

## **MODELADO, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE UNA TURBINA EÓLICA CON GENERADOR SINCRÓNICO DE IMÁN PERMANENTE MULTIPOLLO CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA.**

**P. E. Wiernes<sup>1</sup>, M. G. Molina<sup>1</sup>, P. E. Mercado<sup>1</sup>**

Instituto de Energía Eléctrica (IEE) – Universidad Nacional de San Juan (UNSJ)  
Av. Libertador San Martín Oeste 1109, J5400ARL, San Juan, Argentina

Web: <http://www.iee-unsj.org/>, Tel. 54-264-4226444, Fax 54-264-4210299, E-mail: [pwienes@iee.unsj.edu.ar](mailto:pwienes@iee.unsj.edu.ar)

**RESUMEN:** Se presenta el modelado, simulación y análisis de un sistema de generación eólica conectado a la red eléctrica. Este sistema está compuesto por una turbina eólica de velocidad variable, un generador sincrónico de imán permanente (PMSG) multipolo y un sistema electrónico de acondicionamiento de potencia controlado (PCS). El eje de la turbina se acopla directamente al eje del PMSG multipolo, mientras que el generador se vincula a la red eléctrica por medio del PCS, el cual está constituido por dos convertidores fuentes de tensión (VSC) de dos niveles en conexión back-to-back. El modelo dinámico del sistema y su estrategia de control se implementan en la herramienta de simulación MATLAB/Simulink. Los resultados de las simulaciones demuestran que el sistema presentado es capaz de operar en el punto de mayor eficiencia, y de controlar independientemente la potencia activa y reactiva inyectada en la red eléctrica.

**Palabras clave:** Sistema Eólico, Acople Directo, Generador Sincrónico de Imán Permanente Multipolo, Sistema Electrónico de Acondicionamiento de Potencia Controlado, Convertidor Fuente de Tensión Back-to-Back.

### **INTRODUCCIÓN**

La energía eólica es una energía limpia, inagotable, abundante, que disminuye el consumo de combustibles fósiles contribuyendo a evitar el cambio climático. La generación de energía eólica ha tenido un rápido desarrollo en estas dos últimas décadas, convirtiéndola en una alternativa técnicamente y económicamente viable.

Tradicionalmente los generadores eléctricos tienen un mejor rendimiento a velocidades elevadas, por lo que los aerogeneradores requieren cajas de engranajes elevadoras. Sin embargo, la caja de engranajes de la turbina eólica es cara, está sujeta a vibraciones, ruido, fatiga y necesita lubricación y mantenimiento. Actualmente, la idea de eliminar la caja de engranajes ha tomado auge, especialmente en aplicaciones off-shore, en donde el mantenimiento de la caja de engranajes es complejo y costoso. El concepto de eliminar la caja de engranajes implica que el eje de la turbina esté acoplado directamente con el eje del generador. De esta manera, si se consideran turbinas eólicas del orden de los MW, los generadores operan a muy bajas revoluciones, típicamente entre 10 y 25 rpm. Esta situación es adversa para los generadores eléctricos convencionales debido a que el torque necesario para producir la potencia requerida debe incrementarse. Es por esta razón, que para aumentar la eficiencia y reducir el peso de las partes activas, se diseñan generadores con rotores de gran diámetro y un elevado número de polos (multipolos), consiguiéndose frecuencias aceptables a velocidades bajas. El tamaño y las pérdidas de estos generadores son en gran medida determinados por el torque requerido.

Los generadores asincrónicos con gran número de polos poseen una reactancia de magnetización pequeña. Esto significa que la corriente de magnetización requerida por estos generadores es mayor a la que requieren los generadores asincrónicos convencionales. Es por ello que es recomendable utilizar generadores sincrónicos multipolo (Grauers, 1996).

Un generador sincrónico multipolo puede ser excitado eléctricamente o mediante imanes permanentes. Para aerogeneradores de baja velocidad, sin caja de engranajes, el generador sincrónico de imán permanente (PMSG) es el más apropiado debido a que puede disponer de un mayor número de polos por m<sup>2</sup> respecto a los generadores sincrónicos excitados eléctricamente. De esta manera, al no disponer los PMSGs de un arrollamiento de campo, se eliminan las pérdidas en el cobre del rotor originadas por las corrientes de campo y se evita el uso de anillos deslizantes. Respecto a las desventajas que presentan estos generadores, se destaca el costo elevado de los imanes permanentes y la incapacidad en el control de la excitación de los mismos. La incapacidad en el control de la excitación se soluciona añadiendo entre el generador y la red eléctrica de CA un sistema electrónico de acondicionamiento de potencia controlado (PCS) que, adicionalmente, es capaz de desacoplar la frecuencia eléctrica del generador de la frecuencia eléctrica del sistema de potencia, maximizar la energía captada por la turbina, y de controlar la potencia activa y reactiva independientemente.

En este trabajo se presenta el modelo de una turbina eólica de velocidad variable con PMSG multipolo de 315 kW conectado a la red eléctrica de CA a través de un PCS. Conjuntamente se expone el modelado del viento basado en el espectro de Kaimal. El modelo dinámico de la turbina eólica y su estrategia de control se implementan en la herramienta de simulación MATLAB/Simulink. La estrategia de control seleccionada se encarga tanto del control de la turbina eólica, como así también del control de los convertidores de potencia. La capacidad de la estrategia de control es evaluada y discutida por medio de los resultados de las simulaciones.

---

<sup>1</sup> Investigador CONICET.

## MODELADO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En este apartado se describen las ecuaciones implementadas en los modelos de MATLAB/Simulink, como así también la configuración del sistema seleccionada, la cual puede apreciarse en la Figura 1.

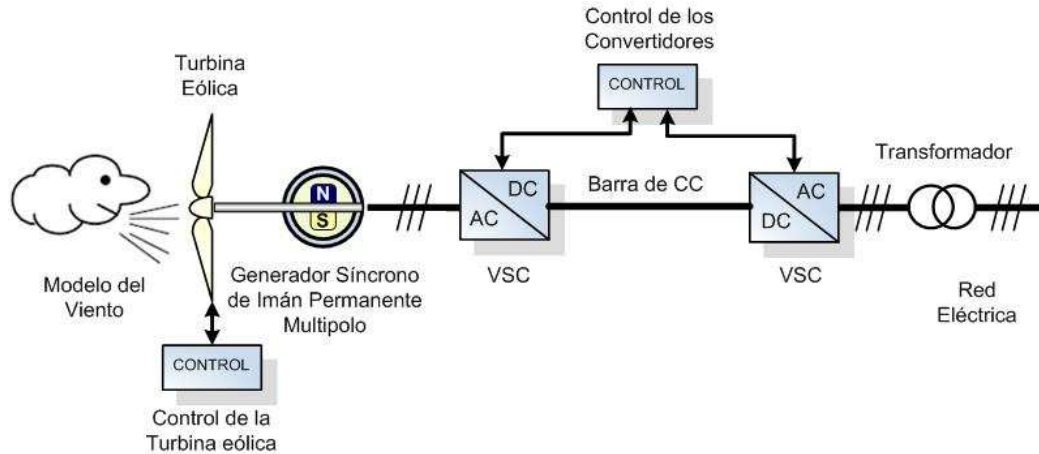


Figura 1: Configuración del sistema propuesto.

En esta configuración, la turbina eólica genera par mecánico a partir de la presión que el viento ejerce sobre las palas. El par generado se transfiere directamente al eje del rotor del PMSG. El PMSG produce un par eléctrico contrario al par mecánico, y la diferencia entre estos pares, determina si el sistema mecánico se acelera, desacelera o se mantiene a velocidad constante.

El PMSG está conectado a la red eléctrica a través de un PCS que controla la velocidad del generador y el flujo de potencia hacia la red. El sistema de electrónica de potencia consta de dos convertidores fuentes de tensión (VSC) de dos niveles en conexión back-to-back, interconectados por una barra de CC común. Los convertidores son comandados por señales moduladas por ancho de pulso (PWM). La utilización de este sistema le permite al PMSG definir la tensión y frecuencia en sus terminales de acuerdo a la velocidad de rotación óptima deseable de la turbina eólica, independientemente de la tensión y frecuencia (constante) de la red. Teniendo en cuenta que el PMSG está conectado a la red a través del convertidor back-to-back, sólo la potencia activa del PMSG se transfiere a la red. La potencia reactiva no se puede intercambiar a través de la barra de CC en el PCS. No obstante, el VSC del lado de la red, cuya tensión y frecuencia están fijados por la red, puede configurarse para controlar la potencia reactiva/tensión de la red. Al igual que la turbina eólica de velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado (Pena et al., 1996), este concepto permite el control total e independiente de la potencia activa y reactiva. Las pérdidas de los convertidores se desprecian, y la red se supone que es rígida. En la Tabla 1 se muestran los parámetros característicos del generador y del sistema.

PMSG	
Potencia nominal	315 [kW]
Tensión nominal	350 [V]
Pares de polos	48
Resistencia estática	0.0054 [ $\Omega$ ]
Inductancia estática	0.9 [mH]
Inductancia Mutua	0.54 [mH]
Flujo del estator	3.44 [Wb]
Inercia incluyendo la turbina	68277 [ $\text{kgm}^2$ ]
Modelo Mecánico	
Relación caja de engranajes	1 (acop. direc.)
Barra de CC	
Resistencia	1000 [ $\Omega$ ]
Capacitancia	1 [F]
Red eléctrica de CA	
Resistencia de la línea	0.01 [ $\Omega$ ]
Inductancia de la línea	0.0001 [H]
Tensión de fase	400/sqrt(3) [V]

Tabla 1: Parámetros del PMSG y del Sistema de Potencia.

### A. Turbina Eólica de Velocidad Variable

En el modelo de una turbina eólica se puede analizar de diferentes maneras la forma en que se obtiene la energía de una corriente de viento. La relación entre la potencia mecánica generada  $P_M$  [W] y la velocidad del viento incidente que atraviesa el plano del rotor de la turbina eólica se puede escribir como (Grauers, 1996; Slootweg et al.):

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

donde  $\rho$  es la densidad del aire [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];  $R$  es el radio de las aspas de la turbina [m];  $V_{VIENTO}$  es la velocidad del viento [m/s];  $C_p$  es el coeficiente de potencia;  $\beta$  es el ángulo de paso de las aspas de la turbina [deg]; y  $\lambda$  es la relación entre la velocidad tangencial en la punta del asa y la velocidad del viento incidente (TSR). El TSR se expresa como (Grauers, 1996; Sloomweg et al., 2003; Heier, 1998):

$$\lambda = \frac{\omega_{MEC} R}{V_{VIENTO}} \quad (2)$$

donde  $\omega_{MEC}$  es la velocidad angular de rotación de la turbina [rad/s]. El coeficiente de potencia que describe el rendimiento operacional de la turbina eólica se puede aproximar utilizando la siguiente función no lineal (Grauers, 1996; Sloomweg et al.):

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left( \frac{151}{\lambda} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{-18.4/\lambda} \quad (3)$$

donde:

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02\beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1}} \quad (4)$$

El par mecánico generado por la turbina eólica se describe por la siguiente ecuación:

$$T_M = \frac{P_M}{\omega_{MEC}} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_{VIENTO}^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (5)$$

### B. PMSG Multipolo

El generador se puede representar eléctricamente por el circuito eléctrico equivalente de una fase que se muestra en la Figura 2.

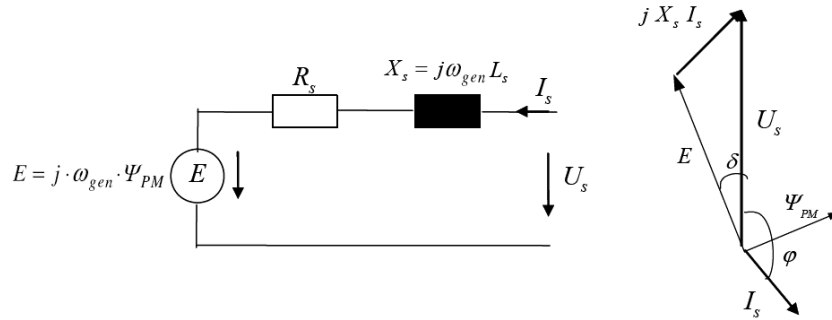


Figura 2: Circuito eléctrico equivalente de una fase y diagrama fasorial de un PMSG.

Si se utiliza un PMSG con el imán permanente montado sobre la superficie del rotor, la distribución del flujo magnético en el rotor se puede considerar senoidal. Con esta suposición, el flujo puede ser totalmente descrito por un vector, y entonces, la fuerza electromotriz  $E$  inducida en el estator por el flujo del imán permanente  $\psi_{PM}$  se puede expresar de la siguiente manera:

$$E = j \cdot \omega_{GEN} \psi_{PM} = j \cdot 2\pi f \psi_{PM} \quad (6)$$

La tensión interna  $E$  depende de  $\omega_{GEN} = p \cdot \omega_{MEC}$ , donde  $p$  es el número de pares de polos y  $\omega_{MEC}$  la velocidad angular de rotación de la turbina. Bajo condiciones de carga, la corriente estática  $I_s$  y la reactancia estática  $X_s$  también originan

campo magnético, el cual se superpone al campo del rotor. Las ecuaciones de tensión del PMSG, expresadas en el marco de referencia dq orientadas al rotor (MRR) (el marco de referencia del eje d está alineado con el vector de flujo del imán permanente  $\psi_{PM}$ ) pueden expresarse como:

$$\begin{aligned} u_{sd} &= R_s i_{sd} - \omega_{gen} \psi_{sq} + \dot{\psi}_{sd} \\ u_{sq} &= R_s i_{sq} - \omega_{gen} \psi_{sd} + \dot{\psi}_{sq} \end{aligned} \quad (7)$$

con las componentes de flujo del estator:

$$\begin{aligned} \psi_{sd} &= L_d i_{sd} + \psi_{PM} \\ \psi_{sq} &= L_q i_{sq} \end{aligned} \quad (8)$$

donde  $u_{sd}$  y  $u_{sq}$  son las tensiones en los bornes del estator,  $i_{sd}$  e  $i_{sq}$  son las corrientes de estator,  $L_d$  y  $L_q$  son las inductancias del estator en el marco de referencia dq. En los estudios de estabilidad, los transitorios  $\dot{\psi}_{sd}$  y  $\dot{\psi}_{sq}$  del estator pueden ser despreciados. Si se asume que el PMSG es una máquina de rotor cilíndrico, lo cual es una buena aproximación para los PMSG's con imanes permanentes montados sobre la superficie del rotor (Spooner y Williamson, 1996), el par eléctrico del generador puede expresarse en el MRR como:

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \text{Im} \left[ \overline{\psi_s^*} i_s \right] = \frac{3}{2} \left[ \psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd} \right] \\ &= \frac{3}{2} \left[ (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} - \psi_{PM} i_{sd} \right] \\ &= \frac{3}{2} \left[ \psi_{PM} i_{sq} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

### C. Sistema PCS

El desempeño de una turbina eólica de velocidad variable acoplada directamente al eje de un PMSG multipolo se optimiza cuando se utilizan inversores activos totalmente controlables (Jöckel et al., 2001), es decir, VSC comandados por señales moduladas por ancho de pulso (PWM) en configuración back-to-back.

Asumiendo una tensión de CC ideal y una modulación PWM ideal, el nivel de tensión de la barra de CC  $U_{DC}$  puede expresarse en función del nivel de tensión de CA del generador o de la red de la siguiente manera:

$$U_{DC} = |U_{AC}| \frac{2\sqrt{2}}{m\sqrt{3}} \quad (10)$$

donde  $m$  ( $0 \leq m < 1$ ) denota el índice de modulación. La tensión de la barra de CC debe ser mayor que la tensión de pico en el secundario del transformador. La tensión  $U_{DC}$  se regula controlando el flujo de potencia hacia la red de CA. Una propiedad importante del convertidor back-to-back es la posibilidad de controlar rápidamente el flujo de potencia. La presencia de un lazo de control rápido en la regulación de la tensión de la barra de CC permite reducir el tamaño del capacitor utilizado en esta barra sin afectar el rendimiento del inversor.

### D. Modelo del Viento

El modelo del viento implementado se describe detalladamente en (Sørensen et al., 2001). Este modelo, en una primera instancia, genera series temporales de viento en base a una densidad espectral de energía del viento dada (espectro de Kaimal) y a una señal de ruido blanco daterminada. En una segunda etapa, la velocidad del viento obtenida es promediada sobre toda el área del rotor, teniendo en cuenta la turbulencia y el efecto de sombreado de la torre.

## SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control de la turbina eólica con PMSG multipolo presenta diversos objetivos de control. Por un lado, tiene como objetivo controlar la potencia reactiva que entrega el generador como la que se inyecta a la red. Por el otro lado, se encarga de controlar la potencia activa entregada por el aerogenerador, tratando de encontrar el punto de operación más eficiente de la turbina eólica, y en el caso de velocidades del viento elevadas, se encarga de proteger al sistema limitando la

potencia activa generada. Este sistema consta de dos niveles de control con distintas dinámicas, los cuales se encuentran ligados estrechamente. Específicamente, contiene un nivel de control para dinámicas lentas (turbina eólica), y otro nivel de control para dinámicas rápidas (control del PMSG). El nivel de control de la turbina eólica se encarga de controlar el ángulo de paso de las palas de la turbina (controlador limitador de potencia) y de controlar la potencia activa de referencia para el nivel de control del PMSG (controlador de velocidad). Por otro lado, el nivel de control de dinámicas rápidas, es decir, el control del PMSG, abarca el control del sistema PCS. Este nivel se divide en dos controladores: el controlador del VSC del lado del generador y el controlador del VSC del lado de la red.

### A. Controlador Limitador de Potencia

El controlador limitador de potencia tiene como tarea incrementar o decrementar el ángulo de paso de las palas de la turbina eólica con el objetivo de limitar la potencia generada a su valor nominal. La Figura 3 muestra el lazo de control del limitador de potencia.

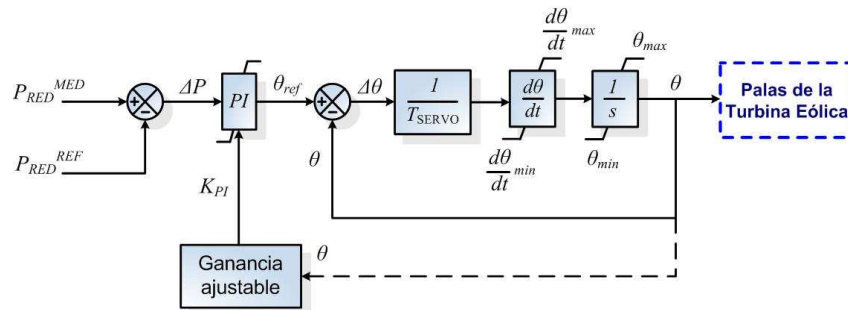


Figura 3: Controlador Limitador de Potencia.

Con el fin de obtener una respuesta más realista del controlador, se tuvieron en cuenta en el modelo la constante de inercia del servomecanismo  $T_{SERVO}$  y los valores extremos que puede alcanzar el ángulo de paso y su gradiente. Como salida del controlador limitador de potencia se obtiene la señal de referencia del ángulo de paso de las palas para el servomecanismo.

### B. Controlador de Velocidad

Este controlador se encarga de mantener el  $\lambda$  en su valor óptimo, y así extraer la máxima potencia del aerogenerador. El  $\lambda_{opt}$  se obtiene adaptando la velocidad del generador en estado estacionario a un valor de referencia  $\omega_{GEN}^{REF}$ . Asimismo, el controlador se ocupa de que el generador opere dentro de los límites de velocidad especificados por el fabricante. La Figura 4 muestra el lazo de control de velocidad. La velocidad de referencia del generador se obtiene de una característica estática predefinida, y corresponde a la velocidad del generador óptima para la potencia activa inyectada por el VSC en la red  $P_{RED}^{MED}$ . El desbalance entre el par de la turbina y el par del generador resultarán en un par acelerante (o desacelerante) que permanecerá hasta que se alcance la velocidad deseada. La salida del controlador de velocidad sirve como valor de potencia de referencia para el controlador del VSC del lado de la red.

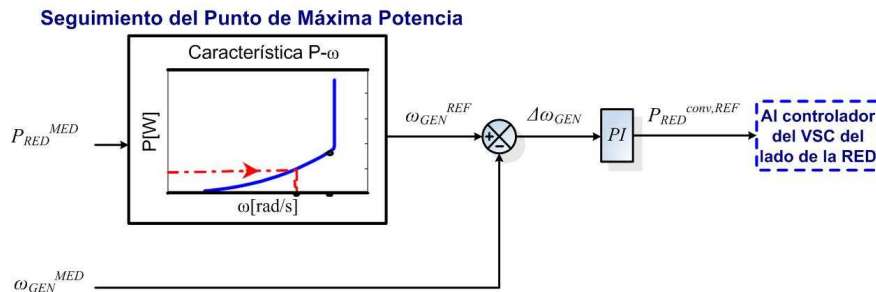


Figura 4: Controlador de Velocidad.

### C. Controlador del VSC del lado del Generador

Diferentes análisis indican que al mantener la tensión del estator en su valor nominal se consigue un mejor aprovechamiento del PMSG (Hansen et al., 2007). Con el fin de garantizar que la potencia activa generada sea transferida a la red, y asumiendo de que no existen pérdidas energéticas en la barra de CC, la tensión de la barra se debe mantener constante. La potencia activa generada, como así también la tensión de la barra de CC, están determinadas solamente por la componente-d de la corriente del estator. Por ende, la tensión de la barra de CC es ajustada a un valor de referencia constante por medio del control de la componente-d de la corriente del estator. La tensión del estator es controlada por la componente-q de la corriente del estator. El control se organiza tal como se ilustra en la Figura 5. Tanto la tensión del estator como la tensión de la barra de CC son controladas a sus valores nominales. El lazo de control de corriente interno provee una señal de control en los ejes d y q ( $P_{md}$  y  $P_{mq}$ ). Esta señal se transforma en una señal PWM para poder comandar al VSC.

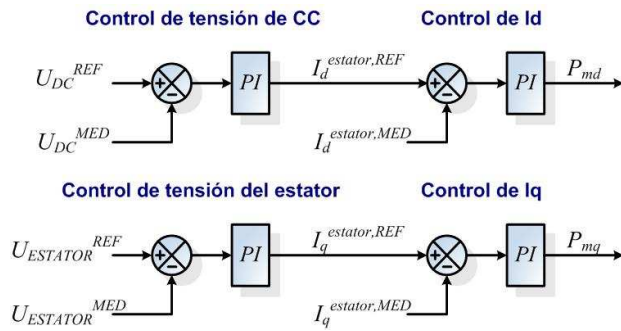


Figura 5: Controlador del VSC del lado del Generador.

#### D. Controlador del VSC del lado de la Red

Al mantener la tensión de la barra de CC en su valor nominal, la potencia activa generada por el PMSG es transferida por medio de la barra de CC directamente al VSC del lado de la red. De esta manera, el VSC del lado de la red es capaz controlar la potencia activa generada. Como resultado de utilizar el PCS, se logran desvincular entre sí las potencias reactivas controladas por cada convertidor. Esto significa que la potencia reactiva suministrada a la red puede ser controlada independientemente por el VSC del lado de la red. El control genérico del VSC del lado de la red se ilustra en la Figura 6.

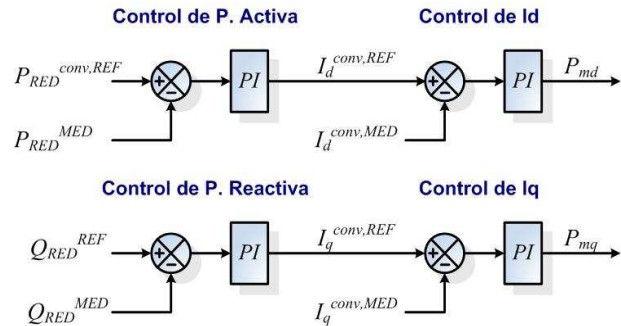


Figura 6: Controlador del VSC del lado de la Red.

El control se realiza en un marco de referencia de tensión orientada a la red. La señal de referencia de potencia activa, como se mencionó anteriormente, es suministrada por el control de velocidad de la turbina eólica. La señal de referencia de potencia reactiva habitualmente se fija en cero, pero también puede ser impuesta por el operador de la red o algún mecanismo de control.

### RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

El sistema completo implementado en MATLAB/Simulink se presenta en la Figura 7.

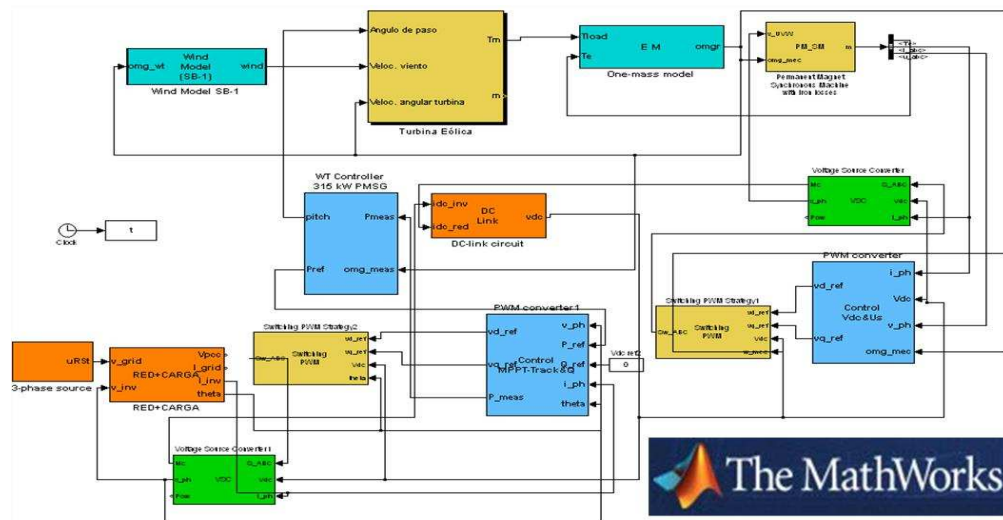


Figura 7: Sistema implementado en MATLAB/Simulink.

Con el fin de evaluar el desempeño dinámico de la turbina eólica de velocidad variable con PMSG multipolo, se llevaron a cabo distintas simulaciones. En primer lugar se examinó el comportamiento del control de la turbina eólica. La Figura 8 muestra claramente como a medida que la potencia se incrementa, el Controlador Limitador de Potencia aumenta el ángulo de paso de las palas de la turbina. Se percibe un aumento brusco cuando se alcanzan los 315 kW (potencia nominal del generador). La respuesta del Controlador de Velocidad, que se presenta en la Figura 9, concuerda con los resultados teóricos esperados, es decir, a medida que aumenta la velocidad de rotación del rotor, la potencia de referencia (óptima) se incrementa.

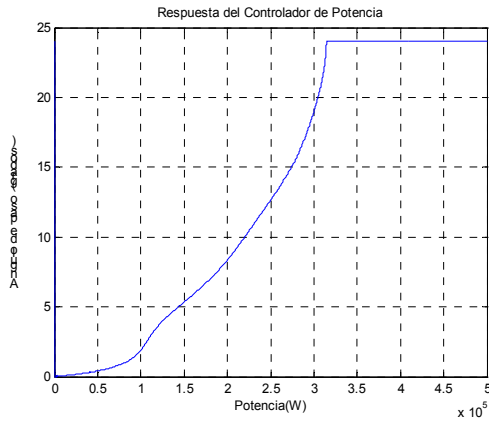


Figura 8: Respuesta del Controlador Limitador de Potencia.

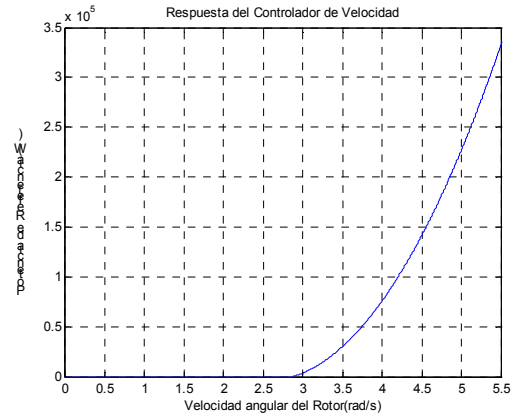


Figura 9: Respuesta del Controlador de Velocidad.

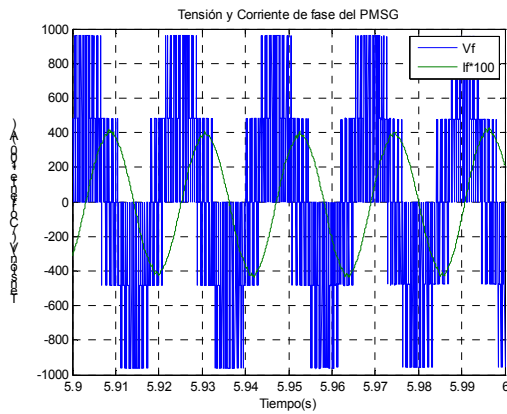


Figura 10: Tensión y Corriente del PMSG.

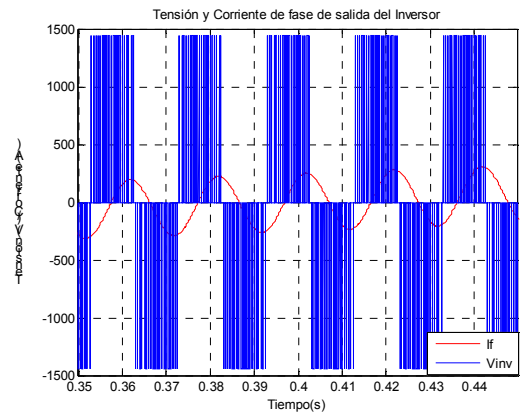


Figura 11: Tensión y Corriente del VSC del lado de la Red.

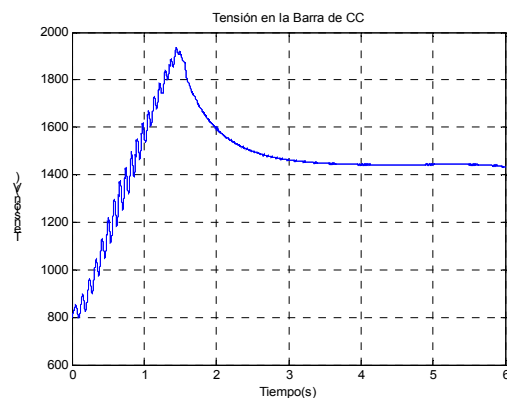


Figura 12: Tensión en la Barra de CC.

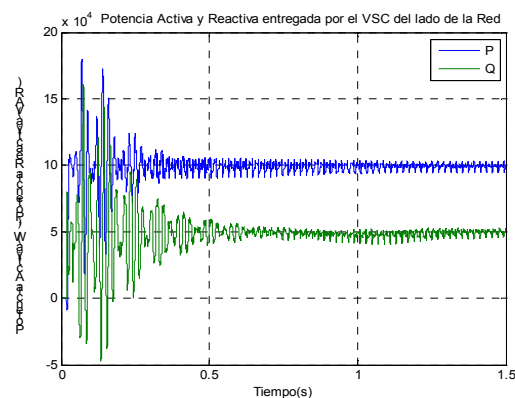


Figura 13: Respuesta del VSC del lado de la Red.

En segundo lugar se examinó el comportamiento del control de los convertidores. Las Figuras 10 y 11 ilustran la tensión y corriente de fase del PMSG multipolo y del VSC del lado de la red respectivamente. Se puede notar en la tensión el efecto de la conmutación de las llaves comandadas por las señales PWM. El Controlador del Convertidor del lado del Generador, además, tiene como objetivo mantener la tensión de la barra de CC en un nivel constante de 1440V. La Figura 12 corrobora el buen desempeño de éste controlador.

Finalmente, la Figura 13 exhibe la respuesta del VSC del lado de la red cuando la velocidad del viento es constante, de 8m/s, velocidad que representaría una potencia activa óptima de generación de aproximadamente unos 100 kW. La referencia de potencia reactiva se fija en 50 kVAR. En la Figura 13 se percibe que las potencias de referencia son alcanzadas rápidamente. Con estos resultados se comprueba la excelente efectividad de los distintos controladores de la turbina eólica de velocidad variable.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo se enfocó en el modelado, control, y análisis de una turbina eólica de velocidad variable con PMSG multipolo. El aerogenerador al no disponer de una caja de engranajes, representa una solución eficiente, de escaso mantenimiento, que puede ser muy beneficiosa para aplicaciones de generación eólica offshore. El control de la turbina eólica se consigue por medio de la coordinación entre el controlador de potencia y el sistema de control del ángulo de paso de las palas. El control del convertidor se encarga de variar la velocidad del rotor para operar en el punto de operación más eficiente de la turbina eólica ante diferentes velocidades del viento. Para velocidades del viento elevadas, el control del ángulo de paso de las palas controla la velocidad del generador e indirectamente la potencia de salida mediante el convertidor, el cual se encarga de que la potencia generada no supere su valor nominal. Los resultados de las simulaciones demuestran que el aerogenerador, con la asistencia de los controladores, es capaz de operar satisfactoriamente dentro de un rango de condiciones normales de trabajo. La estrategia de control de los controladores, además, permite el control independiente de la potencia activa y reactiva. Finalmente se puede concluir, que la turbina eólica con PMSG multipolo puede operar de la misma manera que una planta de energía convencional.

## REFERENCIAS

- Chinchilla M., Arnaltes S. y Burgos J. (2006). Control of permanent magnet generators applied to variable-speed wind energy systems connected to the grid. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 21, 1, 130-135.
- Grauers A. (1996). Efficiency of three wind energy generator system. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 11, 3, 650-657.
- Hansen A.D., Iov F., Sørensen P., Cutululis N., Jauch C., Blaabjerg F. (2007). Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DIgSILENT. *Risø-R-1400*, 2ª edición, 189 pp. Risø National Laboratory, Denmark.
- Heier S. (1998). *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, Cap 2. Wiley & Sons, Chichester, England.
- Jöckel S., Hagenkorf B., Hartkopf T. y Schneider H. (2001). Direct-Drive Synchronous Generator System For Offshore Wind Farms with Active Drive Train Damping by Blade Pitching. *European Wind Energy Conference EWEC 2001*, Copenhagen, Denmark, 991-994.
- Pena R., Clare J.C. y Asher G.M. (1996). Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation. *IEEE Proc. Electric Power Appl.* 143, 3, 231-241.
- Slootweg J., De Haan S., Polinder H. y Kling W. (2003). General Model for Representing Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations. *IEEE Transactions on Power Systems* 18, 1, 144-151.
- Sørensen P., Hansen A., Rosas P. (2001). Wind models for prediction of power fluctuations from wind farms. *Journal of Wind Engineering - Proceedings the Fifth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWEV) Kyoto, Japan*, 89, 9-18.
- Spooner E. y Williamson A. (1996). Direct coupled, permanent magnet generators for wind turbine applications. *IEE Proceedings - Electric Power Applications* 143, 1-8.

## ABSTRACT

This work presents the modeling, simulation and analysis of a grid-connected wind energy conversion system (WECS). The system consists of a variable speed wind turbine, a multipole permanent magnet synchronous generator (PMSG) and an electronic power converter system (PCS). The turbine shaft is directly coupled to the multipole PMSG shaft, while the generator is grid connected through the PCS, which is composed of two level voltage source converters (VSC) operating as back-to-back. The dynamic model of the system and its control strategy are implemented in the simulation tool MATLAB / Simulink. Simulation results show that the system model is capable of operating at its maximum efficiency point, and also that it is able to control independently the active and reactive power injected to the grid.

**Keywords:** Wind Energy Conversion Systems (WECS), Multipole Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG), Electronic Power Converter System (PCS), Back-to-Back Voltage Source Converter (VSC).