

TÉCNICAS DE CONTROL DE CORRIENTE PARA UN INVERSOR TRIFÁSICO ALIMENTADO EN VOLTAJE

Ing. Salomé Rivera Martínez

Instituto Tecnológico de Celaya
s-rivera-m@hotmail.com

M.C. Héctor Juan Carlos López Tapia

Instituto Tecnológico de Celaya
hector.lopez@itcelaya.edu.mx

Dr. Nimrod Vázquez Nava

Instituto Tecnológico de Celaya
n.vazquez@ieee.org

M.C Claudia Verónica Hernández Gutiérrez

Instituto Tecnológico de Celaya
claudia.hernandez@itcelaya.edu.mx

RESUMEN

En el presente trabajo tiene como objetivo analizar tres técnicas diferentes de control no lineal las cuales son utilizadas para regular la corriente de salida en un inversor trifásico alimentado en voltaje. Las técnicas de control se clasifican en dos categorías; control lineal y control no lineal. En cuanto a las técnicas de control no lineal descritas en el presente artículo, la primer técnica es realizada utilizando un control por modos deslizantes, la segunda técnica utilizan un control de corriente predictivo en el cual se incorpora una cuarta rama del inversor trifásico para dicho control, la tercera técnica es un control por histéresis de banda variable para mantener una frecuencia de conmutación fija. Se muestran las simulaciones obtenidas, así como los resultados experimentales y una comparación entre las técnicas de control presentadas.

Palabras Clave: Control de corriente, Control por histéresis, Control modo deslizante, Control predictivo, Inversor trifásico.

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de control de corriente en inversores trifásicos es un tema importante en la electrónica de potencia ya que en muchas aplicaciones es utilizado el inversor trifásico; ejemplos de ello es en el control de motores, en sistemas de energía interrumpibles (UPS, por sus siglas en inglés) y en inversores conectados a la red, así como para rectificadores y filtros activos [1,2]. Para ello existen diferentes técnicas en la literatura [3,4].

El rendimiento del inversor depende en gran parte de la estrategia de control que se aplique, convirtiéndose de este modo el control de corriente en un importante factor a tomar en cuenta; debido a que todas las técnicas de control tienen sus ventajas y desventajas, es importante saber para qué aplicación se va a utilizar.

Por otra parte la función de un inversor trifásico es cambiar el voltaje de entrada de CD a un voltaje de salida senoidal desfasado 120 grados entre sí, con la magnitud y frecuencia deseadas [5]. En la figura 1 se muestra la topología de un inversor trifásico de dos niveles alimentado en voltaje, el cual está compuesto por seis elementos de conmutación que pueden ser MOSFETs, IGBTs o BJT's.

Los inversores pueden ser alimentados en corriente y/o voltaje, la diferencia incide en que el de corriente lleva un inductor y el de voltaje lleva un capacitor. Para el caso del inversor alimentado en voltaje se debe tener en cuenta no activar al mismo tiempo dos

interruptores de una misma rama, ya que de lo contrario se podría generar un corto circuito; para evitar esto se debe agregar un tiempo muerto en las señales de control, este tiempo depende de las características de los interruptores que son el tiempo de retardo en el encendido y el tiempo de retardo en el apagado.

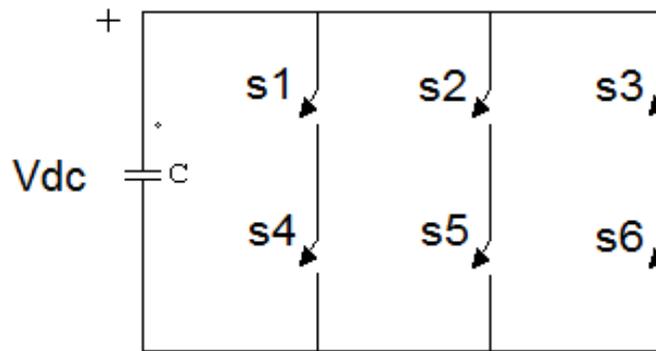


Figura 1. Inversor trifásico alimentado en voltaje

Como ya se ha mencionado anteriormente, el control es un factor importante en el rendimiento del inversor ya que de dicho control dependen los resultados a obtener del inversor, por ello los aspectos importantes que deben manejar estos controles son los siguientes:

- Rápida respuesta dinámica.
- Baja distorsión armónica total (THD).
- Seguimiento de referencia.

2. TÉCNICAS DE CONTROL DE CORRIENTE.

Las técnicas de control de corriente en inversores se clasifican en dos grupos que son control lineal y no lineal.

Control lineal

Este tipo de control utiliza una modulación por ancho de pulso senoidal (SPWM) o espacio vectorial (SVPWM). Los sistemas de control lineal tienen compensación de error de corriente lo que permite aprovechar las ventajas de la modulación (SPWM, SVPWM) que son frecuencia de conmutación constante y espectro armónico definido; por otra parte están limitados al operar con una carga desbalanceada, para ello se deben adaptar a las características de dicha carga para su buen desempeño. Generalmente es utilizado un control PI (proporcional-integral) [3].

Control no lineal

Incluye por lo general el control por histéresis, control por modos deslizantes, predictivo.

Control por modos deslizante SMC

Es un método de control no lineal que altera la dinámica de un sistema no lineal mediante la aplicación de una señal de control discontinuo que obliga al sistema, al seguimiento de una trayectoria a lo largo de una sección transversal. Por lo tanto el control por modos deslizantes es un método de control de estructura variable [6]. Este tipo de control utiliza una superficie de deslizamiento cuyo objetivo consiste en llevar al sistema sobre esta misma, haciendo que permanezca ahí hasta llevarlo a un punto de operación deseado, ver figura 2.

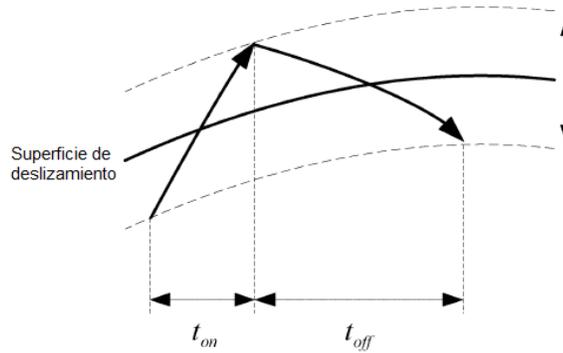


Figura 2. Superficie de deslizamiento

Sin embargo, en las aplicaciones reales de control, cuando el sistema se encuentra en régimen deslizante, la frecuencia de conmutación tiende a ser infinita; no obstante, existen problemas esenciales ya que los dispositivos de conmutación no pueden conmutar a una frecuencia infinita, por ello esta frecuencia se debe limitar y determinar para cuestiones prácticas. En la figura 3 se muestra el esquema de un diagrama de bloques sobre el control modo deslizante para un inversor trifásico alimentado en voltaje.

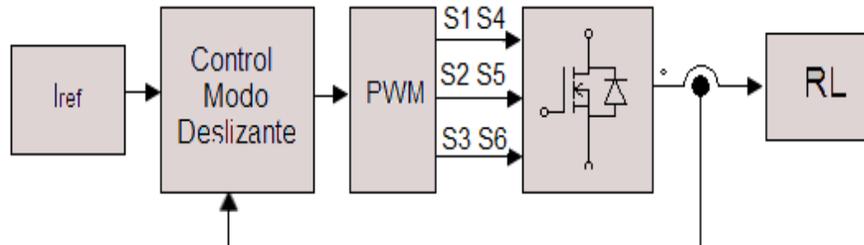


Figura 3. Control modo deslizante para un inversor trifásico

Los resultados obtenidos en [6] se muestran en la figura 4, donde se aprecia el seguimiento que se tiene de las corrientes sobre la referencia donde se puede ver que se tiene un buen seguimiento de referencia. Por otra parte, en la figura 5 se observa el contenido de armónicos de la señal de salida a la frecuencia de conmutación; como se

puede observar en dicha figura, se tienen dos componentes principales, en donde el mayor es a la frecuencia fundamental y el otro es a 10kHz, la frecuencia de conmutación.

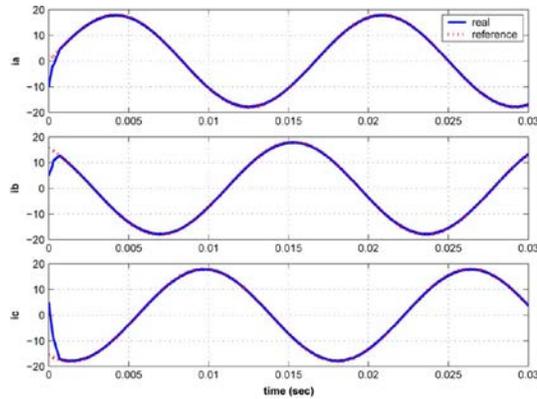


Figura 4. Seguimiento de corriente utilizando SMPWM

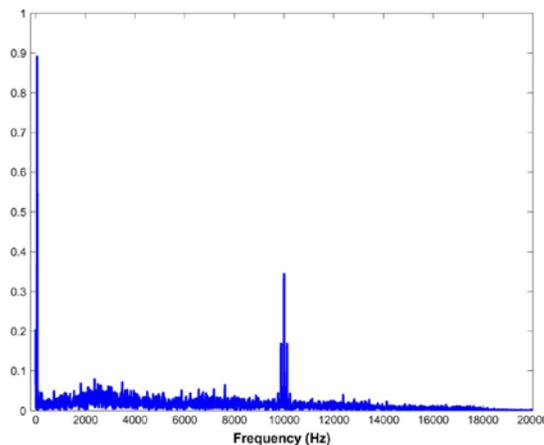


Figura 5. Contenido de frecuencia del control SMPWM

Control predictivo

El propósito de este control es predecir, en cada periodo de modulación y en base al error actual y de los parámetros del sistema, el valor que debería de adoptar la tensión de salida del inversor para asegurar que la corriente de salida alcance el valor de referencia [7].

El control de corriente predictivo se explica en los siguientes tres pasos [8,9] a través de un diagrama de bloques, el cual se muestra en la figura 6.

- 1) Se obtiene el valor de la corriente de referencia $i^*(k)$,(a partir de un lazo de control externo) y se mide la corriente de carga $i(k)$.
- 2) El modelo del sistema (bloque 1) se utiliza para predecir el valor de la corriente de carga en el siguiente intervalo de muestreo $i(k+1)$ para cada uno de los diferentes vectores de tensión.
- 3) La función de calidad evalúa el error entre la referencia y las corrientes previsibles en el siguiente intervalo de muestreo, la corriente se selecciona y se aplica a la carga (bloque2).

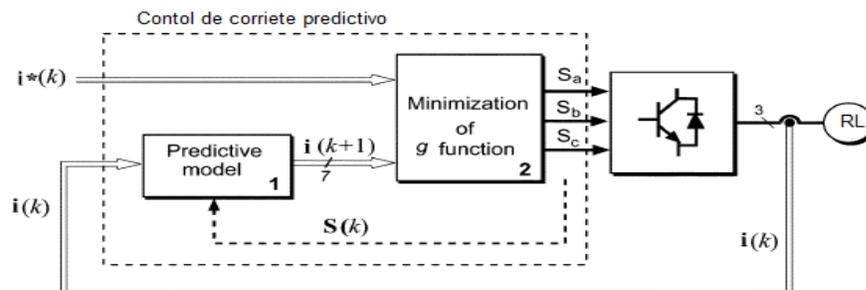


Figura 6. Diagrama de bloques del control de corriente predictivo

En el trabajo [8] se le adiciona una cuarta rama al inversor, el cual es mostrado en la figura 7, con el objetivo de realizar el control de corriente de las tres fases. Dicha rama está conectada al neutro del inversor. Sin embargo, debido a la cuarta rama adicional, aumenta el número de señales de control para los interruptores; por lo tanto, aumenta la complejidad en el control en comparación con el de tres ramas, no obstante se puede

usar una fase o las tres, en carga balanceada o desbalanceada para el control sin afectar el circuito.

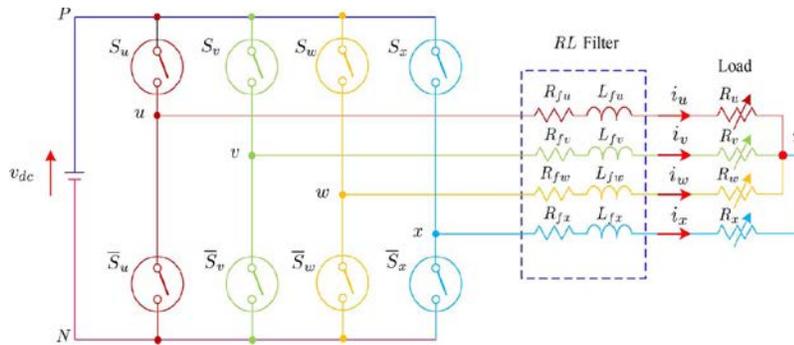


Figura 7. Inversor trifásico de cuatro ramas

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 8 [8], obtenida al realizar un cambio en las corrientes; así mismo, se puede observar en la simulación que se tiene una rápida respuesta dinámica de corriente sin salirse de los valores establecidos. En la figura 9 las corrientes de salida son las deseadas; debido a que las corrientes están desequilibradas la corriente fluye a través del neutro de la cuarta rama y no es senoidal ya que la frecuencia de las tres fases es diferente. Por otra parte, los valores de la distorsión armónica total (THD) que se obtuvieron por fase para cargas balanceadas fueron las siguientes 4.61%, 5,72% y 5,81%, para corrientes respectivamente. Con esto se comprueba que por medio de una cuarta fase se puede regular corriente y frecuencia de una o de las tres fases de manera independiente.

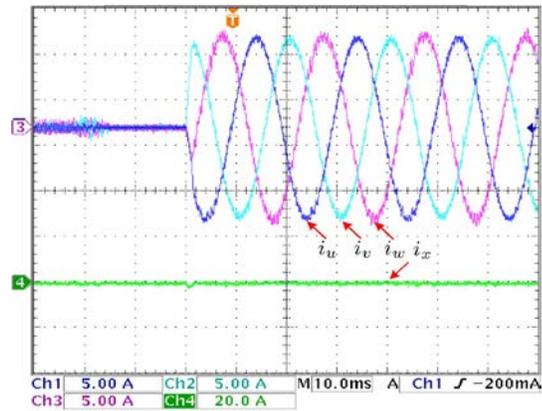


Figura 8. Cambio de corriente de 0 a 10A

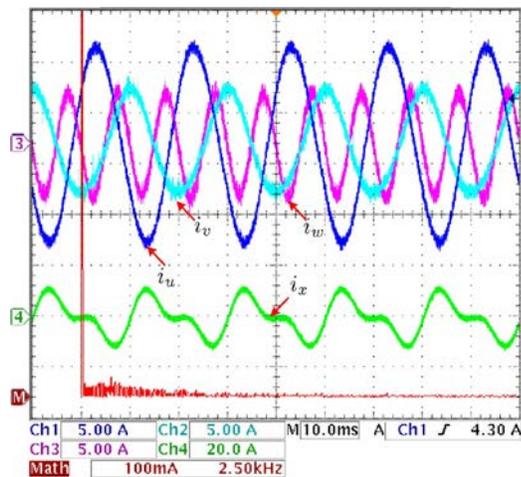


Figura 9. Corrientes de referencia desbalanceadas

Control por banda de histéresis

Es un método que se utiliza en el control de corriente de salida para un inversor alimentado en voltaje. Este tipo de control se muestra en la figura 10. Se basa en el seguimiento de una corriente de referencia a través de un ancho de banda con un límite superior y un límite inferior, en el cual se generan los estados de encendido y apagado de los interruptores para el inversor; una de las ventajas de dicho control es

que se tiene un buen rendimiento, con una rápida respuesta dinámica; por el contrario, una desventaja que se tiene es la frecuencia de conmutación variable[10]. No obstante, una forma de hacer nula dicha desventaja es utilizando una modulación con banda variable, esto provoca que se obtenga una frecuencia de conmutación constante, éste es uno de los trabajos presentados en este artículo [11], en donde además se le adiciono un tercer armónico para evitar la sobre modulación y así obtener el beneficio de un mayor voltaje en las terminales del inversor.

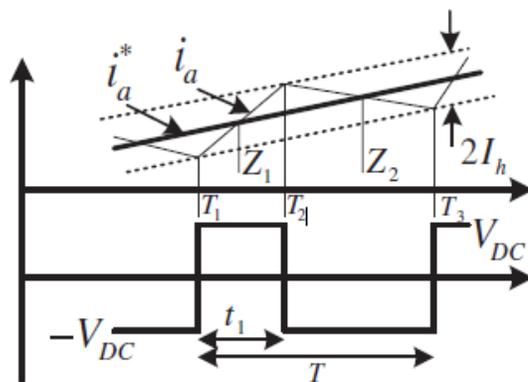


Figura 10. Proceso de regulación de corriente por histéresis

3. RESULTADOS.

En la figura 11 se muestra la respuesta dinámica ante un cambio del 100% en la corriente, donde queda demostrada la rápida respuesta dinámica del sistema. También se muestra la distorsión armónica, figura 12, donde se realiza una comparación de la distorsión armónica, por lo que los autores estudiaron tres diferentes casos con la misma condición con respecto a la frecuencia de conmutación. En la figura 12(a) utiliza un control por histéresis de banda fija con una distorsión armónica del 12.1% en comparación con el de banda adaptativa, para el cual es de 6.33%, ver figura 12 (b), y para el tercer caso se utiliza un control convencional PWM con una distorsión armónica

de 5.14%. En todos los casos se obtienen dos componentes principales, donde uno de ellos es a la frecuencia fundamental y el otro es debido a la frecuencia de conmutación [11].

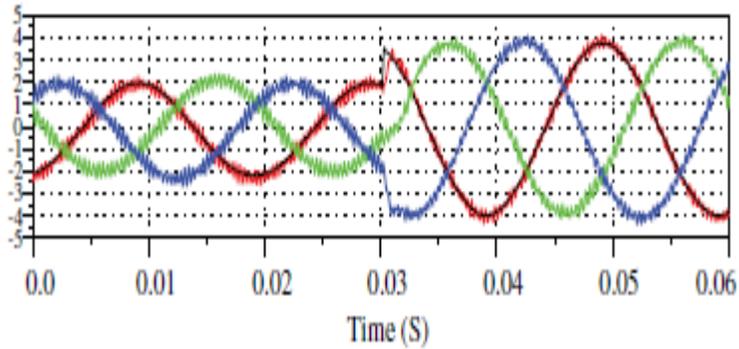


Figura 11. Cambio en la corriente del 100%

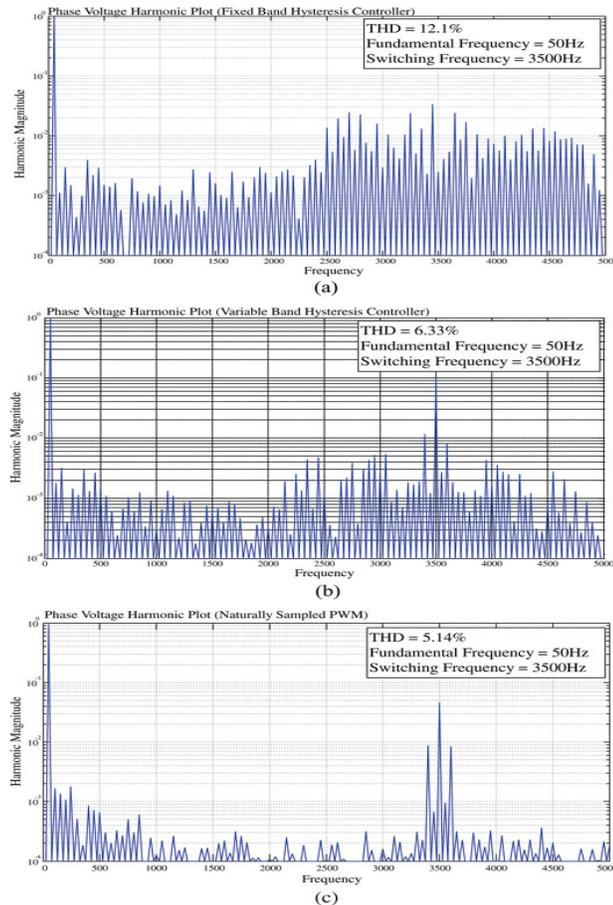


Figura 12. Armónicos de voltaje (a) control de banda fija por histéresis, (b) control de banda adaptativa por histéresis y (c) PWM con 80% de modulación sin la inyección del tercer armónico.

4. COMPARATIVA

En la tabla 1 se presenta una comparación del rendimiento de las técnicas de control descritas en este trabajo en el que incluye la distorsión de armónica total (THD), la respuesta dinámica y el dispositivo utilizado en la implementación del control. Los valores obtenidos de la Distorsión armónica total y Respuesta dinámica del control modo deslizante fueron obtenidos a partir de un análisis de los resultados.

Tabla 1. Comparativa del rendimiento

	Modo deslizante	Predictivo	Histéresis
THD	10%	<i>Por fase</i> $i_u = 4.61\%$ $i_w = 5.72\%$ $i_w = 5.81\%$	6.33%
Respuesta dinámica	1ms	4 ms	0.769ms
Dispositivo utilizado	DSP Ram 36Kb Flash 256Kb	Tarjeta de control SDRAM 32 MB Flash 8MB	DSP Ram 36Kb Flash 128Kb

5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se analizaron las técnicas de control de corriente no lineal aplicadas a un inversor de tres fases, describiendo los principios básicos de operación de cada una

de las técnicas de control, así como sus ventajas y algunas de sus limitaciones con el fin de presentar a todas aquellas personas que gusten adentrarse en el tema de control de corriente en un inversor trifásico para su implementación y diseño.

Se puede observar en los artículos revisados en el desarrollo de este trabajo que las técnicas de control de corriente se prefiere llevarlas a cabo mediante una implementación en un control digital.

REFERENCIAS

- Malesani, L., Mattavelli, P., & Buso, S. (1999). Robust dead-beat current control for PWM rectifier and active filters. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 35(3), 613–620.
- Espí, J.M., Castelló, J., García, R., Garcerá, G., & Figueres, E. (2011). An adaptive robust predictive current control for three-phase grid-connected inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(8), 3357-3546.
- Kazmierkowski, M.P., & Malesani, L. (1998). Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45(5), 691-703.
- Kalyanraj, D., & Prakash, S.L. (2013). Design and performance analysis of different current control strategies of voltage source inverter. International Conference. Power, Energy and Control (ICPEC), India.

- Rashid, M.H. (2004). Inversores modulados por ancho de pulso. (Tercera edición), *Electrónica de potencia, Circuitos, dispositivos y aplicaciones* (pp.226-248). México: Pearson. Prentice Hall.
- Yan, W., Hu, J., Utkin, V., & Xu, L. (2008). Sliding Mode Pulsewidth Modulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(2), 619-626.
- Navas, C.M., & Pacheco, C.L. (2006). Filtro activo. Control en modo corriente del Puente inversor trifásico. (Tesis de ingeniería). Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Rivera, M., Yaramasu, V., Llor, A., Rodríguez, J., Wu, B., & Fadel, M. (2013). Digital Predictive Current Control of a Three-Phase Four-Leg Inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(11), 4903-4912.
- Rodríguez, J., Pontt, P., Silva, C.A., Correa, P., Lezana, P., Cortés, P., & Ammann, U. (2007). Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(1), 495-503.
- Nachiappan, A., Sundararajan, K., & Malarselvam, V. (2012). Current Controlled Voltage Source Inverter Using Hysteresis Controller And PI Controller. International conference, Power, Signals, Controls and Computation (EPSCICON). Sathyabama University, Chennai, India.
- Holmes, D.G., Davoodnezhad, R., & McGrath, B.P. (2013). An Improved Three-Phase Variable-Band Hysteresis Current Regulator. *IEEE Transactions on power electronics*, 28(1), 441-450.