

Control de Flujos de Potencia en Sistemas de Generación Eólicos Basado en Pasividad

Irvin López García, Gerardo R. Espinosa Pérez y Victor M. Cárdenas Galindo

Resumen—El objetivo de este trabajo es el de evaluar numéricamente el desempeño de un controlador recientemente desarrollado para generadores de inducción de rotor devanado en aplicaciones relacionadas con la generación de energía eléctrica por medio de una Turbina Eólica. El control evaluado ha sido desarrollado bajo la técnica conocida como control basado en pasividad bajo la suposición de que el par mecánico entregado a la máquina es constante. En el caso del estudio abordado, se considera que este par es generado por una Turbina Eólica y se evalúa la operación del sistema cuando el generador se conecta a una Red Eléctrica y se busca controlar el flujo de potencias. La contribución principal del trabajo es ilustrar como aun bajo estas condiciones de operación, el controlador evaluado es capaz de alcanzar el objetivo de control de una manera notable.

Palabras claves: Sistema de Generación Eólico, Pasividad, Generador de Inducción de Rotor Devanado, Turbina Eólica y Coeficiente de Potencia Mecánica.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la búsqueda de nuevas maneras de generar la energía eléctrica es apremiante, tanto para el medio ambiente, como para la economía de cualquier país. Las maneras convencionales para generar esta energía (hidroeléctricas, termoeléctricas, núcleo eléctricas) están siendo constantemente evaluadas por los impactos negativos que están teniendo en el medio ambiente y por el hecho de que la energía primaria utilizada (petróleo, gas) es más cara y su disponibilidad será escasa en el futuro.

De acuerdo con lo encontrado por la International Energy Agency's, publicado en junio de 2006 por el Global Wind Energy Council y el Renewable Energy Systems Limited, la producción global de petróleo tiene como pronóstico alcanzar su máximo en el año 2014 y la producción del gas en el año 2030, por lo que después de estos años, los precios de estos combustibles se dispararán de forma agresiva, encareciendo así la generación convencional de la energía eléctrica [1]. Por ello se espera que haya un déficit mundial en la generación de la energía eléctrica que deberá ser solventada de una u otra manera.

Irvin López García es estudiante doctoral de la UNAM, A.P. 70-256, 04510 México D.F., MEXICO. irvinlopez@yahoo.com. También es Profesor en la UAM-Azcapotzalco, A.P. 02200, México D.F. MEXICO G. Espinosa-Pérez labora en DEEFI – UNAM, A.P. 70-256, 04510 México D.F., MEXICO. gerardoe@unam.mx

V. Cárdenas labora en CIEPFI – UASLP, A.P. 62490, San Luis Potosí. vcardenas@uaslp.mx

Los Sistemas de Generación Eólicos (SGE), diseñados a partir de un Generador de Inducción de Rotor Devanado (GIRD) están siendo usados a gran escala para generar energía eléctrica [2]. El hecho del crecimiento que están teniendo estos sistemas y de que pueden operar en rangos amplios de potencia activa y reactiva, abre un área de investigación importante en el diseño de nuevas estrategias de control para cuando se interconecten con la Red Eléctrica (RE) [3], [4].

En aplicaciones industriales, el control vectorial (campo orientado) es ampliamente utilizado en el control de las máquinas de inducción [5]. La mayoría de estos controladores, se basan en la combinación de cancelaciones y esquemas lineales con acciones proporcional e integral, sintonizados alrededor de un punto de equilibrio [6] - [10]. El problema con estos controladores es que resultan ser complejos y son sensibles a variaciones paramétricas, resultando con ello problemas de altas ganancias [11], [12].

En el control de potencia activa y reactiva de los SGE, el trabajo [13] es una de las referencias importantes. En este trabajo se presenta el diseño del controlador basado en la orientación del voltaje del estator, donde el objetivo es controlar la potencia activa y reactiva cuando el SGE está interconectado con la RE. El problema de control es formulado en términos de la regulación de corrientes en el estator del GIRD y probado por simulación y experimentalmente. El problema es que se considera que la Turbina Eólica está entregando un par mecánico constante, situación criticable, si se toma en cuenta que los SGE trabajan a par mecánico variante en el tiempo, por la condición fluctuante del viento [14], [15].

Como alternativa al control vectorial, se tienen los controladores por control directo de potencia [16], [17]. En el área de controladores no lineales, las técnicas más usadas son las de modos deslizantes, linealización por retroalimentación y pasividad. Este último resulta una alternativa adecuada por la simplicidad de sus controladores y porque se ha mostrado que es posible alcanzar altos rendimientos bajo este enfoque [15], [18]-[22].

El propósito de este trabajo es mostrar el desempeño de un controlador basado en pasividad reportado en [22] para el control de flujos de potencia entre un SGE y la RE, para una condición de par mecánico variante en el tiempo. Para alcanzar el objetivo de este trabajo se considera que el SGE está representada por el modelo del GIRD y se idealiza la dinámica de los diferentes subsistemas que lo conforman [14], [23]. La dinámica de la Turbina Eólica se incluye con un modelo teórico ampliamente utilizada y reportada en

literaturas especializadas [14], [23]-[26]. La RE es modelada por un BI operando en condiciones de estado estable, a un FP dado [27].

El resto del trabajo está organizado de la siguiente manera: en el apartado II se presenta el SGE, en III se presenta el modelo de la Turbina Eólica, en IV el problema de control que se plantea, junto con el modelo del GIRD y el controlador IDA-PBC. En el apartado V se presentan los resultados y por último, en el apartado en VI las conclusiones.

II. SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO

Desde una perspectiva de sistemas, el SGE está conformado por diferentes subsistemas que necesitarán ser controlados u operar en condiciones estables. En la Figura 1 se muestra esquemáticamente al SGE, donde se señalan los diferentes subsistemas que lo conforman.

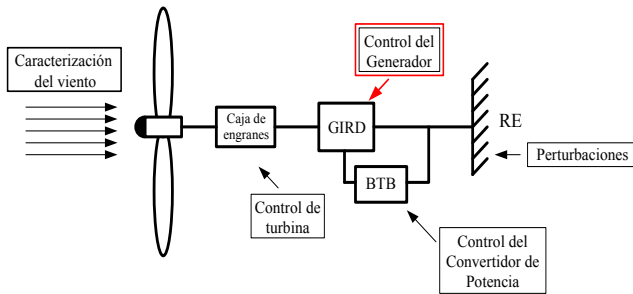


Fig. 1. Sistema de Generación Eólico

En conjunto, el problema de la caracterización del viento y la acción de la Turbina Eólica conforman el subsistema mecánico. El GIRD representa otro subsistema, al igual que la RE. Para un SGE con un GIRD, se tienen como actuador principal a un convertidor de potencia bidireccional, conocido como Back-to-Back (BTB, por sus siglas en inglés) [28]. Este convertidor, conforma otro subsistema. Entonces, desde esta perspectiva, la tarea de controlar adecuadamente a un SGE implica controlar también adecuadamente la dinámica de cada uno de los otros subsistemas. Cumplir con esta tarea no es fácil, sin embargo, si solamente se representa al SGE mediante el subsistema del GIRD y se idealiza la dinámica de los otros subsistemas, es posible plantear el control del SGE a través del control de GIRD.

La consideración de no involucrar la dinámica del subsistema mecánico se puede justificar si se considera conocido el perfil de viento y se representa a la Turbina Eólica con un modelo teórico, conocido de literaturas especializadas y que es ampliamente utilizado [14], [23]-[26]. Para la RE, este se le puede representar con un Bus Infinito (BI), operando en condiciones de estado estable a un Factor de Potencia (FP) dado [27]. Para el caso del convertidor de potencia, se puede considerar que se tiene un convertidor BTB con la capacidad de drenar las potencias necesarias al devanado de rotor de la máquina de inducción[29].

III. MODELO DE LA TURBINA EÓLICA

Generalmente, un SGE que opera en condiciones de velocidad variable se representa por una Turbina Eólica, una

caja de engranes y un Generador Eléctrico. La potencia mecánica que se captura de la Turbina Eólica y que se transmite a través del rotor que lo acopla al Generador Eléctrico, está dada por la ecuación no lineal (1),

$$P_m = \frac{1}{2} \omega_r \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

donde ω_r es la velocidad del rotor, R es el radio del rotor y ρ es la densidad del aire. La potencia extraída del viento, P_a , es proporcional al cubo de la velocidad del viento y la velocidad del rotor. El coeficiente de potencia (C_p), depende del ángulo de ataque de las álabes, β , y del índice de la velocidad relativa del viento y la Turbina Eólica, λ , la cual está definida como la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de las álabes y aquella del viento, es decir,

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \quad (2)$$

De la ecuación (2), se puede ver que cualquier cambio en la velocidad del rotor o de la velocidad del viento, implica una variación en el coeficiente de potencia. Explícitamente, el C_p se define de la siguiente manera, donde es claro su dependencia del ángulo de ataque de las álabes (β) y del índice de la velocidad relativa del viento (λ) [14],[25],

$$C_p = 0,5 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) \exp^{-\frac{21}{\lambda_i}} \quad (3)$$

donde

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\alpha^3 + 1} \right)^{-1} \quad (4)$$

El par mecánico entregado por la Turbina Eólica se puede obtener si se despeja a ω_r de (2) y se le sustituye en la ecuación (1). Así, la ecuación del par mecánico queda definida por la ecuación no lineal (5).

$$T_m = \frac{1}{2} \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \rho \pi R^3 v^2 \quad (5)$$

Teóricamente, la C_p tiene un máximo conocido como límite de Betz [30]. El límite práctico es de 0,5, y se considera satisfactorio un C_p superior a 0.4 [23]. Si se fija al ángulo de ataque a un valor constante, por ejemplo, a cero grados ($\beta = 0^\circ$), se tiene un valor óptimo de λ igual a 8.0. Para este valor de λ , se tiene que la C_p es de 0,4109 en la ecuación (3). Es importante aclarar que es posible que la Turbina Eólica trabaje en este punto de operación si se controla la velocidad del rotor (ω_r) para que compense las variaciones que se tienen del viento (ver ecuación (2)). El control de esta variable se puede llevar a cabo si se controla la velocidad mecánica del GIRD y se considera que se tiene una conexión directa entre el eje del generador y la Turbina Eólica.

IV. PROBLEMA DE CONTROL:IDA-PBC

IV-A. Modelo del GIRD

En esta sección, se presenta el modelo del GIRD con la suposición de que se tiene una relación lineal en el circuito magnético y que la máquina opera bajo un régimen balanceado. El modelo en el marco de referencia dq , girando a una velocidad síncrona se da en las siguientes ecuaciones [31]

$$\begin{aligned} \frac{di_s}{dt} &= -\omega_s \mathbf{J} i_s - \omega_r \xi \mathbf{J} \lambda_r - \gamma i_s \\ &\quad + \alpha \xi \lambda_r + \frac{\xi L_r}{L_{sr}} u_s - \xi u_r \end{aligned} \quad (6)$$

$$\dot{\lambda}_r = -(\omega_s - \omega_r) \mathbf{J} \lambda_r + \alpha L_{sr} i_s - \alpha \lambda_r + u_r \quad (7)$$

$$J \dot{\omega}_m = \frac{L_{sr}}{L_r} i_s^T \mathbf{J} \lambda_r - B \omega_r + T_m \quad (8)$$

donde ω_s es la velocidad del marco de referencia, ω_r es la velocidad del rotor, $i_s = [i_{sd}, i_{sq}]^T$ son las corrientes, $\lambda_r = [\lambda_{rd}, \lambda_{rq}]^T$ son los encadenamientos de flujos, u_s y u_r son el voltaje en el estator y rotor, respectivamente, mientras que todos los parámetros (positivos) están dados por,

$$\alpha = \frac{R_r}{L_r}; \xi = \frac{L_{sr}}{\mu}; \gamma = \frac{1}{\mu} \left(\frac{R_s L_r^2 + R_r L_{sr}^2}{L_r} \right) \quad (9)$$

con $\mu_r = L_s L_r - L_{sr}^2$ y

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = -\mathbf{J}^T \quad (10)$$

En el modelo, L_s , L_r son las inductancias propias del estator y rotor, L_{sr} es la inductancia mutua, R_s , R_r son las resistencias de los devanados, J es el momento de inercia, B el coeficiente de fricción y T_m el par mecánico aplicado.

Considerando el vector de los encadenamientos de flujos $\lambda = \mathcal{L}_e i$ con $\lambda = [\lambda_s^T, \lambda_r^T]$ e $i = [i_s^T, i_r^T]$, donde λ_s son los encadenamientos de flujos en el estator e i_r las corrientes en el rotor, con

$$\mathcal{L}_e = \begin{bmatrix} L_s \mathbf{I}_2 & L_{sr} \mathbf{I}_2 \\ L_{sr} \mathbf{I}_2 & L_r \mathbf{I}_2 \end{bmatrix}; \mathbf{I}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

se puede escribir el siguiente un modelo equivalente del modelo dado en (6)-(8)

$$\dot{\lambda}_s = -\omega_s L_s i_s - \omega_s L_{sr} \mathbf{J} i_r - R_s i_s + u_s \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_r &= -(\omega_s - \omega_r) L_{sr} \mathbf{J} i_s - (\omega_s - \omega_r) L_r \mathbf{J} i_r \\ &\quad - R_r i_r + u_r \end{aligned} \quad (13)$$

$$J \dot{\omega}_r = L_{sr} i_s^T \mathbf{J} i_r - B \omega_r + T_m \quad (14)$$

Con el fin de incluir el efecto de la Turbina Eólica en este modelo equivalente del GIRD, T_m es el par mecánico entregada por la Turbina Eólica, mientras que $T_g = L_{sr} i_s^T \mathbf{J} i_r$ es el par electromagnético que se genera dentro de la máquina. Para este trabajo, T_m se considera como una entrada variante en el tiempo, obtenida a partir de la ecuación (5).

IV-B. Control de Flujos de Potencias (\mathcal{P} y \mathcal{Q})

Desde un punto de vista general, el modelo (12)-(14) exhibe una estructura para la potencia activa (\mathcal{P}) y reactiva (\mathcal{Q}) si se asume que el estator del GIRD está conectado a un BI con una magnitud de voltaje U y frecuencia determinada por ω_s . Entonces, las potencias en el estator de la máquina son,

$$\mathcal{P}_{ab} = I_s^T V_s; \mathcal{Q}_{ab} = -I_s^T \mathbf{J} V_s \quad (15)$$

donde I_s y V_s son el vector de voltaje y corriente en el estator, respectivamente, en el marco de referencia bifásico natural ab para una máquina de inducción [31]. En el marco de referencia dq síncrono para el modelo del GIRD en este trabajo, las expresiones para las potencias están dadas en (16).

$$\mathcal{P}_s = \frac{3}{2} U i_{sd}; \mathcal{Q}_s = -\frac{3}{2} U i_{sq} \quad (16)$$

IV-C. Prueba de desempeño: Planteamiento

El planteamiento para probar el desempeño del controlador SIDA-PBC, reportado en [22], parte de considerar que la Turbina Eólica opera en un punto máximo de potencia, con un ángulo de ataque de las álabes igual a cero. Bajo esta consideración, se tiene un valor constante del C_p ($C_p = 0,4109$) en (3), que corresponde a un índice de la velocidad relativa del viento optima ($\lambda_{opt} = 8,0$) [14]. Con este valor del C_p , la potencia máxima entregada por la Turbina Eólica queda sólo en términos de sus parámetros de construcción, que son constantes, y de la velocidad del viento, que se va a considerar variante en el tiempo.

$$P_m = \frac{1}{2} \omega_r \rho \pi R^2 v^3 C_p \quad (17)$$

De la ecuación (5), también se puede definir la velocidad deseada del rotor (ω_r^*) en términos de λ_{opt} y de la velocidad del viento (v), para la condición de operación de máxima potencia.

$$\omega_r^* = \frac{\lambda_{opt}}{R} v \quad (18)$$

Con la definición de ω_r^* y P_m , la evaluación del desempeño del controlador SIDA-PBC es la siguiente

Considerando el modelo del GIRD dado por (12)-(14) y asumiendo que

- ◇ Todos los estados son medibles.
- ◇ El par mecánico que entrega la Turbina Eólica es conocido y variante en el tiempo.
- ◇ La magnitud y frecuencia del voltaje en el estator es fijado por el BI y son conocidos
- ◇ Todos los parámetros del modelo son conocidos.

mostrar numéricamente que el diseño del controlador SIDA-PBC obtenido en [22] satisface el objetivo de control

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathcal{P}_s = \mathcal{P}_s^*; \lim_{t \rightarrow \infty} \mathcal{Q}_s = \mathcal{Q}_s^*; \quad (19)$$

donde \mathcal{P}_s^* y \mathcal{Q}_s^* son valores deseados para las potencias, bajo condiciones de T_m variante en el tiempo

IV-D. Análisis de solubilidad

Una vez planteado el problema para la cual se va a evaluar el desempeño del controlador SIDA-PBC, es importante hacer un análisis de la solubilidad del sistema bajo las consideraciones que se están haciendo. Para ello, se obtiene la dinámica del equilibrio del sistema (12)-(14) mediante el siguiente sistema de ecuaciones algebraicas.

$$0 = -\omega_s L_s i_s^* - \omega_s L_{sr} \mathbf{J} i_r^* - R_s i_s^* + u_s \quad (20)$$

$$0 = -(\omega_s - \omega_r^*) L_{sr} \mathbf{J} i_s^* - (\omega_s - \omega_r^*) L_r \mathbf{J} i_r^* - R_r i_r^* + u_r \quad (21)$$

$$0 = L_{sr} i_s^{*T} \mathbf{J} i_r^* - B \omega_r^* + T_m \quad (22)$$

Es importante hacer notar que la velocidad deseada del rotor está dada por (18), y las corrientes deseadas en el estator por la ecuación (23), por el hecho de que la máquina está conectada a un BI.

$$i_s^* = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{U} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{P}_s^* \\ \mathcal{Q}_s^* \end{bmatrix} \quad (23)$$

De las ecuaciones (20) y (22), se obtiene la ecuación para la corriente (i_r^*), la cual se da en la ecuación (24). Para el caso de la velocidad deseada en el rotor (ω_r^*), esta se obtiene directamente de la ecuación (22) y se da en (25).

$$i_r^* = \frac{\mathbf{J}^T}{(\omega_s L_{sr})} \{u_s - (\omega_s L_s \mathbf{J} + R_s \mathbf{I}_2) i_s^*\} \quad (24)$$

$$\omega^* = \frac{L_{sr}}{B_r} i_s^{*T} \mathbf{J} i_r^* + \frac{1}{B_r} T_m \quad (25)$$

Si se premultiplica por \mathbf{J} a la ecuación de i_r^* y se sustituye en la ecuación de (25), se tiene una ecuación algebraica de segundo orden para \mathcal{P}^* y \mathcal{Q}^* ,

$$\begin{aligned} & \mathcal{P}^{*2} \left(\frac{4R_s}{9\omega_s u_{sd}^2 B_r} \right) - \mathcal{P}_s^* \left(\frac{2}{3B_r \omega_s} \right) + \\ & \left(\frac{4R_s}{9\omega_s u_{sd}^2 B_r} \mathcal{Q}_s^{*2} - \frac{T_{mMax}}{B_r} + \omega^* \right) = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

De la solución de la ecuación (27), la cual está dada en la ecuación (27), se define la potencia activa deseada para el par mecánico entregado por la Tubina Eólica, quedando libre la potencia reactiva deseada,

$$\mathcal{P}_s^* = \frac{\frac{2}{3B_r \omega_s} - \sqrt{\left(\frac{-2}{3B_r \omega_s}\right)^2 - 4\left(\frac{4R_s}{9\omega_s u_{sd}^2 B_r}\right)\left(\frac{4R_s \mathcal{Q}_s^{*2}}{9\omega_s u_{sd}^2 B_r} - \frac{T_m}{B_r} + \omega^*\right)}}{(2)\left(\frac{4R_s}{9\omega_s u_{sd}^2 B_r}\right)} \quad (27)$$

con la siguiente restricción.

$$\left(-\left(\frac{2}{3B_r \omega_s}\right)\right)^2 - 4\left(\frac{4R_s}{9\omega_s u_{sd}^2 B_r}\right)\left(\frac{4R_s}{9\omega_s u_{sd}^2 B_r} \mathcal{Q}_s^{*2} - \frac{T_{mMax}}{B_r} + \omega^*\right) > 0 \quad (28)$$

De la ecuación (27), se tiene que la potencia activa en el lado del estator varía en función de la dinámica impuesta

por el par mecánico, la velocidad deseada del rotor y la potencia reactiva deseada que se imponga. De la estructura de esta ecuación, se puede hacer notar que la condición de $\mathcal{Q}_s^* = 0$ implica que toda la energía extraída del viento se está convirtiendo en potencia activa. Por la tanto, el hecho de que el SGE pueda despachar potencia reactiva se debe a las características propias del convertidor BTB [28], ya que en el lado del rotor, el controlador pasivo requerirá despachar reactivos y esta será proporcionada por el Bus de CD cuando sea el caso en el que demande, y por el devanado mismo del rotor, cuando lo suministre. Es importante hacer notar que en el Bus de CD del convertidor, sólo se tiene potencia activa y que se plantea que la conexión del convertidor a la RE trabaje a Factor de Potencia unitaria [29].

IV-E. Controlador SIDA-PBC

La estrategia de control SIDA-PBC está dada por

$$\begin{aligned} u_r = R_r i_r + (\omega_s - \omega) \mathbf{J}_2 (L_{sr} i_s + L_r i_r) - k_s (L_s e_{i_s} + L_{sr} e_{i_r}) \\ - k_r (L_{sr} e_{i_s} + L_r e_{i_r}) + k_\omega \mathbf{J}_2 \psi_s e_\omega \end{aligned} \quad (29)$$

con las siguientes restricciones

$$k_r > 0; k_\omega > 0; k_s > \frac{L_{sr}^2}{4B_r L_r \mu} |\psi_r^*|^2 k_\omega \quad (30)$$

y con las condiciones de equilibrios dadas en (23)-(25).

Observación: Es importante hacer notar que las restricciones dadas en (30) son cota para cuando T_m es constante y se probó en [22] que el punto de equilibrio para el sistema nominal en lazo cerrado es Global y Exponencialmente Estable. Para este trabajo, se mostrará que para cuando T_m sea variante en el tiempo, con constantes de sintonización que respetan las restricciones del controlador pasivo, el desempeño del controlador es notablemente aceptable para las estados eléctricos, y que para la velocidad mecánica, al menos es estable.

V. RESULTADOS

Para la evaluación del desempeño del controlador SIDA-PBC, se trabaja con un máquina de inducción de rotor devanado de 1.1 [kW] a 380 [V] entre fases en estator y rotor. La máquina opera como generador y las señales de control serán los voltajes en el rotor. Los parámetros del GIRD son: $R_s = 4,92[\Omega]$, $R_r = 4,42[H]$, $L_s = 0,725[H]$, $L_r = 0,715[H]$ y $L_{sr} = 0,71[H]$. La inercia y el coeficiente de fricción de la máquina son: $J = 0,00512[kg \cdot m^2]$ y $B = 0,005[N \cdot m/rad/s]$.

Los resultados que se van presentar corresponden a la evaluación del controlador SIDA-PBC para un perfil de viento que varía en forma de rampa, como se muestra en la Figura 2. Las constantes de sintonización para el controlador para todos los resultados son: $k_s = 1000$, $K_r = 100$ y $k_\omega = 0,15$. Las condiciones iniciales para los estados en el arranque del SGE en lazo cerrado es cero y se propuso una condición de despacho de potencia reactiva en el estator del GIRD de $\pm 300[VAR]$. La potencia activa lo gobierna las

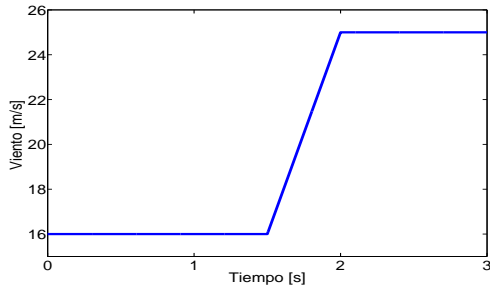


Fig. 2. Perfil de viento

condiciones del par mecánico, que a su vez, es gobernado por la velocidad del viento.

Los resultados para el seguimiento de las condiciones para la potencia activa deseada y reactiva en el estator del GIRD se muestran en las Figuras 3, donde la condición variante de la potencia activa se explica por la variación del viento (ver (26)). La condición constante para la potencia reactiva, tanto para cuando está entregando y consumiendo reactivos, se explica porque de (27), esta variable es libre y se fijó a esos valores.

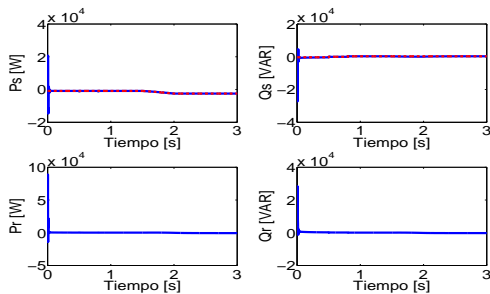


Fig. 3. Potencias en el estator del GIRD

En la Figura 4 se muestra un acercamiento de los resultados para las potencias en el estator, donde se puede ver que se tiene un error estacionario en el seguimiento de la potencia reactiva en el intervalo donde la velocidad de viento está variando. Es importante resaltar que esta situación no se presenta en la potencia activa, ya que se puede ver que el desempeño es más que aceptable.

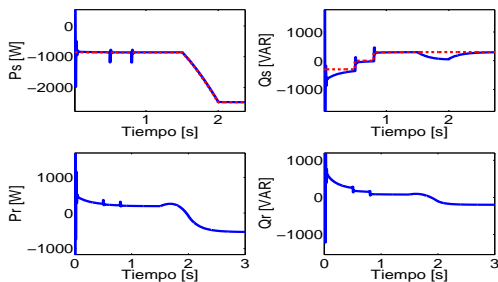


Fig. 4. Acercamiento: Potencias en el estator del GIRD

En la Figura (5) se presenta el desempeño que se tiene

para la velocidad mecánica, en donde se puede observar que en el intervalo donde varía la velocidad del viento, el ajuste de la velocidad de referencia no es bueno. Esta condición se puede explicar por las condiciones originales de diseño del controlador pasivo en [22], la cual plantea un problema de control de regulación. Par el caso de este trabajo, lo que se tiene es un problema de control de seguimiento, pero a pesar de ello, se está mostrando con los resultados de simulación que el SGE en lazo cerrado es al menos estable en los estados.

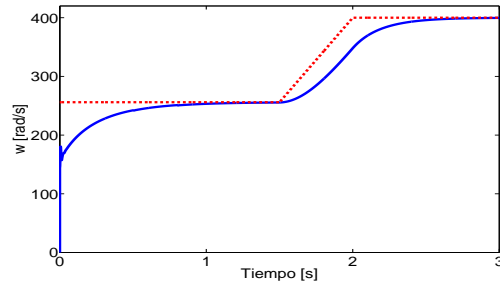


Fig. 5. Velocidad de rotor del GIRD

Para mostrar que en verdad la Turbina Eólica del SGE está operando en su punto máximo de potencia, en la Figura 6 y 7, se muestra que se están alcanzando los valores óptimos de C_p y λ . Claro está que se puede observar que en el intervalo donde varía la velocidad del viento, el ajuste no es adecuado, pero sigue siendo estable.

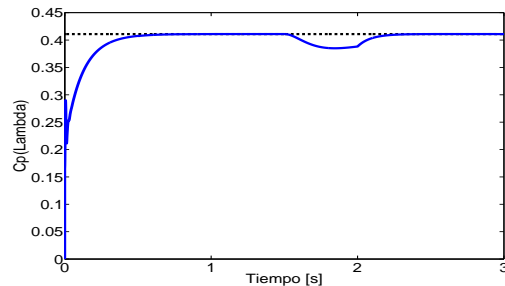


Fig. 6. Coeficiente de potencia de la Turbina Eólica

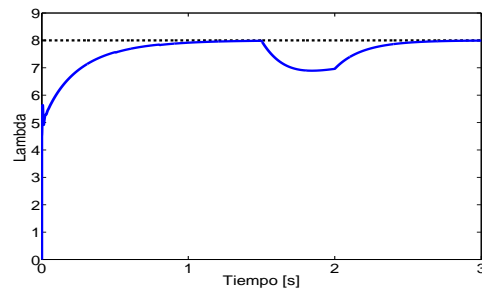


Fig. 7. Índice de la velocidad relativa del viento

VI. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en el trabajo, se mostró que controlador SIDA-PBC reportado en [22] se puede aplicar

directamente en el control de flujos de potencia en un SGE, bajo las condiciones de operación que se consideraron. Sin embargo, es claro que existen problemas, tanto en el seguimiento de la potencia reactiva como en caso de la velocidad mecánica, ya que no presentan un buen desempeño en el intervalo de tiempo donde la velocidad del viento varía. Sin embargo, es importante resaltar que los resultados de simulación muestran que los estados del SGE son al menos estables. Por lo tanto, es necesario modificar de alguna manera la estrategia de control pasivo SIDA-PBC para compensar esta situación y así mejorar el desempeño del controlador en su aplicación en el SGE para el control de flujos de potencia.

REFERENCIAS

- [1] IEEE Transactions on Energy Conversion. *Guest Editorial Introduction to the Special Issue on Wind Power*. Vol. 22, No. 1, March 2007.
- [2] Datta, T. F Ranganathan, V. T. *Variable-Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine-A Comparison With Alternative Schemes*. IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 17, No.3, pp. 414-421, September 2002.
- [3] Xu L. *Enhanced control and operation of DFIG based wind farms during network unbalance*. IEEE Transaction on energy conversion, Vol. 23, No. 4. December 2008.
- [4] Brekken T. K. and Mohan N. *Control of a doubly fed induction wind generator under unbalanced grid voltage conditions*. IEEE Transaction on energy conversion, Vol. 22, No. 1, pp. 129-135, June 2007.
- [5] Leonhard, W. *Control of electric drives*. Berlin-Germany: Springer, 1995.
- [6] Pena R., Cárdenas R., Escobar E., Clare J and Wheeler P. *Control strategy for a doubly-fed induction generator feeding and unbalanced grid or stand-alone load*. Elsevier-Electric Power Systems Research. Vol. 79, pp. 355-364, 2009.
- [7] Hu J. and He Y. *Modeling and enhanced control of DFIG under unbalanced grid voltage conditions*. Elsevier-Electric Power Systems Research. Vol. 79, pp. 273-281, 2009.
- [8] Pena R., Clare J. and Asher G. *Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation*. Inst. Elect. Eng. Proc. Elect. Power Appl. Vol. 143, No. 3, pp. 231-241, May 1996.
- [9] Akagi H. and Sato H. *Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system*. IEEE Transactions on power electronic Vol. 17, No. 1, pp. 109-116, January 2002.
- [10] De Doncker R., Muller S. and Deicke M. *Doubly-fed induction generator systems for wind turbines*. IEEE Ind. Appl. Mag. Vol. 8, No. 3, pp. 26-33, May-June 2002.
- [11] Barros L. S., Mota W. S., and Moura D. F. *Matrix method two linearization and state space representation of power systems containing doubly fed induction machines operating as wind generators*. IEEE/PES Trans. Distrib. Conf. Expo: Latin America, pp. 1-6, August 2006.
- [12] Marinescu B. *A robust coordinated control of the doubly-fed induction machine for wind turbines: A state-space based approach*. In proc. Amer. Control Conf. Vol. 1, pp. 174-179, June 2004.
- [13] Peresada, S., Tilli, A., Tonielli, A. *Power control of a doubly fed induction machine via output feedback*. Control Engineering Practice, Vol. 12, No. 1, pp. 41-57, 2004.
- [14] Heier S. *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. Wiley, 1998.
- [15] Monroy A., Alvarez I. L. and Espinosa P. G. *Passivity based control for variable speed constant frequency operation of a DFIG wind turbine*. International Journal of control, Vol. 81, No. 9, pp. 1399-1407, September 2008.
- [16] Xu L and Cartwright P. *Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation*. IEEE Transaction on energy conversion Vol. 21, No. 3, pp. 750-758, September 2006.
- [17] Gokhale K. P., Karraker D. W. and Heikkila S. J. *Controller for a wound rotor slip ring induction machine*. U.S Patent 6 448 735 B1, September, 2002.
- [18] Ortega, R., Loria, A., Nicklasson, P. and Sira R. H. *Passivity-Based Control of Euler-Lagrange systems*. Berlin-Germany: Springer Verlag, 1998.
- [19] Espinosa P. G., and Ortega R. *State observers are unnecessary for induction motor control*. System & Control Letters 23, pp. 315-323, 1994.
- [20] Ortega R., Nicklasson P. J., and Espinosa P. G. *On Speed Control of Induction Motors*. Automatica, Vol. 32, No. 3, pp. 455-460, 1996.
- [21] Battlle, C., Doria C. A., and Ortega R. *Power Flow Control of a Doubly-Fed Induction Machine Coupled to a Flywheel*. International Conference on Control Applications. Taipei, Taiwan, pp.1645-1650, September 2-4, 2004.
- [22] Battlle, C., Doria C. A., Espinosa P. G., and Ortega R. *Simultaneous Interconnection and Damping Assignment Passivity-Based Control: The induction Machine Case Study*. International Journal of control. Vol. 82, pp. 241-255, 2009.
- [23] Mukund R., Patel *Wind and Solar Power Systems (Design, Analysis and Operation)* CRC-Taylor & Francis. Second Edition. 2006.
- [24] Boukhezzer B., Lupu L., Siguerdidjane H., and Hand M. *Multivariable Control Strategy for Variable Speed, Variable Pitch Wind Turbine*. Elsevier-Renewable Energy 32, pp. 1273-1287, 2007.
- [25] Sloopweg J. G., Polinder H., and Kling W. L. *Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations*. IEEE Transaction on energy conversion Vol. 18, No. 4, pp. 516-524, September 2003.
- [26] Sloopweg, J. G., Polinder, H., Kling, W. L. *Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator*. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, pp. 644-649, 2001.
- [27] Kundur P. *Power System Stability and Control* McGraw-Hill, 1994.
- [28] Kazmierkowski, M. P., Krishan, R., and Blaabjerg, F. *Control in power electronics (Selected Problems)*. Academic Press (An Imprint of Elsevier Science), 2002.
- [29] López G., I, Espinosa P. G., Cárdenas G., V y Siguerdidjane H. *Análisis de un Controlador Pasivo para una Máquina de Inducción Operando en un Sistema Eólico*. Congreso Nacional de la Asociación de México de Control Automático, 2010.
- [30] Sahin A. D. *Progress and Recent Trends in Wind Energy*. Progress in Energy and Combustion Science, 30:501-543, 2004.
- [31] Krause, C. P., Wasynczuk O., Sudhoff, D. S. *Analysis of electric machinery and drive system*. IEEE Press Power Engineering Series, Second Edition, 2002.