

Modelado y Desempeño Dinámico de un Sistema de Inversor para Fuentes de Generación Distribuida

Francisco M. Gonzalez-Longatt

Resumen—En este artículo, se desarrolla un esquema de control para inversores conectados a un sistema AC (corriente alterna). Este esquema es adecuado para el control de inversores en un ambiente de generación distribuida. El aspecto principal de este esquema de control es que emplea la realimentación de sólo variables que pueden ser medidas localmente en la ubicación del inversor. Esto es esencial para la operación de grandes sistemas de potencias penetrados por generación distribuida. El control de potencia activa y reactiva es logrado por el control de la magnitud y el ángulo del vector de flujo de voltaje a la salida del inversor.

Palabras claves—Inversor, Lazos de control, Potencia, Simulación .

I. INTRODUCCIÓN

Los cambios que se han presentado en la evolución del clima regulatorio y operacional de las empresas eléctricas tradicionales y, las tecnologías emergentes de pequeñas fuentes de generación; han abierto nuevas oportunidades para la generación de electricidad por los usuarios. En este contexto, las fuentes de generación distribuida (FGD) – pequeños generadores de potencia típicamente localizados en la ubicación del usuario donde la energía (térmica y eléctrica) generada es usada- ha emergido como una opción promisoría de cubrir las crecientes necesidades del consumo por potencia Eléctrica con énfasis en la calidad de servicio [1]. Las FGD incluyen una variedad de generadores y almacenamiento de energía, con capacidad en el rango comprendido de 1kW a 10MW.

Una apropiada modelación dinámica de la GD es importante para obtener información del impacto sobre la red, producto de la presencia de este tipo de unidades de generación ante alguna perturbación. La dinámica de las FGD es fundamentalmente diferente al que exhiben las tecnologías de generación tradicional. En la FGD la respuesta es influenciada por la respuesta de la micro fuente y la interfaz con la red AC. Dos clases básicas de micro fuentes se distinguen: una es la fuente DC (corriente continua), tal como las celdas de

combustible, sistemas fotovoltaicos, y la otra es una fuente de voltaje AC de alta frecuencia, tal como la micro turbina. Ambas clases requieren de una interfaz a la red AC, por lo que emplean un inversor alimentado por fuente de voltaje.

La respuesta de la micro fuente es lenta en comandos y típicamente no poseen mecanismos de almacenamiento interno. El agregar un sistema de almacenamiento (como banco de baterías, capacitores) a la salida de la micro fuente hace que la naturaleza de la micro fuente y su detalle durante el transitorio no sea crucial. De hecho, la FGD puede ser vista como un inversor alimentado por una fuente de voltaje (IAFV) con una posibilidad de modulación de ancho de pulso para proveer un rápido control de la magnitud de voltaje). Por esto, el inversor y su control son un componente importante de la dinámica de la FGD.

Este artículo primero desarrolla un método de control para un inversor alimentando potencia activa y reactiva en un sistema AC con un voltaje definido, como se muestra en la Fig 1. Esto conforma las bases de un método de control adecuado para una FGD. El inversor es un IAFV con dispositivos de conmutación de apagado por puerta, operando desde una fuente de voltaje DC, y alimentando a un sistema AC a través de un filtro inductivo. Los requerimientos de control para tal interfaz son descritos en la próxima sección. Las secciones posteriores desarrollan la implementación de un modelo en Simulink™ del esquema de control propuesto y los resultados de simulación de un sistema de potencia como el de la Fig. 1.

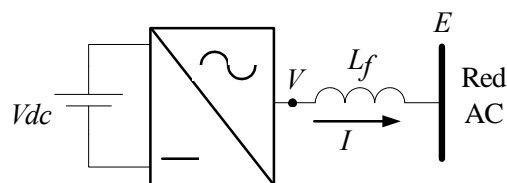


FIG. 1. Interfaz de Inversor al Sistema.

II. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL

El control de inversores empleados para suministrar potencia a un sistema AC en un ambiente distribuido, debe estar basado en información disponible localmente. En un sistema de potencia tradicional densamente penetrado por GD, las grandes distancias puede hacer que la comunicación de información entre inversores sea impráctica. La comunicación de información puede ser usada, sin embargo, para mejorar el

Manuscrito recibido el 29 de Marzo de 2004.

F. M. G. L. está con la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, Carretera Nacional Maracay-Mariara Frente a Base Aérea Mariscal Sucre, Núcleo Maracay, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Maracay, Estado Aragua, Venezuela, Tlf. +58-243-5546954, Fax: +58-244-5546923, E-mail: fglongatt@ieee.org.

desempeño del sistema, pero no debe ser crítico para la operación del sistema. Esencialmente esto implica que el control del inversor debe estar basado en cantidades terminales.

Es bien conocido que la operación estable de un sistema de potencia AC requiere un buen control del flujo de potencia activa P , y potencia reactiva Q . Los flujos de P y Q en un sistema AC pueden ser considerados desacoplados como una aproximación [2]. P depende predominantemente del ángulo de potencia, y Q depende predominantemente de la magnitud de voltaje. Esto es ilustrado en Fig. 2. Por tanto, es indispensable contar con un buen control del ángulo de potencia y el nivel de voltaje por el inversor.

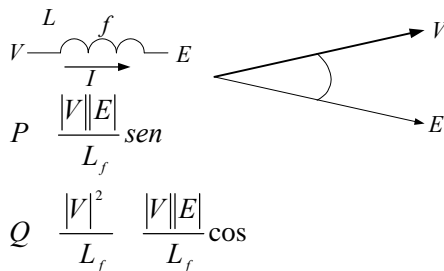


FIG. 2. Flujo de potencia activa y reactiva.

El control de frecuencia dramáticamente controla el ángulo de potencia y en consecuencia el flujo de potencia activa. Para prevenir la sobrecarga del inversor, es importante asegurar que los cambios en la carga sean tomados por los inversores conectados a la red en una forma predeterminada, sin comunicación. Esto se logra en los sistemas de potencia convencionales con múltiples generadores, por la introducción de un *droop* (característica descendente) en la frecuencia de cada generador con la potencia activa P entregada por cada generador. [2]. Esto permite que cada generador tome una porción del cambio de potencia total de una manera determinada por su característica descendente de frecuencia; siendo de algún modo ésta la vía de comunicación entre los sistemas de control de los generadores.

En éste artículo, la misma filosofía es empleada para asegurar una razonable repartición de la potencia total entre inversores conectados a un sistema AC. Similarmente, una característica descendente en el voltaje con la potencia reactiva es usado para asegurar el modo de compartir la potencia reactiva.

Un importante aspecto de la metodología de control desarrollada aquí es su naturaleza altamente modular. Entonces, el esquema de control básico puede ser muy fácilmente adoptado para cumplir con variaciones en la configuración del sistema de potencia. Esta modularidad es lograda por la selección en las cantidades controladas lentas, fuera de los lazos de control para cumplir con la configuración dictada por el sistema de potencia (despacho económico, etc.), mientras se mantienen las cantidades controladas rápidas dentro de la estructura del control del inversor.

III. CONTROL DE UN INVERSOR

La Fig. 1 muestra un simple inversor conectado a una red AC a través de un filtro inductivo. El inversor es asumido que es de seis pulsos, con dispositivos de potencia con encendido apagado por puerta IGBT, alimentado por fuente de voltaje. Esta sección detalla el control del inversor basado en la realimentación de las cantidades medidas localmente en el inversor.

La potencia real y reactiva inyectada a la red AC son las dos variables que son controladas por el inversor. Dado unos ajustes de potencia activa y reactiva P^* y Q^* , la potencia activa P y reactiva Q entregada por el inversor a la red AC puede ser controlada por un método que controla la integral en el tiempo del vector de espacio del voltaje de salida del inversor. Este concepto ha sido aplicado previamente extensivamente en variadores de velocidad para motores [3]-[4].

El control entero del inversor es efectuado en el sistema de referencia estacionario $d-q$. La transformación desde el sistema de referencia abc al sistema de referencia estacionario $d-q-0$ es descrito por las siguientes ecuaciones [5],[7].

$$f_d = \frac{2}{3} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} f_b + \frac{\sqrt{3}}{2} f_c \right) \quad (1)$$

$$f_q = \frac{2}{3} \left(f_a - \frac{1}{2} f_b - \frac{1}{2} f_c \right) \quad (2)$$

$$f_0 = \frac{2}{3} \left(-\frac{1}{\sqrt{2}} f_a + \frac{1}{\sqrt{2}} f_b + \frac{1}{\sqrt{2}} f_c \right) \quad (3)$$

En estas ecuaciones, la cantidad f , generalmente denota una cantidad física, tal como un voltaje o una corriente. En la ausencia de una conexión del neutro, la cantidad f_0 no es de interés [4]. Para un IAFV de seis pulsos, el vector espacial del voltaje puede tomar alguna de las siete posiciones en el plano especificado por las coordenadas $d-q$. Estos son mostrados en Fig. 3 (a) como los vectores 0-6. La integral en el tiempo del vector de espacio de voltaje de salida del inversor es llamado "flujo vectorial del inversor".

El flujo vectorial no tiene el mismo significado que en las aplicaciones de motores. Más bien, esta es una cantidad ficticia relacionada a los voltios-segundos en el filtro con inductor.

Las componentes en los ejes d y q , del vector de flujo del inversor \mathbf{y}_v son definidas como:

$$\mathbf{y}_{dv} = \int_{-\infty}^t v_d dt \quad (4)$$

$$\mathbf{y}_{qv} = \int_{-\infty}^t v_q dt \quad (5)$$

La magnitud de \mathbf{y}_v es:

$$|\mathbf{y}_v| = \sqrt{\mathbf{y}_{qv}^2 + \mathbf{y}_{dv}^2} \quad (6)$$

El ángulo de \mathbf{y}_v , respecto al eje de referencia q es:

$$\mathbf{d}_v = \tan^{-1} \left(\frac{-\mathbf{y}_{dv}}{\mathbf{y}_{qv}} \right) \quad (7)$$

Las componentes en los ejes d y q del vector de flujo de voltaje del sistema AC, \mathbf{y}_e , su magnitud y ángulo son definidos en una forma similar. El ángulo entre \mathbf{y}_v y \mathbf{y}_e están definidos como:

$$\mathbf{d}_p = \mathbf{d}_v - \mathbf{d}_e \quad (8)$$

El control de flujo vectorial ha mostrado que posee un buen desempeño dinámico y de régimen permanente [3],[4],[8],[9]. Este también provee un conveniente medio para definir el ángulo de potencia debido a que aunque el vector de voltaje del inversor conmuta posición en el plano d - q , este no posee discontinuidades en el flujo de vector del inversor. Es muy ventajoso el desarrollar las relaciones de transferencia de potencia en términos de los flujos de vectores. La relación básica de transferencia de potencia activa en el sistema de la Fig. 1 en el eje sistema de referencia d - q es:

$$P = \frac{2}{3} (e_q i_q + e_d i_d) \quad (9)$$

En (9), e_q y e_d son las componentes sobre los ejes d y q , respectivamente, del vector de voltaje del sistema AC, E . Además, i_q e i_d son las componentes del vector de corriente del inversor I . Cuando i_q e i_d son expresados en términos de los flujos, la ecuación es expresada como:

$$P = \frac{3}{2L_f} [e_q (\mathbf{y}_{qv} - \mathbf{y}_{qe}) + e_d (\mathbf{y}_{dv} - \mathbf{y}_{de})] \quad (10)$$

Tomando en cuenta la relación espacial entre los dos flujos de los vectores y asumiendo que el voltaje del sistema AC es sinusoidal, (10) puede ser expresado como:

$$P = \frac{3}{2L_f} \omega |\mathbf{y}_e| |\mathbf{y}_v| \sin(\mathbf{d}_p) \quad (11)$$

En esta expresión, $|\mathbf{y}_v|$ y $|\mathbf{y}_e|$ son las magnitudes de los flujos de los vectores de voltaje del sistema AC y el inversor respectivamente, y \mathbf{d}_p es el ángulo espacial entre ambos flujos. ω es la frecuencia de rotación de los dos flujos vectoriales. La expresión de transferencia de potencia reactiva de la Fig. 1 puede ser obtenida en forma similar. Esta es:

$$Q = \frac{3\omega}{2L_f} [|\mathbf{y}_e| |\mathbf{y}_v| \cos(\mathbf{d}_p) - |\mathbf{y}_e|^2] \quad (12)$$

Las ecuaciones (11) y (12) indican que P puede ser controlada por el adecuado ajuste del ángulo de potencia \mathbf{d}_p , y Q puede ser controlado por la modificación de $|\mathbf{y}_v|$. El acoplamiento cruzado entre el control de P y Q es también aparente en estas ecuaciones. El sistema de control del inversor es mostrado en la Fig. 2.

Las dos variables que son controladas directamente por el inversor son $|\mathbf{y}_v|$ y \mathbf{d}_p . El vector \mathbf{y}_v es controlado de modo que posee una magnitud y una posición angular especificada respecto al vector de flujo del voltaje del sistema AC, \mathbf{y}_e . Esta forma de control esta asociada al lazo de control más íntimo y es muy rápido. Se nota que los vectores espaciales tanto del voltaje en el sistema AC como el del inversor son obtenidos por mediciones instantáneas de los valores de voltaje que están disponibles localmente. Los puntos de ajuste para el controlador son P^* y Q^* , y los ajustes del lazo de control mas interno $|\mathbf{y}_v|^*$ y \mathbf{d}_p^* son derivados de ellos.

Los valores reales de P y Q calculados desde la realimentación son comparados con los valores de ajuste. El error es alimentado a un regulador proporcional e integral (PI), el cual genera los puntos de ajuste $|\mathbf{y}_v|^*$ y \mathbf{d}_p^* para el lazo de control interno. El control del inversor para $|\mathbf{y}_v|$ y \mathbf{d}_p es especificado con má detalle en lasiguiente sub-sección.

A. Control de $|\mathbf{y}_v|^*$ y \mathbf{d}_p^*

El control de $|\mathbf{y}_v|$ y \mathbf{d}_p forma el primer nivel de control y directamente controla la conmutación del inversor. La selección del vector de conmutación del inversor es hecha en las bases de las desviaciones de $|\mathbf{y}_v|$ y \mathbf{d}_p desde los valores de ajuste $|\mathbf{y}_v|^*$ y \mathbf{d}_p^* y la posición del flujo vectorial del inversor en el plano d - q dado para \mathbf{d}_v .

Si la desviación de \mathbf{d}_p de \mathbf{d}_p^* es mayor que un limite especificado, un vector de conmutación cero es elegido. Si esta desviación es menor que el limites especificado o si $|\mathbf{y}_v|$ se desvía de $|\mathbf{y}_v|^*$ por mas que un valor especificado, un vector de conmutación que incrementa a \mathbf{d}_p y cambia $|\mathbf{y}_v|$ en la dirección correcta es seleccionado. Esto es esencialmente logrado por comparadores de histéresis para los valores de ajuste y entonces emplea una tabla de consulta para seleccionar el vector de voltaje de salida del inversor correcto. Las consideraciones para el desarrollo de la tabla de consulta son detalladas en [3]. La selección del vector de conmutación del inversor es dictado por el valor de \mathbf{d}_v .

El plano d - q es dividido en seis sectores para \mathbf{d}_v , como se muestra en Fig. 3.

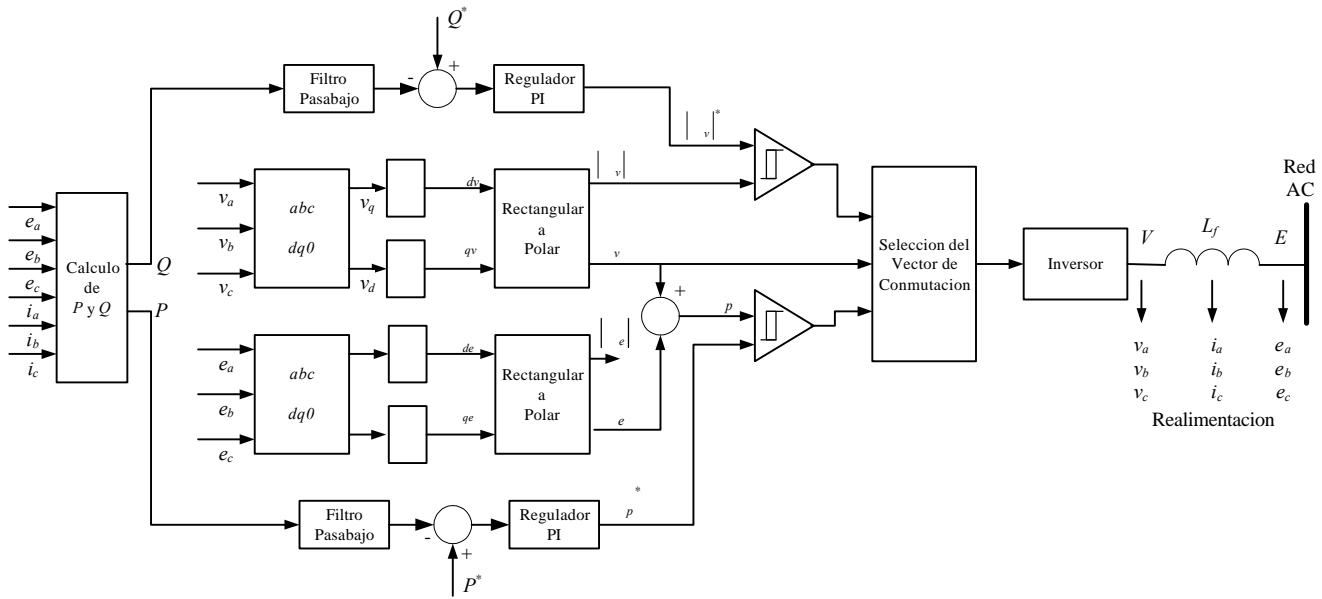
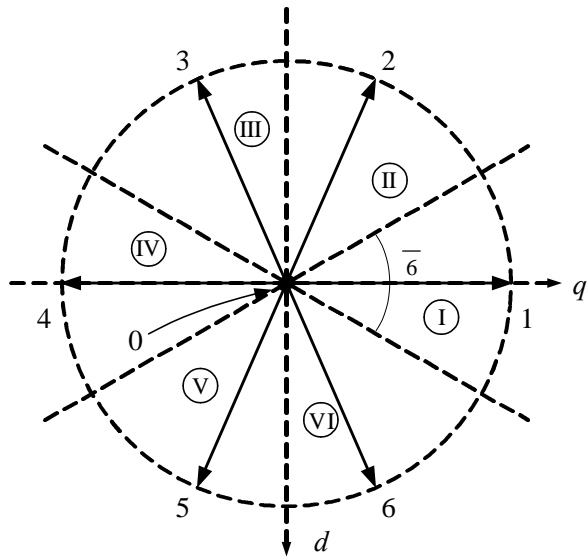


FIG. 2. Esquema de Control.



1 : Vector q de voltaje del inversor
 (I) : Sector I de opcion de vector de voltaje del inversor

Fig. 3. Vectores de voltaje de salida del inversor.

Las posiciones de los vectores de conmutación del inversor son mostrados en la Fig. 4. El valor de d_v determina la selección de dos posibles vectores de conmutación aparte del vector cero. Un vector incrementa la magnitud de $|y_v|$, y el otro lo decrementa, mientras que ambos tienden a incrementar d_p . Entonces, para disminuir d_p , el vector cero es seleccionado. Para corregir el valor de $|y_v|$ uno de los dos vectores de conmutación activo es elegido, dependiendo del signo de la corrección requerida.

La Tabla I da la opción de los vectores activos deconmutación dadas las posiciones de flujo vectorial del inversor, el cual es especificado por d_v . De esta manera, $|y_v|$ y d_p son fuertemente controlados para cumplir con la especificada banda de histéresis por medio de la conmutación del inversor. La punta del vector de flujo de inversor es guiado a lo largo de un camino casi circular. El control de $|y_v|$ y d_p de esta manera resulta en una onda de voltaje PWM a la salida del inversor.

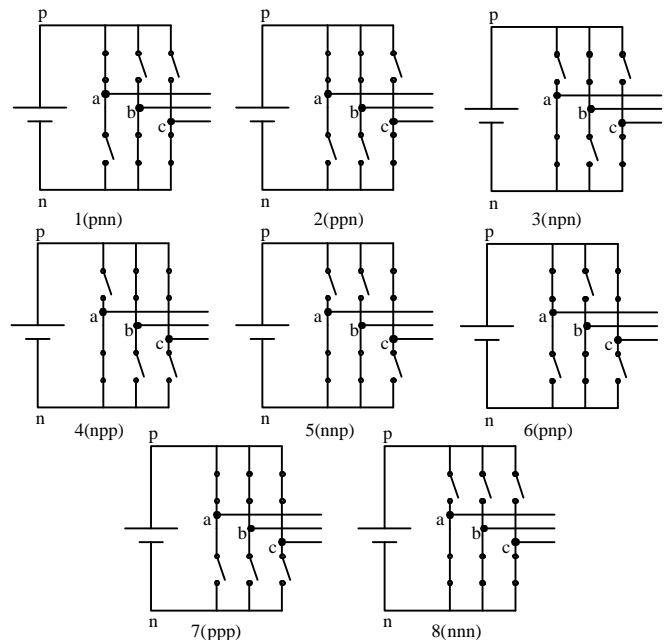


FIG. 4 Posición de los conmutadores.

TABLA I
OPCIÓN DE VECTOR DE CONMUTACIÓN.

	Número de Sector (Localización de y_v)					
	I	II	III	IV	V	VI
Incrementa $ y_v $	2	3	4	5	6	1
Decrementa $ y_v $	3	4	5	6	1	2

(El vector cero es elegido para disminuir d_p)

IV. MODELADO

El esquema de control propuesto para el inversor se implementó en Simulink™, estando compuesto por:

- *Calculo del Flujo vectorial.* En éste bloque, las señales de voltajes (V , E) medidas en ambos extremos del filtro inductivo L_f , son transformados al sistema coordinado rotatorio dq . Se calcula integral en el tiempo (4), (5), para poder determinar el flujo vectorial, y se efectúa la descomposición en magnitud y ángulo (Fig. 5).

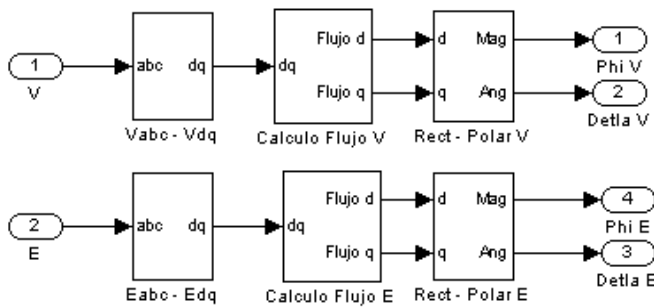


FIG. 5. Bloque cálculo de flujo vectorial

- *Lazos de control P y Q.* La regulación de la potencia activa y reactiva que entrega el inversor se efectúa inicialmente por la realimentación y comparación con los valores ajustados de potencia (P^* , Q^*). El error de potencia es pasado por un control proporcional e integral, con límites de saturación para de este modo calcular, el flujo vectorial $|y_v|^*$ y ángulo d_p^* que satisfacen las condiciones reales de potencia del inavisor (Fig. 6).

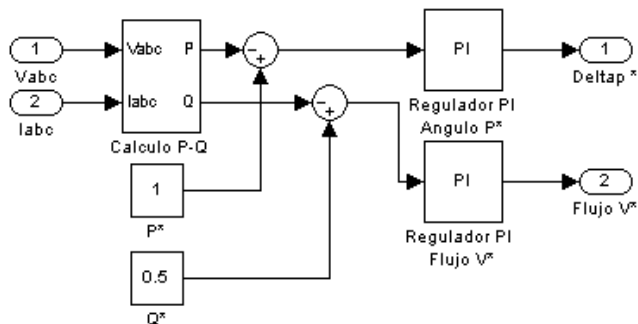


FIG. 6. Bloque control P y Q.

- *Esquema de Disparo.* Para el disparo de los dispositivos de conmutación, se ha empleado el concepto de la integral en el tiempo del vector de flujo de voltaje a la salida del inversor. Los lazos de control P y Q , definen el valor que el flujo vectorial debe tener para satisfacer las condiciones de demanda y una comparación por banda de histéresis define la necesidad de modificación (magnitud y/o ángulo) del flujo vectorial y una tabla predeterminada (*look-up*) define el vector de conmutación adecuado para el inversor.
- *Inversor y filtro AC.* Un puente completo de tres ramas, alimentado por fuente de voltaje (V_{dc}), conforma el inversor trifásico. A la salida del mismo, se ha considerado un inductor (L_f), para el filtrado del rizado de la corriente.

V. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Los resultados de la simulación del sistema mostrado en la Fig. 4, son presentados en las Fig. 7, 8 y 9. El voltaje de la barra DC fue tomado 10kV, y el voltaje de línea a línea del sistema AC 3.3 kV RMS. El inductor es de 17mHy. La Fig. 7 muestra el lugar geométrico del vector de flujo del inversor y_v . El lugar geométrico se aproxima a una circulo, debido a que la magnitud de $|y_v|$, es controlada muy precisamente. La Fig. 8 muestra el voltaje línea a línea v_{ab} y la corriente i_a , a la salida del inversor para $P^* = 1MW$, $Q^* = 500$ kVAR. La Fig. 9. muestra el respuesta del inversor a un cambio, en forma de escalón en Q^* y P^* , sucesivamente. Se nota, a que hay un cambio en P , cuando Q^* es cambiado y, una perturbación en Q cuando P^* es modificado. En cada caso los reguladores P-I modifican los valores de $|y_v|^*$ y d_p^* para mantener P y Q a los valores ajustados. Además, el control estricto de P y Q dentro de los límites es aparente de la Fig. 7.

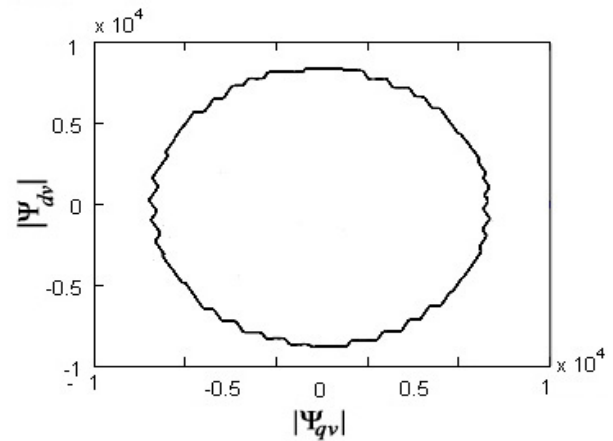


FIG.7. Flujo vectorial del inversor.

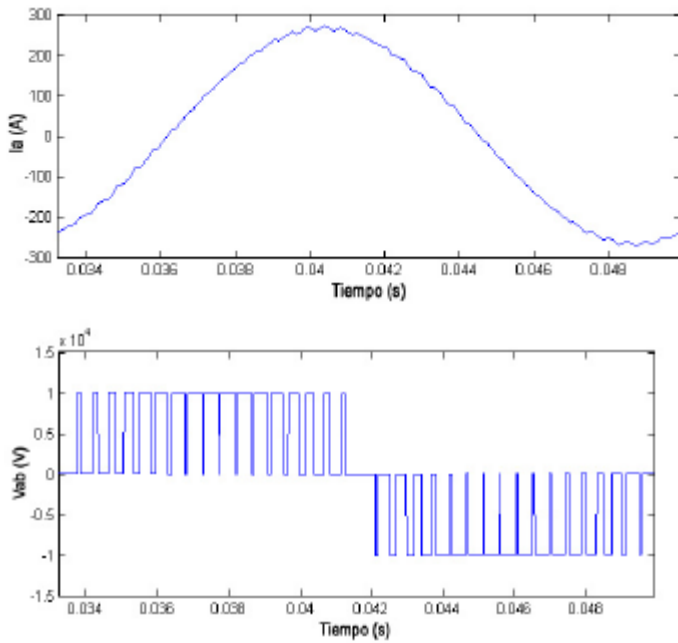


FIG.8. Forma de onda de Voltaje y corriente del Inversor.

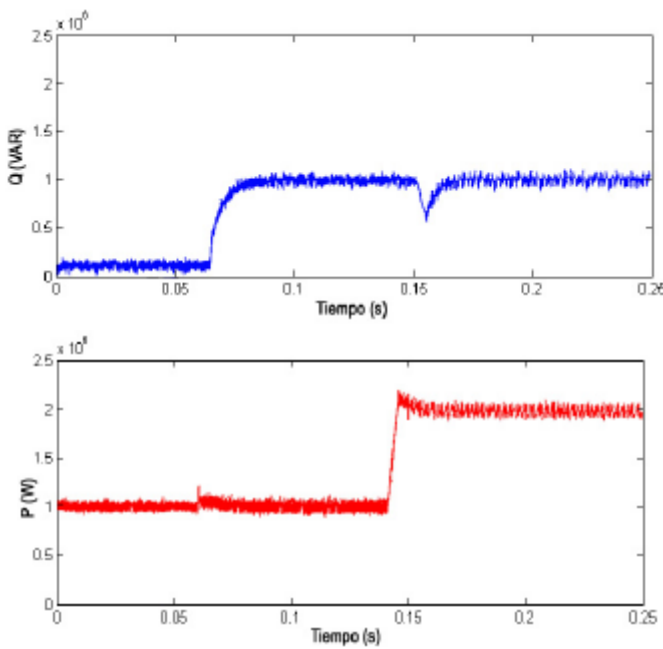


FIG.9. Potencia activa y reactiva a la salida del inversor.

VI. CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado un método efectivo de control para un inversor alimentado por fuente de voltaje, que entrega potencia a un sistema de potencia AC. La metodología de control emplea variables localmente disponibles en el inversor y no requiere comunicación con el resto de los elementos del sistema de potencia, por lo que resulta de una estructura altamente modular. Esta característica lo hace muy simple de absorber las modificaciones en la red de potencia, y muy propicio para aplicaciones de generación en sitio o generación distribuida. Los resultados de la simulación indican que el esquema logra los objetivos de controlar del flujo de potencia entregado por el inversor. El esquema descrito en este artículo usa un regulador PI, para determinar los componentes (magnitud y ángulo) del vector de flujo vectorial para lograr el cometido. Para finalizar este artículo, presento los requerimientos del sistema de inversor conectado a una red AC, desarrolló un esquema modular para lograr esos requerimientos sin requerir comunicación con otros elementos de la red, presento simulación del esquema de control.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R.H. Lasseter, “**MicroGrids**”, 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Conference Proceedings, New York, NY, vol. 1, pp. 305-308.
- [2] A.R. Bergen. “**Power System Analysis**”. Englewood Cliffs. New York: Prentice Hall, 1986.
- [3] I. Takahashi and T. Noguchi, “**A new quick-response and high-efficiency control strategy of an inductor motor**”. IEEE Trans. Industry Applications, Vol. IA-22, pp. 820-827, sept/Oct. 1986.
- [4] M. Depenbrock, “**Direct self control (DSC) of inverter fed induction machine**”, IEEE Trans. Power Electronic, Vol. 3, pp. 420-429, Oct 1988.
- [5] T. A. Lipo, “**Analysis of synchronous machines**”, notas de clases, Univ. Wisconsin-Madison, 1990.
- [6] C. M. Chandorkar, M. Deepakaraj “**Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems**”. IEEE Trans. On Ind. Applications. VI 29. No 1, January/February, 1993.
- [7] M. B. Linggren. “**Analysis and simulation of digitally-controlled grid connected PWM-converters using the space-vector average approximation**”, Proceeding of the 5th IEEE Workshop on Computer in Power Electronics, pp. 85-89, 1996.
- [8] G. Lewwich and H. Sharma, “**Connection of Inverters to a weak grid**”, Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2000, Vol 2, pp. 1018-1022, 2000.
- [9] A. Lohner; T. Meyer; A. Nagel. “**A new panelintegratable inverter concept for grid-connected photovoltaic systems**”. ISIE '96. Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Warsaw, Poland, 17-20 June 1996, Vol. 2, pp.827-831, June 1996.