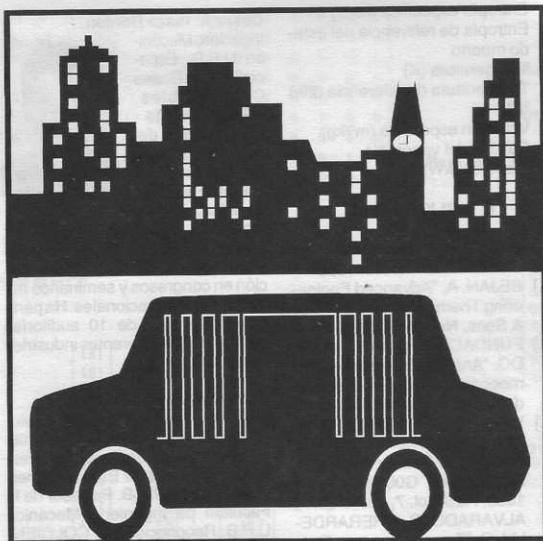


Modulador PWM de tensión y frecuencia para vehículo eléctrico



□ Ángel Costa Montiel, Ph.D.
Ingeniero Electricista

□ Alberto Basanta Otero, M.Sc.
Ingeniero Electricista

□ Aldo Florencias Puerto, M.Sc.
Ingeniero Electricista

□ Jorge Alba Pérez

□ Osviel Cabrera Gómez

Centro de Investigaciones y Pruebas Eléctricas (CIPEL) Ave. 127 s/n, Carretera al Central Manuel Martínez Prieto, Marianao, Ciudad Habana, Cuba

RESUMEN

En el trabajo se expone el esquema general y las características y prestaciones técnicas más importantes del accionamiento de un vehículo eléctrico ligero. Se utiliza un control por variación de la frecuencia de un motor de inducción trifásico, con control a par constante hasta 60 Hz y a potencia constante hasta 120 Hz. En la primera zona se emplea modulación PWM con modulación del vector espacial. Como elemento de control se utiliza una PC-486 de 33 Mhz con dos tarjetas adicionales.

ABSTRACT

In this paper the general layout and the technical requirements for a light electric vehicle are exposed. A volt/hertz frequency control in the constant torque region is utilized. In this zone, a PWM space vector modulation is used. In the power constant region, the choice is a square wave with constant voltage and flux weakening. As a digital control element, a PC-486 with 33 Mhz with an additional hardware is utilized.

KEYWORDS

Control de máquinas eléctricas, accionamiento eléctrico, modulación PWM, vehículos eléctricos, tracción eléctrica.

34

* Este texto se recibió, para ser publicado, en diciembre de 1997.

1. INTRODUCCIÓN

Hace unas décadas, los accionamientos eléctricos de corriente continua eran utilizados casi universalmente en la tracción eléctrica. Tanto el motor serie tradicional, con su elevado par de arranque y elevada capacidad de sobrecarga, como los de excitación independiente, parecían no tener rival en esta aplicación. El inconveniente de este tipo de motor siempre fue su alto costo inicial, necesidad de mantenimiento frecuente y, sobre todo, su gran peso y volumen; condición crítica en las aplicaciones relacionadas con la tracción eléctrica. Debido a esto, desde hace muchos años se investiga, en todo el mundo, la introducción del conocido motor de inducción jaula de ardilla, barato, ligero, pequeño y robusto en esta aplicación. Inicialmente se probó con el convertidor de frecuencia a tiristores con control analógico, pero la necesidad de incluir en el mismo redes de conmutación voluminosas y pesadas, no consiguió "destronar de este reino" al conocido motor de corriente continua. Al surgir los dispositivos semiconductores de potencia apagados por el "gate" y posibilitarse el control digital de estos dispositivos, la situación ha comenzado a cambiar y puede pronosticarse que en algunos años, todos los accionamientos utilizados en la tracción eléctrica serán de corriente alterna.

Debido a esto, al plantearse la necesidad de un accionamiento eléctrico para un vehículo ecológico ligero, con destino a áreas turísticas especiales, se decidió realizar un control de velocidad de un motor de Inducción trifásico jaula de ardilla. Se optó, para el primer prototipo, por diseñar un accionamiento típico de tracción con una zona de par constante con control v/f constante que utiliza la modulación del vector espacial trifásico y una zona de potencia constante con onda rectangular o "six step". Como dispositivo semiconductor se utilizó el transistor bipolar de puerta aislada (*insulated gate bipolar transistor*) o IGBT, debido a sus innegables ventajas.

En este trabajo se describen los aspectos más importantes de este proyecto y sus perspectivas de desarrollo.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ACCIONAMIENTO

Se plantearon como prestaciones generales para el accionamiento: la posibilidad de cubrir un diapasón de velocidad de 400 r/min a 3200 r/min y una potencia de 11 kW, con el objetivo de que el vehículo alcanzara una velocidad máxima de unos 80 km/h. Se decidió utilizar un motor de inducción trifásico de propósito general de 11 kW y 220 v, reconectándolo de estrella a delta, con lo cual su tensión nominal en línea se hacía 127 volts. Debido a esto la tensión nominal en el bus de corriente continua resultó ser de 168 volts, por lo cual se decidió

utilizar 14 baterías de plomo-ácido de 12 volts, conectadas en serie.

Se diseñó y montó un inversor trifásico a IGBT con dispositivos de 600 v.; 300 a. accionado por un circuito excitador (*driver*) trifásico, el cual envía los pulsos de encendido, de acuerdo con los códigos de entrada, deja el tiempo muerto necesario entre el apagado y el encendido de los IGBT de la misma rama y protege contra: sobrecarga de los elementos, bajo nivel de tensión de alimentación, bajo nivel de excitación y conducción simultánea de los semiconductores de una misma rama.

El control del accionamiento se lleva a cabo de forma digital, utilizando una PC-486 de 33 Mhz con dos tarjetas de expansión: una para el control del modulador y otra de adquisición de datos.

El mando del variador de velocidad se lleva a cabo a través del pedal del vehículo, el cual suministra una señal analógica a un conversor A/D de 8 bits. Existen 256 valores diferentes de frecuencia comprendidos entre 5,1 Hz y 119,85 Hz. Para cada uno de estos valores se almacenan en la PC los patrones de encendido correspondientes a un ciclo de trabajo, los cuales son accionados en dependencia de la señal de mando del pedal. Ésta es suministrada a un suavizador por hardware, el cual sirve para evitar los cambios bruscos de frecuencia que conducen a cambios demasiado bruscos de la corriente que pueden conducir a sobrepasar sus valores límites y atentan contra el confort.

En la figura 1 se muestra el esquema general del accionamiento explicado. El bloque denominado *control digital* comprende la PC-486 y las dos tarjetas adicionales.

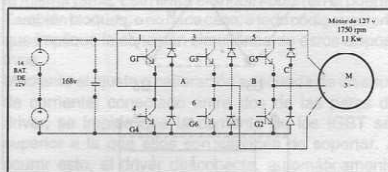


Figura 1. Esquema general de fuerza

3. MODULADOR DE VOLTAJE Y FRECUENCIA

Como es sabido, el modulador es el conjunto de elementos hardware y software que sirven para variar la tensión y la frecuencia, de acuerdo con la ley de mando seleccionada. Esta ley de mando se muestra en la figura 2 y en la tabla I. Como se aprecia, se trabaja de 5 Hz a 60 Hz, siguiendo una ley tensión/frecuencia constante. Se utiliza modulación PWM. De 60 Hz a 120 Hz, se utiliza la modulación de Onda Rectangular o "Six step".

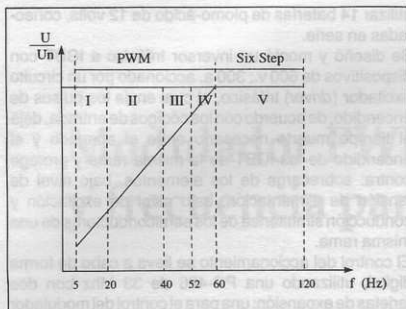


Figura 2. Ley de mando del modulador

Tabla I. Zonas del modulador

Zona	Frecuencias	Rc	Método de Modulación
I	5,1-19,95	48	Vectorial Trifásica
II	20,4-40,2	24	Vectorial Trifásica
III	40,65-51,90	12	Vectorial Trifásica
IV	52,35-59,55	12 y 6	Vectorial Monofásica
V	60-119,85	6	Rectangular (Six Step)

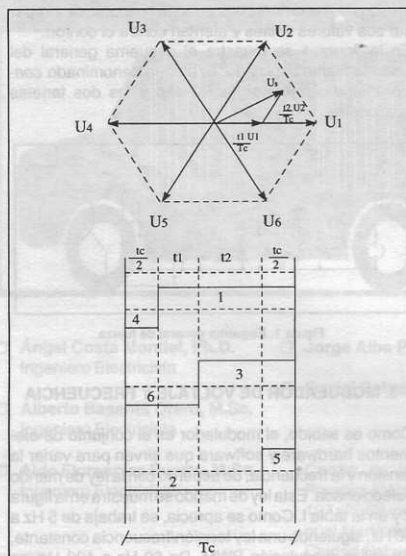


Figura 3. Modulación trifásica

En la figura 3 pueden apreciarse los fundamentos de la modulación vectorial trifásica ([2],[3],[4]). Se basa en "construir" cualquier vector espacial de tensión, a partir de los denominados vectores básicos, seis diferentes de cero y dos nulos, o iguales a cero, que posibilitan las diferentes combinaciones de IGBT en saturación, variando el tiempo relativo de aparición de dichos vectores en cada período de modulación T_c . Se considera requisito que el cambio de un vector a otro sólo implique la conmutación de una sola fase del inversor. Para cumplir este requisito el tiempo correspondiente al vector cero se divide en dos partes iguales, correspondiendo cada parte a un vector cero diferente. Esto puede apreciarse en la propia figura 3 (utilizando modulación vectorial asimétrica). La ecuación de tensión para este método es:

$$\vec{U}_s = \left(\frac{t_1}{T_c} \right) \cdot \vec{U}_1 + \left(\frac{t_2}{T_c} \right) \cdot \vec{U}_2 \quad (1)$$

y el tiempo total del vector cero es:

$$t_0 = T_c - (t_1 + t_2) \quad (2)$$

Se define la razón de modulación R_c como la razón entre la frecuencia de modulación f_c y la frecuencia fundamental f_1 :

$$R_c = \left(\frac{f_c}{f_1} \right) \quad (3)$$

El número de vectores que deben sintetizarse por período es igual, también, a esta razón de modulación. Mientras mayor es este factor, mejor es la calidad de la onda de corriente (menor contenido de armónicas superiores y, por tanto, menos pérdidas en el motor) pero mayores son las pérdidas en el inversor y mayor el "esfuerzo computacional" a que se somete al procesador. El modulador diseñado tiene tres zonas de trabajo correspondientes a la modulación vectorial trifásica tal como se muestra en la tabla I.

Uno de los principales problemas a resolver en los moduladores que trabajan, tanto en la zona de par constante con modulación PWM, como en la de potencia constante con onda rectangular, es la denominada zona de transición, en la cual debe irse pasando suavemente de una modulación a la otra. El no hacerlo así daría lugar a cambios muy bruscos en la componente fundamental de la tensión y, por tanto, de la corriente.

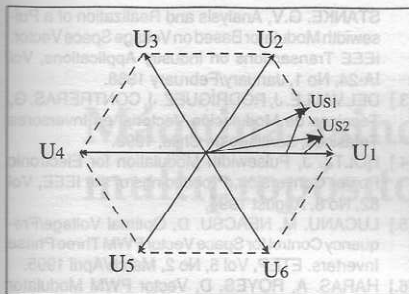


Figura 4. Modulación monofásica (vectores)

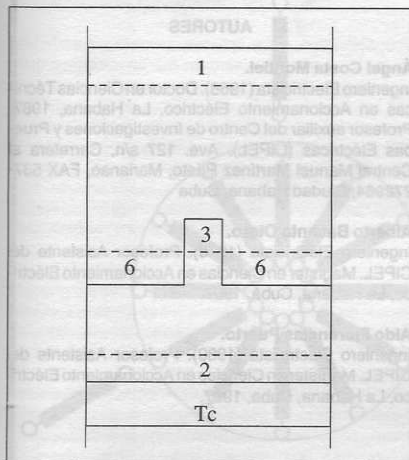


Figura 5. Modulación monofásica (patrones de encendido)

Para resolver este problema, en el modulador propuesto, se utiliza la denominada modulación monofásica ([4],[6]) desde una frecuencia de 32,5 Hz hasta una de 59,55 Hz. En las figuras 4 y 5 se muestran, gráficamente, los fundamentos de este tipo de modulación. Como puede apreciarse, el vector siempre tiene la punta de la saeta en el lado del hexágono del sector limitado por dos vectores activos consecutivos. En la figura 6 se muestra un período de modulación, en el cual puede observarse que sólo una de las tres fases es modulada en cada período de modulación. La fase modulada cambia de período de modulación en período de modulación. Esto,

evidentemente, hace más suave la transición a la onda rectangular. Obsérvese, también, que en este tipo de modulación nunca se hace uso de los vectores cero.

4. PROTECCIONES DEL SISTEMA

Para contar con una buena confiabilidad es necesario contar con un sistema de protecciones que la garantice. Este sistema debe cumplir los requisitos siguientes:

1. Evitar daños irreversibles a los elementos semiconductores, debidos a picos de tensión.
2. Evitar que la temperatura del aislamiento del motor alcance un nivel superior al permisible.
3. Responder, de manera adecuada, ante la presencia o la posibilidad de una falla. Preferentemente, deben evitarse sus consecuencias catastróficas sin desconectar el sistema.

Para lograr el primer requisito se utilizan los denominados "snubbers", que son circuitos adicionales ubicados en el puente inversor, destinados a eliminar los picos de tensión de los IGBT. Debido al margen de seguridad con que se seleccionan estos dispositivos y al hecho de trabajar con una frecuencia de conmutación relativamente baja, se decidió utilizar un esquema muy sencillo, el cual se muestra en la figura 7, para una fase del inversor y que consiste en conectar un condensador en paralelo con cada pareja de IGBT.

Por otra parte, el driver trifásico utilizado para la excitación del puente inversor contiene también importantes funciones de protección. Tiene realizado, internamente, el tiempo muerto necesario entre la desconexión o corte de un IGBT y la conexión o corte del otro IGBT de la misma rama. Esto evita el *shootthrough* en el puente. También bloquea, o no hace caso, a todo código vectorial que implique la conexión simultánea de estos dispositivos.

Mediante el ajuste o calibración adecuada de un *shunt* de corriente, conectado entre dos de las patas del driver, se impide que la corriente de los IGBT sea superior a la que ellos son capaces de soportar. Al ocurrir esto, el driver desconecta, automáticamente, todos los pulsos de excitación de los IGBT conectados al lado positivo del puente y señala la falla.

Finalmente, se realizó la protección de sobrecarga, dirigida a proteger al motor, la cual actúa al ocurrir una corriente superior a la de sobrecarga. El control reacciona ante esta situación no haciendo caso a la señal del pedal y disminuyendo la frecuencia. Esto provoca una disminución de la corriente. Este proceso continúa hasta que la corriente cae por debajo de la de sobrecarga. Al ocurrir esto, el pedal no recupera el mando inmediatamente, sino que lo hace de forma suave mediante un sencillo hardware adicional. Esto impide variaciones bruscas de la corriente.

5. CONCLUSIONES

Se obtuvo un accionamiento que cumple los requerimientos impuestos, utilizando un motor de inducción trifásico de propósito general, lo cual lo hace más sencillo y barato, permitiendo una mejor utilización del espacio disponible en el vehículo, en comparación con un motor de corriente continua.

La utilización de la modulación vectorial permite simplificar tanto el hardware como el software, debido al enfoque trifásico característico de este método de modulación.

Con el objetivo de utilizar más eficientemente el tiempo de cálculo, se almacenaron en memoria los patrones de encendido, accesándolos de acuerdo con la consigna impuesta por el pedal. Con este mismo propósito y buscando un compromiso entre pérdidas en el inversor y pérdidas en el motor, se varió la razón de modulación R_c en dependencia de la frecuencia.

Se realizó un sistema de protecciones que permite garantizar la confiabilidad del accionamiento, disminuyendo al máximo la necesidad de reposición de componentes.

Actualmente se trabaja en la realización de la modulación vectorial simétrica, lo cual debe redundar en una disminución del contenido de armónicas de la corriente del motor. Se piensa trabajar también en un sistema de diagnóstico de fallos que mejore aún más la confiabilidad y seguridad del vehículo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1.] BOSE. B.K, SUTHERLAND. H, A High Performance Pulsewidth Modulator for an Inverter Fed Drive System using a Microcomputer. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol-IA-19, No. 2, March/April 1983.
- [2.] VAN DER BROECK. H.W, SKUDELNY. H.CH,

STANKE. G.V, Analysis and Realization of a Pulsewidth Modulator Based on Voltage Space Vector. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol IA-24, No 1, January/February 1988.

- [3.] DEL VALLE. J, RODRÍGUEZ. J, CONTRERAS. G, Técnicas de Modulación Vectorial en Inversores Trifásicos, Santiago de Chile, 1992.
- [4.] HOLTZ. J, Pulsewidth Modulation for Electronic Power Conversion, Proceedings of the IEEE, Vol 82, No 8, August 1994.
- [5.] LUCANU. M, NEACSU. D, Optimal Voltage/Frequency Control for Space Vector PWM Three Phase Inverters. ETEP, Vol 5, No 2, March/April 1995.
- [6.] HARAS. A, ROYES. D, Vector PWM Modulator with Continuous Transition to the Six Step Mode. European Power Electronics Conference, Sevilla, España, 1995.

AUTORES

Ángel Costa Montiel.

Ingeniero Electricista (1968). Doctor en Ciencias Técnicas en Accionamiento Eléctrico, La Habana, 1987. Profesor auxiliar del Centro de Investigaciones y Pruebas Eléctricas (CIPEL). Ave. 127 s/n, Carretera al Central Manuel Martínez Prieto, Marianao, FAX 537-272964, Ciudad Habana, Cuba

Alberto Basanta Otero.

Ingeniero Electricista (1978). Profesor Asistente del CIPEL. Magíster en Ciencias en Accionamiento Eléctrico, La Habana, Cuba, 1997.

Aldo Florencias Puerto.

Ingeniero Electricista (1980). Profesor Asistente del CIPEL. Magíster en Ciencias en Accionamiento Eléctrico, La Habana, Cuba, 1997.