

Diseño de un Convertidor CD-CD y su Control para un Sistema de Generación Eólico Conectado a una Carga Aislada

Design of DC-DC Converter and its Control for a Wind Generation System Connected to an Isolated Load

Carlos A. Ramírez-Gómez¹
Andrés J. Saavedra-Montes²
Carlos A. Ramos-Paja³

1 Departamento de Energía Eléctrica y Automática,
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia,
Medellín-Colombia
caramireg@unal.edu.co

2 Departamento de Energía Eléctrica y Automática,
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia,
Medellín-Colombia
ajsaaved@unal.edu.co

3 Departamento de Energía Eléctrica y Automática,
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia,
Medellín-Colombia
caramosp@unal.edu.co

Resumen

En este artículo se presenta un método para diseñar un convertidor cd-cd y su control, el cual está asociado a un sistema de generación eólico que alimenta una carga aislada. Para diseñar el convertidor se deduce un equivalente Thevenin que representa el comportamiento de la turbina, el generador sincrónico de imanes permanentes y el rectificador. El diseño de los elementos del convertidor garantiza rizados de los voltajes de entrada y salida, y de la corriente del inductor que no superan el 5 %. El control del voltaje de salida se realiza con un controlador proporcional-integral-derivativo y como criterios de ajuste se seleccionan un amortiguamiento de 0,707 y una frecuencia de corte de $1/5$ la frecuencia de conmutación del convertidor. El controlador diseñado regula el voltaje de salida frente a perturbaciones de la carga y cambios en la velocidad del viento.

Palabras clave

Convertidor Buck; control de tensión; generación eólica; controlador PID.

Abstract

A method to design a Buck converter and its control, which are associated to a wind generation system that is feeding an isolated load, is presented in this paper. To design the converter a Thevenin equivalent is deduced, which represents the behavior of the wind turbine, the permanent magnet synchronous generator, and the rectifier. The design of the converter elements guarantees input/output voltages and inductor current ripples of 5 % or less. The output voltage control is developed with a proportional-integral-derivative controller and as design criteria a damping of 0,707 and cutoff frequency of $1/5$ converter commutation frequency are selected. The designed controller regulates the output voltage faced load perturbations and wind speed variations.

Keywords

Buck converter; voltage control; wind generation; PID controller.

1. INTRODUCCIÓN

En los sistemas de generación eólica de baja potencia, el convertidor cd-cd es utilizado para controlar el voltaje de salida y reducir el contenido armónico hacia la fuente y la carga (Baroudi, 2007). El control del voltaje de salida del convertidor se realiza a través del ciclo de trabajo del mismo y la reducción de armónicos se realiza diseñando los elementos del convertidor tal que se garanticen niveles de rizado inferiores al 5%.

En (Hua & Cheng, 2010), (Morales, 2009), (López Miguel, 2009), (Chiniforoosh, 2008), se presenta el uso del convertidor Boost, además en todos los casos se alimenta una carga aislada de la red eléctrica. En los anteriores trabajos la variable a controlar es la potencia eléctrica o el voltaje de salida. La selección del convertidor Boost en los trabajos anteriores está motivada por la capacidad de elevación de voltaje del convertidor. Sin embargo el control del voltaje de salida no se puede realizar de forma directa ya que su función de transferencia es de fase no mínima, por lo tanto es necesario controlar la corriente del inductor y posteriormente controlar el voltaje de salida del convertidor.

En (Goto, 2009) y (Tafticht, 2006) el convertidor utilizado es el Buck-Boost y en ambos casos una carga aislada de corriente directa es alimentada. El convertidor Buck también es utilizado en sistemas de generación eólica de baja potencia que alimentan cargas aisladas. Una ventaja del convertidor Buck sobre el convertidor Boost es que en el primero el voltaje de salida puede ser controlado con un solo lazo de control. En (Sinha, 2009), (López Miguel, 2009), (Sinha, 2008) y (Eren, 2006) se reporta el uso de un convertidor Buck para alimentar cargas aisladas y regular su voltaje de salida.

En ninguno de los artículos revisados se reporta la selección de un equivalente de fuente para facilitar el diseño del controlador, por lo tanto es necesario seleccionar un modelo equivalente que represente el comportamiento de la turbina eólica, el generador y el rectificador. En (Sinha 2008) se reporta que el nivel de rizado para el voltaje de salida, entrada y la corriente en el inductor no debe superar el 5%. En generación eólica de baja potencia es necesario un método de diseño del convertidor que garantice rizados

menores al 5% en el rango de variación de la velocidad del viento de un lugar específico.

En este artículo se propone un equivalente Thevenin para representar la fuente y facilitar el diseño del convertidor y de su control. Además se diseña un convertidor Buck tal que el rizado que afecta a la fuente y a la carga sea menor al 5% en un amplio rango de velocidades de viento. Con esto se reduce el contenido armónico en la fuente y en la carga. El voltaje de salida del convertidor se controla con una estrategia Proporcional-Integral-Derivativa (PID), que se sintoniza con un amortiguamiento de 0.707 y una frecuencia de corte de 1/5 de la frecuencia de conmutación. Para la evaluación del convertidor y su control se programa en el software PSIM un sistema de generación eólico conformado por una turbina eólica, un generador sincrónico de imanes permanentes, un rectificador trifásico, el convertidor con su control y una carga cd. El sistema se somete a perturbaciones en la velocidad del viento y en la carga, también frente a cambios en la señal de referencia y finalmente se somete a un perfil de viento real.

El artículo está organizado como sigue: En la Sección 2 se propone un modelo reducido para representar la fuente del sistema. En la Sección 3 se presenta el diseño del convertidor de cd-cd y en la Sección 4 se presenta el diseño del control del convertidor. Resultados de simulación que validan el diseño del convertidor y su control se presentan en la Sección 5. Finalmente se presentan las conclusiones, los agradecimientos y las referencias.

2. MODELO REDUCIDO DE LA TURBINA, EL GENERADOR Y EL RECTIFICADOR

Para diseñar el convertidor Buck es necesario seleccionar un modelo reducido, el cual facilita el cálculo del condensador de entrada, el condensador de salida y el inductor. Los tres modelos reducidos que se analizan para representar la turbina, el generador de imanes permanentes y el rectificador son: un modelo de resistencia diferencial, un equivalente Northon y un equivalente Thevenin. Estos modelos se muestran en la Fig. 1 y son representados por (1)-(3). En donde V_g e I_g son la corriente y el voltaje del

aerogenerador, V_{op} es el voltaje de circuito abierto e I_{cc} es la corriente de corto circuito.

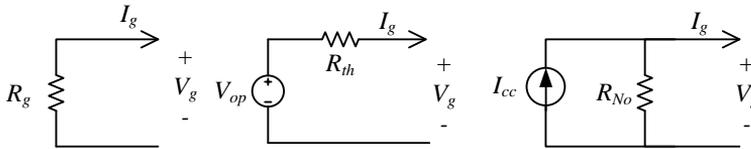


Fig. 1. Equivalentes de fuente. Fuente: Autores

$$R_g = V_g / I_g \tag{1}$$

$$R_{th} = (V_{op} - V_g) / I_g \tag{2}$$

$$R_{No} = V_g / (I_{cc} - I_g) \tag{3}$$

El primer paso para evaluar los equivalentes es ver el comportamiento del sistema de eólico, para esto se construyeron las curvas características potencia-corriente y voltaje-corriente que se presentan en la Fig. 2. Cada característica está trazada para una velocidad de viento, en la Fig. 2 se presentan las curvas para las velocidades de 5, 5.5 y 6 m/s. En la figura se resalta el punto de máxima potencia (Maximun Power Point MPP) para la curva de 5 m/s, el cual tiene asociados una corriente y un voltaje de máxima potencia (I_{MPP} , V_{MPP}). De cada curva se pueden obtener el voltaje de circuito abierto y la corriente de cortocircuito V_{op} e I_{cc} .

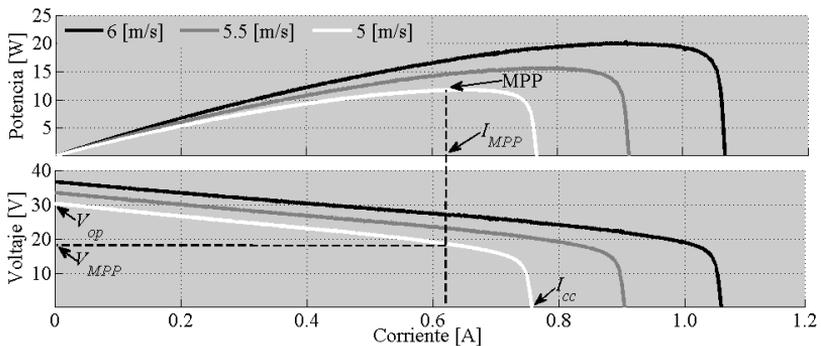


Fig. 2. Curvas de carga del sistema de generación eólico. Fuente: Autores

Con los datos obtenidos de voltaje de circuito abierto, corriente de cortocircuito, voltaje de máxima potencia y corriente de máxima potencia, se calculan los parámetros de los equivalentes para el punto de máxima potencia. Utilizando los equivalentes se construyen las curvas características y se comparan con la curva característica del sistema. Los resultados de la comparación se muestran en la Fig. 3, en la cual se observa que los tres equivalentes representan al sistema en el punto de máxima potencia, pero el equivalente Thevenin describe el comportamiento del sistema de generación eólico para un mayor rango de corriente de carga. El equivalente Thevenin se selecciona para diseñar el convertidor Buck y el control del mismo.

3 DISEÑO DEL CONVERTIDOR BUCK

El convertidor Buck se caracteriza porque el voltaje de salida siempre es menor que el voltaje de entrada y la relación entre ambos voltajes está dado por el ciclo de trabajo del convertidor. El circuito del convertidor está dado en la Fig. 4, donde se muestra el convertidor en conjunto con el equivalente Thevenin de la fuente.

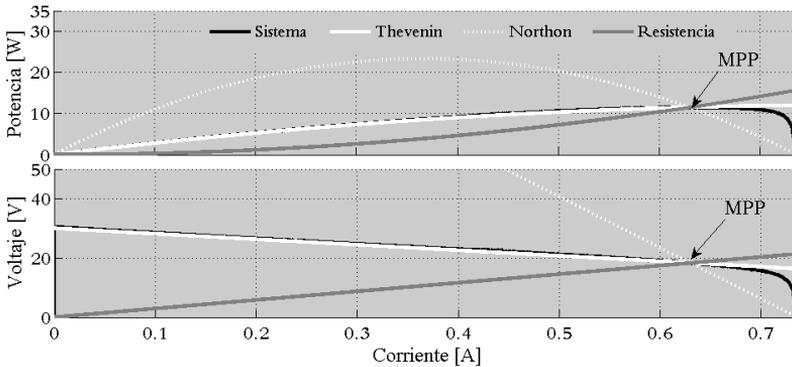


Fig. 3. Comparación de las curvas características generadas con los equivalentes de fuente y el sistema para una $v = 4$ [m/s]. Fuente: Autores

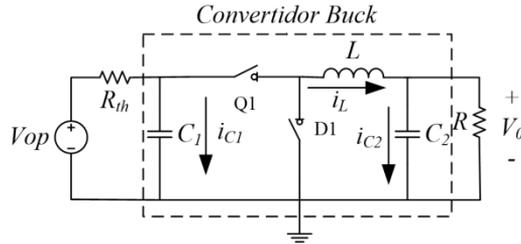


Fig. 4. Circuito del equivalente Thevenin, convertidor Buck y carga resistiva.
Fuente: Autores

Las ecuaciones (4)-(6) representan el convertidor Buck en conjunto con el equivalente Thevenin, el cual representa el sistema de generación eólico y una carga resistiva:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (v_{C1} \cdot d - v_{C2}) \tag{4}$$

$$\frac{dv_{C1}}{dt} = \frac{1}{C_1} \cdot \left(\frac{v_{op} - v_{C2}}{R_{th}} - i_L \cdot d \right) \tag{5}$$

$$\frac{dv_{C2}}{dt} = \frac{1}{C_2} \cdot \left(i_L - \frac{v_{C2}}{R} \right) \tag{6}$$

En donde i_L es la corriente en el inductor, v_{C1} y v_{C2} son los voltajes el capacitor de entrada y de salida respectivamente, d es el ciclo de trabajo, L , C_1 , C_2 son el inductor, y los capacitores de entrada y de salida respectivamente.

Los rizados en el convertidor están determinados por el ciclo de trabajo, la frecuencia de conmutación, el valor del inductor y los condensadores. En (7)-(9) se presentan las ecuaciones de estado estacionario para el cálculo de los rizados del convertidor Buck:

$$\Delta i_L = (V_{C1}/L) \cdot D \cdot D' \cdot T_s \tag{7}$$

$$\Delta v_{C1} = (V_{cd} - V_{C1}/C_1 \cdot R_{th}) \cdot D \cdot D' \cdot T_s \tag{8}$$

$$\Delta v_{C2} = (V_{C1}/8 \cdot L \cdot C_2) \cdot D \cdot D' \cdot T_s^2 \tag{9}$$

En donde D es el ciclo de trabajo, D' es el ciclo de trabajo complementario y T_s es el inverso de la frecuencia de conmutación del

convertidor. Para el cálculo de los elementos del circuito se debe cumplir que la magnitud de los rizados no sea superior al 5% (Sinha 2008), para cualquier punto de operación del sistema de generación eólico. Para garantizar este nivel de rizado se calcularon los parámetros del equivalente Thevenin para el rango de velocidad de viento en el cual funciona el sistema generación eólica 3-12 m/s. Para velocidades entre 3-12 m/s, cada 1 m/s, se calcularon los valores de L y C_1 y C_2 que corresponden al punto de máxima potencia y que además garantizan rizados de corriente y de voltaje iguales o menores al 5%, ver Fig. 5. La frecuencia de conmutación se seleccionó igual a 50 kHz.

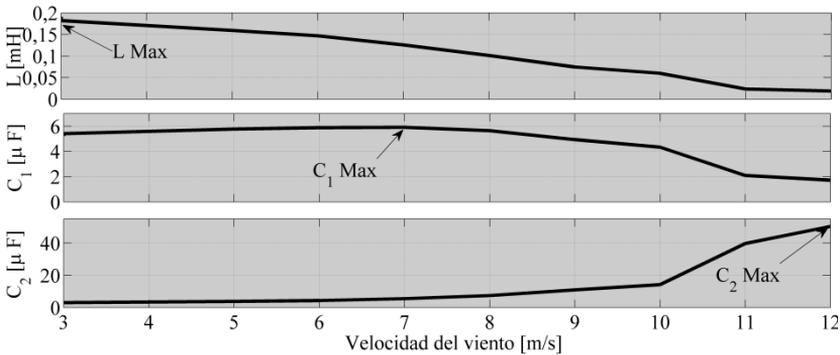


Fig. 5. Valor de los capacitores y del inductor. Fuente: Autores

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR

Para diseñar el control se adicionó, al sistema presentado en la Fig. 4, una fuente de corriente i_o en paralelo con la carga para modelar perturbaciones en la misma. Para el control de voltaje de salida del convertidor Buck, se debe obtener la función de transferencia entre el voltaje de salida y el ciclo de trabajo. El primer paso consiste en expresar el sistema (4)-(6) en forma matricial tal y como se muestra en (10) y (11). En donde x es el vector de los estados del convertidor I_L , V_{C1} y V_{C2} ; u es el vector de las entradas del sistema V_{op} , D e i_o ; y el voltaje de salida del sistema V_o . Al

resolver el sistema de ecuaciones se obtiene la función de transferencia que se presenta en (12):

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{D}{L} & -\frac{1}{L} \\ -\frac{D}{C_1} & -\frac{1}{R_{th} \cdot C_1} & 0 \\ \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{1}{R_c \cdot C_2} \end{bmatrix} \cdot x + \begin{bmatrix} \frac{V_{C1}}{L} & 0 & 0 \\ -\frac{D}{C_1} & -\frac{1}{R_{th} \cdot C_1} & 0 \\ \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{1}{R_c \cdot C_2} \end{bmatrix} \cdot u \quad (10)$$

$$y = [0 \ 0 \ 1] \cdot x \quad (11)$$

$$GV_c/D = \frac{(s^2 \cdot L \cdot R_{th} \cdot C_1 + (V_{C1} \cdot R_{th} \cdot C_1 + L) \cdot s + V_{C1})}{L \cdot C_2 \cdot R_{th} \cdot C_1} \cdot \frac{1}{s^3 + \frac{(R_c \cdot C_2 + C_1 \cdot R_{th})}{R_c \cdot C_2 \cdot R_{th} \cdot C_1} \cdot s^2 + \frac{(C_1 \cdot R_c \cdot R_{th} + R_c \cdot C_2 \cdot D^2 \cdot R_{th} + L)}{L \cdot R_c \cdot C_2 \cdot R_{th} \cdot C_1} \cdot s + \frac{R_c + D^2 \cdot R_{th}}{L \cdot R_c \cdot C_2 \cdot R_{th} \cdot C_1}} \quad (12)$$

La función de transferencia presentada en (12), se evaluó en un punto de operación correspondiente a una velocidad de viento de 4.5 m/s. Para calcular los parámetros de (12) es necesario contar con las características de potencia-corriente y voltaje-corriente correspondiente a 4.5 m/s. R_{th} se calcula con (2) y $V_{op} = 27.17V$, $V_{MPP} = 16.3505V$ e $I_{MPP} = 0.52034A$. Los valores de C_2 y L se toman como los valores máximos en la Fig. 5 para mantener los rizados menores al 5%. El valor de C_1 se seleccionó 1666 veces mayor al valor máximo presentado en la Fig. 5, esto para reducir el rizado producido por el rectificador. Esta es una práctica común en el diseño de convertidores Buck. El voltaje de salida de los sistemas de generación eólicos que alimentan cargas aisladas corresponden típicamente a 12V, 24V y 48V, en este caso se considera $V_o = 12V$, al le cual corresponde a un valor del ciclo de trabajo. En la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros contenidos en (12) correspondientes a 4.5 m/s. Evaluados los parámetros de la Tabla 1 en (12) se obtiene (13):

$$GV_o/D = \frac{1.987 \cdot 10^4 \cdot s^2 + 1.59 \cdot 10^9 \cdot s + 7.507 \cdot 10^9}{s^3 + 1991 \cdot s^2 + 1.043 \cdot 10^8 \cdot s + 8.746 \cdot 10^8} \quad (13)$$

Tabla 1. Parámetros del convertidor. Fuente: Autores

| Parámetro | Valor | Unidades |
|---------------------------|---------|----------|
| Resistencia Thevenin | 20,7922 | Ω |
| Resistencia de carga | 10 | Ω |
| Condensador de entrada | 10 | mF |
| Condensador de salida | 50,339 | μ F |
| Inductancia | 0,1908 | mH |
| Frecuencia de conmutación | 50 | kHz |
| Ciclo de trabajo | 0,3 | - |

Con la función de transferencia (13), se diseña un control PID. Se utilizó la herramienta Sisotool de Matlab. Los criterios de diseño fueron un amortiguamiento de 0.707 y una frecuencia de corte del sistema de lazo cerrado de 1/5 de la frecuencia de conmutación del convertidor, que es 50 kHz. Los parámetros del controlador son $K_p = 10.4726$, $T_i = 1.5227e-5$ y $T_d = 4.841e-4$. En la Fig. 6 se presenta el diagrama de bode en lazo cerrado con el control PID. En la figura se destaca la frecuencia de corte igual a 10kHz.

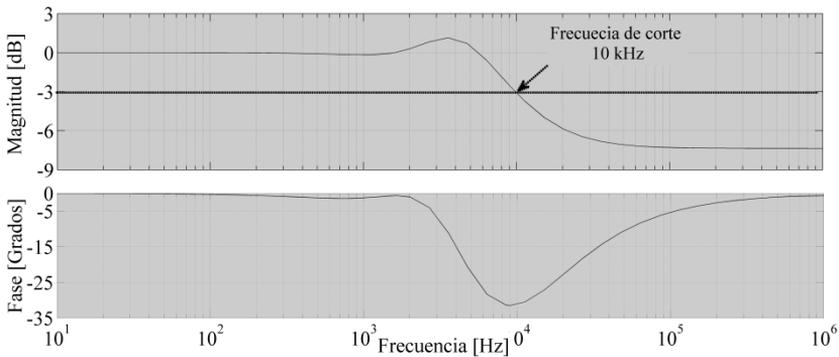


Fig. 6. Diagrama de bode de lazo cerrado con un control PID. Fuente: Autores

5. EVALUACIÓN DEL CONVERTIDOR BUCK Y SU CONTROL

Para evaluar el convertidor y el control se programó el sistema de generación eólico en el software PSIM, el sistema se sometió a tres escenarios: rechazo de perturbaciones en la velocidad del viento y la carga, seguimiento de la señal de referencia y compor-

tamiento frente a un perfil de viento real. El primer escenario se presenta en la Fig. 7, en la cual se compara el voltaje de salida del convertidor sin y con control frente a perturbaciones de la velocidad del viento y la corriente de carga.

El seguimiento de la referencia se presenta en la Fig. 8, en este caso la referencia se ajusta para producir un cambio en el voltaje de salida del 5% del valor estacionario. En la Fig. 8 se observa un sobre impulso de 0.065 V y un tiempo de establecimiento de 4e-4 s. Para confirmar la capacidad del convertidor de regular la tensión entregada a la carga, en la Fig. 9 se presenta la respuesta del sistema frente a un perfil de viento real. En la figura se observan los cambios de la velocidad del viento y la acción sobre el ciclo de trabajo para mantener el voltaje de salida en un valor de referencia.

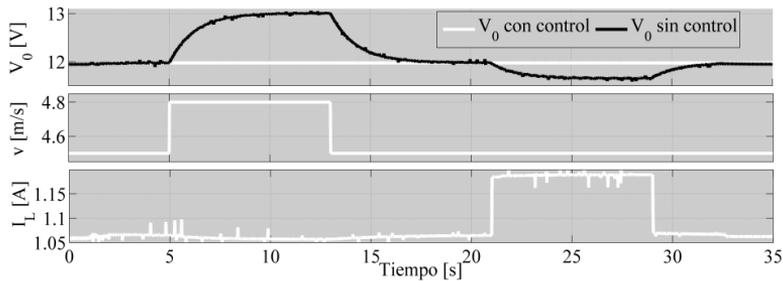


Fig. 7. Sistema sin y con control ante perturbaciones de viento y carga.

Fuente: Autores

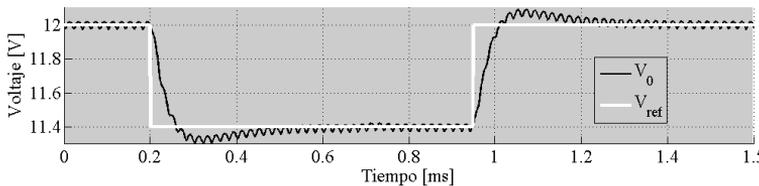


Fig. 8. Comportamiento del sistema ante un cambio en la referencia.

Fuente: Autores

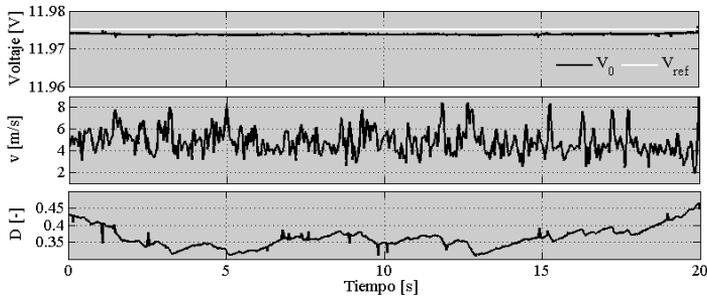


Fig. 9. Comportamiento del sistema ante un perfil de viento real. Fuente: Autores

6. CONCLUSIONES

El diseño de un convertidor Buck y su control de voltaje de salida se presentaron en este artículo. El convertidor está asociado a un sistema de generación eólico de baja potencia que alimenta una carga aislada. Para diseñar el convertidor se analizaron tres modelos reducidos que representan la turbina eólica, el generador sincrónico y el rectificador. Del análisis se evidenció que el equivalente Thevenin es una representación suficiente del sistema de generación. El diseño del convertidor garantiza que los rizados de voltaje en los capacitores y en la corriente en el inductor no superen el 5%. El diseño del controlador se realizó para un amortiguamiento de 0.707 y una frecuencia de corte de lazo cerrado de $1/5$ la frecuencia de conmutación.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al programa de jóvenes investigadores 525-2011 y a la beca doctoral 095-2005 de COLCIENCIAS. Este trabajo ha sido soportado por la Universidad Nacional de Colombia bajo los proyectos IDEN-EXGEN y SMART-ALEN.

8. REFERENCIAS

- Baroudi, J. A., Ā, V. D. & Knight, A. M. (2007). A review of power converter topologies for wind generators. *Renewa Energy*, 32, 2369-2385.
- Chiniforoosh, S., Alaeinovin, P., Davoudi, A., Jatskevich, J. & Chapman, P. L. (2008). Dynamic modeling of stand-alone micro-wind turbine generator systems for telecommunicati on power supply. In *IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*,(pp. 1-6).
- Eren, S., Hui, J. C. Y., To, D. & Yazdani, D. (2006). A high performance wind-electric battery charging system. In *2006 Canandian Conference in Electrical and Computer Engineering (CCECE)*,(pp. 2275-2277).
- Goto, H., Guo, H.-J. & Ichinokura, O. (2009). A micro wind power generation system using permanent magnet reluctance generator. In *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*,(pp. 1-8).
- Hua, A. C. C. & Cheng, B. C. H. (2010). Design and implementation of power converters for wind energy conversion system. In *2010 International on Power Electronics Conference (IPEC)*,(pp. 323-328).
- López Miguel, V. J.-C. (2009). Stand-alone wind energy conversion system with maximum power transfer control. *Ingeniarse, Revista chilena de ingenieria*, 17, 328-336.
- Morales, R., Ordoñez, R., Morales, M. A. & Flores, V. (2009). Control system design and simulation of an AC / DC - DC / DC - DC / AC power converter for a permanent magnet wind power generator in rural power generation. In *2009 International Conference on Electrical, Communications, and Computers (CONIELECOMP)*,(pp. 79-83).
- Sinha, A., Kumar, D., Samuel, P. & Gupta, R. (2008). A two-stage converter based controller for a stand alone wind energy system used for remote applications. In *IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*,(pp. 1-5).
- Sinha, A., Kumar, D., Samuel, P. & Gupta, R. (2009). Performance analysis of converter based variable speed wind energy conversion system. In *2009 International Conference on Power Systems (ICPS)*,(pp. 1-6).
- Tafticht, T., Agbossou, K. & Cheriti, A. (2006). DC bus control of variable speed wind turbine using a buck-boost converter. In *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*,(pp. 1-5)..