

Accionamiento de reluctancia autoconmutado con control en línea de los ángulos de inicio y de bloqueo de la conducción

B. Blanqué, J.I. Perat, P. Andrada

G.A.E.C.E. Grupo de Accionamientos Eléctricos con Conmutación Electrónica
Departament d'Enginyeria Elèctrica
E.P.S.E.V.G., Universitat Politècnica de Catalunya
Avinguda Víctor Balaguer s/n, 08800 Vilanova i la Geltrú (España)
Tel.:+34 938967732, fax:+34 938967700, e-mail: blanque@ee.upc.edu

Resumen.

Se presenta un accionamiento de reluctancia autoconmutado con control en línea de los ángulos del disparo o de conmutación, para aplicaciones que requieren regular la velocidad. El modo de control del motor de reluctancia es por corriente. El ángulo de inicio de conducción se calcula mediante la regla de Bose y el ángulo de bloqueo se determina en base a la teoría del ángulo óptimo de bloqueo de Gribble. El procedimiento propuesto es sencillo y sólo requiere del conocimiento de unos pocos datos del motor; de la velocidad, de la tensión en el bus de continua y de la corriente de referencia. El accionamiento es totalmente digital y se ha implementado en un DSP, TMS320F240, utilizando una placa de control Dspace Ace Kit 1104 CLP. El accionamiento se ha ensayado y los resultados experimentales obtenidos permiten constatar unas buenas prestaciones tanto en régimen permanente como en régimen transitorio.

Palabras clave.

Motores de reluctancia, accionamientos de velocidad variable, control en línea, control de corriente.

1. Introducción

El motor de reluctancia autoconmutado (SRM), poco a poco, va encontrando su sitio en el mercado de accionamientos eléctricos, debido a su construcción mecánica sencilla y robusta, sus bajos costes de fabricación, su capacidad de tolerancia a faltas, su elevado rendimiento y su buena relación par/volumen y par/inercia. A pesar de estas ventajas el SRM también tiene inconvenientes: necesita de un control electrónico, de unos sensores de posición, precisa de un gran condensador en el bus de continua y, además, la estructura de polos salientes tanto en el estator como en el rotor provoca ruido y rizado en el par.

En aplicaciones de velocidad variable el SRM opera en uno de estos tres modos: control de corriente, control de

tensión y control de pulso único. En el control de corriente el par electromagnético medio depende de la corriente de referencia, de la velocidad, de la tensión en el bus de continua y de los ángulos de inicio, θ_{on} , y bloqueo de la conducción, θ_{off} , Fig.1. En muchos SRM con control de corriente, la corriente de referencia es la principal señal de control y los ángulos de inicio y de bloqueo a la conducción varían por tramos, utilizándose los mismos ángulos de conmutación en un amplio rango de velocidades. En otros casos los ángulos de conmutación son precalculados para las distintas condiciones de carga y almacenados en una tabla. Cuando se desea optimizar algún parámetro, por lo general maximizar el rendimiento, minimizar el rizado de par o reducir el ruido audible estos ángulos han de seleccionarse adecuadamente [1]-[3].

En esta comunicación se presenta un control de corriente para SRM para aplicaciones a velocidad variable con ángulos de conmutación variables. Los ángulos de conmutación se determinan en línea y en tiempo real en función de las exigencias de la carga y de la velocidad.

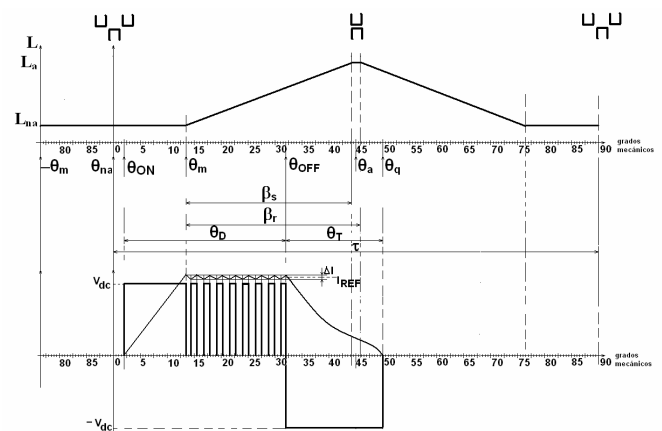


Fig.1. Control de corriente: formas de onda de inductancia, corriente y tensión con definición de los ángulos de disparo.

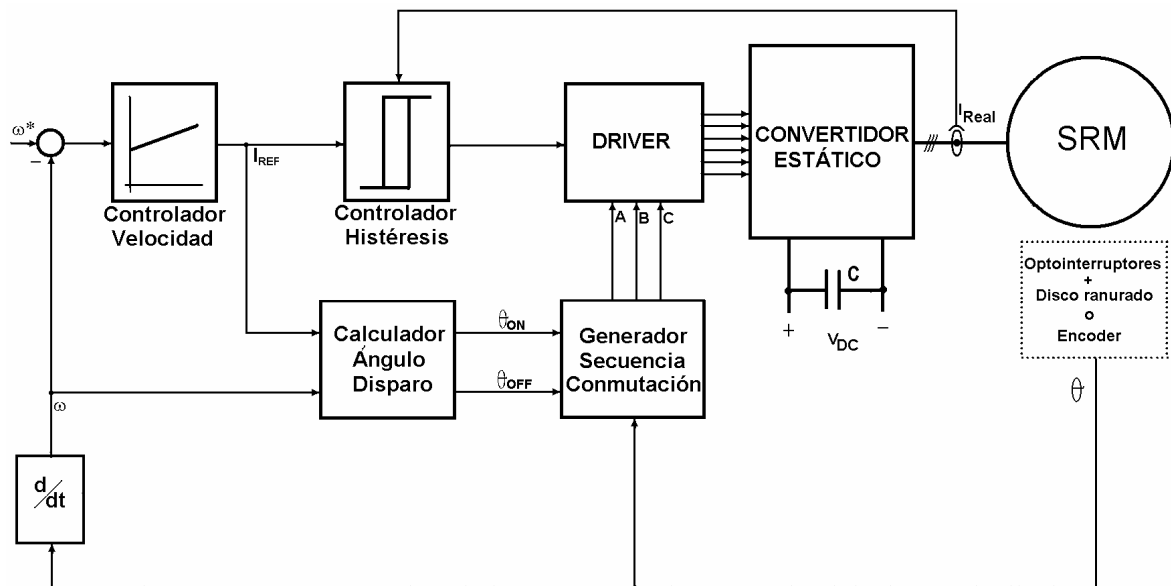


Fig. 2. Diagrama de bloques del SRM

El ángulo de inicio de conducción se ha calculado mediante la regla de Bose [4] y el ángulo de bloqueo de la conducción de acuerdo con la teoría general del ángulo óptimo de bloqueo propuesta por Gribble [5]. El accionamiento se ha ensayado, en diferentes condiciones de carga y regimenes de funcionamiento.

2. Descripción del accionamiento.

2.1 Descripción general

Un diagrama de bloques del accionamiento SRM para velocidad variable, con control en línea de los ángulos de conmutación se muestra en la Fig. 2. El motor de reluctancia es trifásico con seis polos en el estator y cuatro en el rotor, los principales datos del motor se detallan en el anexo. El convertidor de potencia es un convertidor asimétrico o clásico con dos IGBTs y dos diodos rápidos por fase. La posición rotórica se determina mediante un encoder o un conjunto formado por un disco ranurado y tres optointerruptores situados en el interior del motor. El controlador de velocidad, proporcional-integral, PI, genera una corriente de referencia a partir de la diferencia entre la consigna de velocidad y la velocidad real del motor. La corriente en cada fase se regula al valor de la corriente de referencia mediante un controlador de histéresis. El calculador de ángulos de disparo determina, en tiempo real, el ángulo de inicio y el de bloqueo de conducción considerando en todo momento la velocidad y la corriente de referencia.

El control es totalmente digital y se ha implementado en un procesador digital de señal DSP (TMS320F240) utilizando una placa de control Dspace Ace Kit 1104

CLP que permite desarrollar las aplicaciones de control directamente desde Matlab-Simulink sin necesidad de escribir el código manualmente. El proceso de compilación, linkado y carga se efectúa automáticamente en la tarjeta denominada Real Time Processor (RTP) utilizando el llamado Total Development Environment. Una vez implementados los modelos de control, utilizando Matlab-Simulink, en el Dspace hardware, estos pueden probarse en tiempo real en el propio sistema.

2.2. Calculador de ángulos de disparo

El calculador del ángulo de disparo impone en todo instante de tiempo, los ángulos de inicio y de bloqueo de conducción. El procedimiento propuesto para el cálculo de los ángulos de conmutación no requiere del conocimiento de las curvas de magnetización del motor basta con el conocimiento de la inductancia en la posición de alineamiento y en la de no alineamiento, de la velocidad, de la tensión en el bus de continua y de la corriente de referencia. El ángulo de inicio a la conducción se calcula a partir de la regla de Bose.[4] mediante:

$$\theta_{ON} = \theta_m - 6 \frac{L_{na} \cdot N}{V_{dc}} I_{REF} \quad (^\circ) \quad (1)$$

El ángulo de bloqueo se calcula utilizando el óptimo ángulo de bloqueo de conducción para control de corriente, considerando el método simplificado derivado de la teoría de ángulo de bloqueo propuesta por Gribble [5] por medio de la siguiente formula:

$$\theta_{OFF} = \theta_a - \frac{\theta_m}{2} \left(-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \frac{24 \cdot I_{REF} \cdot (1-x) \cdot N}{R_{ua} \cdot V_{dc} \cdot \theta_m}} \right) \quad (^\circ) \quad (2)$$

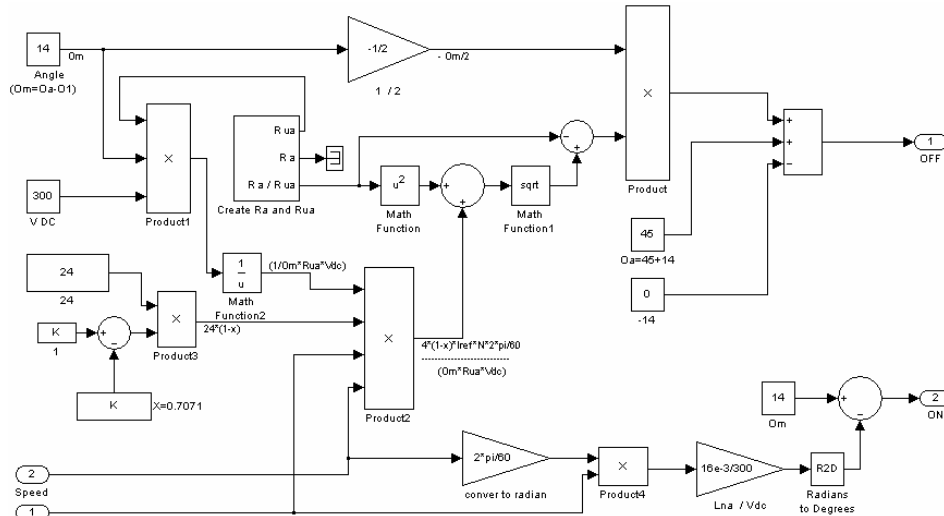


Fig. 3. Diagrama de bloques en Matlab-Simulink del calculador de ángulo de disparo.

Con:

R_a y R_u recíprocos de las inductancias en la posición de alineamiento, L_a , y de no alineamiento, L_{na} ,

$$R_{ua} = R_u - R_a$$

$$\alpha = \frac{R_a}{R_{ua}}$$

N , velocidad (rpm)

V_{dc} , tensión en el bus de continua (V)

x , constante (normalmente comprendida

entre $\frac{1}{\sqrt{2}}$ y $\frac{2}{3}$)

El calculador de ángulos de disparo basado en las expresiones (1) y (2) se ha implementado en Matlab/Simulink tal como se muestra en la Fig. 3. El método propuesto a parte de necesitar poca información sobre los parámetros del motor tiene la ventaja que calcula los ángulos de conmutación de forma analítica considerando en todo momento las condiciones de operación del accionamiento. Los valores obtenidos para los ángulos de inicio y de bloqueo de conducción no optimizan el rendimiento, el rizado de par ni el ruido acústico pero proporcionan unas características de funcionamiento en las que todos estos indicadores están dentro de unos límites muy satisfactorios. En caso que se desee, por ejemplo, maximizar el rendimiento puede añadirse al accionamiento un bloque adicional, bloque de optimización del rendimiento, que modifica los ángulos de conmutación inicialmente calculados por el procedimiento presentado con el fin de minimizar la potencia de entrada del accionamiento [6]

3. Resultados Experimentales

Se ha construido y ensayado un accionamiento SRM con control en línea de los ángulos de inicio y de bloqueo de

la conducción para aplicaciones con velocidad variable.

En la Fig 4 se muestran las formas de onda del par y de la corriente de fase funcionando en régimen permanente con una carga de 2,4 Nm a 750 rpm. El rendimiento en función de la velocidad para diferentes condiciones de carga se ha representado en la Fig. 5, los valores obtenidos son bastante elevados sobre todo para cargas ligeras y para velocidades bajas y medias. En la Fig. 6 se observa el transitorio ante un cambio brusco de carga, de vacío a par nominal mientras que en la Fig.7 se muestra la respuesta transitoria a una repentina disminución de la carga, de par nominal a vacío. En estas dos últimas figuras la consigna de velocidad es la misma, viéndose en ambas la evolución del par, de la velocidad y de la corriente de fase y comprobándose que ante las variaciones bruscas de carga el accionamiento tiende a restablecer rápidamente la velocidad de consigna.

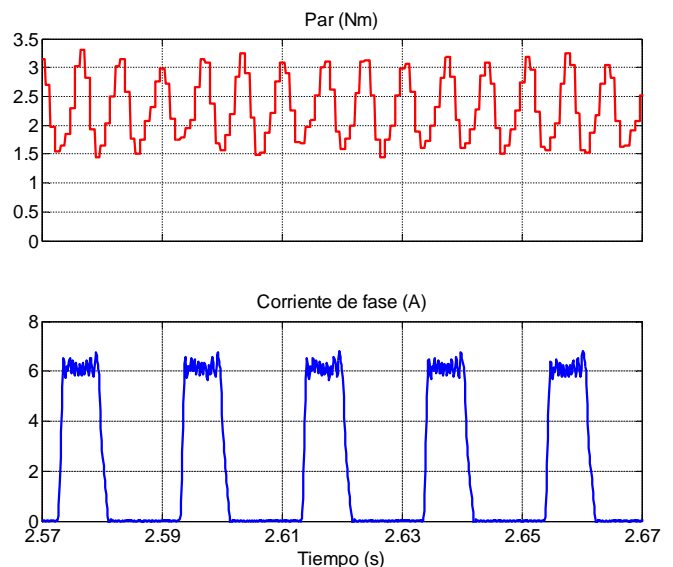


Fig. 4. Formas de onda del par y de la corriente de fase. Par medio 2.4 Nm, velocidad de consigna 750 rpm.

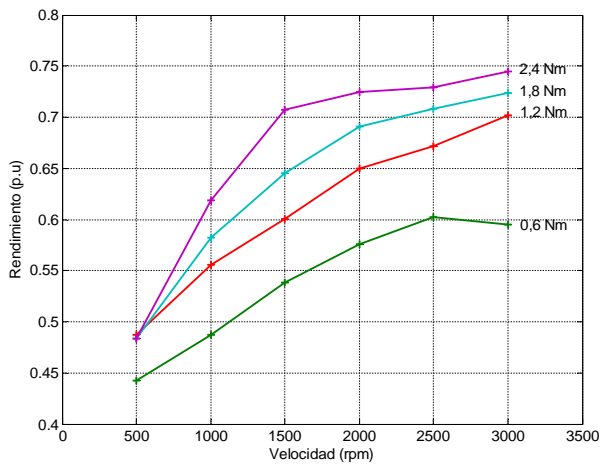


Fig. 5. Rendimiento en función de la velocidad para diferentes cargas.

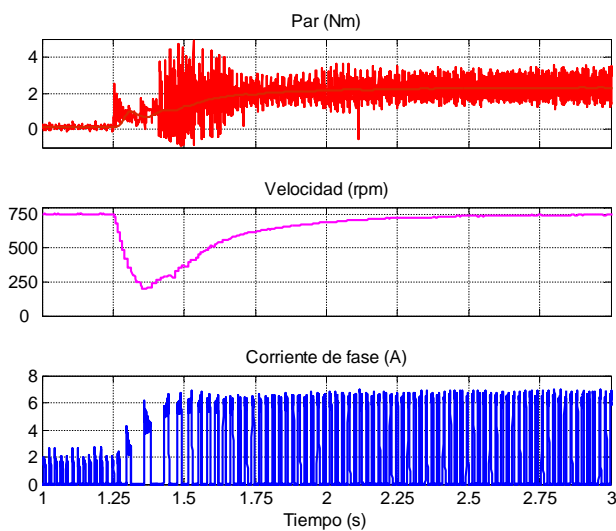


Fig. 6. Transitorio de cambio brusco de carga (de vacío a par nominal 2.4 Nm), velocidad de consigna 750 rpm.

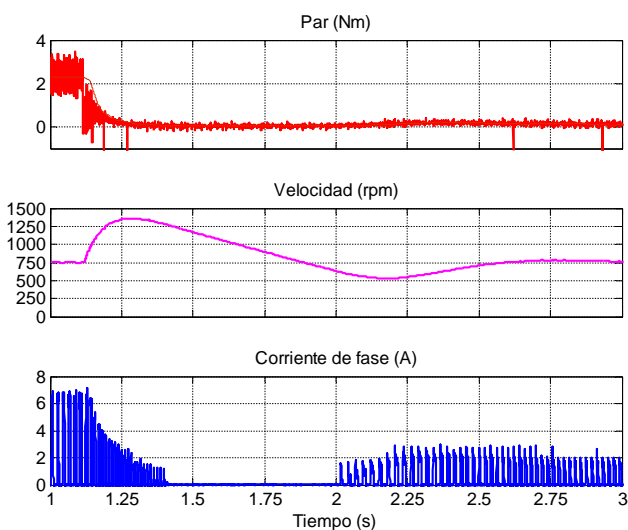


Fig.7. Transitorio de pérdida brusca de carga, de par nominal 2.4 Nm a vacío, velocidad de consigna 750 rpm.

Conclusiones

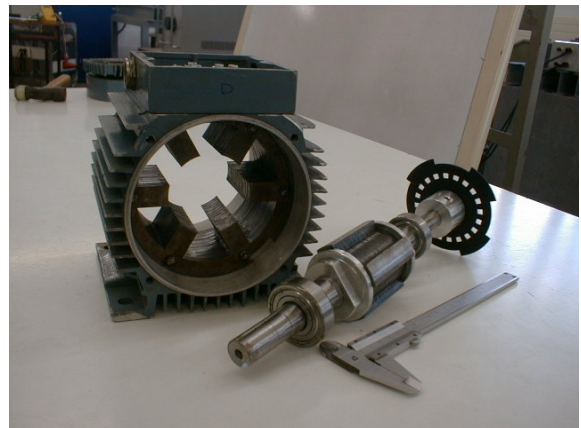
En esta comunicación se ha presentado un accionamiento SRM con control en línea de los ángulos de inicio y de bloqueo de conducción para aplicaciones de velocidad variable. El control propuesto no requiere del conocimiento de las curvas de magnetización del SRM. El ángulo de inicio a la conducción se calcula a partir de la regla de Bose y el ángulo de bloqueo a partir de la teoría de ángulo de bloqueo propuesta por Gribble. El control es totalmente digital y se ha implementado en un procesador digital de señal DSP (TMS320F240) utilizando una placa de control Dspace Ace Kit 1104 CLP. El accionamiento se ha construido y ensayado, deduciéndose de los resultados experimentales un comportamiento muy satisfactorio tanto en régimen permanente, como en régimen transitorio ante cambios bruscos en la carga.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (DPI2001-2203) y por fondos Feder.

Anexo

Parámetros del motor SRM



Tamaño IEC	80
Par nominal	2.4 Nm
Potencia nominal	0.75 kW
Velocidad nominal	3000 rpm
Tensión	300 V
Inductancia alineada	98 mH
Inductancia no alineada	16 mH
Resistencia de fase	1.6 Ω
Momento de inercia	0.0007 kgm ²

Referencias

- [1] P.C.Kjaer, F. Blaabjerg, C.Cossar, T.J.E. Miller. "Efficiency Optimization in Current Controlled Variable-Speed Switched Reluctance Motor Drives". European Power Electronics Conference, EPE, pp 3.741-3.747, Sevilla 1995.
- [2] P.C. Kjaer. "High Performance Control of Switched reluctance Motor". PhD. Thesis University of Glasgow, July 1997.
- [3] C. Mademlis and I. Kioskerides. "Performance Optimization in Switched Reluctance Motor Drives with Online Commutation Angle Control". IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, No 3, pp. 448- 456, September 2003.
- [4] B.K. Bose, T.J.E. Miller, P.M. Szczesny, W.H. Bicknell. "Microcomputer control of switched reluctance motor". IEEE Transactions Industry Applications, 1985, Vol. 22 No 4, pp 708-715.
- [5] J.J Gribble, P.C. Kjaer, T.J.E. Miller. "Optimal commutation in average torque control of switched reluctance motors". IEE Proc.-Electr. Power Appl. Vol 146, No 1, pp. 1-10, January 1999.
- [6] B. Blanqué, J.I. Perat, P. Andrada, M. Torrent. "Improvement efficiency in swtched reluctance motor drive with on line control of turn-on and turn-off angles". Comunicación aceptada para presentación en EPE 2005, Dresden