

Técnicas de control para motores *Brushless*

Comparativa entre conmutación Trapezoidal, conmutación Sinusoidal y Control Vectorial

Roger Juanpere Tolrà
rjuanpere@ingenia-cat.com

ingenia-cat - Motion Control Department
C./Llacuna 162, Barcelona - Spain

Abstract - Este documento presenta las técnicas de control más utilizadas actualmente para motores *Brushless* basadas en el uso de sensores. Los tipos de controladores de motor se clasifican según la conmutación utilizada: Trapezoidal, Sinusoidal y Control Vectorial. En cada caso se analiza su principio de funcionamiento así como sus prestaciones y/o limitaciones.

Keywords : Controlador motor, *brushless*, *brushed*, BLDC, *sensorless*, *sensor*, PM Motor, Conmutación trapezoidal, Filtro PI, *six-step method*, Conmutación sinusoidal, Control vectorial, *Direct-Quadrature Control*, *Field Oriented Control*.

I. INTRODUCCIÓN

Los bobinados de un motor *brushless* (también llamado BLDC) están distribuidos a lo largo del estátor en múltiples fases. Dichos motores constan normalmente de tres fases con una separación de 120° entre ellas.

A diferencia de los motores *brushed* convencionales donde la conmutación entre sus fases se realiza internamente de forma mecánica, en los motores *brushless* las corrientes y voltajes aplicados a cada uno de los bobinados del motor deben ser controlados independientemente mediante una conmutación electrónica [1]. El dispositivo encargado de realizar esta tarea se denomina *controlador de motor*.

Para generar par motor el controlador debe excitar continuamente los bobinados adecuados de forma que generen un campo magnético perpendicular a la dirección del rotor [2].

Existen dos grandes familias de controladores de motor diferenciadas principalmente en la utilización (*sensored*) o no (*sensorless*) de algún sensor para determinar la posición del rotor. Los controladores *sensorless* no son motivo de estudio en este documento si bien todos los resultados presentados son extrapolables a ellos.

Las técnicas de control para motores *brushless* se pueden clasificar según el algoritmo de conmutación implementado. Las más utilizadas actualmente son:

- Conmutación trapezoidal (también llamada *6-steps mode* o basada en sensores *hall*),
- Conmutación sinusoidal y
- Control vectorial (*Field Oriented Control*).

Estas técnicas tienen básicamente como objetivo estimar la excitación óptima de cada una de las fases del motor y se diferencian principalmente por su complejidad de implementación, que se traduce en un incremento de prestaciones.

A continuación se describen algunas de las características más relevantes de cada técnica de control.

II. TECNICAS DE CONTROL

II.1. Control basado en Conmutación trapezoidal

Uno de los métodos más simples de control de motores *brushless* es el llamado conmutación trapezoidal o *6-steps mode*.

En este esquema se controla la corriente que circula por los terminales del motor, excitando un par simultáneamente y manteniendo el tercer terminal desconectado. Sucesivamente se va alternando el par de terminales a excitar hasta completar las seis combinaciones posibles.

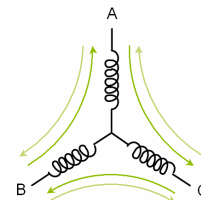


Figura II-1: Esquema de los seis posibles caminos de circulación de corriente en el control trapezoidal.

Tres sensores de efecto *hall*¹ situados en el motor son utilizados para proporcionar la posición aproximada del rotor al controlador y que éste pueda determinar el próximo par de terminales a excitar. La siguiente figura muestra el diagrama de bloques de un controlador trapezoidal típico con lazo cerrado de corriente.

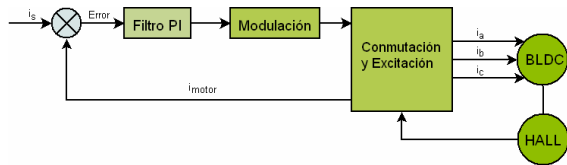


Figura II-2: Esquema de un controlador con conmutación trapezoidal

La corriente que circula por el par de terminales activos es comparada con la corriente deseada y el error resultante es aplicado a un Filtro PI (Proporcional - Integrador). La salida de este filtro intenta corregir la desviación y por tanto minimizar el error. Con esta técnica se consigue mantener constante la corriente que circula por cualquiera de los bobinados del motor.

Existen distintas técnicas de modulación orientadas a la generación de señales de excitación para motores *Brushless*[3] mediante las cuales, se puede aumentar la eficiencia del sistema.

Debido a que en todo momento las corrientes de dos bobinados son iguales en magnitud y la tercera siempre es nula, el vector de corrientes del estátor o resultado de la suma vectorial de las corrientes que circulan por las bobinas, sólo puede apuntar a 6 direcciones discretas (ver Figura II-3).

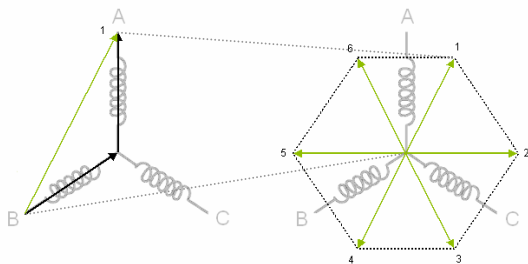


Figura II-3: Ejemplo de cálculo del vector de corrientes del estátor y espacio de posibles direcciones de dicho vector.

Dado que el vector de corrientes sólo puede apuntar en seis direcciones se produce una desalineación entre éstas y la posición real del rotor. En el peor de los casos, es decir cuando el rotor se encuentre en la

posición intermedia de uno de los 6 sectores, la desalineación puede llegar a ser de 30 grados.

Esta desalineación genera un rizado en el par del motor de aproximadamente el 15% ($1 - \cos 30^\circ$) a una frecuencia seis veces la velocidad de rotación del motor (ver Figura II-4).

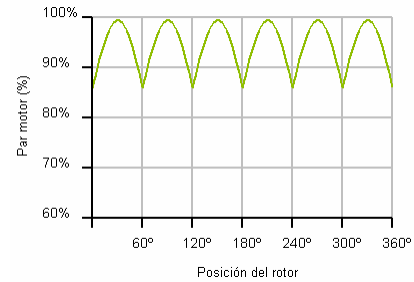


Figura II-4: Rizado del par motor respecto a la posición del rotor en una conmutación trapezoidal.

Este rizado dificulta el control de motores *brushless*. En aplicaciones que demanden movimientos a baja velocidad se hace especialmente notable provocando una disminución en la precisión de dichos movimientos.

Además puede ocasionar desgaste mecánico, vibraciones o ruido audible reduciendo las prestaciones y el tiempo de vida del motor.

No obstante gracias a su fácil implementación, esta técnica de conmutación viene siendo muy utilizada desde el inicio de los motores *brushless* especialmente en aplicaciones de bajo coste.

II.2. Control basado en Conmutación sinusoidal

La conmutación sinusoidal es vista como un control más avanzado y exacto que el trapezoidal, ya que intenta controlar la posición del rotor continuamente.

Esta continuidad se consigue aplicando simultáneamente tres corrientes sinusoidales desfasadas 120° a los tres bobinados del motor. La fase de estas corrientes se escoge de forma que el vector de corrientes resultante siempre esté en cuadratura con la orientación del rotor y tenga un valor constante.

Como consecuencia de este procedimiento se obtiene un par más preciso y sin el rizado típico de la conmutación trapezoidal.

No obstante, para poder generar dicha modulación sinusoidal es necesaria una medida precisa de la posición del rotor.

¹ Transductor que varía su tensión de salida en función de la densidad de campo magnético presente.

Debido a que los sensores de efecto *hall* solo proporcionan una posición aproximada es necesario el uso de otro dispositivo que aporte mayor precisión angular como puede ser un *encoder*².

La siguiente figura muestra el diagrama de bloques típico de un controlador con conmutación sinusoidal.

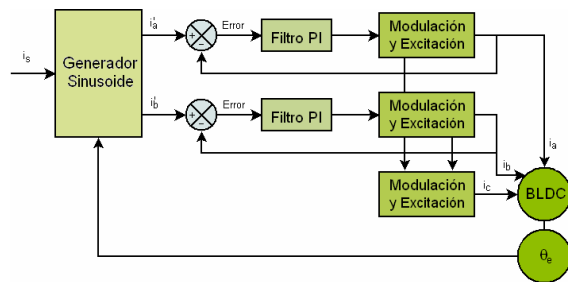


Figura II-5: Esquema de un controlador con conmutación sinusoidal

Según la ley de *Kirchoff* la suma de dos de las tres corrientes entrantes a un nodo es igual al valor negativo de la tercera ($i_a + i_b = -i_c$). Por tanto, controlando dos de las corrientes aplicadas al motor se controla implícitamente la tercera o lo que es lo mismo la tercera corriente no puede ser controlada de forma independiente.

En el caso que nos aplica:

$$\begin{aligned} i_a &= i_s \times \sin(\theta_e) \\ i_b &= i_s \times \sin(\theta_e - 120^\circ) \\ i_c &= i_s \times \sin(\theta_e - 240^\circ) = -(i_a + i_b) \end{aligned}$$

Gracias a la información de la posición del rotor proporcionada por el *encoder* se sintetizan las dos sinusoidales deseadas, normalmente mediante el uso de una LUT³. Éstas son comparadas con las medidas de las corrientes que circulan por el motor y el error resultante aplicado a dos Filtros PI que intentan corregir las desviaciones.

La salida de los filtros es utilizada como entrada del generador de excitación que en la mayoría de los casos incorpora un modulador PWM.

La conmutación sinusoidal soluciona los problemas de eficiencia que presenta la conmutación trapezoidal. Sin embargo, presenta problemas a altas velocidades de rotación del motor debido a la limitación frecuencial del bucle de corriente (Filtro PI).

² Dispositivo electrónico que convierte una posición angular en un código digital.

³ Look-up Table - Técnica computacional que permite la optimización del tiempo de cálculo de una función mediante la sustitución de ésta por la consulta a un array.

A mayor velocidad de rotación, mayor error y por tanto mayor desalineación entre el vector de corrientes y la dirección de cuadratura del rotor. Este hecho provoca una progresiva disminución del par motor (ver Figura II-6).

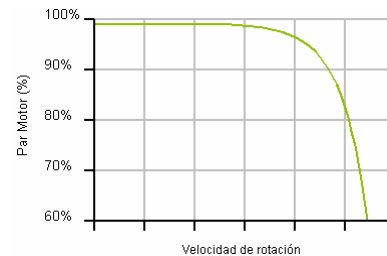


Figura II-6: Par Motor en función de la velocidad de rotación

Para mantener el par constante se necesita aumentar la corriente que circula por el motor provocando una disminución de la eficiencia.

Este deterioro de la eficiencia aumenta al incrementarse la velocidad hasta llegar a un punto en el que el desfase entre el vector de corrientes y la dirección de cuadratura puede llegar a 90° produciendo un par motor completamente nulo.

II.3. Control vectorial

El control vectorial es el más complejo y el que requiere mayor potencia de cálculo de las tres técnicas. A su vez también es la que mejor control proporciona.

El problema principal que presenta la conmutación sinusoidal es que intenta controlar directamente las corrientes que circulan por el motor, las cuales son intrínsecamente variantes en el tiempo. Al aumentar la velocidad del motor, y por tanto la frecuencia de las corrientes, empiezan a aparecer problemas.

El control vectorial o *Field Oriented Control* (FOC) soluciona el problema controlando el vector de corrientes directamente en un espacio de referencia ortogonal y rotacional, llamado espacio D-Q (*Direct-Quadrature*).

Dicho espacio de referencia está normalmente alineado con el rotor de forma que permite que el control del flujo y del par del motor se realice de forma independiente. La componente directa permite controlar el flujo y la componente en cuadratura el par.

Debido a que el vector de corrientes en el espacio de referencia D-Q es estático los filtros PI trabajan en continua y se eliminan por tanto los problemas frecuenciales de la conmutación sinusoidal (ver Figura II-7).

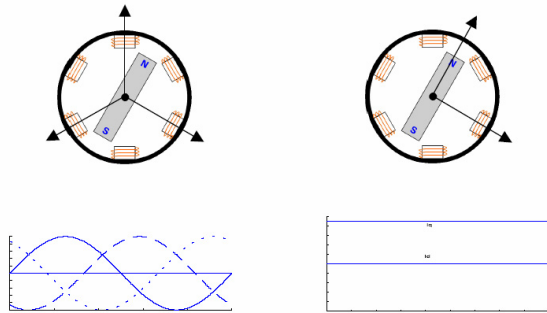
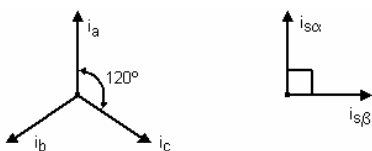


Figura II-7: Comparativa entre el espacio estático de las bobinas y el espacio rotacional D-Q

Para poder realizar este control es necesario transformar matemáticamente las medidas de las tres corrientes referidas al espacio estático de las bobinas del motor al espacio rotacional D-Q.

Aunque esta transformación puede implementarse en un único paso educacionalmente se divide en dos transformaciones [4].

- Transformada de *Clarke* - Transformación de un sistema de 3-fases equiespaciados (a,b,c) a uno de 2-fases ortogonales (α, β).



$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos \varphi & \cos 2\varphi \\ 0 & \sin \varphi & \sin 2\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$\varphi = 120^\circ$$

- Transformada de *Park* - Transformación de un sistema ortogonal estacionario (α, β) a uno rotacional (d, q).

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}$$

Al igual que en la conmutación sinusoidal es importante conocer la posición del rotor con exactitud. Un error en la estimación de ésta provocará que la componente directa y la componente cuadratura no estén totalmente desacopladas.

Una vez aplicadas las dos transformaciones el control del motor se simplifica considerablemente. Dos Filtros PI son utilizados para controlar la componente directa y la cuadratura de forma independiente.

La componente en cuadratura es la única que proporciona par útil, por tanto, la referencia de la componente directa suele fijarse a cero. De esta forma se fuerza al vector de corrientes a situarse en la dirección de la componente de cuadratura maximizando la eficiencia del sistema.

Posteriormente se realizan las transformadas inversas para regresar al espacio estacionario de las bobinas y se aplica la excitación correspondiente a cada una de las fases mediante modulación.

El diagrama de bloques del control vectorial es el siguiente [5].

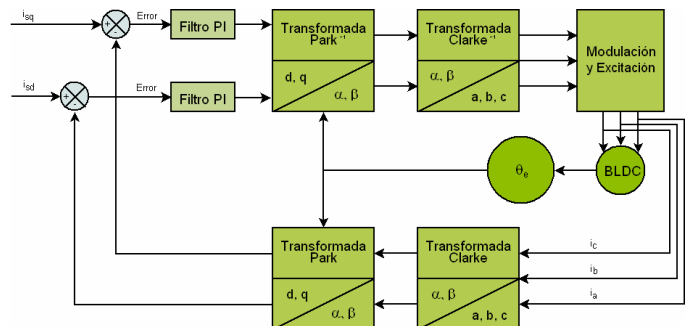


Figura II-8: Esquema de controlador con control vectorial

Este tipo de control mantiene las mismas características de par que la conmutación sinusoidal pero eliminando la limitación frecuencial.

III. CONCLUSIONES

La conmutación trapezoidal proporciona una primera aproximación al control de motores *brushless*. Gracias a su sencilla implementación y a los pocos recursos utilizados es ampliamente usada en aplicaciones de muy bajo coste. No obstante debido a su alto rizado de par en todo el espectro frecuencial la hace desaconsejable para cualquier aplicación que demande una mínima precisión o eficiencia.

La conmutación sinusoidal soluciona el problema del rizado del par a cambio de aumentar la complejidad del control y de incorporar un sensor de mayor precisión. Sin embargo, debido a que trabaja en el espacio variante del tiempo presenta una limitación de control a altas velocidades.

El control vectorial soluciona los problemas de ambos controles consiguiendo una alta eficiencia y control del par tanto a bajas como a altas velocidades.

IV. REFERENCIAS

- [1] M.Vila, “*A quick overview on rotatory Brush and Brushless DC motors*”, ingenia-cat S.L., 2006.
- [2] George Ellis, “*Control System Design Guide*”, Elsevier Academic Press.
- [3] A.Torné, “*Algoritmos de modulación para motores brushless*”, ingenia-cat S.L., 2006
- [4] University of Idaho, “*Utility Applications of Power Electronics*”, ECE 529
- [5] L. Romeral, “*Motion Control for Electric Drives*”, Dept. Eng. Electrónica. Universitat Politècnica de Catalunya.