

CONTROL VECTORIAL DE MOTORES DE INDUCCIÓN

VECTOR CONTROL OF INDUCTION MOTORS

ESPERANZA CAMARGO CASALLAS¹
 ENRIQUE YAMID GARZÓN GONZÁLEZ²
 MIGUEL RICARDO PÉREZ PEREIRA³

RECIBIDO: JUNIO 2010
 APROBADO: SEPTIEMBRE 2010

RESUMEN:

la técnica de SVPWM (modulación por ancho de pulso del vector espacio) permite mejorar la respuesta dinámica de un motor de inducción, caracterizado por su robustez, costo y sencillez. Sin embargo, su uso ha sido restringido por las sobreintensidades que se producen en la red; en el presente artículo se muestra una implementación de la técnica SVPWM que aproxima el comportamiento de un motor de inducción al comportamiento de un motor de corriente directa, es decir, mantiene la relación de voltaje y frecuencia constante. Mediante esta técnica se logra un control independiente de velocidad y flujo; así mismo, permite incrementar un control de flujo de forma tal que se consigue extender el rango de velocidad del motor y optimizar la producción de torque en dicho rango; disminuye la distorsión armónica en los voltajes y corrientes de salida; y el factor de modulación alcanza hasta el 86%, en comparación con la técnica PWM, la cual es del 78,5%.

Palabras clave

Motores de inducción, conmutación, IGBT, PWM, modulación por ancho de pulso del vector espacio

Abstract

SVPWM technique (pulse width modulation of the vector space) can improve the dyna-

mic response of an induction motor, which are characterized by their robustness, cost and simplicity. However, its use has been restricted by the currents that occur on the network, in this article shows an implementation of SVPWM technique which approximates the behavior of an induction motor, the behavior of a DC motor, ie

1. Ingeniera en Control Electrónico e Instrumentación de la Universidad Distrital. Especialista en Instrumentación Electrónica de la Universidad Santo Tomás. Estudiante de Doctorado en Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. Docente de la Universidad Distrital. Directora de proyecto de investigación del grupo DIGITI de la Universidad Distrital. Correo electrónico: ecamargoc@udistrital.edu.co.

2. Ingeniero en Control Electrónico e Instrumentación de la Universidad Distrital. Especialista en Instrumentación Electrónica de la Universidad Santo Tomás. Magíster (C) en Ingeniería Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana. Docente de la Universidad Distrital. Director proyecto de investigación en el grupo de investigación ROMA, vinculado a la Universidad Distrital. Correo electrónico: eygarzong@udistrital.edu.co.

3. Ingeniero en Control Electrónico e Instrumentación de la Universidad Distrital, Especialista en Docencia Universitaria de la Universidad San Buenaventura. Magíster (C) en Ingeniería Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana. Docente de la Universidad Distrital. Correo electrónico: perez_pereira_m@yahoo.com.

maintaining the relationship of voltage and constant frequency. This technique achieves independent control of speed and flow, and also enables increased flow control so that you get to extend the range of engine speed and optimize the production of torque in that range, reduces harmonic distortion in output voltages and currents, the modulation factor reaches up to 86% compared with the PWM technique which is 78.5%.

Key words

Space vector pulse width modulation, Induction motors, switching, IGBT, PWM

1. INTRODUCCIÓN

El uso de motores de inducción se ha visto limitado ya que las sobreintensidades provocan caídas de tensión e introducen armónicos en el sistema. Para el control de este tipo de motores, comúnmente se utilizan métodos tales como: control electrónico por tensión, estrella, triángulo, resistencias rotóricas y control por convertidores de frecuencia-voltaje. Estos métodos han mejorado gracias al avance de los dispositivos de conmutación de alta frecuencia y de los dispositivos digitales como microcontroladores, DSP, FPGA y PSOC.

El control SVPWM permite variar la velocidad de un motor de manera muy similar a los motores de corriente continua. Así mismo, permite disminuir los armónicos inyectados en la red [1],[2],[3].

2. VECTOR DE CONTROL

Para la obtención del vector de control se parte de las ecuaciones que describen una señal trifásica de cada uno de los devanados:

$$\begin{aligned} V_R &= V_m \text{Sen } Wt \\ V_S &= V_m \text{Sen} \left(Wt - \frac{2\pi}{3} \right) \\ V_T &= V_m \text{Sen} \left(Wt + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} V_a &= V_m \text{Cos } Wt \\ V_b &= V_m \text{Cos} \left(Wt - \frac{2\pi}{3} \right) \\ V_c &= V_m \text{Cos} \left(Wt + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \tag{2}$$

Partiendo de que una señal trifásica puede ser descrita a través de funciones exponenciales con un desfase de 120°, se obtiene la ecuación (3).

$$\vec{v} = \frac{1}{c} \left[V_a(t) + V_b(t)e^{-jW\frac{2\pi}{3}} + V_c(t)e^{jW\frac{2\pi}{3}} \right] \tag{3}$$

Siendo c una constante igual a $\sqrt{\frac{3}{2}}$ y reemplazando en las ecuaciones (2) y (3), se obtiene el vector de control:

$$\begin{aligned} \vec{v} &= \frac{2}{3} V_m \left[\frac{e^{jWt} + e^{-jWt}}{2} + \frac{e^{jWt} + e^{jWt + \frac{4\pi}{3}}}{2} + \frac{e^{jWt} + e^{jWt + \frac{8\pi}{3}}}{2} \right] \\ \vec{v} &= \frac{2}{3} V_m \left[\frac{3}{2} e^{jWt} \right] \\ \vec{v} &= \frac{2}{3} V_m \left[\frac{3}{2} e^{jWt} \right] \\ \vec{v} &= V_m e^{jWt} \\ \vec{v} &= \sqrt{2} \text{ eficaz } e^{j\omega t} \end{aligned}$$

(4)

Una vez se obtiene este vector, se requiere relacionarlo con el inversor. Vale la pena recordar que aquel se desplaza entre los vectores de inducción, con módulo igual a V_m constante y velocidad síncrona constante W [4],[5],[6].

3. VECTOR DE CONTROL EN EL INVERSOR

Para relacionar las tensiones aplicadas en el inversor es necesario realizar el diagrama de este y revisar las impedancias de los devanados, así como las tensiones en cada uno de ellos.

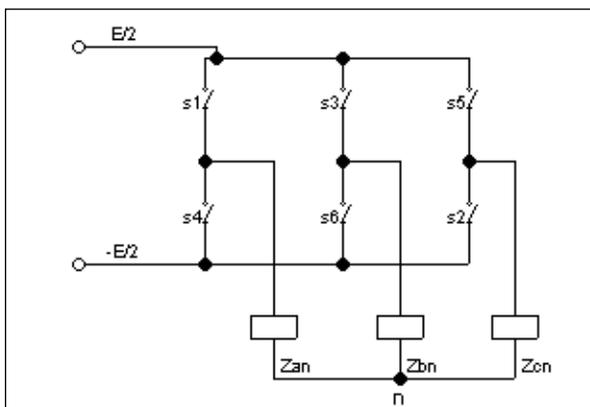


Figura 1. Diagrama del inversor

Los seis vectores están conformados por tres bits, como se muestra en la tabla 1.

Nº. Vector	Vector
\bar{V}_0	000
\bar{V}_1	100
\bar{V}_2	110
\bar{V}_3	010
\bar{V}_4	011
\bar{V}_5	110
\bar{V}_6	101
\bar{V}_7	111

Tabla 1. Vectores de control

Para el control del inversor siempre deben estar tres abiertos y tres cerrados. De esta manera se pueden obtener los siguientes ocho vectores posibles.

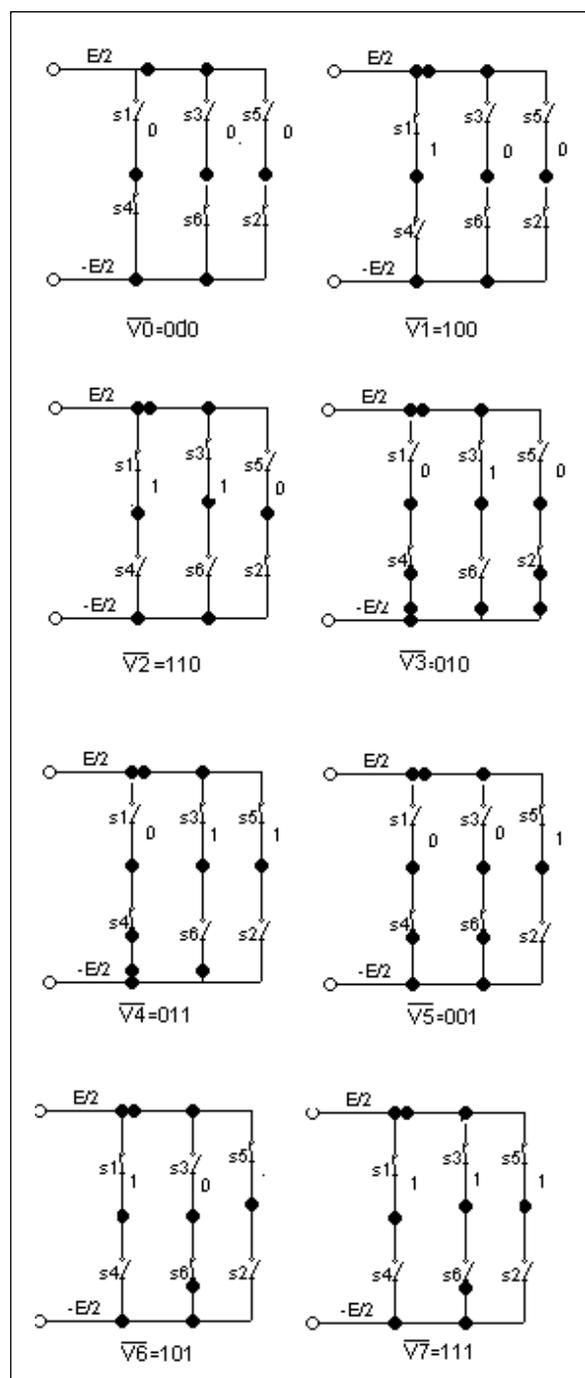


Figura 2. Vectores de control

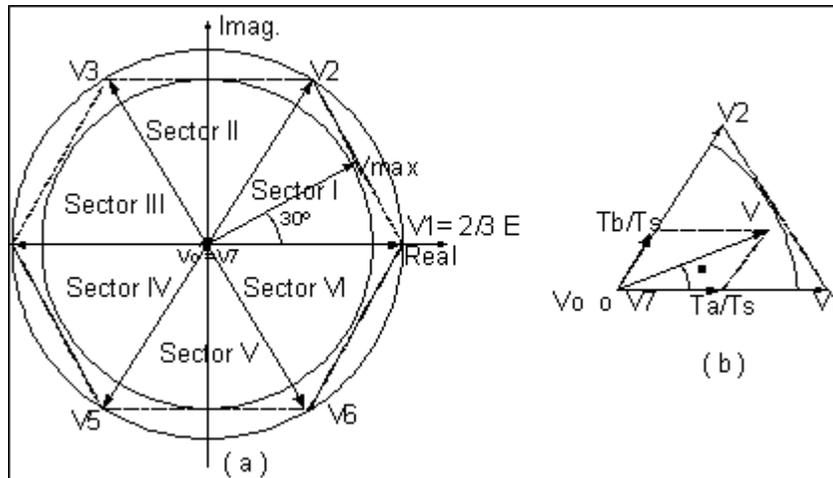


Figura 3. Representación del desplazamiento del vector

Los vectores $\overline{V0}$ y $\overline{V7}$ no transfieren energía al motor, por lo que son considerados nulos. Los seis vectores restantes forman un hexágono por el cual se desplaza el vector de control [7],[8],[9].

4. DESPLAZAMIENTO DEL VECTOR DE CONTROL

El recorrido del vector denota un hexágono, el cual representa el desplazamiento, tal como se muestra en la figura 3.

Al construir este hexágono los vectores con-

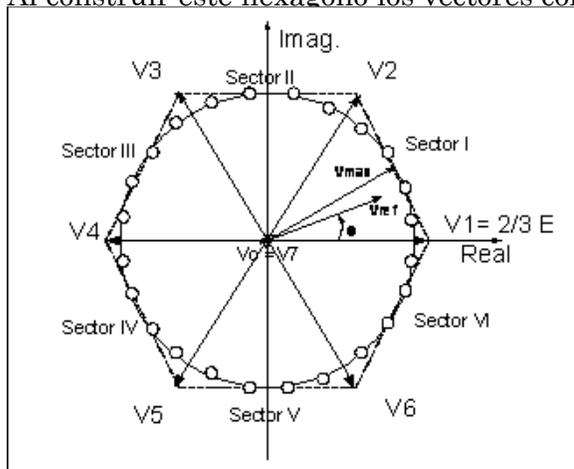


Figura 4. Desplazamiento del vector de control en cuatro tiempos por sector

forma un ángulo de 60° entre sí, por el cual se desplaza el vector de control.

En el origen del círculo inscrito en el hexágono se encuentran los vectores $\overline{V0}$ y $\overline{V7}$ (vectores nulos). Teniendo en cuenta que con solo seis vectores no se obtiene gran continuidad en el desplazamiento, lo cual genera cambios bruscos en la velocidad del motor, se cambia el tiempo de muestreo de $T_s = \frac{T}{6}$ a $T_s = \frac{T}{24}$; con esto se puede observar un cambio continuo en la velocidad [5], [10], [11].

Los vectores $\overline{V0}$ y $\overline{V7}$ son utilizados para introducir tiempos muertos y así obtener la discretización necesaria. Por lo general, solamente se utiliza uno de los vectores $\overline{V0}$ o $\overline{V7}$, ya que al utilizar los dos vectores se introduce un tiempo más de conmutación, lo cual está limitado a los dispositivos de conmutación.

Puesto que los vectores nulos son comunes a todos los sectores, convendría iniciar y terminar cada ciclo con un vector nulo. Por lo tanto, la distribución de los ciclos de trabajo se puede dividir utilizando los dos vectores nulos $\overline{V0}$ y $\overline{V7}$ o uno de los vectores nulos $\overline{V0}$ o $\overline{V7}$.

5. DISTRIBUCIÓN DE LOS CICLOS DE TRABAJO

Los criterios para utilizar uno o los dos vectores nulos tienen que ver con los tiempos de conmutación, ya que el uso de los dos vectores introduce más tiempos de conmutación, y con ello se consigue una mayor frecuencia de conmutación, mucho más grande que la fundamental, lo cual reduce el contenido armónico de la señal; sin embargo, el uso de los dos vectores aumenta las pérdidas de conmutación. Estas pérdidas, en cambio, disminuyen con un solo vector, pues los tiempos de conmutación son menores, pero aumenta la cantidad de armónicos, ya que la frecuencia de conmutación no es tan grande como la fundamental. Para cualquiera de los dos criterios es importante elegir correctamente los dispositivos electrónicos de conmutación; actualmente se recomienda IGBT de frecuencias altas [4],[10].

La distribución de los ciclos se puede realizar por cuatro técnicas, a saber:

- Flanco de subida.
- Flanco de bajada.
- Simetría.
- Alternado.

La distribución de los ciclos, por parte del controlador, está sujeta al diseñador, ya que la disminución de armónicos que se obtiene utilizando los dos vectores nulos, se equilibra con el aumento de pérdidas de conmutación; Por lo tanto, si se decide utilizar dos vectores nulos, o sólo uno de los dos, la técnica de alineación varía, como se muestra en las figuras 5 y 6. La decisión, en todo caso, dependerá de la aplicación que se requiera.

Comparando las conmutaciones que introducen los dos vectores nulos, estas se reducen a una tercera parte cuando se utiliza solamente uno de estos vectores.

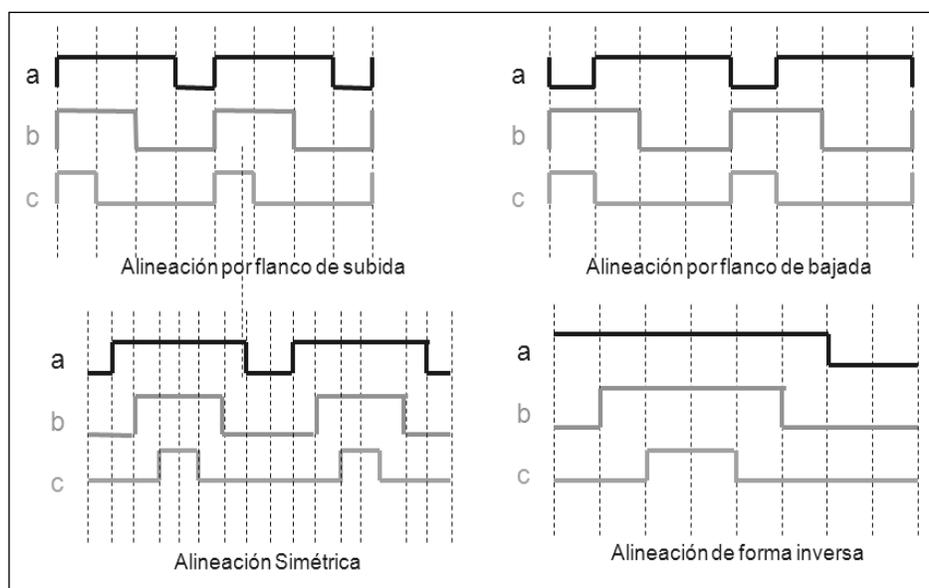


Figura 5. Distribución de los ciclos de trabajo utilizando los dos vectores nulos

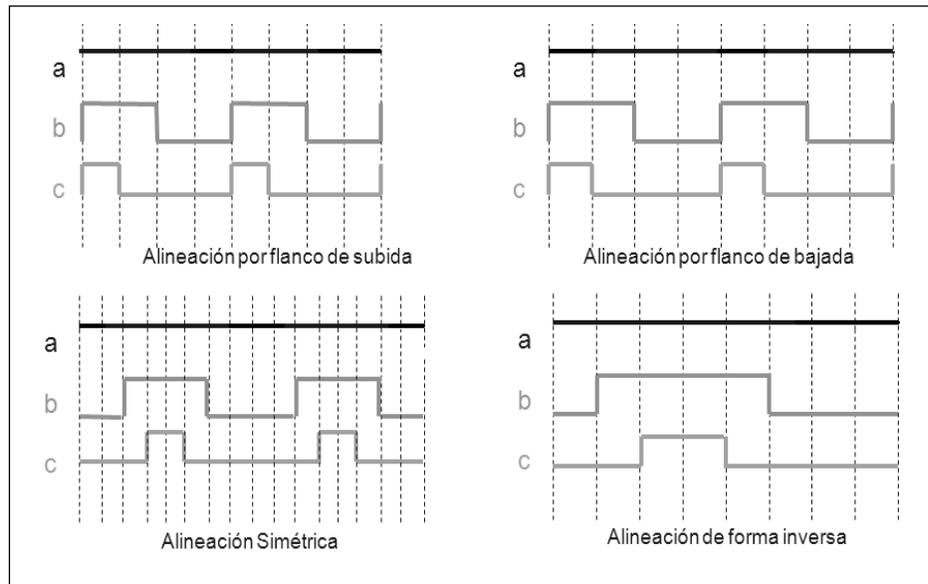


Figura 6. Distribución de los ciclos de trabajo utilizando solo uno de los vectores nulos

6. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL VECTORIAL

Existen dos formas de realizar el algoritmo de control, una es con lógica cableada y la otra es a través de programación [9].

La primera se puede implementar en FPGA, teniéndose como restricción que no hay módulos de captura y comparación, lo cual hace el algoritmo más complejo, y por lo tanto, mayor el tiempo de procesamiento. La se-

gunda se facilita para los microcontroladores y sobre todo con el uso de los DSP, ya que los algoritmos de programación pueden ser realizados con MATLAB®; una solución económica y versátil son los dsPIC.

Para cualquiera de las dos formas se requiere una etapa de aislamiento, para lo que se recomienda optoacopladores, y así mismo, una etapa de potencia en cuyo caso los más indicados son los IGBT de alta frecuencia.

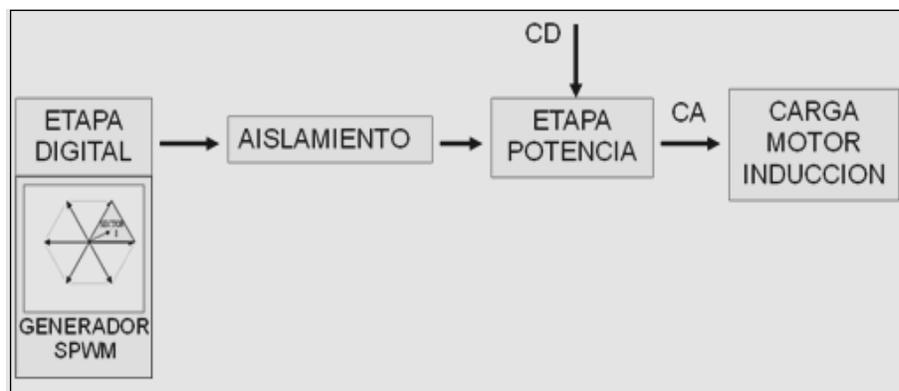


Figura 7. Diagrama de bloques de un controlador SVPWM trifásico

Los DSPs y los microprocesadores proporcionan la potencia de cómputo de alta velocidad necesaria para calcular las corrientes de fase del motor accionado y superan holgadamente los problemas de derivas y de ajuste de *setpoint*, tan frecuentes en las antiguas versiones analógicas de accionamientos vectoriales.

Complementariamente, los inversores PWM con etapas de potencia desarrolladas en torno a dispositivos semiconductores de alta velocidad de conmutación (transistores bipolares de compuerta aislada - IGBT) permiten obtener frecuencias más altas y corrientes de salida mayores, en volumen reducido y con menor costo.

El algoritmo de programación es muy parecido al del PWM senoidal, la programación del microcontrolador es lo que cambia. En la figura 8 se muestra una implementación genérica donde se ha incluido un lazo de realimentación para controlar la velocidad del motor.

Cuando se pretenden realizar distintas funciones, sean estas de control, protección o visualización, es posible que se requiera más de un PIC; por ejemplo, para controlar la aceleración y parada del motor; inversión de marcha; frenado; visualización remota; etc.

Para ciertos tipos de control como el de corriente por fase del motor, que permite implementar el control de campo orientado, así como el control de torque, el control de posición y demás, conviene agregar un tercer micro destinado a procesar las distintas realimentaciones, especialmente si son varias.

Todas las realimentaciones que se introduzcan deberán implementarse en lazos individuales formando bucles concéntricos, y cada una, sea del tipo analógica, o del tipo digital, deberá adecuarse para ser reconocida por el PIC, cuyas entradas operan con niveles de señal hasta 5V.

El efecto de realimentación se mejora notablemente en precisión y rapidez si se procesa con un controlador PI o PID

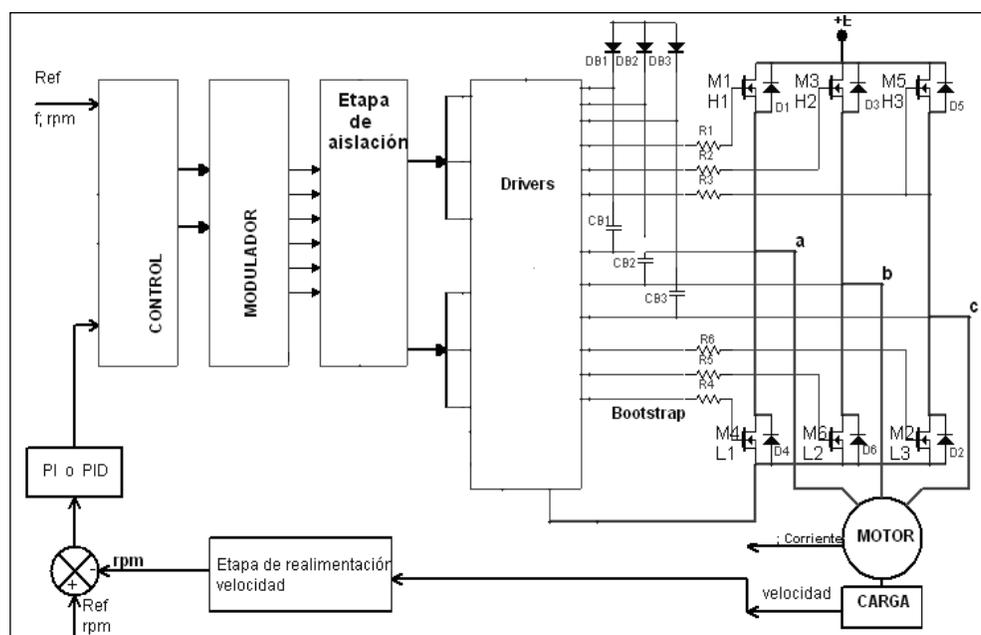


Figura 8. Diagrama de un control SVPW para un motor trifásico

La realimentación de velocidad puede ser analógica desde un taquímetro o digital, desde un encoder. Dicha señal se transforma a valores que puedan compararse con la señal de referencia, y luego el error es procesado por un controlador PI para ingresar al micro de control, a fin de medir el ángulo de giro y calcular la velocidad. El micro se encarga de procesar las señales provenientes del encoder o tacómetro y proporcionar la posición mecánica del rotor o ángulo de giro θ , junto con el sentido de giro.

La determinación del sentido de giro se realiza mediante un contador que se incrementa o no. Si el motor gira en un sentido, la secuencia es diferente a si aquel gira en el sentido contrario.

La velocidad se mide mediante la información del ángulo de giro que proporciona el encoder o tacómetro y el sentido de giro. Derivando la posición del rotor se obtiene la velocidad, y al final se aplica un filtro pasabajos, para eliminar el ruido introducido por el cálculo de la derivada.

Para el cálculo de velocidad se necesita como entrada el ángulo del rotor y además el sentido de rotación. Como salida, proporciona la velocidad de rotación del rotor.

7. CONCLUSIONES

El tiempo de muestreo está sujeto a cada diseñador y a los dispositivos digitales, ya que se requiere más tiempo para el procesamiento, así como dispositivos electrónicos de conmutación rápida.

La técnica de control vectorial aplicada a los motores de inducción, permite alcanzar niveles de prestación dinámicos, similares a los obtenidos en los motores de corriente continua.

Gracias al control vectorial se consigue que los motores de C.A. puedan girar a velocidad variable, sin problemas de estabilidad ni de arranque.

La técnica de control vectorial requiere un modelo detallado del motor y un conocimiento preciso de sus parámetros, además de cálculos complejos en cada ciclo de control, por lo que es necesario un dispositivo de procesamiento de alta velocidad y dispositivos de alta frecuencia de conmutación para la implementación de los algoritmos.

El control vectorial es de fácil implementación en sistemas digitales, lo cual hace generalizado el uso de los motores de inducción.

La introducción de los DSP ha facilitado la implementación de este tipo de control, pues algunos de ellos cuentan con módulos propios SPWM.

El control vectorial permite que el motor siempre desarrolle justamente el par que la carga del motor solicita, no importa la velocidad, y para ello mantiene constante la relación voltaje-frecuencia.

En la actualidad el SVPWM se emplea no solamente para el control de motores, sino también para otros usos en la electrónica de potencia tales como:

- Sistemas de alimentación ininterrumpidos.
- Filtros activos.
- Generación de energía eólica.
- Generación de energía solar fotovoltaica.
- Aplicaciones en electrodomésticos.

REFERENCIAS

- [1] P. Alkorta, O. Barambones, A.J. Garrido e I. Garrido, "SVPWM Variable Structure Control of Induction Motor Drives," en Space Vector Pulse Width Modulation Based Induction Motor Speed Control Using FPGA, 2007, pp. 1195-1200.
- [2] V. Deshpande, J.G. Chaudhari y P.P. Jagtap, "Development and Simulation of SPWM and SVPWM Control Induction Motor Drive," in Simulation of PMSM Vector Control System Based on Matlab/Simulink, 2009, pp. 748-52.
- [3] H. Jin, Y. - Zhao y D. - Wang, "Simulation Study of AC Motor Speed Sensorless Vector Control System based on SVPWM," in Intelligent Information Technology Application Workshops, 2008, IITAW '08. International Symposium on Issue, 21-22 Dec. 2008, pp. 1041-44 Number: 10452774 DOI: 10.1109/IITA.Workshops.2008.275. Date of current version: 30 diciembre 20082009, pp. 524-28.
- [4] K. Marouani, L. Baghli, D. Hadiouche, A. Kheloui y A. Rezzoug, "Discontinuous SVPWM Techniques for Double Star Induction Motor Drive Control," in Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International Issue, 1-4 Sept. 2009, pp: 1-5. Date of Current Version: 11 marzo 2010 pp. 902-07.
- [5] L. Saribulut y M. Tümay, "Robust Space Vector Modulation Technique for Unbalance Voltage Disturbances," Electr. Power Syst. Res., vol. 80, pp. 1364-74, noviembre, 2010.
- [6] H. Djeghloud, R. Benalla y A. Bentounsi, "Application of SVPWM to Three-Level Voltage and Current Inverters," in IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on Issue, 6-10 Nov. 2006, pp. 902-07. DOI: 10.1109/IECON.2006.347288. Date of current version: 16 abril 2007-
- [7] W. -. Yao, H. -. Hu, H. -. Xu, Z. -. Lu y R. -. Zhao, "Research on Techniques of Three-Level Six-Phase Synchronous Motor Driver," Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, vol. 27, pp. 1-6, 2007.
- [8] W. Wenjun, Z. Yanru y D. Bo, "A 3-D SVPWM without Medium Vectors for 3-Phase 3-Wire 3-Level Rectifier," in Simulation Study of AC Motor Speed Sensorless Vector Control System Based on SVPWM 2008, pp. 4199-04.
- [9] H. Wu y X. Hu, "Reserch of SVPWM Variable Frequency Speed Regulation System Based on TMS320LF2407A," in Development and Simulation of SPWM and SVPWM Control Induction Motor Drive, 2008, pp. 1041-44.
- [10] T. -. Liu, Y. Tan, G. Wu y S. -. Wang, "Simulation of PMSM Vector Control System Based on Matlab/Simulink," in Development and Simulation of SPWM and SVPWM Control Induction Motor Drive, 2009, pp. 343-46.
- [11] R. Arulmozhiyal, K. Baskaran, N. Devarajan y J. Kanagaraj, "Space Vector Pulse Width Modulation Based Induction Motor Speed Control Using FPGA," in 2009, pp. 742-47.