

# Sistema de Generación Eólico Interconectado a la Red Eléctrica: Problemas y soluciones

I. López-García<sup>1</sup>, J. Jiménez-González<sup>1</sup>, H. López-García<sup>2</sup>, F. Beltrán-Carbajal<sup>1</sup>, F. González-Montañez<sup>1</sup>, H. Canseco-García<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
Departamento de Energía, Área de Ingeniería Energética y Electromagnética <sup>∇</sup><sup>2</sup>.  
Av. San Pablo Xalpa 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Azcapotzalco, Ciudad de México, D.F., México, 02200.  
[ilg@correo.azc.uam.mx](mailto:ilg@correo.azc.uam.mx), [joseph31.ja@gmail.com](mailto:joseph31.ja@gmail.com)

<sup>2</sup>Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatenco  
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación  
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Lindavista Zacatenco, Ciudad de México, D.F., México, 07738.

2015 Published by *DIFU*<sub>100ci</sub>@ <http://nautilus.uaz.edu.mx/difu100cia>

---

## Resumen

En este trabajo se presenta un análisis de los problemas que surgen cuando un Sistema de Generación Eólico basado en un Generador de Inducción Doblemente Alimentado interconectado a la red eléctrica cuando opera bajo una condición distinta del punto máximo de operación. Los problemas se formulan a partir del planteamiento de la ecuación de balance de potencia entre este sistema de conversión de energía y la red eléctrica y su solución. La ecuación de balance de potencia se formula a través de la dinámica del coeficiente de potencia de la turbina eólica, asumiendo una velocidad de viento constante y bajo una condición de despacho de potencia activa y reactiva hacia la red eléctrica.

*Palabras clave:* Sistemas de Generación Eólicos, Balance de Potencia, Generación Eólica.

---

## 1. Introducción

En la actualidad la generación de energía eléctrica a través de fuentes de energía renovables dejó de ser una utopía para convertirse en una realidad. Por ello, todos los problemas inherentes a este tema (uso de combustibles fósiles, por ejemplo) han generado gran interés a nivel mundial, como así lo muestra

la literatura especializada [1, 2]. En este sentido, los sistemas de generación eólicos han cobrado particular importancia debido a su factor *costo-beneficio* en comparación a las demás fuentes de energías renovables [1, 3]. El Sistema de Generación Eólico (SGE) basado en un Generador de Inducción Doblemente Alimentado (GIDA) es de los más importantes debido a su capacidad instalada [3, 4]. El funcionamiento de un SGE

se puede resumir en dos procesos de conversión de energía; en el primero se transforma la energía cinética del viento en energía mecánica a través de una turbina, en el segundo, esta energía mecánica se transforma en energía eléctrica utilizando un generador. El diseño y operación de este tipo de sistemas requiere un entendimiento adecuado de distintas disciplinas, como ingeniería mecánica, eléctrica, electrónica y control [3]-[9]. El principal problema con los SGE es la naturaleza estocástica de la dinámica del viento, por lo que su interacción con la red eléctrica no se ha comprendido en su totalidad. A diferencia de las centrales eléctricas convencionales (termoeléctricas, hidroeléctricas, ciclo combinado, etc.), el carácter aleatorio del viento rompe con el principio de mantener la confiabilidad de la red eléctrica a través de fuentes de energía controlada.

Debido a la creciente capacidad de instalación de este tipo de SGE, se ha discutido fuertemente la pertinencia de ver también a este sistema de generación de energía como fuente de potencia reactiva [10], apoyado en la capacidad del GIDA en el despacho de potencia reactiva [11, 12]. Uno de los propósitos de este trabajo es mostrar que este SGE puede despachar potencia activa y reactiva a la red eléctrica a través del planteamiento de una ecuación de balance de potencia. El problema es que esta ecuación es trascendental [13, 14] por lo que, implica el uso de métodos numéricos para su solución. Por ello en este trabajo se resuelve este problema a través de la gráfica de la ecuación con la finalidad de mostrar ambas soluciones simultáneamente.

El resto del trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se describe el SGE como un grupo de subsistemas, la sección 3 describe el análisis de flujos de potencia, la sección 4 muestra la solución propuesta al problema y algunos resultados numéricos obtenidos y finalmente en la sección 5 se dan conclusiones importantes de este trabajo.

## 2. Sistema de Conversión de Energía Eólica

Desde una perspectiva de sistemas dinámicos, el SGE consiste de varios subsistemas, como se muestra en la Figura 1. Puede verse que la turbina y la caja de engranes forman el subsistema mecánico. El GIDA forma un subsistema eléctrico, así como la red eléctrica que se representa como un bus infinito [15]. El otro subsistema lo forma un convertidor de potencia bidireccional, conocido como convertidor *back-to-back* [16]. Si consideramos conocidos los subsistemas 1, 3 y 4, la dinámica del SGE se puede representar únicamente con el modelo del GIDA, tomando la dinámica de los otros subsistemas como entradas [17].

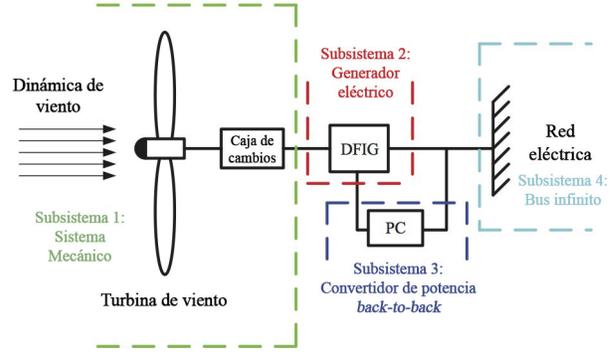


Figura 1. Sistema de Generación Eólico

### 2.1. Modelo del GIDA

Se considerarán las siguientes suposiciones para la operación del GIDA:

- Condiciones balanceadas
- Linealidad en el circuito magnético (no hay saturación)
- Parámetros invariantes por calentamiento
- Fuerza magnetomotriz libre de armónicos

De esta forma, podemos representar al GIDA con el siguiente modelo en el marco de referencia  $dq0$  [11]:

$$\dot{\Psi}_s = -\omega_s L_s \mathbf{J} i_s - \omega_s L_{sr} \mathbf{J} i_r - R_s i_s + u_s \quad (1a)$$

$$\dot{\Psi}_r = -(\omega_s - \omega) L_{sr} \mathbf{J} i_s - (\omega_s - \omega) L_r \mathbf{J} i_r - R_r i_r + u_r \quad (1b)$$

$$J \dot{\omega} = L_{sr} i_s^T - B \omega + T_m \quad (1c)$$

donde  $T_m$  es el par que entrega la turbina eólica y depende de la velocidad mecánica del rotor ( $\omega$ ) y la velocidad del viento ( $v$ ). El término  $L_{sr} i_s^T \mathbf{J} i_r = T_g$  es el par electromagnético generado por la máquina de inducción [17]. En el modelo,  $L_s$  y  $L_r$  son las autoinductancias del estator y del rotor, respectivamente,  $L_{sr}$  es la inductancia mutua,  $R_s$  y  $R_r$  son las resistencias de los devanados,  $\omega_s$  es la velocidad del marco de referencia,  $J$  es el momento de inercia del rotor y  $B$  es el coeficiente de fricción. Además, consideraremos los siguientes vectores:

$$\begin{aligned} i_s &= [i_{sd}, i_{sq}]^T & i_r &= [i_{rd}, i_{rq}]^T \\ u_s &= [U, 0]^T & u_r &= [u_{rd}, u_{rq}]^T \\ \Psi_s &= [\Psi_{sd}, \Psi_{sq}]^T & \Psi_r &= [\Psi_{rd}, \Psi_{rq}]^T \end{aligned}$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

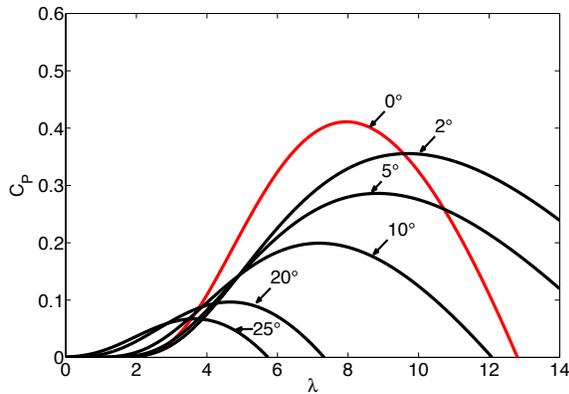


Figura 2. Coeficiente de potencia  $C_p$  con diferentes ángulos de ataque.

### 2.2. Modelo de la turbina eólica

La potencia mecánica captada por la turbina está dada por la siguiente ecuación no lineal [1, 6]:

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

donde  $R$  es el radio del área de barrido de los álabes de la turbina,  $\rho$  es la densidad del viento y  $C_p$  es el coeficiente de potencia de la turbina y representa el porcentaje de energía eólica que se transforma en energía mecánica en el eje del rotor. Nótese que este coeficiente depende de dos variables: el índice de la velocidad de punta  $\lambda$  y el ángulo de ataque de los álabes  $\beta$ . El análisis hecho en este trabajo considera un ángulo de ataque igual a cero ( $\beta = 0$ ). Esta condición de operación se puede ver en la línea roja de la Figura 2. El límite físico de este coeficiente es 59.26 % y se conoce como el límite de Bentz [18]. El índice de velocidad de punta está dado por la Ecuación (3):

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (3)$$

Con un ángulo de ataque igual a cero, el coeficiente de potencia de la turbina tiene la forma mostrada en la Ecuación (4):

$$C_p(\lambda) = \left[ \frac{60.042}{\lambda} \right] e^{\frac{-21}{1-0.035\lambda}} + 0.0068\lambda \quad (4)$$

De la expresión (4) es evidente el problema es que la potencia captada por la turbina eólica tiene una naturaleza no lineal, por lo que su análisis resulta complicado. En la siguiente sección se mostrará cómo impacta este comportamiento en la interconexión a la red.

### 3. Análisis de flujos de potencia

Desde la perspectiva de sistemas planteada en la Figura 1 es importante señalar que la potencia activa que se despacha en el estator del generador no es la potencia que se entrega a la red. Como se muestra en la Figura 3, el nodo de conexión entre el SGE y la red eléctrica se tiene el problema de que la potencia activa entregada a la red depende de la potencia entregada por el generador desde el estator y rotor, y las pérdidas por efecto Joule en estos devanados. Este flujo de potencia está definida en la Ecuación (5):

$$P_{RE} = P_s \pm P_r - P_{sJ} - P_{rJ} \quad (5)$$

donde los subíndices  $J$  indican las pérdidas por efecto Joule y el signo  $\pm$  indica el cambio de dirección de la potencia activa desde el rotor del GIDA (condición de operación subsíncrona y supersíncrona), el cual es una característica particular de los SGE basados en este tipo generador [11, 3, 1].

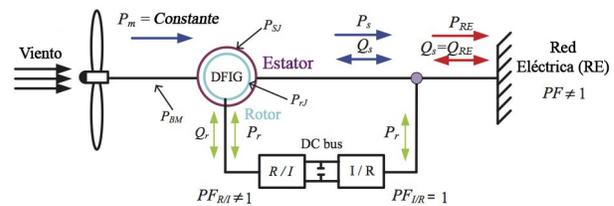


Figura 3. Flujos de potencia en un SGE.

El problema de la relación de las potencias en el estator y rotor de la máquina se puede resolver muy fácilmente a través del fenómeno de deslizamiento  $s$  ( $P_r = -sP_s$ ) si se desprecian las pérdidas por efecto Joule en los devanados del generador [12]. Considerando esta simplificación, que se debe de reconocer que es una limitación importante en el análisis, si se supone conocida y caracterizada la dinámica de los otros subsistemas de la Figura 1, el balance de potencia que debe satisfacer el generador, referido al estator, se puede expresar según la Ecuación (6) [11]:

$$P_{s\star}^2 \left( \frac{4R_s}{9\omega_s u_{sd}^2 B_r} \right) - P_{s\star} \left( \frac{2}{3B_r \omega_s} \right) + \frac{4R_s}{9\omega_s u_{sd}^2 B_r} Q_{s\star}^2 - \frac{T_m}{B_r} + \omega_{\star} = 0 \quad (6)$$

donde el subíndice  $\star$  denota el valor deseado de las variables consideradas, es decir, la potencia activa deseada, la potencia reactiva deseada y la velocidad deseada. Si sustituimos la Ecuación (5) en (6) y se utiliza la relación entre las potencias del rotor y estator del generador

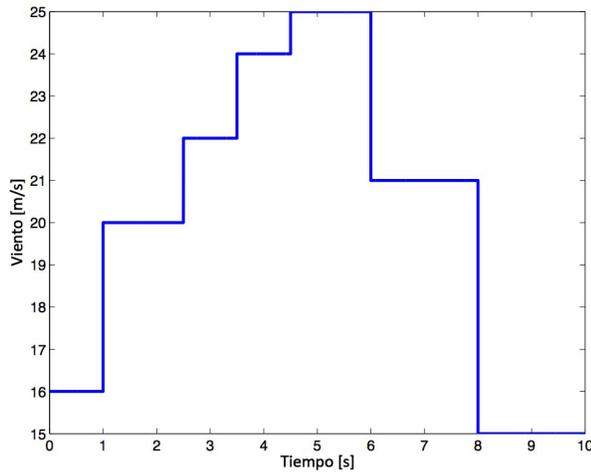


Figura 4. Perfil de velocidades del viento.

cuando se desprecian las pérdidas por efecto Joule en los devanados del generador, el balance de potencia obtenido en términos de las potencias activa y reactiva deseadas en la red está dada por

$$\frac{2P_{RE\star}}{3B_r} \frac{1}{\omega_\star} - \frac{4R_s P_{NE\star}^2 \omega_s}{9B_r u_{sd}^2} \frac{1}{\omega_\star^2} - \frac{4R_s}{9B_r \omega_s u_{sd}^2} Q_{EN\star}^2 + \frac{\rho A R v^2 C_p(\lambda)}{2B_r \lambda} - \omega_\star = 0 \quad (7)$$

De la Ecuación (7), si las potencias activa y reactiva son impuestas y se supone conocida la velocidad del viento, de acuerdo con la Ecuación (4), la Ecuación (7) es una ecuación trascendental de  $\omega_\star$ , cuya solución sólo se puede encontrar utilizando algún método numérico [13, 14].

#### 4. Solución de la ecuación de balance de potencia

Darle solución a la Ecuación (7) no es una tarea sencilla debido a que la velocidad del viento  $v$  está involucrada y se sabe que esta variable es de naturaleza aleatoria, por lo que no se cuenta con un modelo que la describa con exactitud. Sin embargo, podemos simplificar el carácter estocástico del viento si utilizamos un *perfil de velocidades*. La Figura 4 muestra un ejemplo de esta herramienta, en la que consideramos a la velocidad del viento como una función constante a tramos.

Es importante señalar que a pesar de esta consideración en el comportamiento de la velocidad del viento, la ecuación de balance de potencia sigue siendo una función trascendental de  $\omega_\star$ . El problema con este tipo

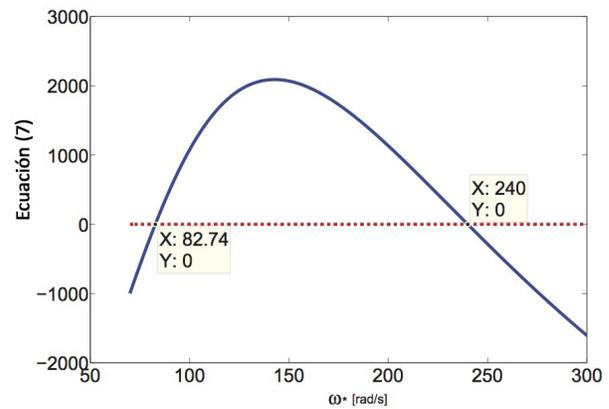


Figura 5. Raíces de la ecuación de balance de potencia para  $v = 16$  m/s.

de ecuaciones es que puede tener más de una solución en un rango determinado [13]. Por ello, el problema se traduce en encontrar o proponer una metodología de solución eficiente para determinar todas las raíces de la Ecuación (7). Un acercamiento a la solución de este problema es proponer un análisis del comportamiento de la ecuación a través de una visualización gráfica. En la Figura 5 se muestra el comportamiento de la Ecuación (7) cuando la velocidad del viento es de 16 m/s, es decir, para el intervalo de 0 a 1 de la Figura 4. Se puede apreciar que la función tiene sólo un máximo y tiene dos raíces, por lo tanto, hay dos velocidades de la turbina que satisfacen la ecuación de balance de potencia. Este comportamiento se da para todas las velocidades de viento propuestas en el perfil de velocidades [11]. La Tabla 1 muestra las dos condiciones de equilibrio para algunos valores de velocidad de viento que resultaron de simulaciones numéricas de un generador bajo estudio [11].

#### 4.1. Trabajo futuro

Es de gran interés implementar un algoritmo capaz de dar con ambas soluciones con el menor número de iteraciones posibles. Es posible utilizar métodos numéricos formales y confiables, como es el método de Newton-Raphson, sin embargo, es necesario un criterio para definir las condiciones iniciales que llevarán al menor número de iteraciones posible. Otra alternativa es la creación de un algoritmo que dé ambas soluciones a través de manipulaciones analíticas de la ecuación.

#### 5. Conclusiones

En este trabajo se presentó un modelo de un SGE considerándolo como un grupo de subsistemas conoci-

Tabla 1. Condiciones de operación para distintas velocidades de viento

$v$ [m/s]	$w_{*1}$ [rad/s]	$w_{*2}$ [rad/s]
15	220.34	82.69
16	240.03	82.70
20	314.17	85.12
24	384.80	88.32

dos y caracterizados, exceptuando el subsistema conformado por el GIDA. Este modelo alternativo permitió llevar a cabo un análisis de flujos de potencia en el SGE cuando este está interconectado con la red eléctrica. El resultado principal fue el planteamiento de una ecuación de balance de potencia que permitió ver los problemas que se tienen cuando el sistema de generación de energía y la red eléctrica están interactuando. El problema fundamental es que la ecuación tiene dos soluciones y los métodos numéricos tradicionales para resolver este tipo de ecuaciones sólo proporcionan una de las dos soluciones. Por ello, a manera de un acercamiento a la solución del problema, se hizo una análisis gráfico de la ecuación para mostrar las dos raíces. Es importante reconocer que el interés final es poder encontrar numéricamente las dos soluciones. Se piensa que la aplicación directa de los resultados de este trabajo puede ser de gran ayuda en el diseño de nuevos esquemas de control para este tipo de SGE, ya que permitiría establecer condiciones de operación óptimas del SGE a partir escoger una velocidad de operación apropiada.

## Referencias

[1] M. R. Patel, **Guest Editorial: Wind and solar power systems: design, analysis, and operation**. CRC, 2006.

[2] Knox-Hayes, Janelle and Brown, Marilyn A and Sovacool, Benjamin K and Wang, Yu, "Understanding attitudes toward energy security: results of a cross-national survey", *Global Environmental Change*, Elsevier, Vol. 23, pp. 609–622, 2013.

[3] R. Cárdenas, M. Molinas and J. T. Bialasiewicz, "Introduction to the special section on control and grid integration of wind energy systems—Part I", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, pp. 2358–2359, 2013.

[4] A. Dadhania, B. Venkatesh, A. B. Nassif and V. K. Sood, "Modelling of doubly fed induction generators for distribution system power flow analysis", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 53, pp. 576–583, 2013.

[5] Z. Bricman and M. Cepin, "Estimating the additional operating reserve in power systems with installed renewable energy sources", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 63, pp. 654–664, 2014.

[6] F. Bianchi, H. De Battista and R. Mantz, **Wind turbine control systems: Principles, modelling and gain scheduling desing**. Springer Verlag, 2007.

[7] R. Konopinski, P. Vijayan and V. Ajjarapu, "Extended reactive capability of DFIG wind parks for enhanced system performan-

ce", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 24, No. 3, pp. 1346–1354, August 2009.

[8] Y. Zhang, Z. Chen, W. Hu and M. Chen, "Flicker Mitigation by Individual Pitch Control of Variable Speed Wind Turbines With DFIG", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 1, pp. 20–28, 2014.

[9] A. Ghaedi, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad and M. Moeini-Aghtaie, "Toward a Comprehensive Model of Large-Scale DFIG-Based Wind Farms in Adequacy Assessment of Power Systems", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 5, No. 1, pp. 55–63, 2014.

[10] Tang C., Guo Y. and Jiang J. "Nonlinear Dual-mode Control of Variable-Speed Wind Turbines With Doubly Fed Induction Generators". *IEEE Transaction on control systems technology*, Vol. 19, No. 4, pp. 774-756, 2004, July 2011.

[11] I. López-Garcá, G. Espinoza-Pérez, H. Siguerdidjane and A. Doria, "On the passivity-based power control of a doubly-fed induction machine", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 45, No. 1, pp. 303–312, 2013.

[12] D. Santos-Martin, S. Arnaltes, J.L. Rodriguez-Amenedo, "Reactive power capability of doubly fed asynchronous generators", *IElectric Power Systems Research*, Vol. 78, pp. 1837–1840, 2008.

[13] Md. Golam, A. Chakraborty and Md. Al-Amin "A robust method for solving transcendental equations", *International Journal of Computer Science Issues*, Vol. 9, Issue 6, No. 2, pp. 413–419, 2012.

[14] G. Shanker Rao, **Numerical Analysis**, New Age International Publishers, Third Editions, 2006.

[15] P. Kundur, N. J. Balu and M. G. Lauby, **Power system stability and control**, McGraw-hill New York, 1994.

[16] M.P. Kaźmierkowski and R. Krishnan, **Control in Power Electronics: Selected Problems**, Academic Pr, 2002.

[17] C.P. Krause, O. Wasynczuk and D.S. Sudhoff, **Analysis of electric machinery and drive system**, IEEE Press Power Engineering Series, Second Edition, 2002.

[18] A. D. Sahin, "Progress and recent trends in wind energy", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30, No. 5, pp. 501–543, 2004.