

COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE CONTROL VECTORIAL APLICADAS A GSIP EN SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA

L.G. González¹, E. Figueres², G. Garcerá², O. Carranza³

(Recibido febrero 2012, Aceptado junio 2012)

¹ Departamento de Electrónica y Comunicaciones, Universidad de los Andes, núcleo la Hechicera, 5101, Mérida-Venezuela.

² Grupo de Sistemas Electrónicos Industriales, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de vera s/n, 46022, Valencia-España.

³ Escuela Superior de Computo, Instituto Politécnico Nacional, Av. Juan de Dios Bátiz s/n, 07738, DF-México.

Resumen: Este artículo se presenta un estudio comparativo de las principales técnicas de control vectorial aplicadas a Generadores Síncronos de Imanes Permanentes (GSIP) utilizados en Sistemas de Conversión de Energía Eólica (SCEE), la comparación de las técnicas están basadas en el modelado del generador, cuantificando en rendimiento presente en cada una de estas técnicas de manera analítica, adicionalmente las técnicas que resultaron más eficientes son comparadas experimentalmente en un prototipo del SCEE con un Convertidor de potencia Back-to-Back, controlado por un DSP modelo TMS320F2812 de Texas Instruments.

Palabras clave: Control Vectorial/ Generador Síncrono de Imanes Permanentes/ Energías renovables/ Energía eólica/ Convertidor back-to-back.

COMPARISON OF VECTOR CONTROL TECHNIQUES APPLIED TO SYSTEMS GSIP WIND ENERGY CONVERSION

Abstract: In this work is presented a study and are compared the mains vectorial control techniques which are applied in conversion systems of wind energy the techniques are compared using in the generator, additionally the techniques more efficient are experimentally compared in a prototype of a conversion system of wind energy with a power converter Back to Back, controlled by a DSP, Model Tm5320F2812 of Texas instruments.

Keywords: Vectorial Control/ Permanent Magnet Synchronous Generator/ Renewables/ Wind Power/ Converter back-to-back.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de las energías renovables se ha incrementado en la última década no solo por el aumento de los combustibles fósiles sino también por la reducción de las emisiones de CO₂ de los países industrializados. Particularmente los Sistemas de Conversión de Energía Eólica (SCEE) son considerados como los más efectivos y rentables de las fuentes de energía alternativa [1]. En algunos países como Alemania, USA y España la potencia generada a partir de SCEE es comparable con la generación de energía a partir de las fuentes convencionales.

En los SCEE de velocidad variable, el sistema de control es uno de los elementos más importantes, debido a que define el punto de operación en todo momento para aprovechar al máximo la energía del viento. Además el uso de Generadores Síncronos de Imanes Permanentes (GSIP) en los SCEE es cada vez más frecuente, debido que estos pueden ser diseñados con un elevado número de polos, razón por la cual pueden utilizarse sin caja de

engranajes entre la turbina eólica-generador y aumentar la eficiencia del sistema.

En el diseño de los SCEE de velocidad variable, es necesario tomar en cuentas dos aspectos fundamentales para el desempeño de los mismos, el primero de ellos es la impredecible disponibilidad del viento, y la segunda, es la dependencia que existe entre la aerodinámica de la turbina, velocidad del generador y la cantidad de potencia que puede ser extraída del viento. Existen varias estrategias de control, que toman en cuentas estos aspectos para tratar extraer en todo momento la máxima potencia disponible del viento [2]-[5].

En el caso de las maquinas sincrónicas, las técnicas de control vectorial permiten que estas sean utilizadas en una amplia variedad de aplicaciones, debido a que permiten un manejo de velocidad y par mecánico con elevada precisión.

Las técnicas de control vectorial en máquinas sincrónicas de imanes permanentes han sido estudiadas por [6]-[7]-[8]

entre otros, y para el caso de esta investigación específicamente se tratan por ser las más importantes: 1.- Corriente reactiva igual a cero ($i_d=0$), 2.- Factor de Potencia Unitario (UPF). 3.- Máximo par por unidad de corriente. 4.- Flujo constante. En el caso de cada una de estas técnicas se desarrolla utilizando el sistema de referencia síncrono (SRF) y el modelo en estado estacionario (dq) del GSIP, para poder determinar el rendimiento en cada una de las técnicas estudiadas.

El esquema general de control del SCEE, se muestra en la Figura 1, en el mismo se utiliza un GSIP acoplado directamente a la turbina eólica y a su vez eléctricamente a un convertidor trifásico back to-back. En relación a la estrategia de control, la etapa rectificadora e inversora utiliza un modulador PWM respectivamente, además se utiliza un estimador de la posición angular y velocidad mediante técnicas sensorless [9]-[10], que permite alcanzar la sincronía entre el GSIP y las variables de referencia del sistema de control.

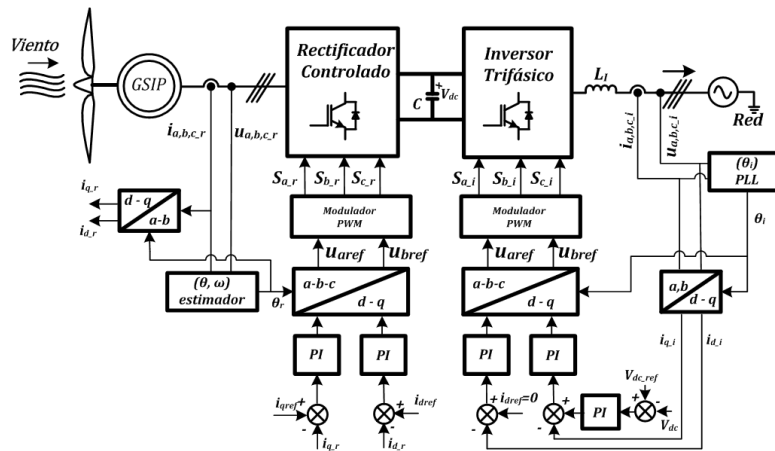


Figura 1. Esquema general de control del SCEE

El artículo está compuesto por las siguientes secciones: El modelo del GSIP en el sistema de referencia síncrono, es presentado en la sección 2. En la sección 3, se desarrollan las técnicas de control vectorial aplicadas al GSIP. En la sección 4, se comparan de manera teórica las técnicas de control vectorial estudiadas. En la sección 5 se presentan y analizan los resultados experimentales, y finalmente se presentan las conclusiones en la sección 6.

II. DESARROLLO

1. Modelo del Generador Síncrono de Imanes Permanentes (GSIP)

El circuito equivalente por fases del GSIP con una distribución sinusoidal es modelado en el sistema de referencia estacionario $\alpha\beta$ [11], mostrada en la ecuación (1). Donde r_s es la resistencia por fase, y L_s es la inductancia equivalente, esta inductancia incluye las inductancias mutuas entre las fases y la de fugas, (v_α, v_β) es el voltaje en bornes, $(\hat{e}_\alpha, \hat{e}_\beta)$ es la fuerza electromotriz (EMF) estimada por los imanes permanentes, y (i_α, i_β) son las corrientes de línea. En las ecuaciones (2) y (3) Muestra el modelo del GSIP en el sistema de referencia síncrono (Park) dq , Figura 2.

$$\begin{pmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{pmatrix} = r_s \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$v_d = -r_s i_d + \omega \psi_q - \dot{\psi}_d \quad (2)$$

$$v_q = -r_s i_q - \omega \psi_d - \dot{\psi}_q \quad (3)$$

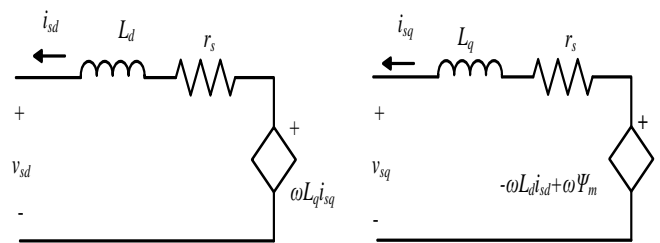


Figura 2. Circuito equivalente del GSIP en el sistema de referencia síncrono dq.

El flujo inducido en el estator en el sistema dq está descrito por las ecuaciones (4) y (5):

$$\psi_d = L_d i_d - \Psi_m \quad (4)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (5)$$

En las ecuaciones anteriores, ω es la velocidad angular del voltaje y corrientes en el GSIP, también Ψ_m es el flujo producido por los imanes permanentes. v_d y v_q son los voltajes en bornes, i_d y i_q son las corrientes del generador en el sistema de referencia síncrono dq , L_d y L_q son la inductancia del estator en sistema de referencia síncrono dq . El par electromagnético aplicado al rotor del GSIP es mostrado en la ecuación (6). Si el GSIP es de rotor liso, se cumple ($L_d = L_q = L$), el par electromagnético es simplificado como se muestra en la ecuación (7).

$$T_e = p \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right) \quad (6)$$

$$T_e = p \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m i_q \quad (7)$$

Donde P es el número de pares de polos. En las maquinas síncronas, la velocidad de rotor presenta una relación lineal con la velocidad angular de tensión y corriente de línea del GSIP, mediante la ecuación (8).

$$\omega_r = \frac{2}{p} \omega \quad (8)$$

2. Técnicas de control vectorial en GSIP

Las técnicas de control vectorial, permiten manipular el factor de potencia de la máquina con precisión, mediante la descomposición y control independiente de las componente activa y reactiva de la corriente en el GSIP, de manera que se pueda manejar indirectamente el par ejercido por la máquina y controlar la velocidad de una manera más eficiente. Para el control de maquinas síncronas se han propuesto otras técnicas como el control directo de par (DTC), que presenta el inconveniente de generar mayor distorsión en las corrientes de línea que en el caso del control vectorial [6]. En consecuencia se ha preferido el control vectorial para esta aplicación.

Para realizar el análisis teórico de las técnicas de control estudiadas en este artículo, es necesario definir el modelo en estado estacionario del GSIP, que parte de las ecuaciones (2) y (3), asumiendo las condiciones de rotor liso ($L_d = L_q = L$), y suprimiendo los términos dependiente del tiempo, obteniendo así las ecuaciones (9) y (10).

$$v_d = -r_s i_d + \omega L i_q \quad (9)$$

$$v_q = -r_s i_q - \omega L i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m \quad (10)$$

La comparación de estas técnicas estará definida por su rendimiento, en función de la ecuación (11).

$$\eta = \frac{p_{out}}{p_{ef}} \cdot 100\% \quad (11)$$

Donde p_{ef} es la potencia mecánica efectiva de entrada (12), y p_{out} es la potencia eléctrica de salida definida en la ecuación (13).

$$p_{ef} = \omega_r T_e = \omega \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right) \quad (12)$$

$$p_{out} = \omega \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m i_q - r_s (i_d^2 + i_q^2) \quad (13)$$

2.1. Corriente reactiva igual a cero ($i_d=0$)

Esta técnica pretende mantener la corriente reactiva identificada como i_d en el sistema de referencia síncrono sea nula, bajo esta condición se cumple la ecuación (14), y la corriente por fase del generador en el sistema de ejes a,b,c está determinada por la ecuación (15).

$$i_d = 0 \quad (14)$$

$$I_a = \sqrt{\frac{2}{3}} (i_d^2 + i_q^2) = \sqrt{\frac{2}{3}} i_q \quad (15)$$

El diagrama vectorial de las corrientes y tensiones de esta técnica puede observarse en la Figura 3.

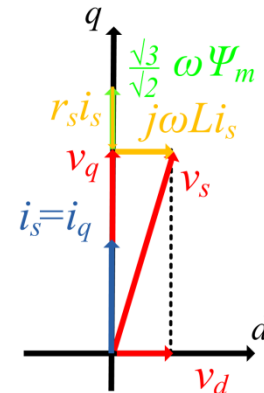


Figura 3. Diagrama vectorial en estado estacionario para la técnica $I_d=0$.

Esta técnica es utilizada comúnmente en generadores de rotor liso, ya que cuando la diferencia de reluctancias es significativa, el rendimiento de la máquina se reduce. La potencia de entrada a la máquina está dada por la ecuación (16).

$$p_{ef} = \omega \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m i_q \quad (16)$$

Y la potencia de salida está dada por la ecuación (17), y su rendimiento es mostrado en la ecuación (18).

$$p_{out} = \omega \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m i_q - r_s i_q^2 \quad (17)$$

$$\eta = \frac{p_{out}}{p_{ef}} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{r_s i_q}{\omega \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m} \right) \cdot 100\% \quad (18)$$

2.2. Factor de potencia unitario UPF

Esta técnica se fundamenta en mantener el factor de potencia unitario en bornes de la máquina, es decir, la corriente y tensión se encuentren en fase en el punto de conexión. Dado que el generador no entrega potencia reactiva, la relación entre la tensión en directo y en cuadratura es igual a la relación entre la corriente en directo y en cuadratura, como se observa en la ecuación (19).

$$\frac{v_d}{v_q} = \frac{i_d}{i_q} = \tan^{-1}(\alpha) \quad (19)$$

El diagrama vectorial de la técnica UPF es mostrado en la Figura 4.

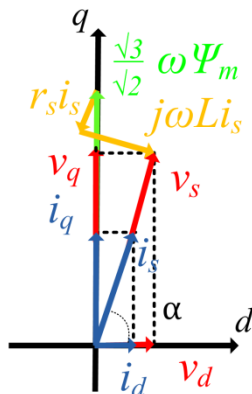


Figura 4. Diagrama vectorial en estado estacionario para la técnica UPF.

A partir de las ecuaciones (9), (10) y (19), es posible encontrar la corriente reactiva en función de la corriente activa como se muestra en la ecuación (20).

$$i_d = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m}{2L} - \sqrt{\left(\frac{3\Psi_m^2}{8L^2} - i_q^2 \right)} \quad (20)$$

La potencia de entrada a la máquina está dada por la ecuación (21):

$$p_{ef} = \omega \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m i_q \quad (21)$$

Y la potencia de salida está dada por la ecuación (22) y el rendimiento está expresado mediante (23).

$$p_{out} = \omega \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m i_q - r_s \left[i_q^2 + \left(\frac{\sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m}{2L} - \sqrt{\frac{3\Psi_m^2}{8L^2} - i_q^2} \right)^2 \right] \quad (22)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} r_s \Psi_m}{8 \omega L^2 i_q} + \frac{r_s}{\omega L i_q} \sqrt{\frac{3\Psi_m^2}{8L^2} - i_q^2} \right) \cdot 100\% \quad (23)$$

2.3. Máximo par por unidad de corriente

Esta técnica permite maximizar el par por unidad de corriente y minimizar las pérdidas por el efecto joule en los conductores [12]. Con esta técnica se consigue la máxima eficiencia del generador en función a la relación entre la corriente directa y en cuadratura. Para relacionar las corrientes de línea en el sistema de referencia estacionario i_d e i_q , en función al ángulo de desfase de la corriente de línea en el sistema de referencia a, b, c y el flujo magnético producto de los imanes permanentes, es utilizado el conjunto de ecuaciones (24) y (25).

$$i_d = \sqrt{\frac{3}{2}} i_s \cos(\alpha) \quad (24)$$

$$i_q = \sqrt{\frac{3}{2}} i_s \sin(\alpha) \quad (25)$$

Donde i_s es el valor pico de la corriente de línea en el GSIP, y α es el ángulo de desfase entre la corriente de línea y el flujo magnético Ψ_m . Sustituyendo la ecuación (25), en la ecuación de par mostrada en la ecuación (7), se obtiene la ecuación (26).

$$T_e = p \left(\frac{3}{2} \Psi_m i_s \sin(\alpha) \right) \quad (26)$$

De manera que el par electromagnético depende del ángulo de desfase α . El par máximo ocurre cuando la derivada de la ecuación (26) en función de α cumple con la condición mostrada en la ecuación (27).

$$\frac{dT_e}{d\alpha} = p \left(\frac{3}{2} \Psi_m i_s \cos(\alpha) \right) = 0 \quad (27)$$

En el caso del generador de rotor liso el par máximo ocurre cuando $\alpha = 90^\circ$, de manera que ($i_d=0$), situación que se cumple con la técnica de corriente reactiva igual a cero.

Desde otra perspectiva mediante la cual se maximice el rendimiento, puede ser vista mediante la sustitución de la ecuación (24) y (25) en (13), se obtienen las ecuaciones (28) y (29) que representan la potencia de entrada y salida

en función del ángulo de la corriente en el sistema abc y el eje d del sistema de referencia síncrono dq .

$$p_{out} = \frac{3}{2} \omega \Psi_m i_s \sin(\alpha) - r_s \left[\left(\sqrt{\frac{3}{2}} i_s \cos(\alpha) \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{3}{2}} i_s \sin(\alpha) \right)^2 \right] \quad (28)$$

$$p_{ef} = \frac{3}{2} \omega \Psi_m i_s \sin(\alpha) \quad (29)$$

La ecuación (30), representa el rendimiento del generador en función de las ecuaciones (28) y (29).

$$\eta = \left(1 - \frac{i_s r_s}{\omega \Psi_m \sin(\alpha)} \right) \cdot 100\% \quad (30)$$

Donde:

$$\frac{d\eta}{d\alpha} = \left(\frac{i_s r_s \cos(\alpha)}{\omega \Psi_m \sin^2(\alpha)} \right) = 0 \quad (31)$$

Maximizando la ecuación (30), mediante su derivada mostrada en la ecuación (31), se obtiene cuando $\alpha = 90^\circ$, de manera que la técnica de máximo par por unidad de corriente, también puede llamarse la de máximo rendimiento.

2.4. Técnica de flujo constante

En esta técnica se pretende mantener el flujo constante en el generador, este flujo equivalente es producto de la suma vectorial del flujo magnético de los imanes permanentes y de las corrientes en el estator. Esta técnica limita el par asociado a la máquina, teniendo que aumentar la velocidad de operación para manejar la potencia nominal [6]. La ecuación que permite mantener el flujo constante está dada por la ecuación (32).

$$\sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m = \sqrt{(\omega L i_q)^2 + \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m - \omega L i_d \right)^2} \quad (32)$$

La ecuación (33), representa la corriente del eje d , en función de i_q , para la técnica de control vectorial flujo constante.

$$i_d = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m}{L} - \sqrt{\frac{3 \Psi_m^2}{2 L^2} - i_q^2} \quad (33)$$

El rendimiento de esta técnica está determinado por la ecuación (34).

$$\eta = \left(1 - \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m r_s + \frac{2 R_s}{\omega i_q L} \sqrt{\frac{3 \Psi_m^2}{2 L^2} - i_q^2}}{\omega i_q L^2 + \omega i_q L} \right) \cdot 100\% \quad (34)$$

3. Comparación de las técnicas de control vectorial

Una vez analizadas las técnicas de control vectorial más utilizadas en máquinas síncronas se puede llevar a cabo un estudio comparativo que parte del prototipo disponible en el laboratorio mostrado en la Figura 6. En concreto, las técnicas han sido evaluadas para una potencia de entrada de 2Kw y un rango de velocidades de rotación entre 100 y 650rpm. En la Figura 5a, se muestra el rendimiento obtenido para velocidades de rotación inferiores a 318rpm, en esta región la potencia de salida es limitada por la corriente de línea, la cual puede observarse en la Figura 5b. En relación al rendimiento, se observa que la técnica $I_d=0$ presenta el mejor desempeño, seguido de la técnica de flujo constante y por último la de factor de potencia unitario, con una diferencia de 0.4% respecto a la técnica $I_d=0$. En relación a la corriente de operación en la región limitada por la potencia, región que opera en velocidades mayores a 318rpm, la corriente de línea en el GSIP es mayor con la técnica UPF, y menor con la técnica $I_d=0$.

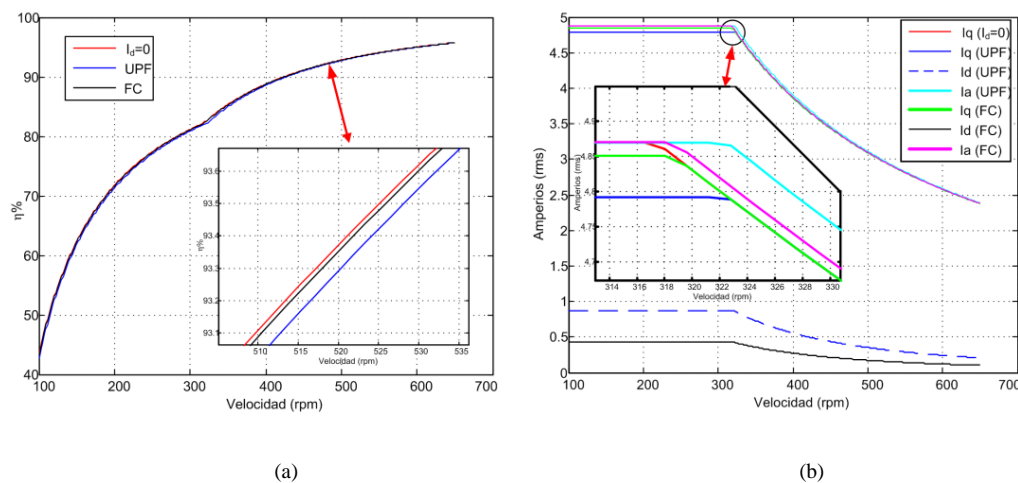


Figura 5. Comparación de desempeño de técnicas de control vectorial.

4. Resultados Experimentales

Con el fin de comprobar de manera experimental en el prototipo mostrado en la Figura 6, con los valores

mostrados en la Tabla I, son evaluadas las técnicas $I_d=0$ y UPF , con una potencia de entrada al convertidor Back-to-Back de 1300w, y una velocidad de rotor de 330rpm.

Tabla I. Parámetros de prototipo experimental

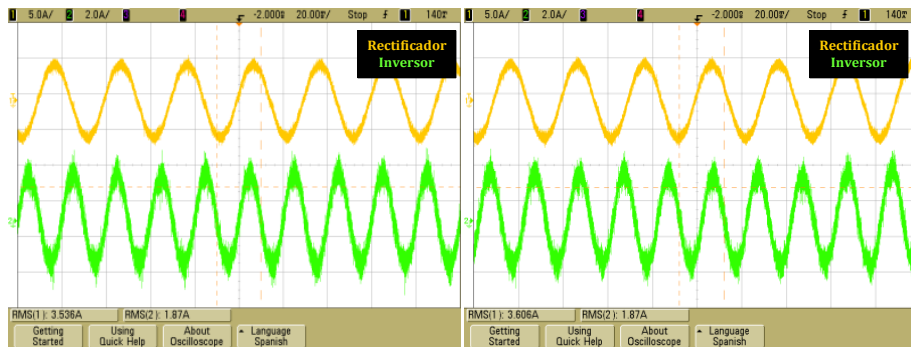
Numero de Polos (P)	12	Velocidad máxima GSIP	650rpm
Resistencia estator (r_s)	5 Ω	DC link Voltaje V_{dc_ref}	800V
Inductancia de línea GSIP (L)	25mH	Coefficiente de inercia	0.5kg·m ²
Coefficiente de flujo magnético (Ψ_m)	0.97v·s/rad	Tiempo de muestreo (T_s)	10 μ s
		Frecuencia de conmutación $\omega_{sw} = 2\pi f_{sw}$	5 kHz



Figura 6. Prototipo Sistema de Conversión de Energía Eólica.

En la Figura 7, se muestran las corrientes del rectificador controlado e inversor para la fase a , para ambas técnicas. Obsérvese que en ambas figuras la corriente del inversor tiene un valor rms de 1.87A, esta corriente representa que en ambos casos la potencia entregada a la red es igual si se asume que la tensión de línea permanece constante. En

relación a la corriente de línea en la etapa rectificadora, se observa que cuando es aplicada la técnica $i_d=0$, esta es menor. En relación al sistema de control de la etapa inversora, se ha realizado como en [Error! No se encuentra el origen de la referencia.], donde se aplica la técnica $i_d=0$, pero no es objetivo de este artículo.



(a)

(b)

Figura 7. Corriente de la fase a, rectificador e inversor; (a) $I_d=0$, (b) UPF

Si se determinan las pérdidas en el GSIP, en estado estacionario, mediante la corriente de línea de la máquina en ambos casos, para la técnica $I_d=0$ y UPF, se obtienen las pérdidas en el cobre, mostradas en (35).

$$W_{loss(i_d=0)} = 3 \cdot 5 \cdot 3.536^2 = 187.54w \quad (35)$$

$$W_{loss(UPF)} = 3 \cdot 5 \cdot 3.606^2 = 195.04w$$

De las pérdidas calculadas anteriormente, es posible demostrar que las pérdidas en la máquina utilizando la técnica UPF aumentan un 4% en comparación a la técnica $I_d=0$, siendo el rendimiento del GSIP $\eta=87.39\%$, mientras que para la técnica UPF es $\eta=86.95\%$. La diferencia entre las dos técnicas es de $\Delta\eta=0.44\%$, diferencia que puede aumentar a medida que el punto de operación se acerque al de potencia nominal.

La diferencia de fase entre las corrientes de línea y la fuerza electromotriz estimada no puede apreciarse de manera experimental debido a la velocidad de respuesta del módulo de intercambio de datos en tiempo real del DSP.

III. CONCLUSIONES

1. En conclusión a las técnicas de control vectorial estudiadas, es importante destacar que la técnica $I_d=0$, presenta un mejor rendimiento, dado que se reducen las pérdidas en la GSIP, la cuales se reflejan en el aumento de la temperatura de operación y por lo tanto disminución de la vida útil del generador.
2. La eficiencia de las técnicas de control vectorial depende en gran medida de la estimación de la posición del rotor, dado que la diferencia entre las corrientes de referencia para cada una de las técnicas es similar.
3. La diferencia entre las técnicas de control vectorial es apreciable a medida que aumenta la potencia de la máquina, dado que aumenta las corrientes de línea de éstas, variable que influye directamente sobre las pérdidas eléctricas.

IV. REFERENCIAS

1. Yang H, Wei Z, Chengzhi L, Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system, *Applied Energy* 2009;86(2):163-169.
2. H. Camblong, I. Martínez de Alegria, M. Rodríguez, G. Abad, Experimental evaluation of wind turbines maximum power point tracking controllers, *Energy Conversion & Management* 2006;47(18):2846-58.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Grupo de Sistemas Electrónicos Industriales (GSEI) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) por el financiamiento recibido y uso de su infraestructura para realizar esta investigación.

3. Y.Y. Hong, S.D. Lu, C.S. Chiou, MPPT for PM wind generator using gradient approximation, *Energy Conversion and Management* 2009; 50(1):82-89.
4. E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2006;53(2):486-94.
5. B.M. Nagai, K. Ameku, J.N. Roy, Performance of a 3kW wind turbine generator with variable pitch control system, *Applied Energy* 2009;86(9):1774-1782.
6. Kazmierkowski MP, Blaabjerg F, Krishnan R. *Control in Power Electronics Selected Problems*. San Diego, California: Elsevier; 2002.
7. Zhang B., Pong M.H., Maximum Torque Control and Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor, In *International Conference on Power electronics and Drive Systems*, Singapore, May 1997.
8. Christos Mademlis, Nikos Margaris, Loss Minimization in Vector-Controlled Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2002;49(6):1344-1347.
9. Brahmi J, Krichen L, Ouali A, A comparative study between three sensorless control strategies for PMSG in wind energy conversion system, *Applied Energy* 2009;86(9):1565-73.
10. L.G. González, E. Figueres, G. Garcerá, O. Carranza, "Synchronization techniques comparison for sensorless control applied to PMSG", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'09)*, ISBN 978-980-84-612-8014-8, (15-17 April, 2009)
11. Yin M, Li G, Zhou M, Zhao C. Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration. In: *IEEE power engineering society general meeting*, Tampa, Florida; June 24-28, 2007.
12. Chinchilla M, Arnaltes S, Burgos JC, Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid, *IEEE Trans Energy Conversion* 2006;21(1):130-135.
13. Figueres E, Garcerá G, Sandia J, González-Espín F, Calvo Rubio J, Sensitivity Study of the Dynamics of Three-Phase Photovoltaic Inverters With an LCL Grid Filter, *IEEE Trans Ins. Electron* 2009;56(3):706-717.