

Alineación inicial de un motor PMSM con *encoder incremental* mediante sensores de efecto Hall

Marc Vila Mani, Roger Juanpere Tolrà
mvila@ingenia-cat.com, rjuanpere@ingenia-cat.com

Ingenia-CAT S.L. – Motion control department
C./Llacuna 162, Barcelona - Spain

Abstract - Cuando se desea controlar con precisión la posición o velocidad de motores síncronos de imanes permanentes (PMSM), suelen utilizarse *encoders* incrementales como elementos de *feedback*.

Estos elementos permiten conocer con precisión la posición del rotor permitiendo así el uso de estrategias de control vectorial.

Sin embargo, estos sistemas requieren una secuencia de alineación inicial del rotor a una posición conocida.

En este documento se presenta un algoritmo estimador de la posición del rotor basado en la utilización de sensores de efecto Hall.

Keywords : motor *brushless*, PMSM, efecto Hall, *encoder*, lazo cerrado, control motor, alineación forzada.

I. INTRODUCCIÓN

Los sensores de efecto Hall se han convertido en un elemento básico de todos los motores eléctricos síncronos de imanes permanentes sin escobillas (PMSM), comúnmente conocidos como *brushless* o *brushless* DC [1].

Son utilizados para conocer la posición angular aproximada del rotor¹ del motor, permitiendo así aplicar una secuencia válida de conmutación entre las fases (bobinas) del estator² que genere par motor [2].

En ocasiones, también puede utilizarse los sensores de efecto Hall para cerrar un lazo de posición o de velocidad, aunque la precisión que éstos permiten obtener, los desaconseja para este uso, siendo más indicados para ello, otros elementos de *feedback* como por ejemplo los *encoders*.

Cuando se desea realizar un control en lazo cerrado con *encoders* incrementales, resulta imposible conocer a priori la posición del rotor, con lo que habitualmente se requiere una secuencia de inicialización para alinear el rotor a una posición conocida que permita aplicar la secuencia de conmutación adecuada a las fases del estator [2].

Esta alineación inicial, suele requerir un movimiento inicial del motor que en ocasiones puede ser indeseable o incluso no realizable. Se han

documentado numerosas propuestas para evitar dichos movimientos [3][4], aunque ninguna de ellas lo suficientemente genérica para todos los motores PMSM.

Este documento, presenta una alternativa para la alineación inicial del rotor cuando se desea trabajar con *encoders* incrementales, basada en el uso de los sensores de efecto Hall.

Inicialmente se describen y analizan tanto las características de los sensores de efecto Hall, como las de los *encoders*. Posteriormente se aborda el problema de la alineación inicial y se describe la solución propuesta.

Finalmente se exponen los resultados experimentales obtenidos.

II. LOS SENSORES DE EFECTO HALL

II.1. El efecto Hall

El efecto Hall fue descubierto en 1879 por Edwin Herbert Hall y consiste en la aparición de un campo eléctrico (también llamado campo Hall) perpendicular a un conductor sobre el que circula una corriente eléctrica cuando éste es expuesto a un campo magnético.

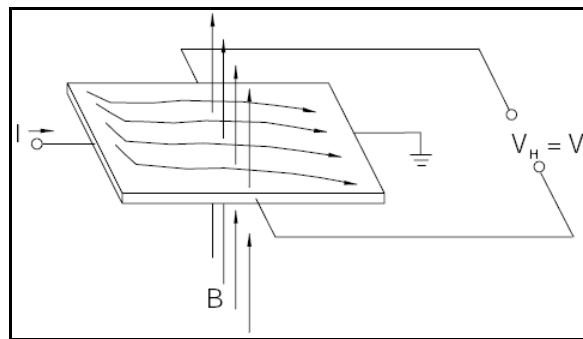


Figura 1: Efecto Hall

La Figura 1 muestra el principio básico de funcionamiento del efecto Hall. Cuando un material semiconductor por el que circula una corriente I , es expuesto a un campo magnético, la fuerza de Lorentz³ se aplica sobre las cargas eléctricas, modificando la distribución uniforme de la corriente y provocando así una diferencia de potencial (V_H)

¹ Componente que gira (rota) en una máquina eléctrica

² Componente fija de una máquina rotativa.

³ http://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza_de_Lorentz

proporcional a la corriente (I) y al campo magnético (B) que lo atraviesa.

El efecto Hall, ha sido ampliamente estudiado y documentado [5][6].

II.2. Sensores de efecto Hall en motores PMSM

Los sensores de efecto Hall propiamente (en la Figura 2 referenciado como *Hall element*) entregan a su salida una tensión proporcional (V_H) a la cantidad de flujo magnético que los atraviesa.

Existe una gran variedad de sensores de efecto Hall[7]: analógicos, digitales, regulados, sin regular, unipolares, bipolares, etc. cada uno adecuado para una aplicación específica.

La Figura 2 muestra el esquema interno de un sensor de efecto Hall digital y regulado.

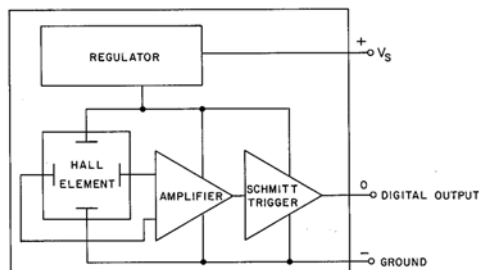


Figura 2: Sensor Hall digital regulado

Sensores de efecto Hall unipolares y bipolares

Una característica importante cuando se escoge una tecnología de sensor de efecto Hall, para aplicar al control de motores, es su unipolaridad o bipolaridad. Los sensores de efecto Hall unipolares, también conocidos como *unipolar switch*, requieren para funcionar un flujo magnético positivo (definido como el que sigue la misma dirección que la referencia del sensor) lo que equivale a dirigir un polo sur hacia su sensor. El campo producido por un flujo magnético negativo (un polo norte dirigido hacia el sensor) no tiene efecto en ellos.

En cambio, entre los sensores de efecto Hall bipolares, existen diversas posibilidades:

- Los que se activan con las señales de campo magnético producidas por un polo norte (*negative bipolar switch*).
- Los que se activan con las señales de campo magnético producidas por un polo sur (*positive bipolar switch* equivalentes a los *unipolar switch*)
- Los que se activan con ambas señales (*latch*).

Los sensores bipolares *latch* son los que permiten obtener mejores eficiencias en la conmutación de las fases de un motor, pues su respuesta eléctrica es la

más simétrica en una vuelta completa del rotor (*50% ON state – 50% OFF state*).

La Figura 3 muestra esquemáticamente los campos obtenidos por un sensor bipolar *latch* en media rotación (180°) de un imán de 4 polos.

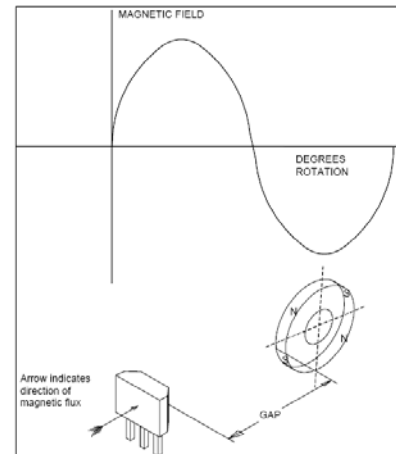


Figura 3: Respuesta de un sensor bipolar

Conmutación basada en sensores de efecto Hall

Para generar par en un motor síncrono de imanes permanentes, debe hacerse circular corriente por las fases del estator siguiendo una secuencia de conmutación establecida [2].

Para determinar los instantes de conmutación o lo que es lo mismo, la posición angular del rotor, suelen utilizarse tres sensores de efecto Hall equiespaciados 120° eléctricos entre ellos.

La corriente que se hace circular por las fases del motor puede sintetizarse como un vector de una determinada intensidad y dirección.

Con la información proporcionada por los sensores, juntamente con la posición relativa de los mismos respecto a las fases, puede determinarse el vector de excitación necesario en cada momento.

III. ENCODERS

Uno de los principales problemas que plantea el uso de sensores de efecto Hall en el control de motores, es la poca precisión que permiten obtener para determinar la posición del rotor.

En efecto, por cada vuelta eléctrica de un motor, los tres sensores de efecto Hall de los que dispone típicamente un motor, sólo entregan seis combinaciones distintas (correspondientes a seis posiciones físicas).

Esta resolución puede ser suficiente para mover el motor, pero no para controlarlo con precisión o para obtener el mejor rendimiento del mismo, en términos de eficiencia y par efectivo.

Cuando se desea obtener mejores rendimientos del motor o un mayor control sobre los parámetros

característicos del mismo, se necesita utilizar un elemento de *feedback* más preciso como por ejemplo un *encoder*.

Los *encoders*, conceptualmente, convierten la rotación mecánica en una secuencia de pulsos eléctricos.

Existen *encoders* de varias tipologías y resoluciones: lineales, rotatorios, magnéticos, ópticos, incrementales, absolutos, monovuelta, multivuelta, etc.

En este documento centraremos la atención en los *encoders* ópticos rotatorios incrementales. Estos *encoders* son los elementos de *feedback* más utilizados hoy en día en las aplicaciones de control de motores que requieren precisión, por su buena relación coste/prestaciones así como su facilidad de uso e integración.

Los *encoders* ópticos rotatorios incrementales, utilizan una fuente de luz y un disco de codificación, para generar señales digitales como los de la Figura 4. Algunos de ellos pueden incorporar adicionalmente una señal de índice o referencia.

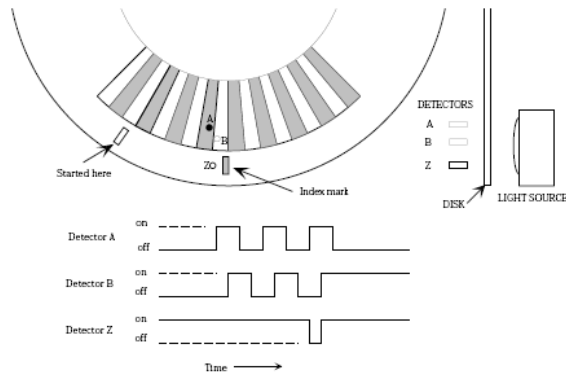


Figura 4: Encoder óptico rotatorio incremental

A este tipo de *encoders* se les suele conocer también como *encoders* de cuadratura, pues sus señales de salida (canales A y B) están desfasadas entre ellas 90° eléctricos.

La resolución que permite obtener este tipo de *encoders* es cuatro veces el número de pulsos de un canal, pues combinando las señales de ambos canales, se obtiene en cada flanco (ascendente o descendiente) una posición discreta del motor.

La elevada precisión en la posición relativa del rotor que nos ofrece este tipo de *encoders* permite obtener parámetros de control más precisos (velocidad actual, posición actual), lo que asegura generar excitaciones más adecuadas en cada posición del rotor.

Para generar estas excitaciones suelen utilizarse estrategias de modulación vectorial [8].

IV. DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN DEL ROTOR

IV.1. Descripción del problema

Cuando se desea utilizar *encoders* incrementales para gobernar la excitación y el movimiento de un motor PMSM es necesario algún algoritmo que permita determinar inicialmente la posición del rotor.

Los algoritmos de localización del rotor se pueden clasificar en dos grupos:

- Algoritmos forzados: Fuerzan al rotor a situarse en una posición concreta.
- Algoritmos estimadores: Determinan la posición del rotor mediante la observación de algunos parámetros del motor y por tanto sin requerir un movimiento.

Existe una gran variedad de algoritmos estimadores que intentan determinar la posición del rotor ya sea a partir de la medida de la inductancia del estator (i.e. basándose en la influencia del flujo del rotor, en las prominencias magnéticas, etc.) o inyectando señales de alta frecuencia y observando su comportamiento, entre otras. No obstante, estas técnicas son únicamente válidas para un determinado tipo de motores impidiendo, por tanto, su generalización.

La alternativa presentada en este documento, basada en la utilización de los sensores de efecto Hall, permite la creación de un algoritmo genérico.

En los próximos subcapítulos se detalla un algoritmo de alineación forzada y se compara con el nuevo algoritmo genérico propuesto. En ambos casos se analizan sus ventajas e inconvenientes.

IV.2. Alineación forzada

Una posible solución al problema de la localización del rotor consiste en generar una excitación de forma que se fuerce al rotor a situarse en una posición conocida.

La Figura 5 representa la alineación forzada de un PMSM con un rotor de 2 polos. El esquema de la izquierda representa la posición inicial del rotor respecto a las fases y el esquema de la derecha representa la posición final después de aplicar la excitación forzada. En este último caso, la flecha azul representa el campo magnético resultante generado mediante la excitación.

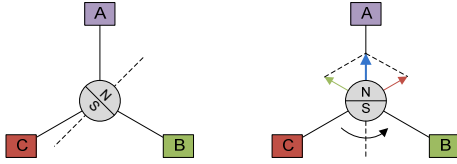


Figura 5: Ejemplo de alineación forzada

Generalmente, en este algoritmo intervienen dos parámetros, la duración temporal de la excitación y el valor de la corriente inyectada (a veces expresada en tanto por ciento de la corriente nominal del motor). Dichos parámetros deberán ser optimizados para cada conjunto motor-carga.

Esta técnica, aunque puede resultar efectiva en muchos casos, presenta problemas cuando el sistema está sometido a elevadas cargas externas debido a que la excitación generada no garantiza obtener el máximo par del motor (para crear el máximo par debe generarse un campo magnético ortogonal al campo del rotor).

Además, forzar la posición del rotor puede no ser viable ya a que implica un movimiento no controlado que puede dañar el sistema final.

IV.3. Alineación basada en sensores de efecto Hall

Esta técnica consiste en combinar dos tipos posibles de conmutación de motores PMSM, trapezoidal y sinusoidal intentando entregar siempre el máximo par.

El algoritmo se puede dividir en dos fases:

- **Arranque:** En la primera fase, se excita el motor utilizando una conmutación trapezoidal basada únicamente en la información proporcionada por los sensores Hall. Tal como muestra la Figura 6, dada una posición inicial cualquiera del rotor podemos estimar a partir de los sensores Hall el sector en el que se encuentra, y por tanto, su posición aproximada con un error de $\pm 30^\circ$. El vector de excitación (flechas numeradas) aplicado en cada sector garantiza que la excitación se encuentre siempre entre 60° y 120° de la posición del rotor.
- **Funcionamiento normal:** Una vez se detecta la transición de un sensor Hall se puede estimar con gran precisión la posición del rotor debido a que la distribución física de los sensores respecto a las fases es conocida y por tanto cada transición corresponde a una posición angular definida. A partir de este momento el sistema utiliza el *encoder* como elemento de *feedback* y genera una conmutación sinusoidal (mediante SPWM o SVPWM).

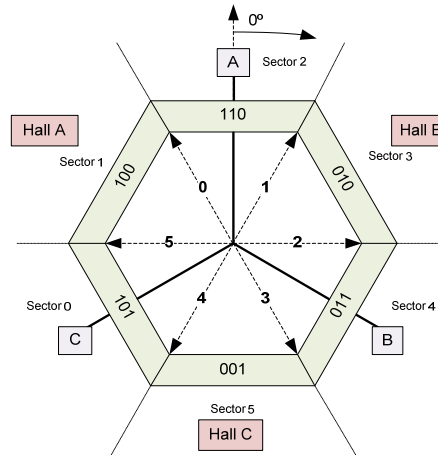


Figura 6: Representación de un PMSM con sensores de efecto Hall. Se pueden apreciar los 6 sectores definidos por la combinación de señales Hall así como los vectores de excitación de cada sector para movimientos *clockwise*

Con este algoritmo se solucionan los dos principales problemas de la alineación forzada ya que siempre garantiza un mínimo par de arranque y no necesita un movimiento previo al deseado. Además se consigue un algoritmo genérico ya que es independiente del tipo de motor.

No obstante, dado que la técnica se basa en la respuesta de los sensores Hall para determinar la posición del rotor, el tipo de sensores Hall utilizados es un parámetro crítico. Si éstos no son bipolares *latch*, es decir, no presentan respuestas completamente simétricas la alineación no será óptima.

V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se muestra un ejemplo de funcionamiento del algoritmo basado en sensores de efecto Hall sometido a una carga externa. En este caso se utiliza una excitación SVPWM para la fase de funcionamiento normal.

Para enfatizar el comportamiento del algoritmo se ha añadido una señal externa de sincronización. Mientras esta señal permanezca desactivada el algoritmo no permitirá la transición a la segunda fase y se excitará en conmutación trapezoidal. Una vez se active la señal, el algoritmo esperará a la siguiente transición de un Hall y pasará a la fase de funcionamiento normal.

Esta modificación nos permite ejecutar el algoritmo a altas velocidades.

En la Figura 7 se muestran las principales señales implicadas en el algoritmo. El canal 1 representa una de las señales del sensor Hall, en el canal 2 la señal de sincronismo y en el canal *Math* se encuentra la tensión aplicada entre dos fases.

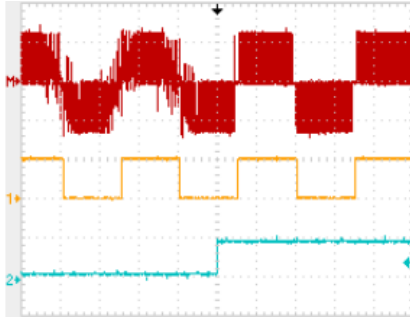


Figura 7: Ejemplo del algoritmo basado en sensores de efecto Hall

En la Figura 8 se ha promediado la tensión de fase a fase para facilitar la visualización de la misma.

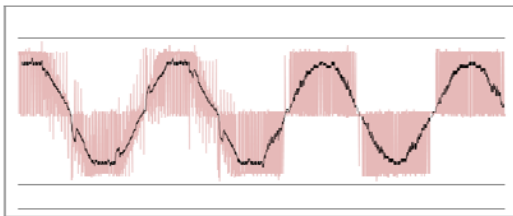


Figura 8: Tensión de fase filtrada

Como se puede apreciar en las figuras, inicialmente el motor es excitado mediante conmutación trapezoidal. En el momento que se activa la señal de sincronismo y se detecta una transición de Hall, se dispone de suficiente información para determinar la posición angular del rotor y aplicar el algoritmo. A partir de ese instante la tensión de fase a fase pasa de tener un perfil trapezoidal a un perfil sinusoidal pero manteniendo la velocidad del motor.

También se han comparado las tensiones de fase a fase y la corriente total consumida por el motor sin carga utilizando, la alineación forzada y el algoritmo basado en sensores de efecto Hall. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

En la Figura 9 se representa la excitación del motor una vez realizada la alineación forzada. En el canal 1 se encuentra la señal de un sensor Hall, el canal 2 representa el consumo del sistema y el canal *Math* la tensión de fase a fase.

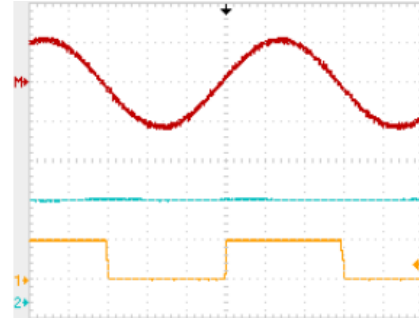


Figura 9: Excitación con alineación forzada sin carga

La Figura 10 representa las mismas señales pero utilizando el algoritmo basado en sensores de efecto Hall. Se puede apreciar que tanto la forma de la de señal de fase a fase como el consumo medio prácticamente no varían entre los dos algoritmos, por tanto, se demuestra en este caso que la utilización del nuevo algoritmo no implica pérdida de prestaciones.

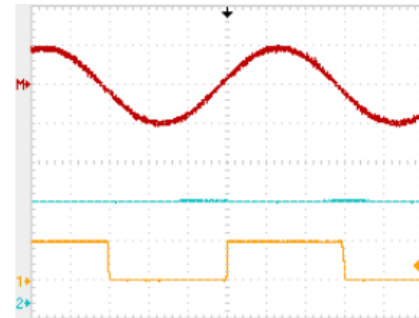


Figura 10: Excitación con alineación basada en sensores Hall sin carga

Se ha repetido la comparativa añadiendo una carga externa al sistema. La Figura 11 presenta los resultados obtenidos con el nuevo algoritmo. Se aprecia que el sistema continúa funcionando de la misma forma que sin carga pero con un ligero aumento del consumo total (canal 2).

Utilizando la alineación forzada en el mismo sistema ha provocado tal error de localización que no se ha podido hacer girar el motor.

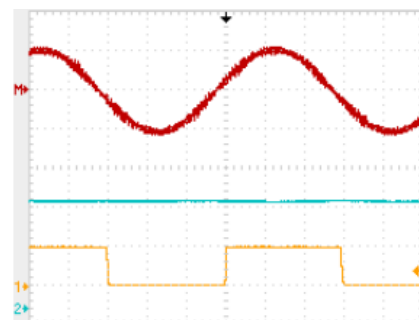


Figura 11: Excitación con alineación basada en sensores con carga

VI. CONCLUSIONES

En este documento se ha mostrado un nuevo algoritmo estimador de la posición del rotor en motores PMSM mediante la utilización de sensores de efecto Hall. Se han comparado las prestaciones en términos de velocidad y consumo con un algoritmo de alineación forzada sin apreciar diferencias.

La alineación forzada ha resultado ser un algoritmo sencillo y válido únicamente en sistemas conocidos que presenten poca carga inicial. No obstante, se ha comprobado que es susceptible a fallar si se requiere un par motor elevado durante la ejecución del mismo.

También se ha comprobado que el nuevo algoritmo es completamente independiente del motor utilizado así como de la carga. La única limitación del algoritmo se basa en la necesidad de utilizar un *feedback* secundario (sensores Hall) de una mínima calidad. Dichos sensores, hoy en día, se incorporan por defecto en la mayoría de motores PMSM.

VII. REFERENCIAS

- [1] M.Vila, "A quick overview on rotatory brush and brushless DC motors", Ingenia-CAT S.L. 2006.
- [2] R.Juanpere, "Técnicas de control para motores brushless", Ingenia-CAT S.L. 2006.
- [3] P.B. Schmidt, M.L. Gasperi, G.Ray, A.H. Wijenayake, "Initial Rotor Angle Detection Of A Non-Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Machine", Rockwell Automation 1997.
- [4] R. Wu, G.R. Slemon, "A Permanent Magnet Motor Drive Without a Shaft Sensor" Proc. IEEE-IAS Annual Meeting, 1990, pp. 553-558.
- [5] S.Kasap, "Hall effect in semiconductors" Univ.Saskatchewan. 1990
- [6] "Hall effect sensing and application", Honeywell.
- [7] J. Gilbert, "Understanding bipolar hall effect sensors" Allegro. 2000.
- [8] A.Torné, "Algoritmos de modulación para motores brushless", Ingenia-CAT S.L. 2006