

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CONTROL PARA UN AEROGENERADOR SINCRÓNICO DE IMANES PERMANENTES (PMSG)

DESIGN AND SIMULATION OF A CONTROL FOR A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS EOLIC GENERATOR (PMSG)

PhD. Gabriel Jaime Correa-Henao

Fundación Universitaria Luis Amigó.

Facultad de Ingenierías, Transversal 51,4#67B 90,

Medellín, Colombia

gabriel.correahe@amigo.edu.co

(Recibido el 12-01-2014. Aprobado el 20-03-2014)

Resumen: esta contribución técnica busca profundizar en el análisis y simulación de un pequeño aerogenerador doméstico, de tipo síncrono de imanes permanentes (PMSG) de 4KW, de baja velocidad, y de voltaje para conexión a aplicaciones en el hogar ($V_L = 381V$). Se presenta un sistema que consta de una turbina de viento, un generador de imanes permanentes, un rectificador trifásico de diodos, un convertidor tipo Boost DC y un convertidor inversor, con sus respectivos controles. La contribución técnica se ilustra mediante la utilización de un aerogenerador PMSG de baja velocidad, dado que permite prescindir de la caja mecánica de cambios, lo cual otorga una buena eficiencia en la conversión energética. La plataforma de simulación se efectúa a través de herramientas informáticas de amplia difusión en el sector eléctrico: PSIM para la conexión a la red trifásica de la máquina.

La contribución técnica pretender presentar la ventaja de utilización de este tipo de aerogeneradores, los cuales se están convirtiendo en una alternativa muy importante en los sistemas de generación distribuida, toda vez que en las diversas configuraciones, el generador síncrono se puede ubicar a baja altura del suelo, facilitando su instalación y mantenimiento.

Palabras clave: generador Síncrono de Imanes Permanentes, Punto de Máxima Potencia, Generación Distribuida.

Abstract: this technical contribution looks for deeper analysis on simulations around domestic eolic permanent magnet synchronous generators (PSGM), with features of low velocity, set at 4KW with applications to domestic uses ($V_L = 381V$). The shown system is conformed by a wind turbine, a permanent magnet generator, a three-phase diode rectifier, a DC boost converter and an inverter converter, along with their respective controls. The technical contribution is illustrated with a PSMG eolic generator since it does not need the use of mechanical gear shafts, which provides a much better energetic efficiency. The simulation is performed on software tools widely accepted in electric projects: PSIM to establish the connection to three phase circuits.

The technical contribution also demonstrates the advantages on the use of these kind of generators, which are now becoming in an important alternative within distributed generation, since this synchronous generator may be placed at low heights from the ground, which eases its installation and maintenance.

Keywords: permanent Magnet Synchronous Generator, Maximum Power Set-Point, Distributed Generator.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las nuevas tecnologías de generación eléctrica, con generadores de velocidad variable, tradicionalmente se ha fundamentado en máquinas asíncronas de rotor bobinado y de jaula de ardilla. Este tipo de aerogeneradores comparten cerca del 99% del mercado de generadores de velocidad variable (Wallace & Rodríguez, 2000). Sin embargo, el desarrollo de los nuevos aerogeneradores síncronos de imanes permanentes, se proyectan como una alternativa efectiva y de fácil implementación en los nuevos parques eólicos (Wikipedia, 2013).

Las máquinas de imán permanente ganan mayor popularidad, por su extensivo uso en servomotores, accionamientos eléctricos para posicionamiento, robótica, máquinas herramienta, ascensores, etc. Se han llegado a construir máquinas de una potencia por encima de 1 MW, por ejemplo, para el accionamiento de submarinos.

Por otro lado, las máquinas síncronas tradicionales están formadas por dos bobinados: el devanado inductor, alimentado en CC y el devanado de inducido en CA, donde el funcionamiento de la máquina como motor y generador se produce por la interacción del campo magnético creado por ambos bobinados (Wallace & Rodríguez, 2000).

Sin embargo, en el caso de las máquinas de imanes permanentes, se trata de utilizar materiales de alto campo magnético (generalmente, que emiten un campo mayor a 1 Tesla). Estas máquinas también se conocen como *brushless* (Sin escobillas, ni anillos rasantes). Existen dos tipos de máquinas, que se clasifican según donde estén montados los imanes (García-Gracia, Paz Comech, Sallán, López-Andía, & Alonso, 2009; Wikipedia, 2013):

- *PMSM con imanes montados en la superficie del rotor (Surface-mounted magnets)*: En el caso que los imanes van montados (pegados o zunchados) en la superficie del rotor estos, por el espacio que ocupan, obligan a tener un entrehierro relativamente grande; además los imanes cerámicos tienen efectos de saliencia despreciables. En estos casos no existe devanado amortiguador.

El gran entrehierro hace que el flujo de la reacción de armadura (*RA*) tenga efectos atenuados sobre el rotor, es decir, la inductancia sincrónica L_d es pequeña pues tiene una componente de reacción de armadura L_d pequeña

y por consiguiente los efectos de la *RA* son muy atenuados. Por otra parte se deduce que el gran entrehierro resulta en una constante de tiempo eléctrica del estator $T = L/R$ pequeña.

2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS GENERADORES SÍNCRONOS DE IMANES PERMANENTES (PMSG)

Los generadores síncronos tradicionales, se diseñan para girar a una velocidad de 1000 a 1700 rpm, con lo que se consigue un funcionamiento normal y con una eficiencia razonable (Sergeant, Crevecoeur, Dupré, & den Bossche, 2009).

En el entorno eólico es necesario generar electricidad mediante el uso de turbinas de bajas velocidades. Por esta razón es necesario utilizar una caja de cambios entre la turbina y un generador, cuya tecnología puede corresponder a una máquina de inducción o a una síncrona. La turbina de los aerogeneradores ante la caja de cambios es de 30-70 rpm. (García-Gracia et al., 2009).

Con una reducida velocidad en un generador PMSG, el rotor gira a la misma velocidad que el rotor de la turbina. El PMSG se puede conectar directamente a la turbina de viento, lo que resulta en un sistema mecánico simple y de mínimo mantenimiento.

Los aerogeneradores tradicionales, que incluyen el mecanismo de acoplamiento mecánico y el respectivo generador de inducción, además de ser más pesados, generan más ruido, requieren mayor mantenimiento y adicionalmente presentan más pérdidas.

De la Figura 1 se puede inferir la menor cantidad de partes y de materiales que se emplean en los aerogeneradores que usan PMSG.

Vale la pena hacer referencia que los aerogeneradores anteriormente indicados, tienen asociados en el grupo eléctrico, generadores de imanes permanentes de alta eficiencia, que no emplean escobillas, los cuales tienen la característica que no emplean escobillas en la conmutación para la transferencia de energía; en este caso, la conmutación se realiza electrónicamente. Esta propiedad elimina el gran problema que poseen los generadores eléctricos convencionales con escobillas, los cuales producen rozamiento, disminuyen el rendimiento, desprenden calor, son ruidosos y requieren una sustitución periódica y, por tanto, un mayor mantenimiento.

Como se indicó anteriormente, en la parte introductoria, este tipo de generadores han disminuido notablemente su precio en el mercado gracias al uso de materiales, que permiten ahorrar costos en la construcción de los imanes permanentes, cuya tecnología constituye todo un campo de investigación. El material más común para la construcción de este tipo de imanes es el Neodimio Boro - Hierro (NdFeB 32) (Park, Jang, Lee, & Kim, 2007).

Los generadores de alta eficiencia de imanes permanentes sin escobillas tienen muchas ventajas frente a los generadores DC con escobillas y frente a los generadores asincrónicos. Algunas de estas ventajas son: (Park et al., 2007)

- Mejor relación velocidad-par motor
- Mayor respuesta dinámica
- Mayor eficiencia
- Mayor vida útil
- Menor ruido
- Mayor rango de velocidad.

Para este tipo de generadores, es indispensable contar con controladores electrónicos complejos, para mantener el generador en funcionamiento. El mismo puede usarse para variar el voltaje generado que, posteriormente, será llevado al inversor DC-AC, con la finalidad de que se pueda utilizar la energía eléctrica en las cargas a las que alimenta los aerogeneradores.

Finalmente, una aplicación de los PMSG en la generación distribuida y las micro redes es la posibilidad de acoplarlos directamente a las turbinas eólicas de eje vertical, como las que se presentan en la Figura 2 (Mattio & Tilca, 2014).

Este tipo de aerogeneradores aprovechan, incluso, las más bajas velocidades del viento. Son productivas incluso a partir de 2.3 m/s, y en cuanto más grande sea la turbina, se requiere menor velocidad de viento para comenzar a generar energía. La dirección del viento no es un factor importante para estos conjuntos aerogeneradores de eje vertical. Estas turbinas pueden ser instaladas en cualquier lugar, incluso en medio de zonas urbanas densamente pobladas: en parques, reservas naturales, en los puntos de descanso en carretera o en cualquier tipo de edificios (Wikipedia, 2013).

Este tipo de turbinas de eje vertical, al estar conectadas a generadores de imanes permanentes, son ideales para sistemas de redes distribuidas, para la carga de baterías y para el suministro de energía para cargas intermitentes (casas rurales, etc).

3. CONFIGURACIÓN DEL GENERADOR PGMS PARA SIMULACIÓN CON CONTROLADOR TRIFÁSICO

La Figura 3 presenta las diferentes formas constructivas del rotor de un generador de imanes permanentes. En dicha Figura se señala la configuración de la máquina que se pretende simular más adelante, y que se denomina *Configuración de flujo radial superficial con polos exteriores*. (Wallace & Rodríguez, 2000).

Básicamente, se distingue la disposición de rotores con imanes en puente, imanes superficiales, y configuración de flujo concentrado. En todos los casos se busca maximizar la intensidad del campo magnético de manera que se induzca la fuerza electromotriz sobre las espiras del estator.

Se utilizan materiales de baja permeabilidad magnética en el eje del rotor del motor y de alta permeabilidad para el relleno en el rotor.

De esta manera, se garantiza baja reluctancia en el área del rotor donde se requiere circulación del flujo magnético (carcasa del estator y relleno del rotor), y alta reluctancia en las zonas que implican mayores pérdidas de flujo magnético (eje del rotor). Recordar que la reluctancia se define como:

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (1)$$

R -> reluctancia, medida en amperio vuelta por Weber (A v/Weber). Esta unidad es equivalente al inverso del Hernio (H-1) multiplicado por el número de espiras.

l -> longitud del circuito, medida en metros.

U -> permeabilidad magnética del material, medida en H/m (henrio/metro).

A -> Área de la sección del circuito (sección del núcleo magnético), en metros cuadrados.

Se pretende modelar un sistema generador-conversor que se conecta a la red, que hace parte de un sistema eólico, impulsado por turbina de eje horizontal, como el que se especifica en la Figura 4.

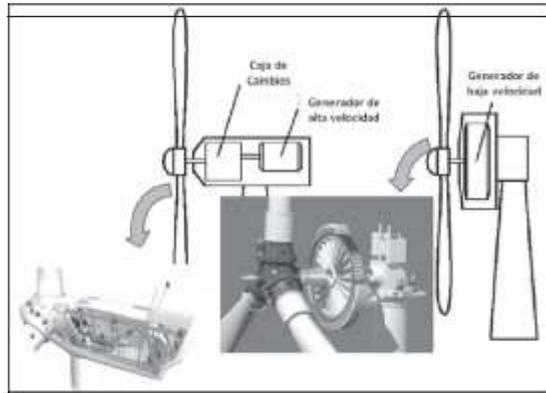


Fig. 1. Diagrama esquemático aerogeneradores de alta y baja velocidad



Fig. 2. Turbinas eólicas de eje vertical para PMSG

Fig. 3. Formas constructivas del rotor del PMSG

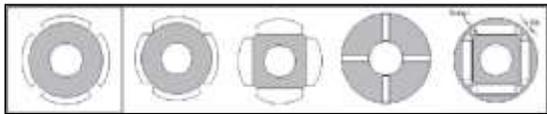
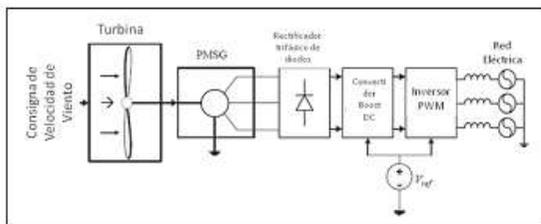


Fig. 4. Sistema propuesto para modelación



La velocidad angular del eje, ω_m , debe ajustarse de manera que la velocidad de giro siempre corresponda a un valor óptimo de G . Esto significa que ω_m y la velocidad del viento de alguna manera se deben combinar en una única variable para que la curva que muestra la relación entre G y ω_m pueda ser especificada. La expresión que describe esta relación corresponde a la única razón entre velocidad punta de la turbina de $R\omega_m$ y la velocidad del viento V_v .

Esta relación de velocidad punta, X se define como $X = \frac{R\omega_m}{V_v}$ (García-Gracia et al., 2009). (ω_m es la velocidad angular del eje en rad/s).

La relación entre G , C_T y para distintos tipos de aerogeneradores se muestra en la Figura 1. Hay que tener en cuenta que la relación entre el coeficiente de potencia, G y el coeficiente de torque, C_T , corresponde a la función X , dada por $G = C_p/C_T$, (García-Gracia, Comech, Sallán, & Llombart, 2008).

3.1. Parámetros del aerogenerador

Si se usa una turbina de eje horizontal de múltiples palas (Como son las más comunes en los parques de generación eólica), o una turbina de eje horizontal, como las de la Figura 2, entonces de la Figura 5 se evidencia que existe un punto donde el coeficiente de potencia es máximo. Así, en la simulación para diferentes valores de velocidad del viento, V_v , la velocidad de rotación, ω_m debe mantenerse próxima a $X=1,0$ (Correspondiente a la **curva B**).

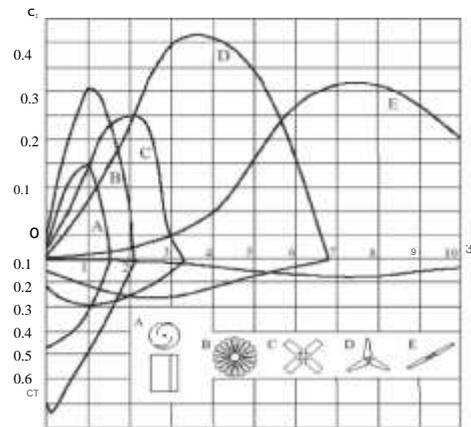


Fig. 5. Relación entre G según el tipo de turbina eólica

Se tienen los siguientes datos, para una turbina de mediano tamaño, tipo D

- $R = 1.4m$
- $A_{aire} = 125$
- $V_v = 12.1 m/s$
- $F_g = 7Hz$

Se tiene la siguiente expresión para calcular la potencia eléctrica mínima del aerogenerador: (Wallace & Rodríguez, 2000).

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

Donde c_{mk} , en una turbina tipo B es 0.35, que corresponde aun $\lambda_{in} = 1$.

Luego, la potencia eléctrica es:

$$P_e = 1/2(0.35) (1.25)(1.4)^2(12.1)^3 = 2386,2 \text{ W}$$

$$\lambda_{max} = \frac{\omega R}{v_n} \rightarrow \omega = 8.64 \text{ rad/seg.}$$

$$n = \frac{60 \cdot \omega}{2\pi} \rightarrow n = 82.53 \text{ r.p.m}$$

Ahora se obtiene el número de polos del generador: $p = 60f / n = 5.09$. Es decir, se necesitan 5 pares de polos (10 polos).

De esta manera, el par mecánico que se obtiene es: $M = P/\omega$, con $\omega = 2\pi n / 60$. El par que se calcula es **276,18 Nm**.

3.2. Conformación del modelo de simulación eléctrico

Es importante anotar que en el modelo presentado en la Figura 4, si la velocidad del viento aumenta, entonces, para mantener C_p en su valor óptimo, se deberá modificar la posición de las aspas de la turbina, para aumentar la velocidad mecánica proporcionalmente (Eltamaly, 2007; Llor, 2003).

El control eléctrico de potencia consistirá en obtener la máxima potencia posible.

Cuando se alcanza la potencia nominal del generador, se deberá controlar dicha potencia si la velocidad del viento aumenta. Es decir, el par de freno que presente el generador debe ser el equivalente al par de potencia nominal. (Wallace & Rodríguez, 2000).

Los métodos de control se pueden clasificar en: (Llor, 2003)

- Control escalar: se controla la cantidad de potencias activas y reactivas entregadas a la red.
- Control vectorial: se controla la velocidad y el par de freno del generador, así como la calidad de la potencia entregada a red.

En la Figura 9 se aprecia el modelo que se implementa en la plataforma PSIM, equivalente al sistema que se indicó previamente en la Figura 1.

En esta contribución técnica, el propósito será el enfoque en el tipo de control escalar. Para el efecto, el modelo de simulación considera un sistema de

control con tensión y frecuencia en bornes del generador constante, que incluye un rectificador trifásico y un Boost DC-DC, el cual se conecta a un rectificador PWM, que es gobernado a través de su sistema de control (Souza, Navarro, & Arasanz, 2009)

3.3. Turbina del aerogenerador

Para simular el funcionamiento de la turbina, se parte de la curva C_p de la Figura 5. En PSIM la turbina se representa según el modelo establecido en la Figura 10 (Walker, 2010). Obsérvese la curva de funcionamiento. Esta curva corresponde a una máquina con potencia nominal de 2.4 KW, con un rotor de 1.4 metros de radio y una velocidad nominal de 83 rpm.

Con estos datos se procede a la construcción del bloque que, recibiendo como entradas la velocidad de giro de la turbina y la velocidad del viento, se calcula la potencia y el par entregado por la turbina eólica.

Utilizando el modelo de la turbina, se puede obtener fácilmente la curva de potencia de la máquina. Esto se logra introduciendo variaciones lineales del viento y representando la potencia obtenida en función de la velocidad, según los resultados obtenidos en la Figura 11.

Se puede inferir que el aerogenerador tendrá una generación máxima de potencia a 21.5m/s, (Equivalente a una potencia de 0.65KW).

3.4. Máquina Síncrona de Imanes Permanentes (PMSG)

La herramienta PSIM permite elegir el modelo de la máquina síncrona de imanes permanentes (PMSG), tal y como se presenta en la Figura 6. Su configuración se realiza teniendo en cuenta la inclusión de 10 polos en total, en un generador de 4 KW.

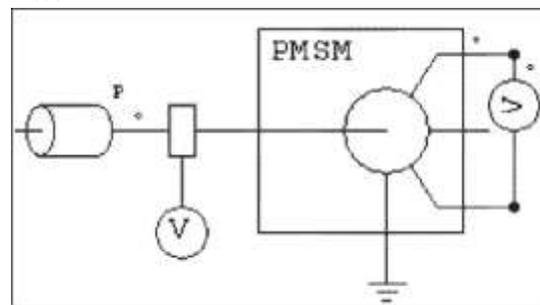


Fig. 6. Representación del Módulo PMSG

Los datos recopilados y presentados en la Figura 7, permiten configurar la información de la máquina PGSM de 4KW (5HP), correspondiente a los modelos comerciales para aplicaciones de generación distribuida(Souza et al., 2009).

Motor and System Parameters	
Command signal levels	± 10 V
Dc link voltage	400 V
Max. current	15 A
PWM chopping frequency	8 kHz
Phase resistance	0.931 Ω
Power	5 hp
Rated current	10 A (1 p.u.)
Rated speed	2500 rpm
Rotor friction constant	0.001 N·m/rad/sec
Rotor inertia	0.006 kg·m ²
Speed feedback gain	0.0383 V/rad/sec
Speed feedback time constant	0.1 sec

Fig. 7. Datos y parámetros del PMSG

3.5. Elementos de Electrónica de Potencia

En la Figura 8 se aprecia el módulo de rectificación, Boost DC-DC e inversor PWM que se implementa en la herramienta PSIM (Souza et al., 2009; Walker, 2010).

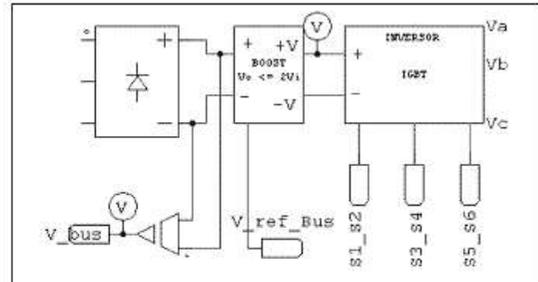


Fig. 8. Módulos de rectificación e inversor PWM

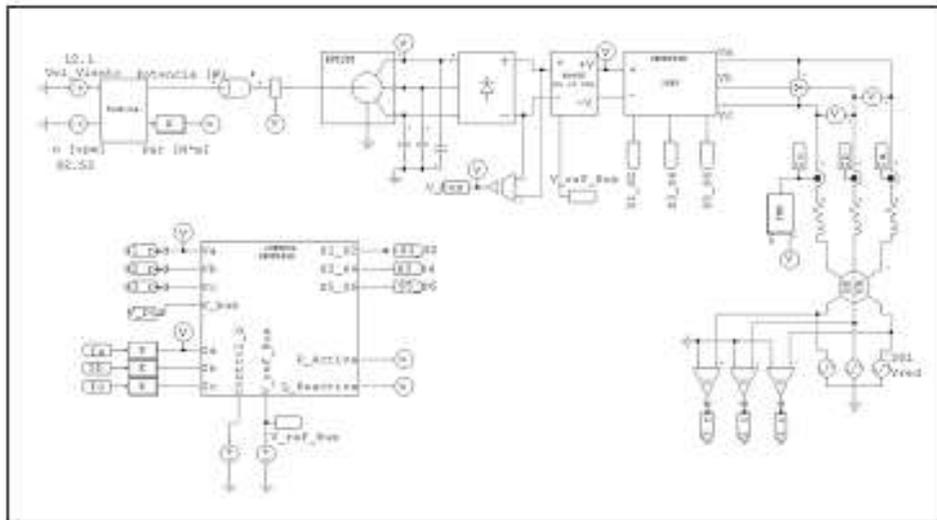


Fig. 9. Modelo de Simulación en PSIM

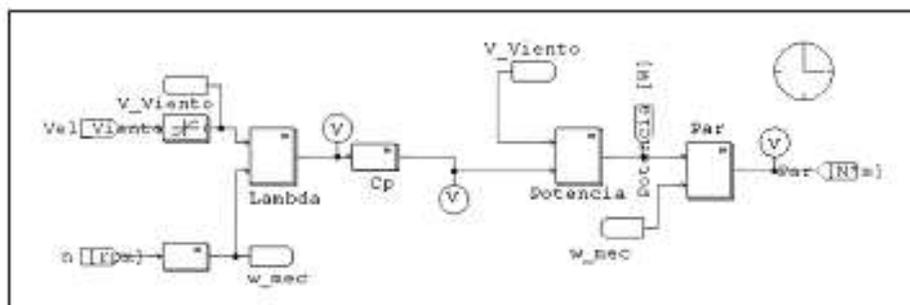


Fig.10. Representación de Turbina Eólica

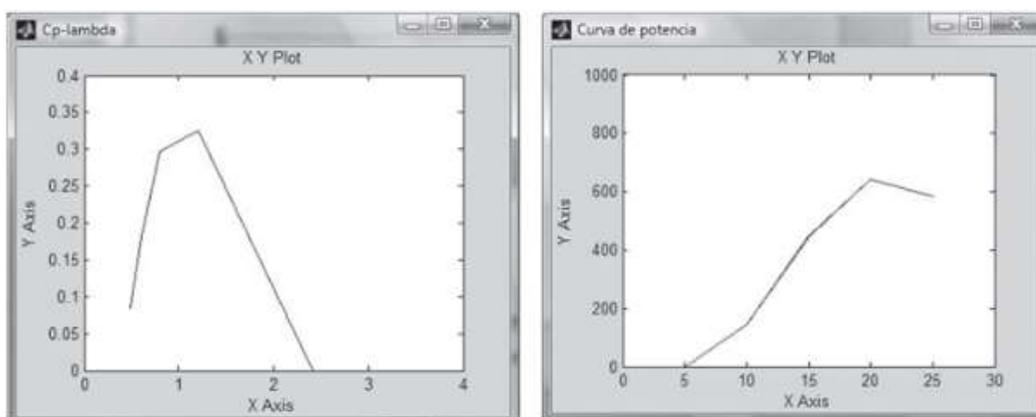


Fig. 11. Curva Cp-a, Curva de Potencia del Aerogenerador

3.6. Puente trifásico de Rectificación

El rectificador de diodos es la topología electrónica más simple, barata y resistente para aplicaciones electrónicas. Sin embargo, la mayor desventaja de este rectificador de diodos radica en la imposibilidad de trabajar en el flujo bidireccional de potencia (Mattio & Tilca, 2014).

En los bornes de salida del rectificador se tiene el siguiente voltaje $V_{DC} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{LL}$ según se refleja en la Figura 12.

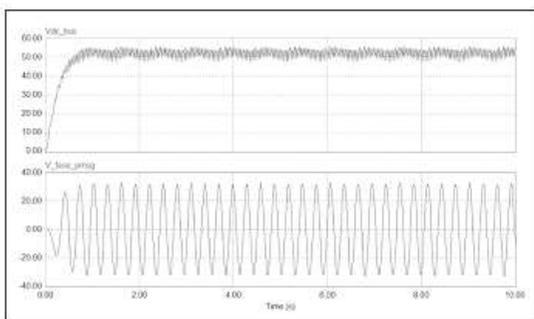


Fig. 12. Relación de la conversión de voltaje en el rectificador

3.7. Sistema Boost DC-DC

El esquema del Boost DC-DC se presenta en la Figura 13 (incluye el respectivo control PI). Como su nombre lo indica, la tensión de salida es siempre mayor que la tensión de entrada. El principio básico del convertidor Boost consiste en dos estados distintos dependiendo del estado del interruptor S, representado en este caso por un elemento de electrónica de potencia IGBT (Eltamaly, 2007; Park et al., 2007).

- Cuando el interruptor está *cerrado (On-state)* la bobina L almacena energía de la fuente, a la vez la carga es alimentada por el condensador C.
- Cuando el interruptor está *abierto (Off-state)* el único camino para la corriente es a través del diodo D y circula por el condensador (hasta que se carga completamente) y la carga.

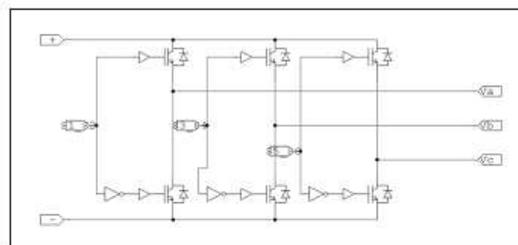


Fig.13. Configuración del circuito de potencia del inversor con IGBT's

Existen dos situaciones de funcionamiento: Modo continuo (toda la energía se transfiere a la carga, sin llegar a que la corriente se anule), y Modo Discontinuo (la carga consume menos de lo que el circuito puede entregar en un ciclo).

La relación entre la entrada y salida de voltaje y corrientes del convertidor elevador corresponde a:

$$V_{d,out} / V_{d,in} = 1 / (1 - D) ; I_{d,out} / I_{d,in} = 1 - D$$

donde D corresponde al *Duty Ratio* del Boost DC-DC (Souza et al., 2009).

Para la simulación, el convertidor tiene un factor D de 0.5, lo cual permite elevar el voltaje, como se ilustra en la Figura 14.

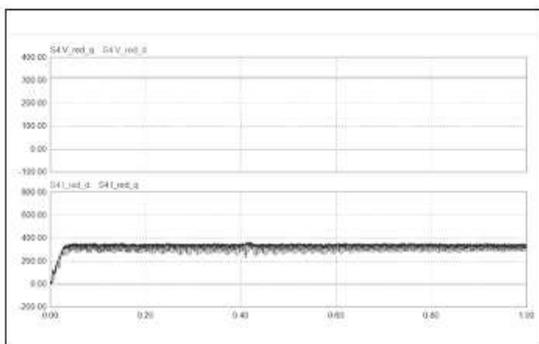


Fig. 14. Generación de señales I_d , I_q para control de la modulación PWM

3.8. Sistema Inversor DC-AC

La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna. Las formas de onda de salida de voltaje de un inversor ideal deberían ser sinusoidales. Una buena técnica para lograr esto es utilizar la técnica de PWM logrando que la componente principal senoidal sea mucho más grande que las armónicas superiores (Eltamaly, 2007). La configuración del inversor se realiza a partir de un puente de IGBT 's, como se presenta en la Figura 13. (Souza et al., 2009).

Este circuito se conecta a la red trifásica de 381V, 50 Hz, directamente a través de unas inductancias de acople. Dicha configuración se puede apreciar en la Figura 9 de la sección 3.5.

Las señales de modulación son ahora V_d_ref y V_q_ref , magnitudes en DQ representativas de las tensiones trifásicas que sintetizará el convertidor. En la Figura 14 se aprecia la respuesta de la generación de señales en la referencia DQ para control vectorial.

Para el cálculo del control del inversor PWM, se tiene una frecuencia de corte relacionada con la velocidad de respuesta del sistema de regulación. Para tener capacidad de sintetizar una referencia de 50 Hz será necesario que la frecuencia de corte del sistema de control sea mayor de 400 Hz. Para tener capacidad de seguir una frecuencia f se establece la frecuencia de corte: (García-Gracia et al., 2009).

$$(8 - 10): \dot{f} \quad (3)$$

Para la frecuencia de filtro f_f se puede seguir el criterio, a partir de la frecuencia de corte: (Eltamaly, 2007).

$$f_f = 1 / brf. \quad (4)$$

Si se escoge un valor muy bajo la lectura puede quedar muy atenuada y retrasada respecto a la medida original. Si se elige demasiado alta el filtrado puede ser insuficiente.

Se sitúa su frecuencia de corte lo más cerca posible a una década. Además, para evitar que la medida de corriente incluya armónicos de conmutación, que en un IGBT puede llegar a los 20KHz. Luego, será recomendable que (Jang, Ko, Park, & Lee, 2008):

$$f_c \ll \text{conmutación} \quad (5)$$

En resumen, se establece con todas las frecuencias del sistema un criterio enlazado:

$$f < f_c < f_f \ll \text{conmutación} \quad (6)$$

Para mantener el bus bajo control se deben realizar intercambios de potencia activa con la red.

Si la tensión tiende a bajar se debe absorber potencia de la red para restablecer el equilibrio (funcionamiento como rectificador). Si por el contrario la tensión tiende a subir, se deberá evacuar potencia hacia la red (funcionamiento como inversor).

La referencia de corriente en el eje Q está asociada a la potencia activa intercambiada con la red. Por esta razón, para mantener el bus bajo control, el lazo de control a implementar sería el siguiente, cuya salida es la corriente I_q de referencia (García-Gracia et al., 2009).

El control de las referencias de corrientes I_d e I_q , permiten realizar el control de la generación trifásica y su posterior acople a la red.

Vale destacar que la referencia (V_d_ref y A_{ref}) calculada automáticamente por el control PI coincide con el voltaje V_d_red y V_q_red , por cuanto podemos asumir que el control está trabajando de manera efectiva. La Figura 16 permite apreciar las señales de modulación para el inversor 3.

A partir de las medidas de corriente y tensiones de red en ejes DQ se puede calcular la potencia activa y reactiva intercambiada con ella. El diagrama de bloques de estos cálculos se muestra en la Figura 15. El coeficiente de 1.5 es resultado del tipo de magnitud en DQ que se está utilizando (valor máximo de la magnitud de fase). (Sergeant et al., 2009).

Una interesante conclusión, es que este tipo de control vectorial, con la transformación DQ, hace muy fácil la manipulación y configuración de cualquier convertidor de potencia. De esta manera, se puede controlar el factor de potencia, la inyección o consumo de potencia activa y reactiva, y el comportamiento como rectificador o como inversor. La referencia de corriente en el eje Q está asociada a la potencia activa intercambiada con la red y la referencia de corriente del eje D está asociada a la potencia reactiva (Zhu et al., 2007).

3.9. Conexión a la red trifásica

Tratándose de un pequeño aerogenerador de imanes permanentes, para aplicación en una red de

distribución, se realiza una conexión directamente a la red de 381 V. De esta manera, los usuarios pueden conectarse al sistema y tomar directamente los 220V monofásicos.

Debido a las características mecánicas de la máquina, en las que hay que considerar la inercia mecánica y la estabilización del generador, entonces se debe dar un tiempo prudencial a la simulación para poder apreciar las características del mismo.

El sistema de inyección de corriente a la red, presenta los siguientes resultados.

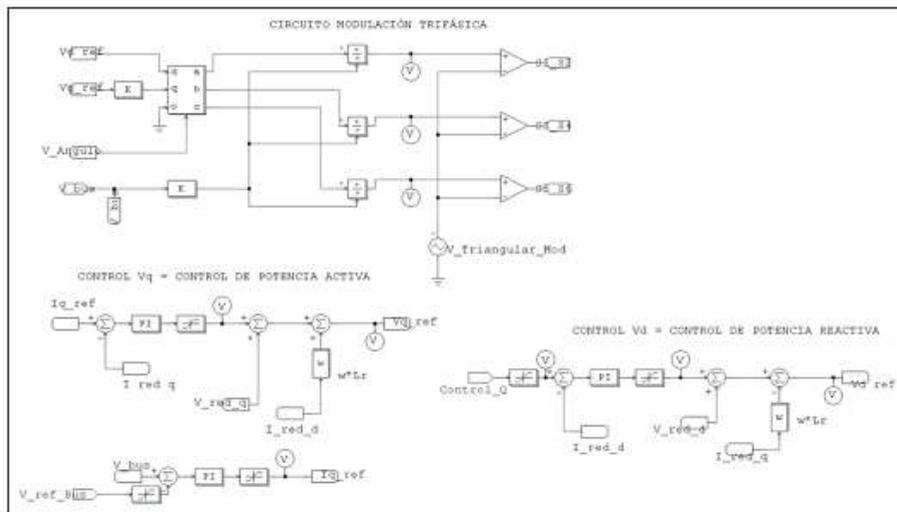


Fig. 15. Modulación PWM, incluyendo modulación trifásica con conversión a ejes ABC de las referencias

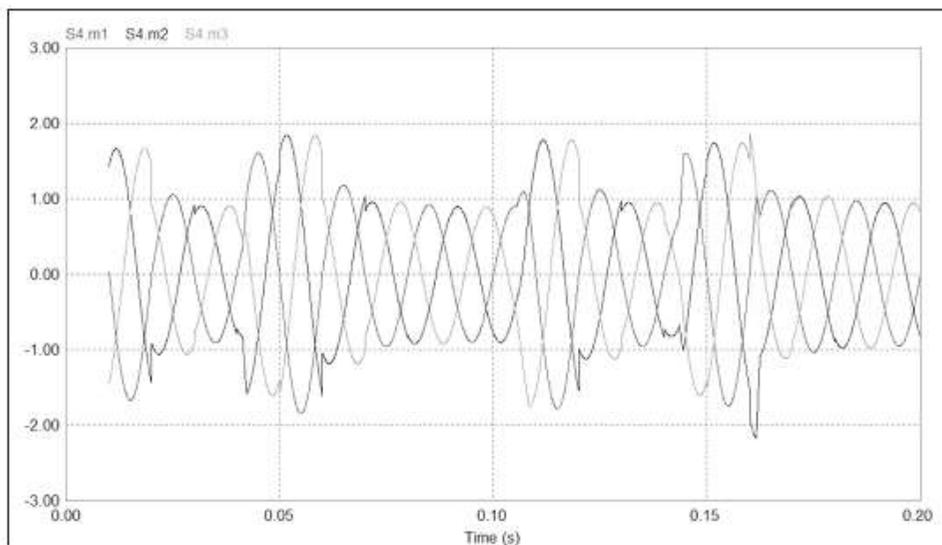


Fig. 16. Señales de modulación PWM

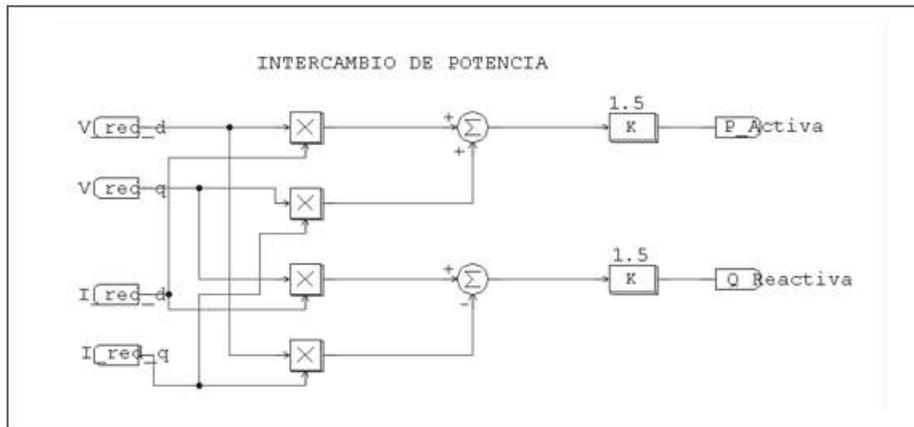


Fig. 17. Cálculo de la potencia activa y reactiva intercambiadas con la red, desde la Transformación DQ

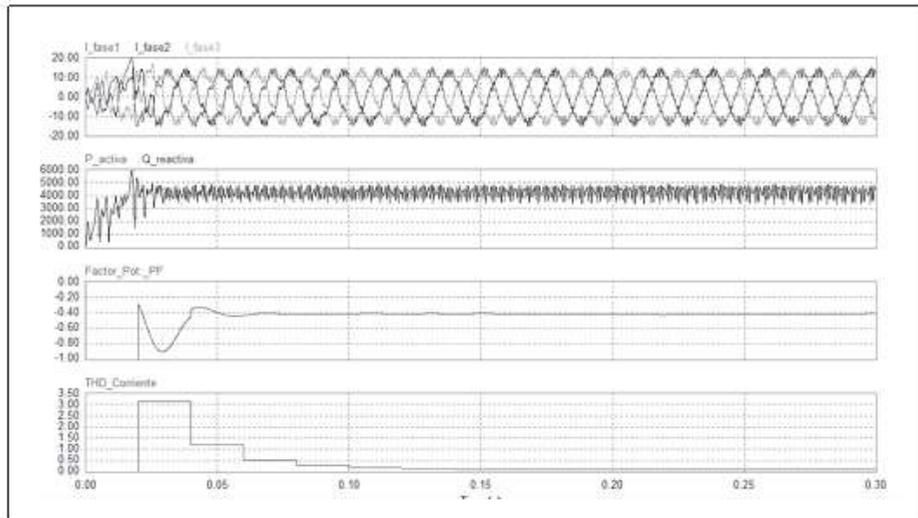


Fig. 18. Inyección de potencia activa y reactiva a la red trifásica desde el PMSG

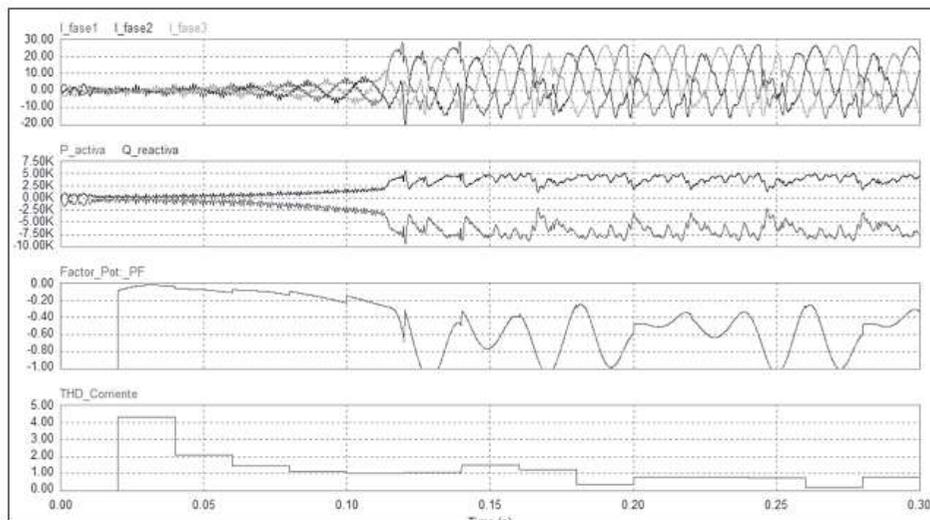


Fig.19. Perturbación donde se consume Pactiva y se inyecta Qreactiva

Se puede apreciar el contenido armónico de las ondas de corriente, que se estima en 5.9% para el THD de corriente (Figura 18 y Figura 19). Adicionalmente, el factor de potencia es capacitivo, y se puede corregir mediante la manipulación de las referencias I_d , presentadas en sistema de modulación PWM (Sección 3.5).

También es posible tener el caso que desde el convertidor se inyecte potencia reactiva al sistema, aunque sea necesario consumir potencia activa desde la red para mantener la tensión del bus de DC, ante una perturbación.

También interesa conocer las condiciones mecánicas del aerogenerador. En la Figura 20 se aprecia la característica pulsante y la variabilidad en el giro de la turbina y del eje del aerogenerador.

Obsérvese la estabilización en la velocidad de giro del eje del aerogenerador.

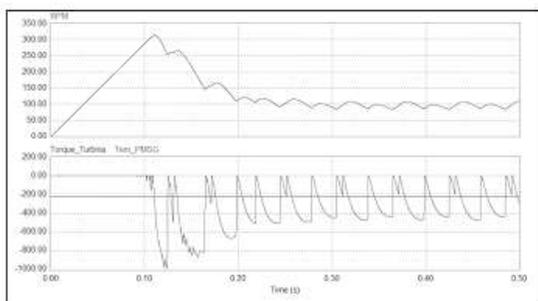


Fig. 20. Torque y velocidad en el sistema mecánico del aerogenerador

4. CONCLUSIONES

En esta contribución técnica se ha verificado la versatilidad de los convertidores doblemente alimentados y su inmensa utilidad para en aplicaciones tanto para el acople de los generadores de velocidad variable, y los módulos fotovoltaicos a la red de 60Hz. El control DQ es fácil de configurar y muy apropiado para este tipo de aplicaciones. El convertidor puede corregir fácilmente el factor de potencia y mantener la estabilidad del sistema.

Este tipo de aplicaciones son de gran utilidad para los sistemas de generación distribuida. Las tendencias tecnológicas demuestran que los usuarios de energía eléctrica podrán autoabastecerse, aprovechando la energía del viento, y transformándola en electricidad a través de aplicaciones tecnológicas como el que se estudió en este trabajo.

Esto demuestra el magnífico futuro de las máquinas síncronas de imanes permanentes: Son fáciles de instalar y requieren mantenimiento mínimo. Al utilizar sistemas de excitación de baja permeabilidad, es decir imanes permanentes, se tiene la ventaja de minimizar el efecto de reacción de armadura, lo cual tiene como consecuencia un aumento de la regulación de tensión. Además al no tener contacto óhmico el sistema de excitación con el exterior, se hace posible la construcción de unidades blindadas.

Al contar con máquinas que generen a partir de una baja velocidad de la fuente motriz, presenta la ventaja de poder prescindir o reducir en tamaño elementos de transmisión mecánica con base en engranajes para elevar la velocidad.

Como comentario final, es muy importante elegir una plataforma de simulación adecuada para este tipo de aplicaciones. En el caso del uso de PSIM, herramientas especializadas en cada uno de sus áreas (Electrónica de Potencia), ha sido satisfactoria la obtención de resultados y los tiempos de simulación, que fueron anteriormente presentados.

5. REFERENCIAS

- Eltamaly, A. M. (2007). Modeling of wind turbine driving permanent magnet generator with maximum power point tracking system. *Journal of King Saud University*, 19, 223-237. Retrieved from <http://www.docstoc.com/docs/19709931/Modeling-of-Wind-Turbine-Driving-Permanent-Magnet-Generator-with>.
- García-Gracia, M., Comech, M. P., Sallán, J., & Llombart, A. (2008). Modelling wind farms for grid disturbance studies. *Renewable Energy*, 33(9), 2019-2121 doi: <http://clx.doi.org/10.1016/j.renene.2007.12.007>
- García-Gracia, M., Paz Comech, M., Sallán, J., López-Andía, D., & Alonso, O. (2009). Voltage dip generator for wind energy systems up to 5MW. *Applied Energy*, 86(4), 565-574. doi: <http://clx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.07.006>
- Jang, S.-M., Ko, K.-J., Park, J.-H., & Lee, S.-H. (2008). Design criteria and electromagnetic analysis of a high-speed permanent magnet synchronous machine. In *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on* (pp. 3146-3151).

Llor, A. (2003). *Control directo de par a frecuencia de modulación constante de motores síncronos de imanes permanentes*. Lyon (Francia), Carlos III Madrid (España). Retrieved from <http://docinsa.insa-lyon.fr/these/2003/llor>

Mattio, H. F., & Tilca, F. (2014). Mediciones de velocidad y dirección de viento con fines de generación eléctrica, y medición de potencia eléctrica generada por aerogeneradores. *Instituto Nacional Tecnología Argentina*. Retrieved from http://inti.gov.ar/cirsoc/pdf/accion_viento/Recomendaciones_Mediciones_de_Viento.pdf

Park, H.-G., Jang, S.-H., Lee, D.-C., & Kim, H.-G. (2007). Low-cost converters for micro wind turbine systems using PMSG. In *Power Electronics, 2007. ICPE'07. 7th International Conference on* (pp. 483-487). Daegu, Corea del Sur. Retrieved from <http://ynucc.yeungnam.ac.kr/~dclee/papers/international/conference/ICPE Low cost.pdf>

Sergeant, P., Crevecoeur, G., Dupré, L., & den Bossche, A. (2009). Characterization and optimization of a permanent magnet synchronous machine. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 28(2), 272-285.

Souza, D. de A., Navarro, J. A. D., & Arasanz, J. S. (2009). Adaptive Fuzzy Controller for Output Power Maximization of Induction Generators. In *Informatics in Control, Automation and Robotics* (pp. 49-60). Berlín, Alemania: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-00271-7_3

Walker, G. R. (2010). PSIM User's Guide Version 6.0. *PSIMTECH*. Powersimtech Inc. Retrieved from http://www.psim.jp/download/pdf/PSIM_User_Manual_V9.0.2.pdf

Wallace, R., & Rodríguez, A. (2000). Diseño de un Generador de Flujo Axial con Imanes Permanentes para Aplicaciones Eólicas. *Revista Chilena de Ingeniería*, 7(2), 3-12. Retrieved from <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/114/11400701.pdf>

Wikipedia. (2013). Motor de magnetización permanente. Retrieved from http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Motor_de_magnetizaci%C3%B3npermanente&oldid=6601559

Zhu, W., Pekarek, S., Fahimi, B., & Deken, B. J. (2007). Investigation of Force Generation in a Permanent Magnet Synchronous Machine. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*. doi:10.1109/TEC.2006.888034