura 1. Esta configuración consta de un rectificador no controlado, seguido de un convertidor CC - CC y un convertidor fuente de tensión (*Voltage Source Converter, VSC*) en configuración inversor con un filtro de salida. El conjunto del VSC más el filtro de salida es conocido con el

nombre de "convertidor de frente activo" (*Front End Converter, FEC*).

En los sistemas de generación autónomos que utilizan FEC, éste debe ser controlado para generar una tensión de salida con amplitud y frecuencia constante, independientemente de la carga solicitada, por lo tanto se debe diseñar una estrategia de control adecuada para que el FEC pueda cumplir con este objetivo.

Los métodos basados en pasividad permiten un diseño sistemático del controlador quedando claramente definida la estructura del sistema y siendo la determinación de los parámetros, una tarea sencilla comparada con otras estrategias. Uno de estos métodos es el de asignación de interconexión y amortiguamiento (*Interconnection and Damping Assignment*,

*IDA*), el cual ha sido utilizado en el diseño de controladores para VSC usados como rectificadores e inversores. Este método consiste en elegir una función de energía para el sistema que permita garantizar que el error de control converja asintóticamente a cero.

En este trabajo, el diseño de la estrategia de control para el FEC es realizado utilizando IDA. Dicha estrategia tiene por objetivo mantener la amplitud y frecuencia de la tensión de salida constante, independientemente de la carga solicitada.

Se debe mencionar que este trabajo corresponde a la primera etapa de diseño de control para un sistema de generación eólica aislado completo, en el cual se incluirá el control de un generador sincrónico de imanes permanentes, lo

que permitirá efectuar el control de la dinámica de la barra de corriente continua. Es por esta razón que en este artículo se considera que dicha tensión se mantiene aproximadamente constante.

El desempeño del control propuesto es validado mediante resultados de simulación realizados sobre un modelo realista del sistema en el cual se incluyen las resistencias parásitas de los elementos que componen el convertidor y los efectos de la modulación por ancho de pulso (*Pulse Width Modulation, PWM*).

El trabajo está organizado de la siguiente manera, en la sección 2 se presenta el modelo del FEC, en la sección 3 se diseña la estrategia de control basada en IDA, en la sección 4 se muestran resultados de simulación, y finalmente se dan las conclusiones.

## 2. Modelo del FEC

En esta sección, en primera instancia se presenta el modelo del FEC en coordenadas de Park utilizando la transformación invariante en potencia, y luego este modelo es representado en la forma hamiltoniana controlada por puerto.

Como se puede ver en la figura 2, el FEC está constituido por un VSC construido utilizando transistores ( $S_1 \dots S_6$ ) de tipo IGBT

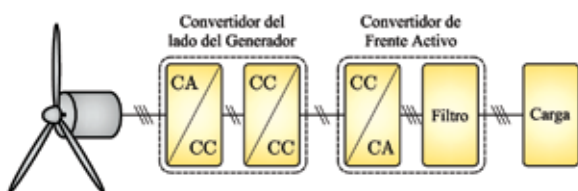


Figura 1. Sistema de generación eólica autónomo

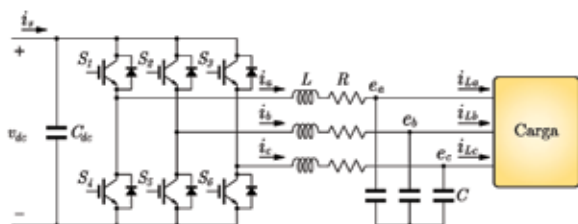


Figura 2. Convertidor de frente activo - FEC

# Nota técnica

(Isolated Gate Bipolar Transistors) más un filtro RLC que conecta el VSC con la carga.

La tensión de la barra de corriente continua,  $v_{dc}$ , es controlada por el convertidor del lado del generador. Por este motivo, desde el punto de vista de la operación del FEC,  $v_{dc}$  se supone aproximadamente constante, presentando variaciones suaves cuando se producen cambios en la potencia de entrada.

## 2.1 Modelo en Coordenadas de Park

El modelo del FEC en coordenadas de Park ( $dq$ ) puede escribirse como

$$L\dot{i}_d = -Ri_d - \omega_{dq}Li_q - e_d + m_d v_{dc}, \quad (1)$$

$$L\dot{i}_q = -Ri_q + \omega_{dq}Li_d - e_q + m_q v_{dc}, \quad (2)$$

$$C\dot{e}_d = i_d - \omega_{dq}Ce_q - i_{Ld}, \quad (3)$$

$$C\dot{e}_q = i_q + \omega_{dq}Ce_d - i_{Lq}. \quad (4)$$

Donde  $\omega_{dq}$  es la frecuencia angular del referencial, la cual coincide con la frecuencia deseada de la tensión de salida;  $i_d$  e  $i_q$  son las corrientes en el referencial seleccionado, obtenidas mediante la transformación de  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ ;  $e_d$  y  $e_q$  son las tensiones sobre el capacitor de filtro de salida, obtenidas mediante la transformación de  $e_a$ ,  $e_b$  y  $e_c$ ;  $i_{Ld}$  e  $i_{Lq}$  son las corrientes de carga, obtenidas de la transformación de  $i_{La}$ ,  $i_{Lb}$  e  $i_{Lc}$ ;  $m_d$  y  $m_q$  son

$$\begin{bmatrix} L\dot{i}_d \\ L\dot{i}_q \\ C\dot{e}_d \\ C\dot{e}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & -\omega_{dq}L & -1 & 0 \\ \omega_{dq}L & -R & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -\omega_{dq}C \\ 0 & 1 & \omega_{dq}C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ e_d \\ e_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{dc} & 0 \\ 0 & v_{dc} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_d \\ m_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -i_{Ld} \\ -i_{Lq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

los índices de modulación y, finalmente,  $L$ ,  $R$  y  $C$  son la inductancia, la resistencia y la capacitancia del filtro, respectivamente.

El sistema formado por las ecuaciones (1) - (4) se puede escribir en forma matricial como se muestra en (5).

Para poder diseñar un control mediante IDA, se debe representar al sistema mediante su modelo hamiltoniano controlado por puerto (*Port-Controlled Hamiltonian, PCH*).

## 2.2 Modelo PCH

El modelo PCH de un sistema dinámico se puede escribir como

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [J(x, u) - R(x)] (\partial H(x)/\partial x) + g(x) \\ u &+ \zeta \end{aligned} \quad (6)$$

donde  $x$  es el vector de estado,  $u$  es el vector de entrada,  $J(x, u)$  es la matriz de interconexión,  $R(x)$  es la matriz de amortiguamiento,  $H(x)$  es la función de energía del sistema,  $g(x)$  es la matriz de entrada, y  $\zeta$  es un vector de perturbaciones externas.

El vector de estado se define como

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [i_d \ i_q \ e_d \ e_q]^T \quad (7)$$

y el vector de entrada es

$$u = [m_d \ m_q]^T \quad (8)$$

Las matrices de interconexión y amortiguamiento se definen a partir de (5) como

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{dq}L & -1 & 0 \\ \omega_{dq}L & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -\omega_{dq}C \\ 0 & 1 & \omega_{dq}C & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

donde  $J$  es antisimétrica y  $R$  es simétrica semidefinida positiva, es decir,

$$J = -J^T \text{ y } R = R^T \geq 0 \quad (11)$$

además, para este sistema, las matrices  $J$  y  $R$  no dependen de los estados ni de las entradas.

La matriz  $g(x)$  está dada por

$$g(x) = \begin{bmatrix} v_{dc} & 0 \\ 0 & v_{dc} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

La función de energía del sistema  $H(x)$  puede obtenerse como la sumatoria de la energía almacenada en los inductores y capacitores del filtro de salida

$$H(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{L} x_1^2 + \frac{1}{L} x_2^2 + \frac{1}{C} x_3^2 + \frac{1}{C} x_4^2 \right) \quad (13)$$

de donde se puede calcular,

$$\partial H(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x} = [i_d \ i_q \ e_d \ e_q]^T \quad (14)$$

Finalmente, el vector de perturbaciones externas  $\zeta$  está dada por

$$\zeta = [0 \ 0 \ -i_{Ld} \ -i_{Lq}]^T \quad (15)$$

donde  $i_{Ld}$  e  $i_{Lq}$  son las corrientes consumidas por la carga.

### 3. Diseño del controlador

La estrategia de control propuesta para el FEC se diseña utilizando IDA. El objetivo de control es obtener una tensión de salida sinusoidal con amplitud y frecuencia constante.

El diseño del controlador consiste en lograr que las variables de estado del sistema (5) sigan la trayectoria definida por el vector de referencia.

$$\mathbf{x}^* = [Li_d^* \ Li_q^* \ Ce_d^* \ Ce_q^*]^T \quad (16)$$

Entonces, se diseña una ley de control de manera tal que la dinámica del sistema a lazo cerrado sea un sistema PCH con la forma

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}_d(\mathbf{x}, \mathbf{u}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})] \frac{\partial H_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (17)$$

donde  $H_d(\mathbf{x})$  es la función de ener-

gía del sistema de lazo cerrado, la cual tiene un mínimo en el punto de equilibrio deseado,

$$\left. \frac{\partial H_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} = \mathbf{0} \quad (18)$$

$\mathbf{J}_d(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  y  $\mathbf{R}_d(\mathbf{x})$  son las matrices de interconexión y amortiguamiento deseadas, las cuales se pueden escribir como

$$\mathbf{J}_d(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{J}_a(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (19)$$

$$\mathbf{R}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{R}(\mathbf{x}) + \mathbf{R}_a(\mathbf{x}) \quad (20)$$

donde  $\mathbf{J}_a(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  y  $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$  son las matrices necesarias para sintetizar la estrategia de control propuesta. Para este caso particular, estas matrices se pueden escribir en forma genérica como

$$\mathbf{J}_a = -\mathbf{J}_a^T = \begin{bmatrix} 0 & j_{12} & j_{13} & j_{14} \\ -j_{12} & 0 & j_{23} & j_{24} \\ -j_{13} & -j_{23} & 0 & j_{34} \\ -j_{14} & -j_{24} & -j_{34} & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{R}_a = \mathbf{R}_a^T = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Para asegurar la convergencia a cero del error ( $\epsilon = \mathbf{x} - \mathbf{x}^*$ ), la función de energía para el sistema de lazo cerrado es elegida como

$$H_d(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} (\epsilon^T \mathbf{P}^{-1} \epsilon) \quad (23)$$

además, se puede calcular su derivada en el tiempo de la siguiente manera

$$\dot{H}_d(\mathbf{x}) = -\epsilon^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{R}_d \mathbf{P}^{-1} \epsilon < 0 \quad (24)$$

donde

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C \end{bmatrix} \quad (25)$$

De (24) se deduce que  $\mathbf{R}_d$  debe ser una matriz definida positiva para asegurar la convergencia a cero del error  $\epsilon$ . Además, los elementos de esta matriz se eligen para lograr la velocidad de convergencia deseada.

Los elementos de la matriz  $\mathbf{J}_a$  se seleccionan para desacoplar las ecuaciones de tensión y corriente para el eje d y el eje q, lo cual influye en la determinación de los elementos de la matriz  $\mathbf{R}_a$  ya que éstos se calculan a partir de las ecuaciones de la dinámica del error.

De lo anterior  $\mathbf{J}_a$  se elige como sigue

$$\mathbf{J}_a = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{dq} L & 0 & 0 \\ -\omega_{dq} L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_{dq} C \\ 0 & 0 & -\omega_{dq} C & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Haciendo uso de (6) y (17) se puede obtener la ecuación diferencial

$$[\mathbf{J} - \mathbf{R}] \partial H_a(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x} = -[\mathbf{J}_a - \mathbf{R}_a] \partial H_d(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \mathbf{u} + \zeta \quad (27)$$

# Nota técnica

donde

$$H_a(x) = H_d(x) - H(x) \quad (28)$$

La solución de (27) da como resultado las leyes de control para  $m_d$  y  $m_q$ ,

$$m_d = [Ri_d^* + \omega_{dq} Li_q - R_1 (i_d - i_d^*) + e_d^*]/v_{dc} \quad (29)$$

$$m_q = [Ri_q^* + \omega_{dq} Li_d - R_2 (i_q - i_q^*) + e_q^*]/v_{dc} \quad (30)$$

y las corrientes de referencia  $i_d^*$  e  $i_q^*$  resultan

$$i_d^* = -R_3 (e_d - e_d^*) + \omega_{dq} C e_q + i_{Ld} \quad (31)$$

$$i_q^* = -R_4 (e_q - e_q^*) + \omega_{dq} C v_d + i_{Lq} \quad (32)$$

Así las ecuaciones para la dinámica del error quedan

$$\dot{\epsilon}_{id} = -\frac{(R + R_1)}{L} \epsilon_{id} - \frac{1}{C} \epsilon_{ed} \quad (33)$$

$$\dot{\epsilon}_{iq} = -\frac{(R + R_2)}{L} \epsilon_{iq} - \frac{1}{C} \epsilon_{eq} \quad (34)$$

$$\dot{\epsilon}_{ed} = \frac{1}{L} \epsilon_{id} - \frac{R_3}{C} \epsilon_{ed} \quad (35)$$

$$\dot{\epsilon}_{eq} = \frac{1}{L} \epsilon_{iq} - \frac{R_4}{C} \epsilon_{eq} \quad (36)$$

A partir de (33) - (36) se pueden calcular los elementos de  $R_a$  que permiten lograr la velocidad de convergencia deseada.

Los elementos del vector de referencia  $x^*$  se eligen de acuerdo

a los objetivos de control del sistema. En este trabajo se eligió  $e_d^* = \text{cte.}$  y  $e_q^* = 0$ , lo que permite controlar la amplitud de la tensión de salida; mientras que  $\omega_{dq}$  se elige en función de la frecuencia deseada de la tensión de salida.

En la figura 3 se muestra un diagrama en bloques de la estrategia de control implementada.

## 4. Resultados de simulación

Con el objetivo de evaluar el desempeño del FEC bajo distintas condiciones de trabajo se realizaron simulaciones utilizando SimPoweSystem de Matlab™.

La tensión de la barra de corriente continua,  $v_{dc}$ , se considera constante en los ensayos realizados, ya que como se mencionó en la sección 2, esta tensión se supone controlada por un convertidor

CC - CC que forma parte del convertidor que controla al generador en el sistema completo.

El objetivo de control del FEC, para esta aplicación, es asegurar que la tensión aplicada a la carga tenga amplitud y frecuencia constante, por lo tanto, se ensayó el sistema frente a cambios de carga con el objetivo de evaluar el cumplimiento de dicho objetivo.

Inicialmente el FEC tiene acoplada una carga resistiva pura  $R_L = 3,5 \Omega$  y en un tiempo  $t = 50 \text{ ms}$  se conecta en serie otra resistencia del mismo valor. En la figura 4 (a) se muestra la componente del eje d de la tensión sobre el capacitor de salida,  $e_d$ , (línea continua) junto a su referencia (línea de trazos), en la figura 4 (b) se muestra la componente del eje q de la tensión sobre el capacitor de salida,  $e_q$ , (línea continua) junto a su re-

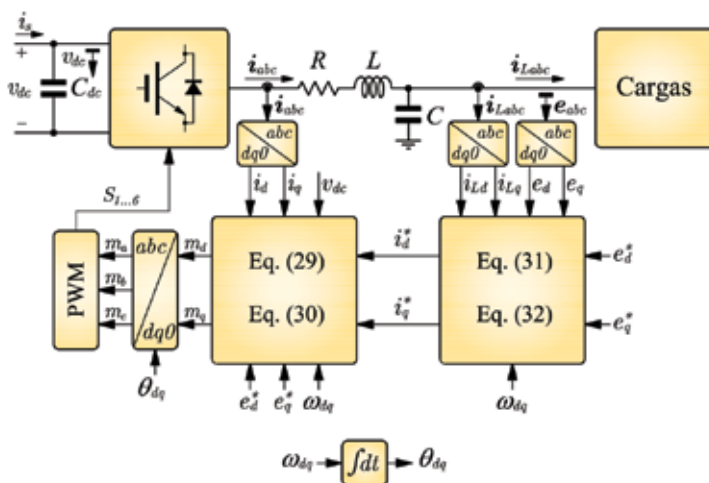


Figura 3. Estrategia de control

ferencia (línea de trazos), en la figura 4 (c) se muestran las corrientes  $i_d$  e  $i_q$  junto a sus referencias y en la figura 4 (d) se muestra la tensión sobre el capacitor de salida y la corriente de carga para la fase a de salida del FEC.

Como se puede observar en la figura 4 (a) y (b) las tensiones sobre el capacitor del filtro de salida  $e_d$  y  $e_q$  se mantienen en su valor de referencia hasta el momento del cambio de carga, en este instante  $e_d$  tiende a crecer mientras que  $e_q$  disminuye. La estrategia de control establece, entonces, el nuevo

valor para la corriente de salida requerida por la carga, como se observa en la figura 4 (c), y de esta manera  $e_d$  y  $e_q$  retornan al valor de referencia en un tiempo de aproximadamente 10 ms.

En la figura 4 (d) se muestra la tensión sobre el capacitor del filtro y la corriente de carga para la fase a del sistema, donde se observa la reducción en la amplitud de la corriente en  $t = 50$  ms debido al cambio de carga. Se puede observar, además, que la tensión y la corriente se mantienen en fase ya

que la carga es resistiva pura y que la forma de onda de la tensión y la corriente son sinusoidales, libres de armónicos y distorsiones significativas.

Como segundo ensayo se conectó en bornes del filtro de salida del FEC, una carga de tipo  $R_L$ . El sistema tiene acoplada la misma carga resistiva  $R_L = 3,5 \Omega$  y a los 50 ms se conecta en serie una inductancia  $L_L = 10$  mH.

En la figura 5 (a) se muestra la componente del eje d de la tensión sobre el capacitor de salida,  $e_d$ , (línea continua) junto a su referencia (línea de trazos), en la figura 5 (b) se muestra la componente del eje q de la tensión sobre el capacitor de salida,  $e_q$ , (línea continua) junto a su referencia (línea de trazos), en la figura 5 (c) se muestran las corrientes  $i_d$  e  $i_q$ , y en la figura 5 (d) se muestra la tensión sobre el capacitor del filtro y la corriente de carga para la fase a.

Como se observa de la figura 5 (a) y (b) las tensiones sobre el capacitor del filtro de salida  $e_d$  y  $e_q$  se mantienen en su valor de referencia hasta el momento en que se conecta la inductancia, en ese momento,  $e_d$  y  $e_q$  presentan una oscilación transitoria hasta que el sistema de control establece las corrientes de carga necesarias para que las tensiones de salida

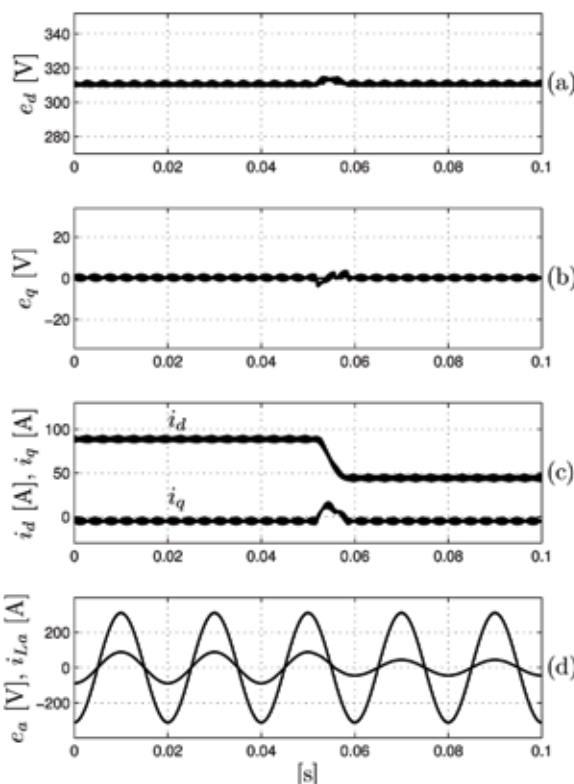


Figura 4. Cambio de carga resistiva. a) Tensión  $e_d$ , b) tensión  $e_q$ , c) corrientes  $i_d$  e  $i_q$ , d) tensión  $e_a$  y corriente  $i_{La}$

## Nota técnica

retornen a sus valores de referencia en un tiempo aproximado de 15 ms.

Finalmente, en la figura 5 (c) se muestra la tensión sobre el capacitor del filtro y la corriente de carga para la fase a del sistema, donde se observa el cambio de fase en la corriente debido a la inclusión de una carga inductiva. Se puede observar, además, que la tensión y la corriente entregadas por el FEC son sinusoidales, libre de armónicos y distorsiones significativas.

### 5. Conclusiones

En este trabajo se diseñó un

control para un FEC utilizando en un sistema de generación eólica aislado. El objetivo de control consistió en mantener la tensión de salida con amplitud y frecuencia constante independientemente de la carga alimentada.

Se realizaron simulaciones sobre un modelo realista del convertidor para dos situaciones de cambio de carga, inicialmente se probó el desempeño del sistema con carga resistiva introduciendo en un determinado instante de tiempo un cambio en el valor de dicha resistencia y luego, se consi-

deró un cambio de carga de resistiva a resistiva inductiva.

De los ensayos realizados se pudo observar que el sistema cumple con el objetivo de control propuesto, manteniendo la amplitud y frecuencia de la tensión de salida constante incluso frente a los cambios de carga realizados.

Se mostró, además, que la estabilidad del sistema a lazo cerrado puede ser asegurada mediante la elección de la función de energía deseada para el sistema, lo cual implica la elección adecuada de las matrices de interconexión y amortiguamiento necesarias para sintetizar la estrategia de control.

Finalmente, se pudo observar de los ensayos realizados que la forma de onda de la tensión y corriente de salida es sinusoidal, libre de armónicos y distorsiones significativas.

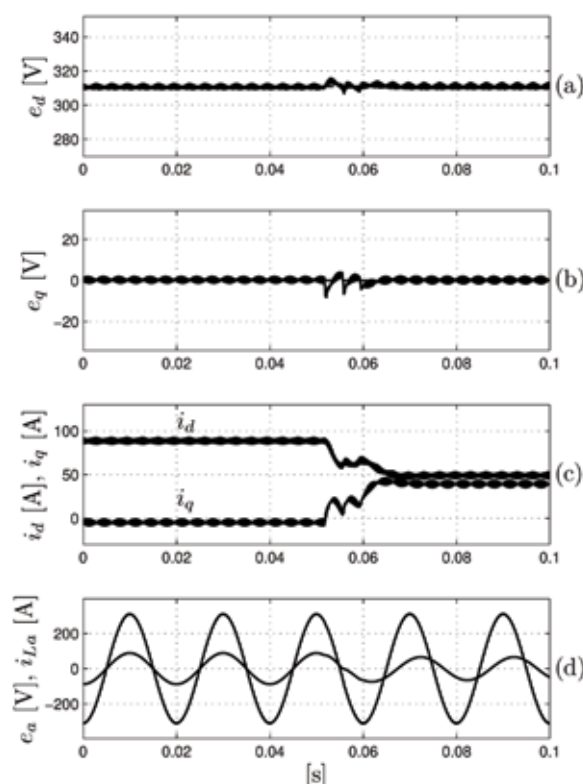


Figura 5. Cambio de carga de resistiva a resistiva inductiva. (a) Tensión  $e_d$ , (b) tensión  $e_q$ , (c) corrientes  $i_d$  e  $i_q$ , (d) tensión  $e_a$  y corriente  $i_{La}$

### Bibliografía

Por norma editorial, no se publican las referencias bibliográficas que dan sustento a este trabajo. Por consultas de esta índole o demás cuestiones referidas al tema tratado, contactar a Federico Serra, [fserra@ieee.org](mailto:fserra@ieee.org)