

Algoritmo de modulación vectorial para convertidores multinivel de cuatro ramas utilizando coordenadas naturales

M.M.Prats
Departamento de
Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
mangeles@gte.esi.us.es

J.I.Leon
Departamento de
Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
jileon@gte.esi.us.es

R.Portillo
Departamento de
Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
ramonpg@zipi.us.es

L.G.Franquelo
Departamento de
Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
leopoldo@gte.esi.us.es

E.Domínguez
Departamento de
Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
buge@gte.esi.us.es

Abstract—En este trabajo se presenta el primer algoritmo de modulación vectorial tridimensional para convertidores multinivel de cuatro ramas. Este convertidor se puede aplicar en el campo de los filtros activos o a los compensadores de corriente por el neutro para compensación de armónicos y corriente homopolar usando coordenadas naturales. Esta técnica simplifica en gran medida la selección del espacio tridimensional donde se encuentra un vector de tensión dado. El algoritmo reduce drásticamente la complejidad computacional y los cálculos para determinar los vectores activos con sus correspondientes tiempos que generan el vector de referencia de tensión. Además, la baja carga computacional del algoritmo propuesto es siempre la misma y es independiente del número de niveles del convertidor.

Index Terms: multilevel converter, 3-dimensional modulation algorithm, natural coordinates.

I. INTRODUCCION

Los convertidores multinivel de cuatro ramas están teniendo un gran auge en los últimos tiempos en el filtrado activo y en rectificadores trifásicos tolerantes a fallos con la capacidad de balanceo de la carga y reducción de la distorsión. Estos convertidores responden a la creciente demanda de potencia y calidad de energía con reducida distorsión armónica y bajo EMI [1,2].

Los convertidores multinivel de cuatro ramas permiten un preciso control de la corriente del neutro gracias a un rango extenso de las secuencias cero de tensión y corriente. En la figura 1, se representa un inversor con topología diode-clamped de tres niveles y cuatro ramas. Esta topología presenta las ventajas de los convertidores de tensión de cuatro ramas [3] y las correspondientes de los convertidores multinivel [4]. Aunque los resultados experimentales han sido obtenidos usando esta topología, el algoritmo propuesto en este trabajo puede usarse en cualquier topología de convertidor multinivel debido a que solo depende del espacio de estados donde se encuentran los vectores.

La mayoría de los algoritmos de modulación space vector encontrados en la literatura para convertidores de tensión usan una representación de vectores de tensión usando las coordenadas $\alpha\beta\gamma$ [3,5], en vez de usar las coordenadas abc. Esta representación ofrece una información interesante sobre la componente homopolar de las tensiones y

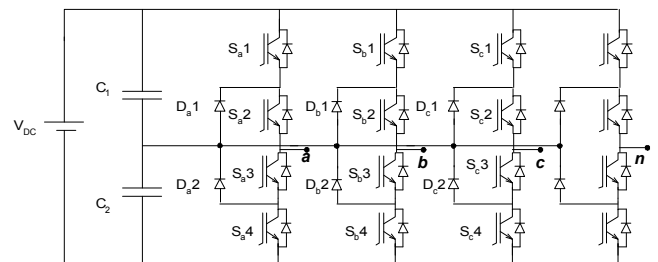


Figura 1. Inversor de tres niveles y cuatro ramas NPC

corrientes (proporcionales a la coordenada γ). Sin embargo, el cambio de sistema de coordenadas tiene que realizarse implicando complejos cálculos. Además, la representación tridimensional de los vectores de estado en las coordenadas $\alpha\beta\gamma$ es difícil de comprender. En [6], un nuevo algoritmo de modulación vectorial tridimensional usando coordenadas naturales abc se aplicó a convertidores convencionales de tensión de cuatro ramas mostrando las ventajas de usar este tipo de coordenadas. El primer algoritmo generalizado de modulación vectorial tridimensional fue propuesto en [7,8].

El algoritmo de modulación tridimensional es una generalización de la conocida técnica space vector de dos dimensiones [9-12], reduciendo la complejidad del control y la carga computacional. Los vectores de estado estarán en un plano si el sistema es equilibrado [9]. Sin embargo, es necesario generalizar a un espacio tridimensional si el sistema no está equilibrado o si hay una homopolar o armónicos triples ya que el vector de referencia no estará en un plano. El algoritmo generalizado tridimensional permite el cálculo inmediato de la secuencia de los vectores de estado más cercanos para generar el vector de referencia de tensión [7]. Además de esto, lo realiza calculando también los tiempos asociados a estos vectores sin tener que utilizar cálculos trigonométricos, tablas o transformaciones de sistemas de coordenadas que incrementan la carga computacional. Estas son importantes ventajas si se compara el algoritmo propuesto con el algoritmo de dos dimensiones para convertidores multinivel [12,14].

En este trabajo, se presenta un algoritmo de modulación tridimensional muy simple basado en el algoritmo de modulación vectorial de tres dimensiones para convertidores trifásicos, presentado en [7]. El coste

computacional del método propuesto es muy bajo y es independiente del número de niveles del convertidor. Esta técnica puede usarse como algoritmo de modulación en todas las aplicaciones que necesiten un control vectorial tridimensional.

II. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE MODULACIÓN

A. Síntesis del vector de referencia

Gracias a que la conmutación de cualquier topología de convertidores de potencia se basa en estados discretos, la modulación space vector se usa para aproximarse a una referencia de tensión u_{ref} calculando el tiempo de sus vectores de estado más cercanos. Cuatro vectores u_1, u_2, u_3 y u_4 se usan para aproximar la tensión deseada u_{ref} en un ciclo de control T_M . La ley de modulación intenta generar el valor de referencia de tensión u_{ref} , que se puede representar en el sistema de referencia estacionario. Durante cada subciclo de modulación de duración T_M se genera una secuencia de vectores que se compone de cuatro vectores de estado $u_1(t_1), u_2(t_2), u_3(t_3)$ y $u_4(t_4)$, donde t_1, t_2, t_3 y t_4 son los tiempo de encendido de los vectores de estado. Así, los cuatro vectores más cercanos al vector de referencia deben ser identificados. El algoritmo tridimensional propuesto calcula fácilmente los cuatro vectores de estado que generan el vector de referencia en sistemas convertidores multinivel de potencia de cuatro ramas. En este sentido, es necesario utilizar una secuencia de cuatro vectores de estado. Por tanto, el vector de referencia estará apuntando a un volumen que es un tetraedro dentro de un cubo incluido dentro de un prisma. Los vértices de este tetraedro son los vectores de estado de la secuencia. Además, el algoritmo permite obtener los tiempos asociados a los vectores de la secuencia sin usar tablas o funciones trigonométricas. La entrada del algoritmo de modulación es un vector de tensión normalizado. La normalización sólo depende del número de niveles del convertidor, n , y del nivel de tensión de los condensadores del DC-Link, V_{DC} [4]. En general, el vector de referencia debe estar escalado por la constante de

normalización $\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_{DC}}{n-1}$ para estar en el rango $\{(n-1), \dots, (n-1)\}$. Sin embargo, el algoritmo y las representaciones mostradas añaden el término $(n-1)$ para considerar el rango $\{0, \dots, 2(n-1)\}$, simplificando con ello la representación.

Paso 1: Calcular las coordenadas del subcubo donde se encuentra el vector de referencia. El espacio de estados de un convertidor multinivel de cuatro ramas forma un prisma en el espacio tridimensional. Este espacio puede descomponerse en varios subcubos donde seis tetraedros generan el total de cada subcubo. El prisma que contiene los vectores de estado que generan el vector de referencia en un convertidor de tres niveles y cuatro ramas se muestra en el figura 2. Como otro ejemplo, el prisma para un convertidor de cuatro ramas y cinco niveles se ilustra en la figura 3.

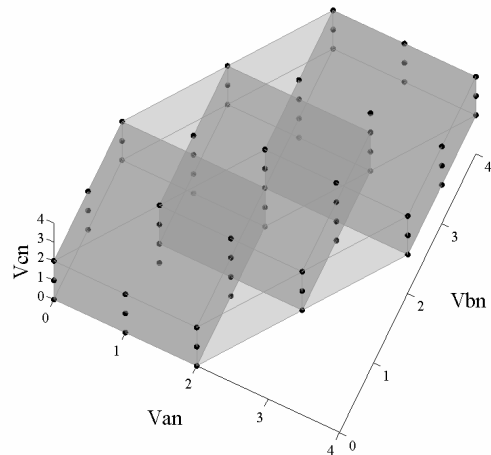


Figura 2. Espacio de estados tridimensional para un convertidor de cuatro ramas y tres niveles

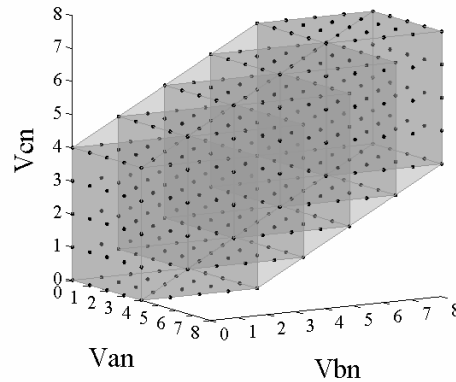


Figura 3. Espacio de estados tridimensional para un convertidor de cuatro ramas y cinco niveles

Para un determinado vector de referencia en el sistema trifásico (u_{an}, u_{bn}, u_{cn}) , la parte entera de cada componente (a,b,c) se puede calcular:

$$a = \text{integer}(u_{an}),$$

$$b = \text{integer}(u_{bn}),$$

$$c = \text{integer}(u_{cn}). \quad (1)$$

donde $(u_{an}, u_{bn}, u_{cn}) \in \{0, \dots, 2(n-1)\}$.

Los cubos dentro del prisma están formados por un cierto número de subcubos dependiendo del número de niveles del convertidor. Sólo un subcubo para convertidores de dos niveles, ocho para tres niveles, veintisiete para cuatro niveles.... En general, $(n-1)^3$ subcubos dentro de cada cubo siendo n el número de niveles del convertidor. Sin embargo, es importante hacer notar que hay otros subcubos localizados entre los cubos y los planos exteriores del prisma y que también pertenecen al volumen de control. Estos subcubos deben ser tenidos en cuenta en el algoritmo de modulación. Las coordenadas (a,b,c) calculadas son el origen de coordenadas

correspondiente al sistema de referencia del subcubo en el que se encuentra el vector de referencia. Esto se muestra en la figura 4.

Paso 2: Seis tetraedros deben ser estudiados en cada subcubo. Por tanto, es necesario definir estos posibles tetraedros donde el vector de referencia se puede encontrar. El tetraedro buscado se puede encontrar fácilmente usando comparaciones con los tres planos de 45° dentro del espacio tridimensional lo que define directamente los seis tetraedros dentro del subcubo. Los tres planos que definen los seis tetraedros se muestran en la figura 5. Sólo un máximo de tres comparaciones son necesarias.

Paso 3: Una vez que las coordenadas (a,b,c) son conocidas, el paso principal del algoritmo consiste en el cálculo de los cuatro vectores de estado correspondientes a los cuatro vértices del tetraedro dentro del subcubo seleccionado en el paso 1. Estos vectores generarán el vector de referencia. Se han estudiado distintas configuraciones con diferente número de tetraedros dentro del cubo. Sin embargo, el mínimo número de comparaciones se obtiene usando los seis tetraedros mostrados en la figura 6.

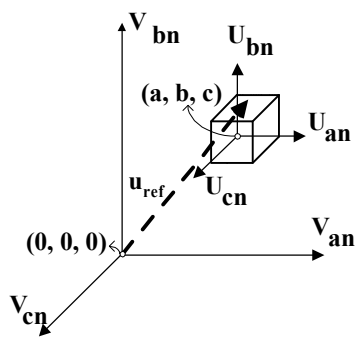


Figura 4. Origen del subcubo en el que se encuentra el vector de referencia.

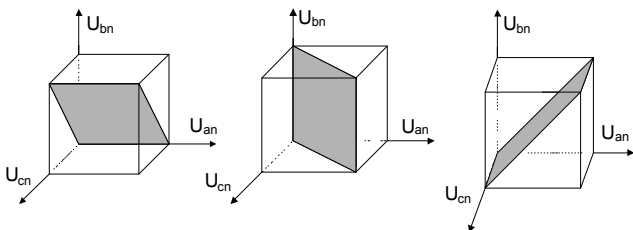


Figura 5. Planos usados para el cálculo del tetraedro donde se encuentra el vector de referencia.

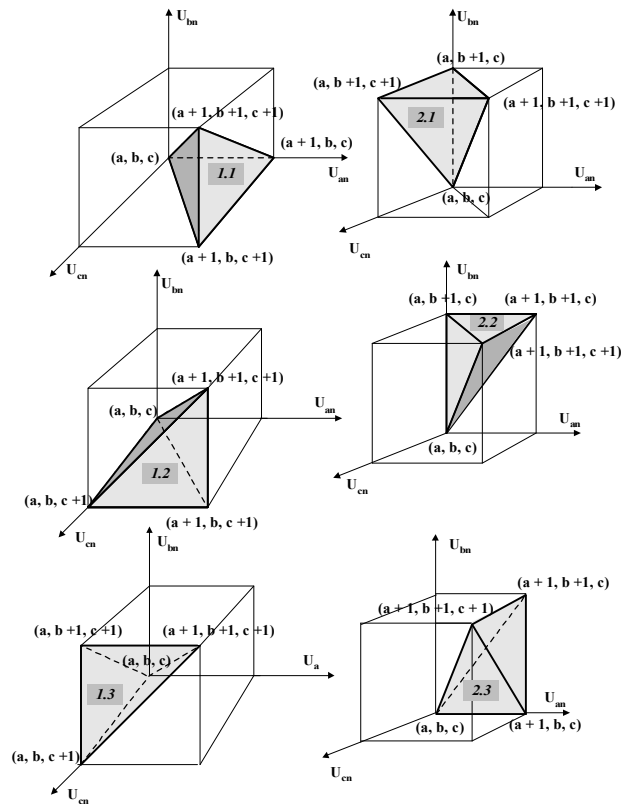


Figura 6. Tetraedros dentro de cada subcubo con sus correspondientes vectores de estado

Paso 4: Espacio de control. Todo vector normalizado de referencia está dentro del prisma de control tridimensional. Sin embargo, el volumen total del prisma no se cubre totalmente con los cubos correspondientes a cada convertidor multinivel. Debido a esto, si un determinado vector de referencia se encuentra en un tetraedro donde uno de sus vértices está fuera del prisma, el algoritmo de modulación asigna tiempo cero a este vector de estado. Esto se debe a que la referencia está apuntando a un plano del prisma y los tres vectores más cercanos, localizados en este plano del prisma, lo generarán. Este caso se muestra en la figura 7.

Paso 5: Cálculo de los tiempos. El algoritmo propuesto calcula los cuatro vectores de estado que están dentro del prisma de control y sus correspondientes tiempos usando un máximo de tres comparaciones para el cálculo del tetraedro. El algoritmo de modulación es tan simple debido a que los planos de 45° y los planos del prisma coinciden, tal y como se muestra en la figura 8.

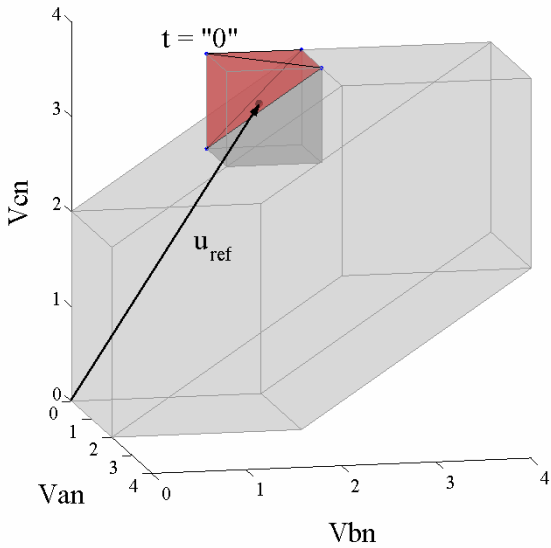


Figura 7. Vector de referencia localizado en un tetraedro donde uno de sus vértices está fuera del prisma.

B. Estructura general del algoritmo

El diagrama de flujo del algoritmo de modulación tridimensional propuesto para convertidores multinivel de cuatro ramas para determinar el tetraedro donde el vector de referencia se encuentra, se muestra en la figura 9.

Hay que hacer notar que el algoritmo es extremadamente simple. La carga computacional es siempre la misma y es independiente del número de niveles. Además, el algoritmo proporciona la secuencia de vectores que minimiza el número de conmutaciones de los semiconductores.

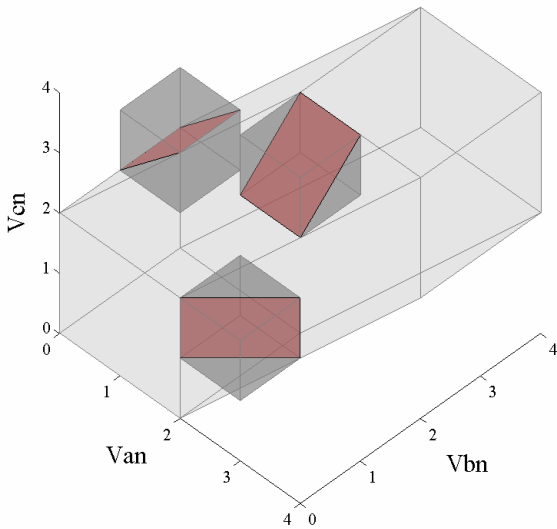


Figura 8. Coincidencia de los planos del prisma y los planos de 45°

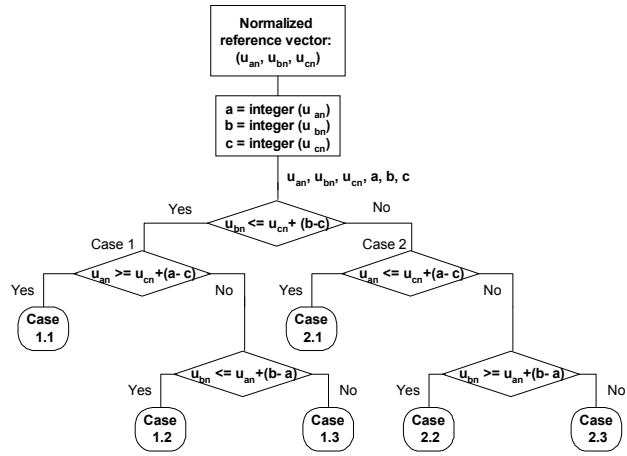


Figura 9. Algoritmo para la selección del tetraedro con los correspondientes vectores de estado.

Paso 6: Cálculo de los tiempos. Una vez que los vectores de estado que generan el vector de referencia son conocidos, los tiempos correspondientes pueden ser determinados. El algoritmo genera una matriz S con los cuatro vectores de estado y sus correspondientes tiempos t_i . S_{an}^i , S_{bn}^i , S_{cn}^i con $i=1, \dots, 4$ son las coordenadas de cada vector de estado y d_i son sus correspondientes tiempos donde T_M es el tiempo de muestreo.

$$S = \begin{bmatrix} S_{an}^1 & S_{bn}^1 & S_{cn}^1 & d_1 \\ S_{an}^2 & S_{bn}^2 & S_{cn}^2 & d_2 \\ S_{an}^3 & S_{bn}^3 & S_{cn}^3 & d_3 \\ S_{an}^4 & S_{bn}^4 & S_{cn}^4 & d_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$t_i = d_i T_M, \quad i = 1, \dots, 4$$

Los vectores de estado son los vértices del correspondiente tetraedro que genera el vector de referencia. Las ecuaciones que deben ser resueltas son las siguientes:

$$\begin{aligned} u_a &= S_{an}^1 d_1 + S_{an}^2 d_2 + S_{an}^3 d_3 + S_{an}^4 d_4, \\ u_b &= S_{bn}^1 d_1 + S_{bn}^2 d_2 + S_{bn}^3 d_3 + S_{bn}^4 d_4, \\ u_c &= S_{cn}^1 d_1 + S_{cn}^2 d_2 + S_{cn}^3 d_3 + S_{cn}^4 d_4, \\ d_1 + d_2 + d_3 + d_4 &= 1. \end{aligned} \quad (3)$$

La evaluación numérica de los tiempos de los vectores de estado es reducida a una simple suma tal y como se muestra en la Tabla I. Las coordenadas (a,b,c) representan los diferentes niveles de tensión entre cada fase y el neutro. Estas coordenadas toman valores entre 0 y $2(n-1)$, donde n es el número de niveles del convertidor multinivel.

Los tiempos son sólo funciones de las componentes del vector de referencia y de la parte entera de las coordenadas del vector de referencia.

Además, se selecciona una secuencia optimizada para conseguir minimizar el número de conmutaciones. La secuencia de vectores de estado en medio ciclo es: $u_1 = (S_{an}^1, S_{bn}^1, S_{cn}^1)$, $u_2 = (S_{an}^2, S_{bn}^2, S_{cn}^2)$, $u_3 = (S_{an}^3, S_{bn}^3, S_{cn}^3)$ y $u_4 = (S_{an}^4, S_{bn}^4, S_{cn}^4)$. En la segunda mitad del ciclo la secuencia de vectores es la inversa.

Tetraedro	Secuencia de vectores de estado	Tiempos
Caso 1.1	$(S_{an}^1, S_{bn}^1, S_{cn}^1) = (a, b, c)$ $(S_{an}^2, S_{bn}^2, S_{cn}^2) = (a+1, b, c)$ $(S_{an}^3, S_{bn}^3, S_{cn}^3) = (a+1, b, c+1)$ $(S_{an}^4, S_{bn}^4, S_{cn}^4) = (a+1, b+1, c+1)$	$d_1 = 1 + a - u_{an}$ $d_2 = -a + c + u_{an} - u_{cn}$ $d_3 = b - c - u_{bn} + u_{cn}$ $d_4 = -b + u_{bn}$
Caso 1.2	$(S_{an}^1, S_{bn}^1, S_{cn}^1) = (a, b, c)$ $(S_{an}^2, S_{bn}^2, S_{cn}^2) = (a, b, c+1)$ $(S_{an}^3, S_{bn}^3, S_{cn}^3) = (a+1, b, c+1)$ $(S_{an}^4, S_{bn}^4, S_{cn}^4) = (a+1, b+1, c+1)$	$d_1 = 1 + c - u_{cn}$ $d_2 = a - c - u_{an} + u_{cn}$ $d_3 = -a + b + u_{an} - u_{bn}$ $d_4 = -b + u_{bn}$
Caso 1.3	$(S_{an}^1, S_{bn}^1, S_{cn}^1) = (a, b, c)$ $(S_{an}^2, S_{bn}^2, S_{cn}^2) = (a, b, c+1)$ $(S_{an}^3, S_{bn}^3, S_{cn}^3) = (a, b+1, c+1)$ $(S_{an}^4, S_{bn}^4, S_{cn}^4) = (a+1, b+1, c+1)$	$d_1 = 1 + c - u_{cn}$ $d_2 = b - c - u_{bn} + u_{cn}$ $d_3 = a - b - u_{an} + u_{bn}$ $d_4 = -a + u_{an}$
Caso 2.1	$(S_{an}^1, S_{bn}^1, S_{cn}^1) = (a, b, c)$ $(S_{an}^2, S_{bn}^2, S_{cn}^2) = (a, b+1, c)$ $(S_{an}^3, S_{bn}^3, S_{cn}^3) = (a, b+1, c+1)$ $(S_{an}^4, S_{bn}^4, S_{cn}^4) = (a+1, b+1, c+1)$	$d_1 = 1 + b - u_{bn}$ $d_2 = -b + c + u_{bn} - u_{cn}$ $d_3 = a - c - u_{an} + u_{cn}$ $d_4 = -a + u_{an}$
Caso 2.2	$(S_{an}^1, S_{bn}^1, S_{cn}^1) = (a, b, c)$ $(S_{an}^2, S_{bn}^2, S_{cn}^2) = (a, b+1, c)$ $(S_{an}^3, S_{bn}^3, S_{cn}^3) = (a+1, b+1, c)$ $(S_{an}^4, S_{bn}^4, S_{cn}^4) = (a+1, b+1, c+1)$	$d_1 = 1 + b - u_{bn}$ $d_2 = a - b - u_{an} + u_{bn}$ $d_3 = -a + c + u_{an} - u_{cn}$ $d_4 = -c + u_{cn}$
Caso 2.3	$(S_{an}^1, S_{bn}^1, S_{cn}^1) = (a, b, c)$ $(S_{an}^2, S_{bn}^2, S_{cn}^2) = (a+1, b, c)$ $(S_{an}^3, S_{bn}^3, S_{cn}^3) = (a+1, b+1, c)$ $(S_{an}^4, S_{bn}^4, S_{cn}^4) = (a+1, b+1, c+1)$	$d_1 = 1 + a - u_{an}$ $d_2 = -a + b + u_{an} - u_{bn}$ $d_3 = -b + c + u_{bn} - u_{cn}$ $d_4 = -c + u_{cn}$

Tabla I: Secuencia de estados y tiempos

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El algoritmo ha sido implementado con éxito presentándose resultados experimentales. Las condiciones de experimentación han sido 55 Ω de carga resistiva, 1.2mH de bobina de alisamiento, 10KHz de frecuencia de muestreo y 40 voltios de tensión de DC-Link. Además, el algoritmo ha sido probado en simulación usando MatLab (Simulink). Los resultados de simulación para convertidores multinivel de cuatro ramas se han obtenido usando un modelo continuo formulado en términos de las funciones de control. Los resultados experimentales se han obtenido gracias a un prototipo real que utiliza un microprocesador DSP TMS320VC33.

Se supone una referencia de tensión no equilibrada compuesta por una componente fundamental con 20V de amplitud, 20% de homopolar y 20% de secuencia inversa. La referencia de tensión para cada fase se representa en la

figura 10. La referencia de tensión para cada fase se ilustra en las figuras 11(a), 12(a) y 13(a). Los resultados de simulación para este experimento se muestran en las figuras 11(b), 12(b) y 13(b) y los resultados experimentales en las figuras 11(c), 12(c) y 13(c).

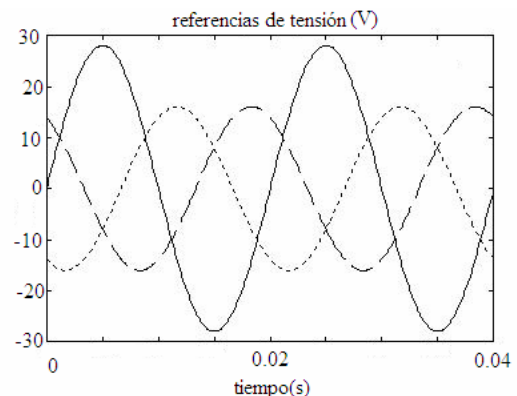


Figura 10. Referencia de tensión para cada fase compuesta por una componente fundamental de 20V de amplitud, 20% de homopolar y 20% de secuencia inversa.

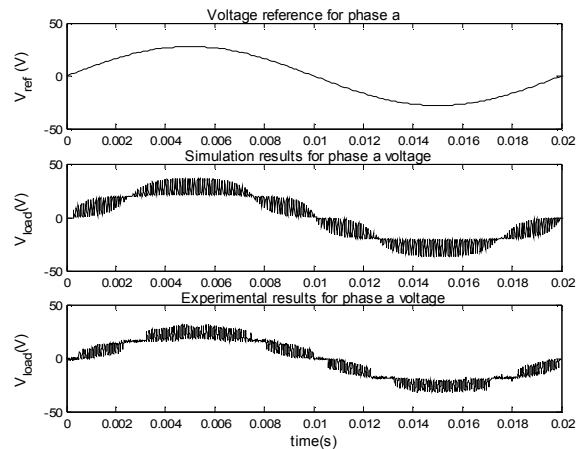


Figura 11. Tensión para la fase a compuesta de una componente fundamental de 20V de amplitud, 20% de homopolar y 20% de secuencia inversa.

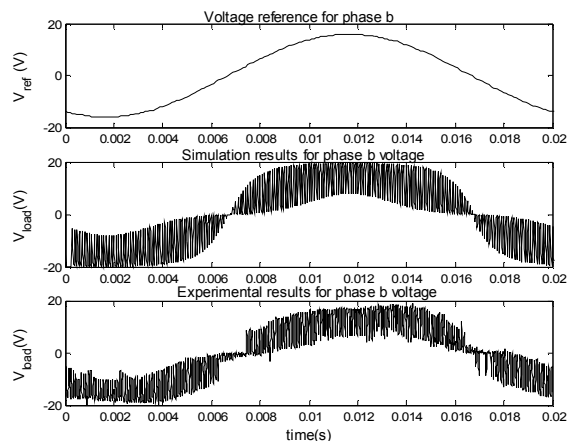


Figura 12. Tensión para la fase b compuesta de una componente fundamental de 20V de amplitud, 20% de homopolar y 20% de secuencia inversa.

IV. CONCLUSIONES

Se presenta el primer algoritmo de modulación tridimensional space vector para convertidores multinivel de cuatro ramas. Este algoritmo rápidamente calcula los vectores de estado y sus tiempos correspondientes para realizar la modulación space vector. La técnica propuesta directamente permite optimizar la secuencia de vectores de estado minimizando el número de conmutaciones en sistemas de cuatro ramas. La complejidad computacional es muy baja e independiente del número de niveles del convertidor. Este algoritmo no usa funciones trigonométricas ni tablas. Ha sido satisfactoriamente implementado usando microcontroladores de bajo coste. Esta técnica puede ser utilizada como algoritmo de modulación en todas aquellas aplicaciones que necesitan de un control vectorial tridimensional como filtros activos de cuatro ramas, donde las modulaciones convencionales de dos dimensiones no pueden ser utilizadas.

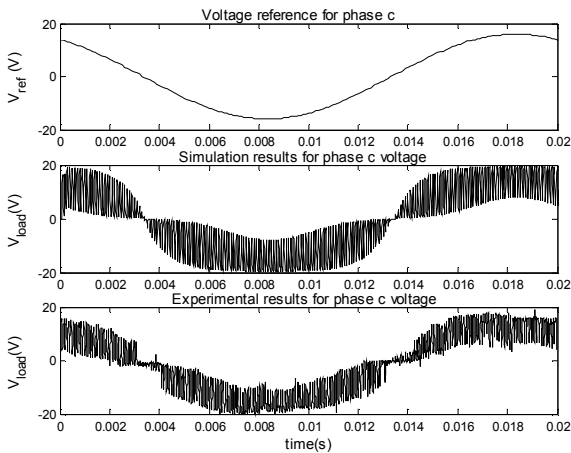


Figura 13. Tensión para la fase c compuesta de una componente fundamental de 20V de amplitud, 20% de homopolar y 20% de secuencia inversa.

Se realizó otro experimento con una señal con una componente fundamental de $40/3^{1/2}$ V de amplitud y un 120% de tercer armónico. La referencia de tensión se muestra en la figura 14. Los resultados de simulación y los experimentales se indican en la figura 15. Claramente, la tensión que cae a través de la resistencia sigue la señal de referencia de entrada. Estos resultados muestran el buen comportamiento del algoritmo propuesto.

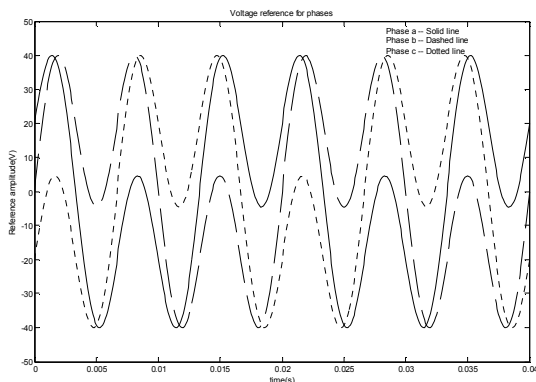


Figura 14. Referencia de tensión compuesta por una componente fundamental de $40/3^{1/2}$ V de amplitud y un 120% de tercer armónico

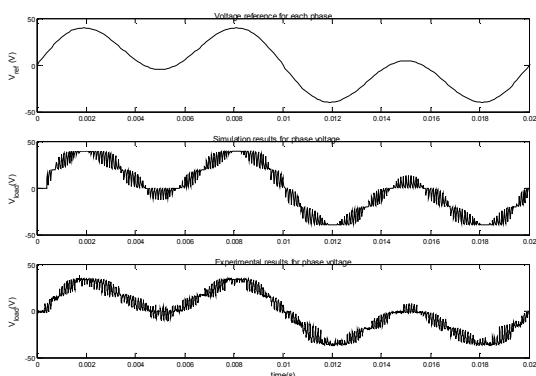


Figura 15. Señales de tensión compuesta por una componente fundamental de $40/3^{1/2}$ V de amplitud y un 120% de tercer armónico

- [1] Simone Buso, Luigi Malesani, Paolo Mattavelli, "Comparison of Current Control Techniques for Active Filter Applications", *Proc. IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 45, No. 5, pp. 722-729, 1998.
- [2] Marian P. Kazmierkowski, Luigi Malesani, "Current Control Techniques for Three-Phase Voltage Source PWM Converters: A Survey", *Proc. IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 45, No. 5, pp. 691-703, 1998.
- [3] R. Zhang, V. H. Prasad, D. Boroyevich and F. C. Lee, "Three-dimensional space vector modulation for four-leg voltage-source converters" *IEEE trans. On Power Electronics*, vol. 17, pp 314-326, may 2002.
- [4] Carrara, S.Gardella, M. Marchesoni, R. Salutari, G. Sciuotto, "A new multilevel PWM method: A theoretical analysis", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.7, pp. 497-505, 1992.
- [5] P. Verdelho and G. D. Marques, "A current control system based in $\alpha\beta$ variables for a four-leg PWM voltage converter," in *Proc. IEEE IECON'98 Conf.*, 1998, pp. 1847-1852.
- [6] Manuel A. Perales, M. M. Prats, Ramón Portillo and Leopoldo G. Franquelo, "Three Dimensional Space Vector Modulation in Natural Coordinates applied to Four-Leg Voltage Source Converters", *IEEE Power Electronics Letters*, accepted for publication, 2003.
- [7] M. M. Prats, L. G. Franquelo, J. I León, R. Portillo, E. Galván and J. M. Carrasco, "A SVM-3D generalized algorithm for multilevel converters", in *Record, IEEE Industrial Electronics Society Conf.*, pp. 24-29, 2003.
- [8] M. M. Prats, L. G. Franquelo, J. I. León, R. Portillo, E. Galván and J.M. Carrasco, "A three dimensional space vector modulation generalized algorithm for multilevel converters", *IEEE Power Electronics Letters*, accepted for publication, 2003.
- [9] M.M.Prats, J.M. Carrasco, L.G. Franquelo, "Effective algorithm for multilevel converter with very low computational cost", *IEE Electronics Letters*, vol. 38, No.22, pp.1398-1400, 2002.
- [10] M.M. Prats, R. Portillo, J.M. Carrasco and L.G. Franquelo, "New Fast Space-Vector Modulation for Multilevel Converters Based on Geometrical Considerations", *Proc. 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'02*, Sevilla, España, 2002.
- [11] M.M. Prats, J.I. León, R. Portillo, J.M. Carrasco and L.G. Franquelo, "A novel space-vector algorithm for multilevel converters based on geometrical considerations using a new sequence control technique", accepted for publication en *Circuits, Systems and Computers, International Journal*, 2003.
- [12] N. Celanovic and D. Boroyevich, "A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 37, No. 2, pp. 637-641, 2001.
- [13] Leon M. Tolbert and Thomas G. Habetler, "Novel Multilevel Inverter Carrier-Based PWM Method", *Proc. IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 35, No. 5, pp. 1098 - 1107, 1999.
- [14] O. Alonso, L. Marroyo, P. Sanchis, "A Generalized Methodology to Calculate Switching Times and Regions in SVPWM Modulation of Multilevel Converters", *Proc. 10th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'2001*, 2001.