

## **ESTRATEGIAS DE CONTROL DE TORQUE EN GENERADORES DE IMANES PERMANENTES PARA TURBINAS EÓLICAS**

**G. Catuogno<sup>1</sup>, C. Ruschetti<sup>1</sup>, C. De Angelo<sup>2</sup>, D. Forchetti**  
Grupo de Electrónica Aplicada (GEA), Facultad de Ingeniería,  
Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nac.#36 Km.601,  
X5804BYA Río Cuarto, Córdoba, Argentina.  
gcatuogno@ing.unrc.edu.ar

**RESUMEN:** En este trabajo se comparan dos técnicas de control para generadores síncronos de imanes permanentes con FEM arbitraria, utilizados en turbinas eólicas. Por un lado se analiza la estrategia convencional o también llamada 6 pulsos, que es ampliamente utilizada en control de máquinas de imanes permanentes. La segunda estrategia propone un control mediante la teoría de potencia activa-reactiva instantánea que permite la reducción de ondulaciones en el torque del generador.

**Palabras Claves:** energía eólica, control de generador, máquinas sincrónicas

### **INTRODUCCIÓN**

Durante la última década la tecnología asociada a la industria eólica ha evolucionado enormemente mejorando la calidad de la energía eléctrica entregada a las redes interconectadas, aumentando la confiabilidad de los sistemas de generación, y reduciendo el costo de cada kWh. El parque eólico mundial instalado ha crecido a una tasa promedio del 27% anual durante los últimos 10 años. Muchos países ya tienen importantes industrias eólicas que producen y exportan equipamiento, prestan servicios o generan electricidad a partir del viento (Soares et al. 2009).

En lo que respecta a los generadores impulsados por turbinas eólicas, las máquinas de imanes permanentes están siendo utilizadas cada vez en mayor medida y para potencias más grandes. Esto es debido principalmente al desarrollo reciente de imanes de alta energía, como por ejemplo los de Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB) o Samario-Cobalto (SmCo).

Las Máquinas Síncronas de Imanes Permanentes (MSIP) poseen, en general, un alto rendimiento y una alta densidad de potencia. Estas máquinas pueden construirse con un elevado número de polos para trabajar a baja velocidad, en sistemas donde es necesario el acoplamiento directo (sin caja reductora) para operar a velocidades reducidas. Por estas razones, este tipo de máquinas es altamente utilizado en sistemas de generación eólica de pequeña potencia (Chen & Nayar 1998; Wu et al. 2000).

En función de la forma de onda de la Fuerza Electro- Motriz (FEM) inducida de la maquina, las MSIP se dividen en dos clases fundamentales (Jahns & Soong 1996; Leidhold & Garcia 2000):

MSIP con FEM inducida Senoidal.

MSIP con FEM inducida Trapezoidal.

Las MSIP de FEM senoidal pueden construirse utilizando bobinados distribuidos en el estator y distribución senoidal de flujo en el rotor, lo cual implica un cierto grado de complejidad constructiva, o bien utilizando paso fraccionario y bobinados concentrados, lo cual es más sencillo. En este tipo de máquinas, la corriente de estator debe ser senoidal para producir torque electromagnético constante (sin ondulaciones), siendo necesario conocer la posición del rotor con una elevada resolución, lo cual implica mayores costos totales del sistema.

Las MSIP de FEM trapezoidal generalmente tienen bobinados concentrados y una distribución triangular del flujo en el rotor. Como principal ventaja poseen una menor complejidad en el esquema de control debido a que no es necesario conocer la posición angular con una elevada resolución. En este tipo de máquina, el control de torque se realiza, clásicamente, imponiendo corriente constante en el intervalo en que la FEM también lo es. Sin embargo, en la práctica, es muy difícil lograr la distribución trapezoidal de la FEM, por lo que este tipo de estrategias presentan ondulaciones de torque electromagnético considerables que deterioran el desempeño del sistema.

Las ondulaciones no deseadas en el torque, pueden originarse por diferentes razones:

<sup>1</sup> Becario del CONICET

<sup>2</sup> Investigador del CONICET

- distorsión de la FEM debido a la configuración geométrica de la máquina,
- distorsión en la corriente de carga de la máquina, debido a la conmutación del inversor,
- retardos o baja resolución en la determinación de la posición del rotor,
- variación de la reluctancia magnética del rotor, debida a la existencia de ranuras o asimetrías constructivas de la máquina.

En particular, el torque desarrollado por la MSIP se puede dividir en dos componentes fundamentales,

1. Torque electromagnético: es el torque producido por la interacción de las corrientes del estator y el flujo del rotor.
2. Torque de reluctancia:
  - a) torque producido por la interacción entre la corriente del estator y las variaciones angulares de reluctancia,
  - b) torque producido por la interacción del flujo del rotor con las variaciones angulares de reluctancia.

La suma de las ondulaciones de torque provenientes de 1) y 2a) es llamada comúnmente “*Ripple* de Torque”, y la ondulación de torque introducida por 2b) es llamada comúnmente “*Cogging Torque*” (Jahns 1994).

En general, el *cogging torque* no depende de la corriente del estator, posee valor medio nulo y puede reducirse durante la etapa de diseño, mientras que el *ripple* de torque puede expresarse completamente en términos de la FEM inducida y la corriente consumida por la máquina.

Conociendo la FEM de la máquina es posible construir una estrategia de control que no produzca ondulaciones de torque en el eje de la máquina. Este tipo de estrategias es fundamental para prolongar la vida de los elementos constructivos del sistema, ya que disminuye considerablemente las solicitaciones mecánicas y envejecimiento por vibración a la que se ven sometidos estos elementos durante el funcionamiento continuo del sistema.

En este trabajo analiza el desempeño de dos propuestas de control para generadores utilizados en sistemas eólicos. En primera instancia se analiza una estrategia convencional, conmutación en seis pulsos, que es ampliamente utilizada en controles de generadores síncronos con forma de onda trapezoidal. En segunda instancia se analiza el desempeño del sistema utilizando una estrategia de control basada en la teoría de potencia Activa-Reactiva Instantánea (Akagi et al. 1983) que utiliza la información de la FEM en función del ángulo del rotor para obtener la corriente de estator necesaria para lograr torque electromagnético constante en el eje del rotor (Ruschetti et al. 2009). Esta estrategia tiene como objetivo principal reducir las ondulaciones en el torque desarrolladas por la máquina y en segundo lugar, disminuir el reactivo absorbido por los bobinados de la maquina.

La información de la FEM inducida en el generador puede conocerse a partir de un ensayo en vacío. Debido a que actualmente no se dispone de un GSIP para realizar este tipo de ensayos se desarrolló un modelo que, utilizando el Método de los Elementos Finitos (MEF), permite obtener la FEM de la máquina en función de la posición del rotor. Este método permite considerar las propiedades del material magnético, tales como no linealidad y anisotropía, distribución geométrica de los bobinados, la geometría de la máquina, como así también la inserción de condiciones en las fronteras (Elosegui et al. 2007).

El trabajo se organiza de la siguiente forma: primero se presenta un modelo simplificado del GSIP, luego se introducen las estrategias de control mencionadas para un GSIP con FEM de forma arbitraria. A continuación se presentan resultados de simulación que muestran el desempeño de la estrategia de control propuesta. Finalmente se dan las conclusiones.

## MODELO DEL GENERADOR

A continuación se desarrolla el modelo del GSIP con FEM arbitraria de flujo radial, con las siguientes características:

- Rotor exterior: los imanes se encuentran pegados sobre la carcasa exterior de la máquina.
- Elevado número de polos: lo que permite el acoplamiento directo en aplicaciones de baja velocidad.

El modelo del GSIP en coordenadas  $abc$  se puede escribir como (Krishnan 2001; De Angelo et al. 2005; De Angelo et al. 2006),

$$v_{abc} = r_s \dot{i}_{abc} + L_s \frac{d}{dt} \dot{i}_{abc} + e_{abc}, \quad (1)$$

donde  $v_{abc}$ ,  $\dot{i}_{abc}$ ,  $e_{abc}$  son las tensiones, corrientes y FEM de estator respectivamente y  $r_s$  es la resistencia de los bobinados del estator y  $L_s$  es la inductancia del estator. Las componentes de  $e_{abc}$  se definen como,

$$e_i = \frac{d\psi_i}{dt} = \frac{d\psi_i}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \varphi_i(\theta)\omega, \quad (i = a, b, c), \quad (2)$$

donde  $\Psi_i$  son los flujos enlazados por el estator de la máquina,  $\omega$  es la velocidad angular del rotor y  $\varphi_i$  las funciones que determinan la forma de onda de la FEM inducida, obtenidas como la derivada del flujo respecto de la posición angular del rotor ( $d\Psi_i / d\theta = \varphi_i(\theta)$ ).

Estas funciones dependen de la configuración geométrica de los bobinados del estator, de la forma y disposición de los imanes y del núcleo magnético del estator.

Con el objetivo de simplificar las ecuaciones del modelo empleado se utiliza la transformada de Clarke. Si se considera un sistema sin neutro, la transformada se puede escribir como,

$$f_{\alpha\beta} = K f_{abc}, \quad (3)$$

con

$$K = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix},$$

donde  $f$  es una variable genérica que puede ser la corriente, la tensión, el flujo o la FEM del estator.

En coordenadas  $\alpha\beta$ , el modelo del GSIP queda descrito por,

$$v_{\alpha\beta} = r_s i_{\alpha\beta} + L_s \frac{d}{dt} i_{\alpha\beta} + e_{\alpha\beta}, \quad (5)$$

donde  $v_{\alpha\beta}$ ,  $i_{\alpha\beta}$  y  $e_{\alpha\beta}$  son las tensiones, corrientes y FEM del estator referidas a los ejes coordenados  $\alpha\beta$  respectivamente. En este sistema de coordenadas, el GSIP puede representarse por medio del circuito equivalente que se muestra en la Figura 1. De la misma forma, la ecuación (2) que define las FEM se pueden escribir en coordenadas  $\alpha\beta$  como,

$$e_{\alpha\beta} = \omega [\varphi_\alpha(\theta), \varphi_\beta(\theta)]^T \quad (6)$$

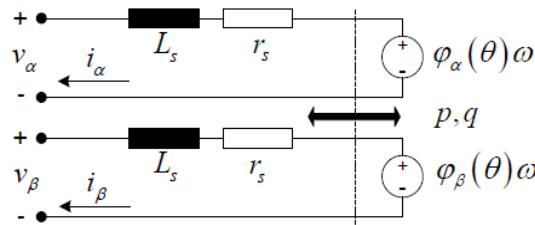


Figura 1: Circuito equivalente del GSIP

#### Método de Elementos Finitos (MEF)

Para obtener la FEM inducida en los bobinados se utilizó un modelo en 2D de la máquina, en el cual se realizó un mallado con elementos triangulares. En la Figura 2 se muestra la mitad del modelo utilizado. La malla utilizada es fina, sobre todo en los lugares donde la variación del campo magnético es más marcada, para obtener un cálculo preciso.

Para efectuar el análisis por el MEF se utilizó el paquete de software MAXWELL/ANSOFT, que permite realizar la simulación de estructuras considerando la rotación, de forma tal que es posible evaluar en cada uno de los pasos de cálculo el flujo concatenado por los bobinados. Dicho software realiza un refinamiento de la malla para obtener el resultado respetando el error definido. Antes de comenzar la simulación con rotación, el software incorpora elementos triangulares de segundo orden con el objetivo de mejorar la transición entre posiciones calculadas. Para la simulación se impuso como datos de entrada la velocidad nominal de la máquina, como un parámetro constante, no considerando la dinámica mecánica. Como otros parámetros de entrada se fijaron el error máximo entre iteraciones, el tiempo total de análisis y el paso de cálculo, de manera tal que la forma de onda obtenida tuviese una buena resolución. En función del dato temporal de la FEM inducida en los bobinados, obtenida de la simulación, y el dato de la velocidad impuesta, se obtuvo la variable  $\varphi_{abc}(\theta)$  y a partir de ésta, aplicando la transformada de Clarke, la variable  $\varphi_{\alpha\beta}(\theta)$ .

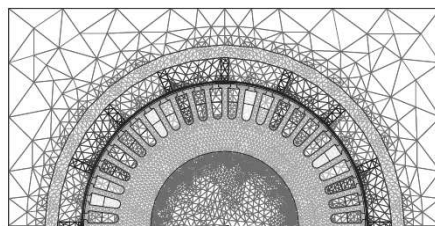


Figura 2: Esquema 2D de la maquina simulada

### PROPUESTAS DE CONTROL

En esta sección se analizan las dos propuestas de control: en primera instancia el control convencional, ampliamente utilizado en generadores síncronos y en segunda instancia un control basado en la potencia activa y reactiva instantánea, que es aplicable a máquinas con FEM con forma de onda arbitraria.

#### Control Convencional (Seis pulsos)

En las máquinas trapezoidales la corriente necesaria para generar torque constante se puede lograr fácilmente con un inversor fuente de corriente de 6 pulsos. Para esto sólo es necesario conocer en qué sector angular de  $60^\circ / n_p$  se encuentra el rotor, donde  $n_p$  es el número de pares de polos. En este esquema se controla la corriente que circula por los terminales del motor, excitando un par simultáneamente y manteniendo el tercer terminal desconectado. Sucesivamente se va alternando el par de terminales a excitar hasta completar las seis combinaciones posibles.

Una técnica muy frecuente para realizar este control es el que utilizan sensores de efecto Hall para medir el flujo en el entrehierro de la máquina, ya que estos sensores son simples y de bajo costo (Niasar et al. 2007). Esta técnica consiste en ubicar los sensores de efecto Hall en el estator del generador, separados  $120^\circ$  entre sí. Cuando el rotor gira, se obtienen las señales como se muestra en la Figura 3(a), las que serán utilizadas mediante una tabla de verdad para determinar el conjunto de terminales a excitar (Figura 3(b)).

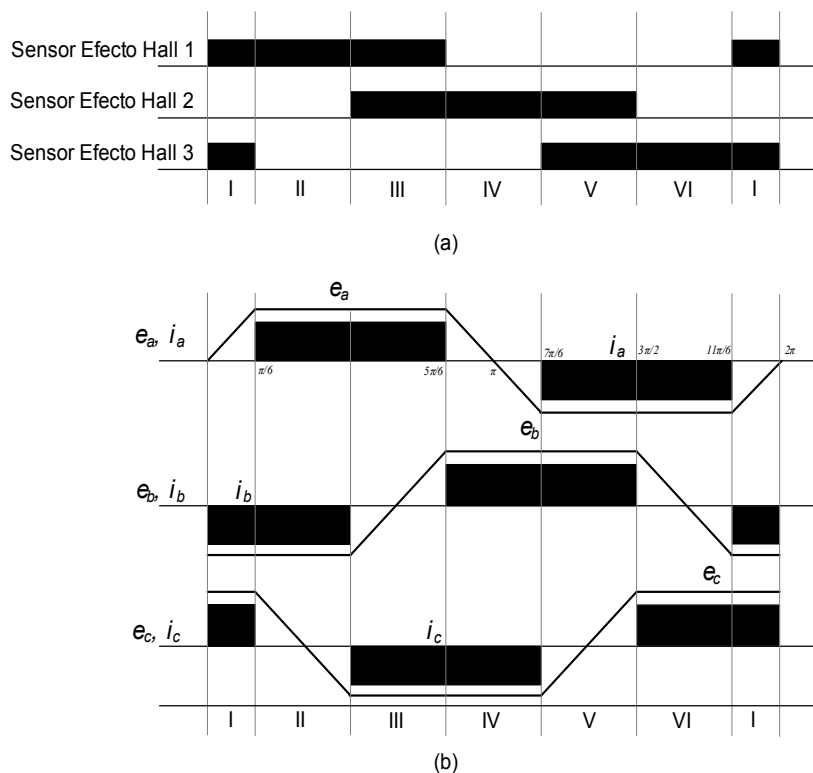


Figura 3: (a) Flujos medidos por los sensores efecto Hall. (b) Corrientes de referencia.

Como se observa en la Figura 3(b), en el control convencional, para todo instante de tiempo sólo dos fases participan en la producción de energía, mientras que la restante está inactiva debido a que el producto de corriente-flujo es nulo. Considerando las formas de onda de la gráfica, puede deducirse que el torque instantáneo es:

$$T_e = 2.i.\varphi, \quad (7)$$

donde  $\varphi$  amplitud de las derivadas del flujo con respecto a la posición del rotor (Leidhold et al. 1999).

#### *Control basado en la teoría de la potencia activa-reactiva instantánea*

En esta sección se desarrolla una estrategia de control basada en la teoría de potencia activa y reactiva instantánea para controlar el torque del GSIP con FEM arbitraria, que permite reducir las oscilaciones de torque y las pérdidas por efecto Joule en los bobinados.

La teoría de potencia activa-reactiva instantánea define la potencia activa ( $p$ ) y la potencia reactiva ( $q$ ) como,

$$\begin{aligned} p &= \bar{p} + \tilde{p}, \\ q &= \bar{q} + \tilde{q}, \end{aligned} \quad (8)$$

donde,  $\bar{p}$  y  $\tilde{p}$  representan las componentes continua y oscilatoria de  $p$ , mientras que  $\bar{q}$  y  $\tilde{q}$  representan la componente continua y oscilatoria de  $q$  respectivamente. Las potencias activa y reactiva instantáneas transferidas al entrehierro del GSIP, pueden expresarse como,

$$\begin{aligned} p &= e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta, \\ q &= e_\alpha i_\beta - e_\beta i_\alpha. \end{aligned} \quad (9)$$

El torque electromagnético desarrollado en el entrehierro del generador ( $T_e$ ) puede escribirse como,

$$T_e = p / \omega, \quad (10)$$

y en función del torque de referencia deseado ( $T_e^*$ ) es posible despejar la potencia activa de referencia ( $p^*$ ) como,

$$p^* = \bar{p}^* = T_e^* \omega. \quad (11)$$

La potencia reactiva  $q$ , calculada como se hace en la ecuación (9) es la energía reactiva entretenida en el entrehierro del GSIP. Debido que el reactivo necesario para la magnetización de la máquina lo proveen los imanes del rotor, es posible disminuir las pérdidas por efecto Joule en la resistencia del estator, anulando la potencia reactiva en el entrehierro.

$$q^* = \bar{q}^* + \tilde{q}^* = 0 \quad (12)$$

Para lograr el control de potencia activa y reactiva instantánea definido en las ecuaciones (9) y (10), es posible alimentar el GSIP con un convertidor, sobre el que se cierra un lazo de control de corriente, donde las referencias de corrientes se pueden obtener a partir de la ecuación (9) como,

$$i_\alpha^* = \frac{p^* e_\alpha - q^* e_\beta}{(e_\alpha^2 + e_\beta^2)} \quad (13)$$

$$i_\beta^* = \frac{q^* e_\alpha + p^* e_\beta}{(e_\alpha^2 + e_\beta^2)} \quad (14)$$

A partir de las ecuaciones (13) y (14) se pueden obtener las referencias de corriente necesarias para implementar la estrategia de control propuesta.

$$i_\alpha^* = \frac{T_e^* e_\alpha}{(e_\alpha^2 + e_\beta^2)} \omega \quad (15)$$

$$i_\alpha^* = \frac{T_e^* e_\beta}{(e_\alpha^2 + e_\beta^2)} \omega \quad (16)$$

## COMPARACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS MEDIANTE SIMULACIÓN

Con el objetivo de comparar las estrategias de control, se realizaron simulaciones para dos casos:

1. generador conectado a un convertidor, generando con el esquema de control de 6 pulsos (Figura 4).
2. generador conectado a un convertidor, generando con el esquema de control de la potencia activa-reactiva instantánea (Figura 5).

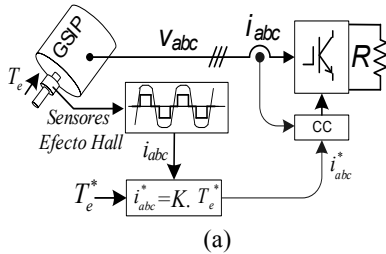


Figura 4: Estrategia convencional.

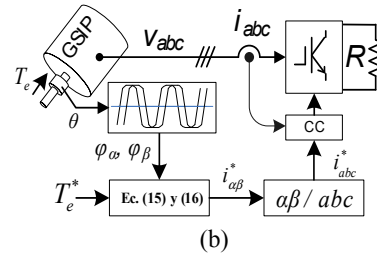


Figura 5: Estrategia teoría pq.

Aún cuando el generador se diseñe para obtener FEM trapezoidal, en la práctica, la geometría del estator y la distribución de las líneas de flujo magnético en el entrehierro producen que la FEM no sea totalmente trapezoidal. Por este motivo, para comprobar el desempeño de ambas estrategias se realizaron simulaciones utilizando un modelo de GSIP que emplea la FEM obtenida por el MEF (Figura 6), en base al diseño de un generador real cuyos parámetros se listan en la Tabla 1.

Como se observa en los diagramas de las Figuras 4 y 5, en ambas estrategias las corrientes de estator se controlan por medio de un convertidor fuente de tensión (Voltage Source Inverter, VSI) con un lazo de control de corriente tipo bang-bang sobre las fases del estator del GSIP. La diferencia de las estrategias se encuentra en la generación de las corrientes de referencia, debido a que mientras el control convencional utiliza la información de los sensores efecto Hall para generarlas, en el control pq se determinan a partir de (15)-(16), utilizando la FEM obtenida por el MEF que es almacenada en una tabla.

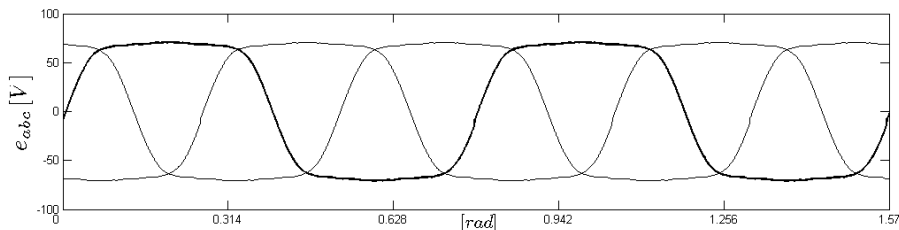


Figura 6: FEM con forma de onda arbitraria obtenida mediante MEF

Para las siguientes subfiguras se muestran los resultados de simulación obtenidos, (a) con la estrategia convencional y (b) los obtenidos con la estrategia de teoría pq.

En la Figura 7 y 8 se muestran las corrientes en ambos casos, de referencia y medidas respectivamente. Para el primer caso se observa que la corriente de referencia propone una corriente constante en el instante en el que la FEM arbitraria es aproximadamente constante, y en la corriente medida se observan unos picos (*spikes*) que son generados debido a que las corrientes no se anulan instantáneamente ya que poseen una constante de tiempo propia de la dinámica del sistema. Para el segundo caso se observa que el control propone la corriente de referencia necesaria para cumplir con las consignas de potencia activa constante y potencia reactiva nula.

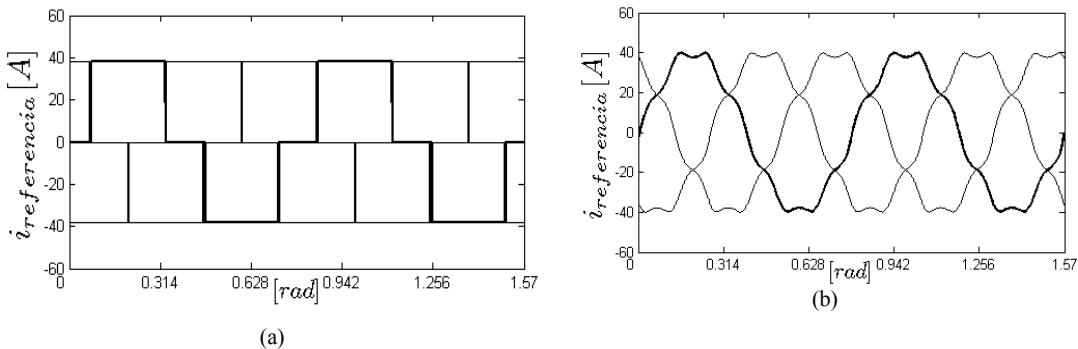


Figura 7: Corrientes de referencia, (a) Estrategia Convencional; (b) Estrategia teoría pq

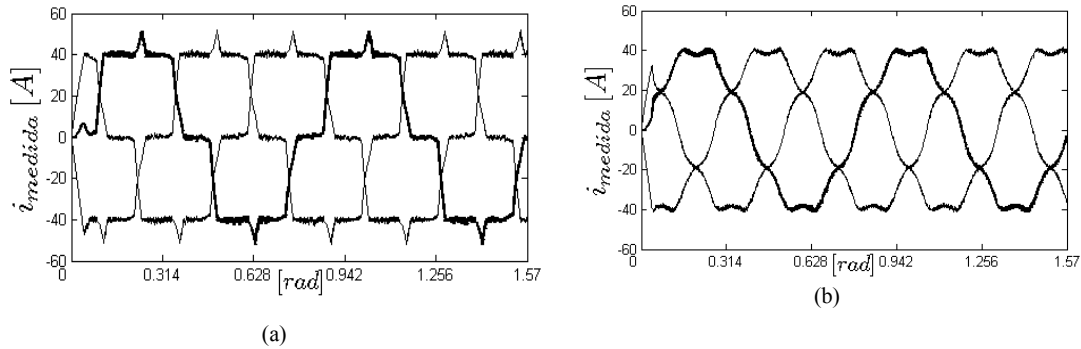


Figura 8: Corrientes medidas, (a) Estrategia Convencional; (b) Estrategia teoría pq

En la Figura 9 se muestran las potencias activa y reactivas; se puede ver que para el caso del control convencional la potencia activa posee una pulsación debido los picos que contiene la corriente y la potencia reactiva es oscilante y llega a valores de 0.5 p.u. Para el caso (b) se ve que la estrategia cumple con las consignas de potencia activa constante y potencia reactiva nula. El torque para ambas estrategias se muestra en la Figura 10; se observa que para el caso (a) contiene una pulsación de seis veces la velocidad del generador mientras que para el caso (b) es constante.

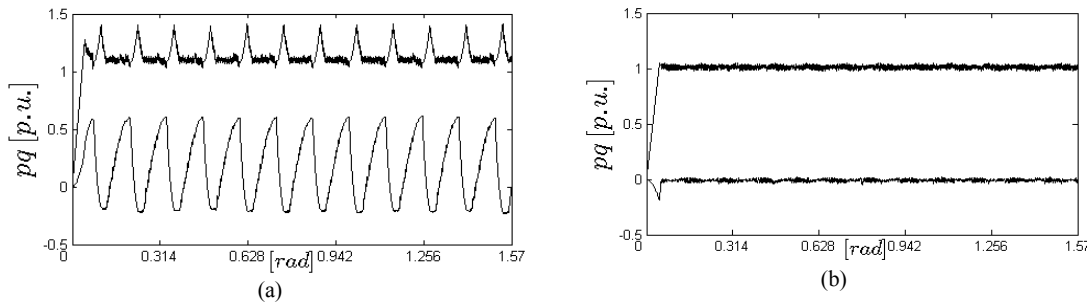


Figura 9: Potencias activa y reactiva , (a) Estrategia Convencional; (b) Estrategia teoría pq

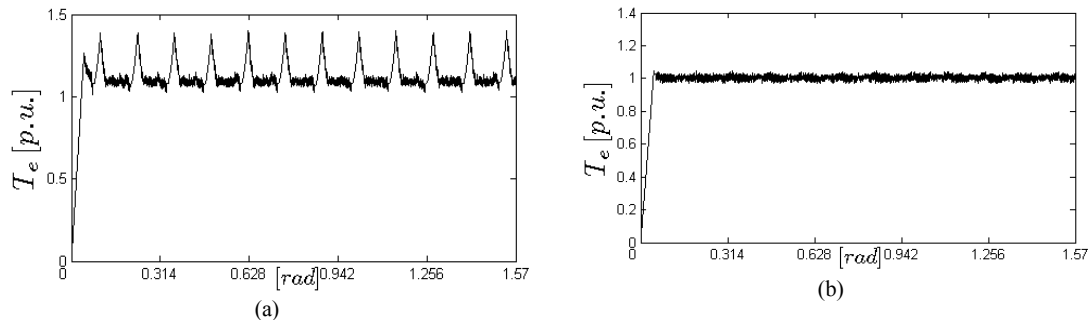


Figura 10: Torque electromagnético, (a) Estrategia Convencional; (b) Estrategia teoría pq

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron y analizaron dos estrategias de control para un generador sincrónico de imanes permanentes con FEM inducida arbitraria utilizados en turbinas eólicas, el control convencional o 6 pulsos y el control basado en la teoría de potencia activa y reactiva instantánea.

De los resultados de simulación obtenidos se puede ver que la segunda estrategia de control elimina completamente las ondulaciones en el torque electromagnético de la máquina. Esto es importante para evitar fatiga mecánica de los componentes y para aumentar la eficiencia en el proceso de conversión de energía del sistema.

Se observa además que esta estrategia de control logra reducir el reactivo absorbido por los bobinados del estator, sin disminución del desempeño dinámico.

Parámetro	Valor
Potencia	5 kW
Numero de polos	16
$\omega_n$	600 rpm
$V_s$	48V
$r_s$	0.215 $\Omega$
$L_s$	1.12mHy

Tabla: Parámetros nominales del GSIP

## REFERENCIAS

- Akagi, H., Kanazawa, Y. & Nabae, A., 1983. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. In *Proc. Int. Power Electronic Conf. (IIEE IPEC)*. Tokyo, Japan, pp. 1375-1386.
- Chen, J. & Nayar, C., 1998. A Direct-coupled, Wind-driven Permanent Magnet Generator. *Renewable Energy*, 542-547.
- De Angelo, C. et al., 2005. A Rotor Position and Speed Observer for Permanent-Magnet Motors With Nonsinusoidal EMF Waveform. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(3), 807-813.
- De Angelo, C. et al., 2006. Mechanical Sensorless Speed Control of Permanent-Magnet AC Motors Driving an Unknown Load. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(2), 406-414.
- Elosegui, I. et al., 2007. Analytical design of synchronous permanent magnet motor/generators. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1165-1170.
- Jahns, T.M. & Soong, W.L., 1996. Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives -a Review. *Transactions on Industrial Electronics*, 2, 321-330.
- Jahns, T.M., 1994. Motion Control with Permanent-Magnet. , 82(8), 1241-1252.
- Krishnan, R., 2001. *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and Control*, New York: Prentice Hall.
- Leidhold, R. & Garcia, G., 2000. Pmac motor control strategy, based on the instantaneous active and reactive power, for ripple-torque and copper--losses minimization. In *Industrial Electronics Society, IECON 2000*. pp. vol. 2 1401-1405.
- Leidhold, R. et al., 1999. ACCIONAMIENTO PARA TRACCIÓN ELECTRICA: CONTROLADOR Y RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL ACCIONAMIENTO. In *RPIC99 VIII Reunion de Trabajo de la Informacion y Control*. Mar del Plata.
- Niasar, A.H., Vahedi, A. & Moghbeli, H., 2007. Torque Control of Brushless DC Motor Drive based on DSP Technology 1. *System*, 524-528.
- Ruschetti, C. et al., 2009. Control de Torque para GSIP basado en la Teoría de Potencia Activa-Reactiva Instantánea. In *RPIC2009 XIII Reunion de Trabajo de la Informacion y Control*. Rosario.
- Sebastian, T. & Gangla, V., 1996. Analysis of Induced EMF Waveforms and torque ripple in a brushless permanent magnet machine. *IEEE Tran. on Industrial Applications*, 32(1), 195-200.
- Soares, M., Kind, S. & Fernández, O.H., 2009. Estado de la Industria Eólica en Argentina 2009.
- Wu, W. et al., 2000. A Low-Speed, High-Torque, Direct-Drive Permanent Magnet Generator For Wind Thrbines. In *Renewable Energy*. pp. 147-154.

**ABSTRACT:** A comparison of two control techniques for permanent magnet synchronous generators used in wind turbines is presented. The 6-pulses strategy, widely used in permanent magnet machines, is compared with a strategy based on the p-q theory, which allows a torque-ripple reduction.

**Keywords:** wind energy, generator control, synchronous machines