

Motor de reluctancia autoconmutado para aplicaciones tolerantes a faltas

J. A. Sánchez, P. Andrada, B. Blanqué, M. Torrent, J.I. Perat

G.A.E.C.E. (Grupo de Accionamientos Eléctricos con Conmutación Electrónica)
Departament d'Enginyeria Elèctrica UPC, EPS d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú
Avinguda Victor Balaguer sn, 08800 Vilanova i la Geltrú
Teléfono: +34 93 8967732; Fax: +34 93 8967700
jsanchez@ee.upc.es

Resumen. Los accionamientos con motor de reluctancia autoconmutado (SRM) son muy apropiados para aplicaciones en las que se requiera alta tolerancia a faltas. Después de identificar y aislar la falta el accionamiento puede continuar funcionando, dejando fuera de servicio la fase dañada aunque con algunas perturbaciones. En esta comunicación se presenta un SRM tolerante a faltas y se analiza su comportamiento después de haber aislado una falta. El análisis, básicamente experimental, hace hincapié en el estudio de algunas magnitudes externas como las vibraciones, el ruido acústico y la temperatura.

Palabras clave

Motor de reluctancia autoconmutado, accionamiento de velocidad variable, accionamiento tolerante a faltas.

1. Introducción

En ciertas aplicaciones una falta en un accionamiento puede provocar paros en la producción (sector industrial) e incluso graves problemas de seguridad (sectores de automoción y aeroespacial). En estas aplicaciones es muy ventajoso utilizar accionamientos tolerantes a faltas, capaces de continuar funcionando, una vez detectada y despejada una falta [1]. Los accionamientos de reluctancia autoconmutados (SRM) son accionamientos que se ajustan muy bien a las exigencias de un accionamiento tolerante a faltas, debido a la independencia magnética de las fases del motor y de las ramas del convertidor de potencia. El SRM es una máquina simplemente excitada, por lo tanto la corriente de falta no continúa circulando en la fase dañada una vez se elimina la excitación de dicha fase. Además hay pocas probabilidades de que se produzca una falta entre fases debido a que no hay solapamiento de las cabezas de bobina.

El análisis de faltas en los SRM fue abordado por primera vez por Stephens [2], posteriormente diversos autores

han hecho importantes aportaciones sobre el tema [3]-[6]. En esta comunicación se presenta un SRM tolerante a faltas y se analiza su comportamiento post-falta. Una vez identificada y despejada la falta, el accionamiento puede continuar funcionando manteniendo la carga, dejando sin servicio la fase afectada cuya excitación se ha interrumpido al bloquear las señales de disparo de los interruptores de la fase afectada. Por lo tanto en estas condiciones de trabajo, no hay contribución al par motor de la fase dañada por lo que las fases sanas han de incrementar su aportación para poder mantener el par exigido por la carga. Esto se consigue a costa de tener que aceptar algunas perturbaciones. Estas perturbaciones, distorsión de corriente, incremento del rizado de par, oscilaciones en la velocidad y ruido acústico serán objeto de un detallado estudio experimental.

2. Descripción del accionamiento

2.1 Descripción general

Un diagrama de bloques del accionamiento SRM tolerante a faltas y para velocidad variable 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 I. El convertidor de potencia es un convertidor asimétrico o clásico con dos IGBT's 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.

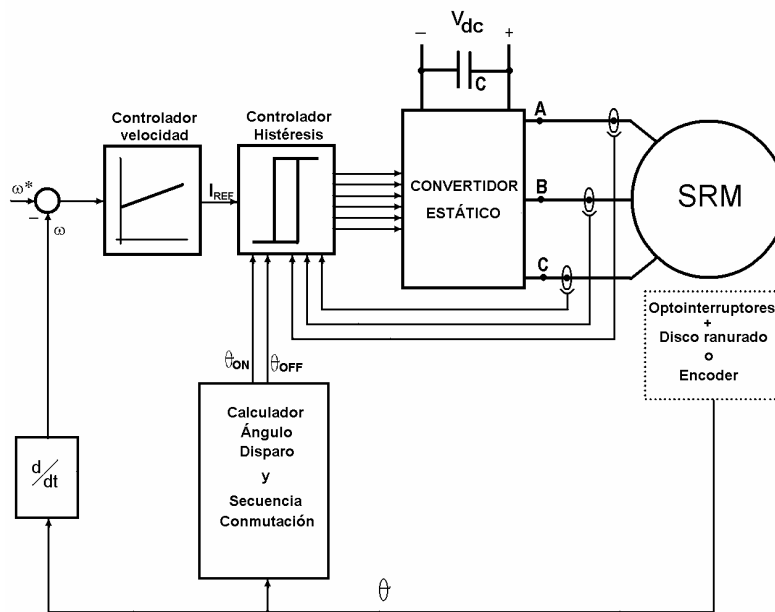


Fig. 1 Diagrama de bloques del SRM

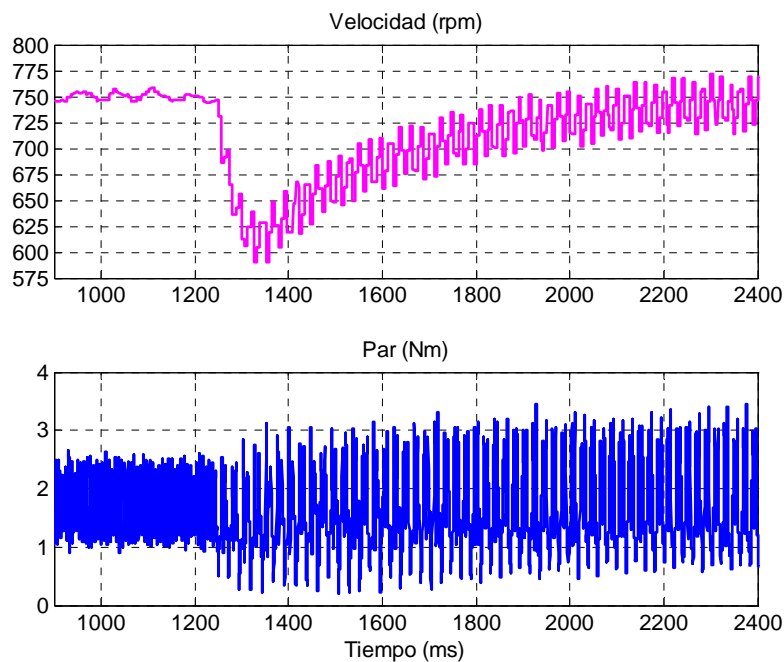


Fig. 2. Respuesta del accionamiento 6/4 SRM mostrando las formas de onda de la velocidad y del par antes y después de la apertura de una fase. Par 1.8 Nm, consigna de velocidad 750 rpm.

2. 2 Comportamiento del accionamiento.

El accionamiento SRM, anteriormente mencionado, ha sido construido y probado, mostrando un buen comportamiento tanto en funcionamiento normal como, después de haberse aislado una falta, queda funcionando con una fase abierta. En el momento de producirse la obertura de la fase se observa una caída brusca de la velocidad pero el accionamiento reacciona rápidamente siguiendo la consigna de velocidad, aunque obviamente se produce un aumento en el rizado de velocidad y de par.

El banco de pruebas utilizado para la validación de los resultados experimentales se describe en el anexo II. En la Fig. 2 se muestran las formas de onda de la velocidad y del par antes y después de la apertura de la fase, las Fig. 3 y 4 son ampliaciones de la figura dos, que permiten evaluar el funcionamiento en régimen permanente y el funcionamiento en condiciones anormales con un una fase fuera de servicio. En la Fig. 4 se observa la evolución de las corrientes de fase antes y después de la apertura de la fase A.

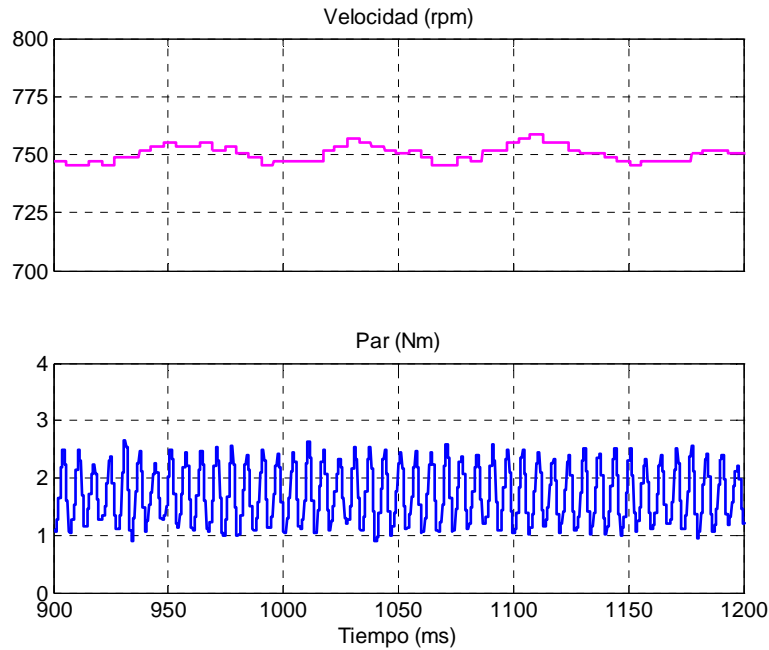


Fig. 3. Velocidad y par antes de la apertura de la fase, funcionamiento normal. Carga 1.8 Nm, consigna de velocidad 750 rpm.

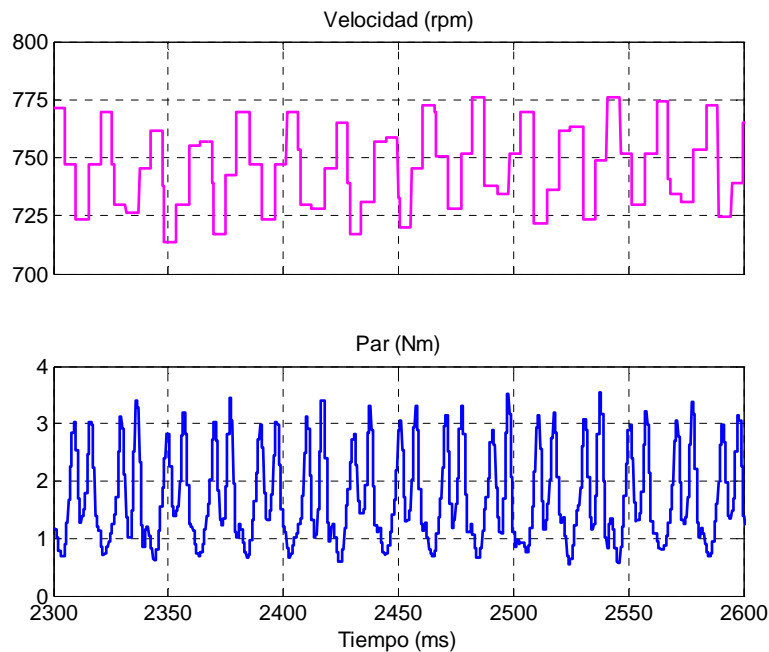


Fig. 4. Velocidad y par después de la apertura de la fase. Carga 1.8 Nm, consigna de velocidad 750 rpm.

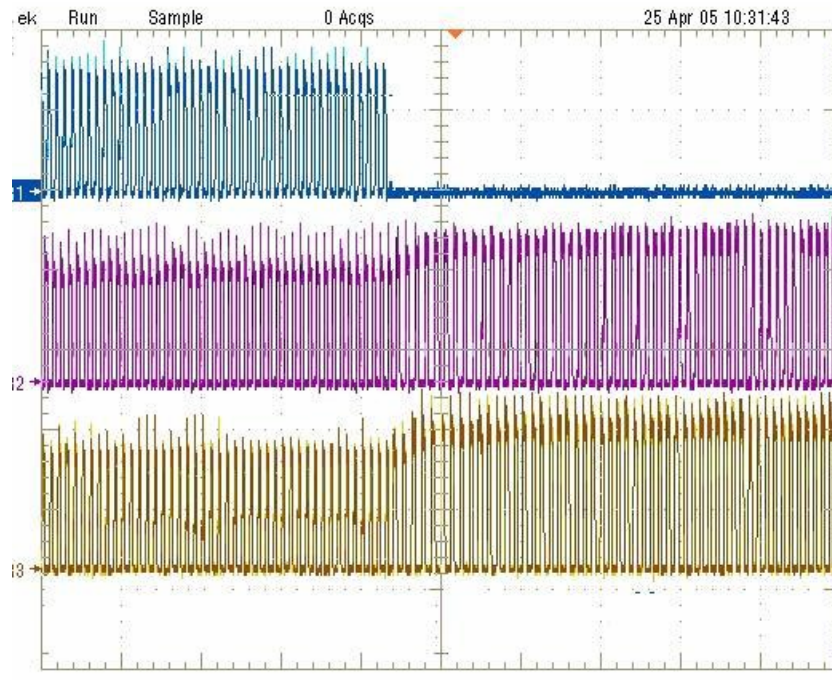


Fig. 5. Evolución de las corrientes de fase antes y después de la apertura de la fase A (curva superior). Carga 1.8 Nm, consigna de de velocidad 750 rpm. (3.8 A/div).

3. Análisis post-falta y discusión.

Cuando se abre una fase del SRM como consecuencia del aislamiento de una falta, esta queda sin excitación y el control aumenta la corriente de las fases sanas, después de un corto período de transición el accionamiento continua funcionando con algunas perturbaciones, en la corriente, la velocidad y el par. En el siguiente análisis haremos hincapié en algunas magnitudes externas como las vibraciones, el ruido acústico y la temperatura. Se ha particularizado el estudio, para una carga de 1.8 Nm y una velocidad de referencia de 750 rpm.

Debido a la falta, considerando los índices de funcionamiento definidos en [6], el rizado de velocidad se incrementa de un 0.80 % a un 3.33 %, y el rizado de par pasa de un 38.90 % a un 72.22 %, tal como se muestra en las Fig. 3 y 4: Mientras que en funcionamiento normal la forma de onda del par está compuesta por un valor medio más una señal sinusoidal

de frecuencia $\frac{N_r N_s}{N_s - N_r} \frac{N(rpm)}{60}$, en el funcionamiento posterior a la falta, es significativa la presencia de frecuencias múltiplos de $N_r \frac{N(rpm)}{60}$. En el caso en

estudio, funcionando en condiciones normales de operación la frecuencia de la señal sinusoidal es de 150 Hz, mientras que con una fase abierta las frecuencias más relevantes son 50, 100, 150 y 200 Hz.

En las condiciones de carga especificadas, se espera que la corriente en las fases sanas se incremente 1.22 veces,

respecto de la corriente en funcionamiento normal. Los resultados experimentales, Fig. 5, así lo confirman, la corriente antes de la falta era de 3.08 A en valor RMS mientras que la corriente después del fallo es de 3.8 A, valor RMS.

El análisis de las vibraciones y del ruido acústico en el dominio del tiempo, revelan que no existen diferencias notables entre ambos tipos de funcionamiento en valores RMS, Fig. 6 y 7. No obstante, un análisis más detallado de las formas de onda de la aceleración, y de la corriente, con una fase abierta, R1 – R3, Fig. 7, muestra un incremento de las vibraciones cuando las fases sanas dejan de conducir, este hecho puede ser utilizado para distinguir el funcionamiento normal del funcionamiento posterior a la falta. El análisis de la aceleración en el dominio de la frecuencia, Fig. 8 y 9, muestra una importante presencia de armónicos múltiplos de $N_r \frac{N(rpm)}{60}$, observándose importantes diferencias en

amplitud en algunos armónicos particulares, entre el funcionamiento normal y el funcionamiento con una fase abierta, circunstancia que puede utilizarse para diagnóstico de faltas aunque esta circunstancia debería ser confirmada con posteriores estudios. La variación del ruido acústico en ambos tipos de operación no es significativa, ya que es de 80 dB en funcionamiento normal y de 81 dB trabajando con una fase abierta. La temperatura de las fases sanas se incrementa cuando el SRM está funcionando con una fase abierta, en condiciones normales es de 72°C y alcanza los 83°C con la apertura de una fase, como se muestra en la Fig. 10.

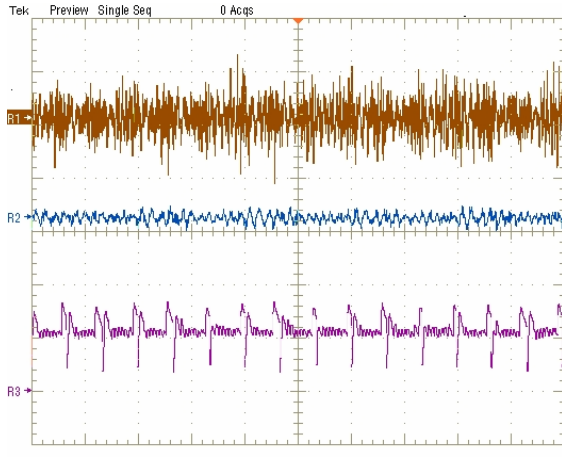


Fig. 6. Vibración, R1, (20 m/s²/div); ruido acústico, R2, (0,2 N/m²/div) y corriente en el bus de conmutación, R3, (5 A/div) funcionamiento normal. Velocidad 750 rpm, carga 1.8 Nm, tiempo: 10 ms/div.

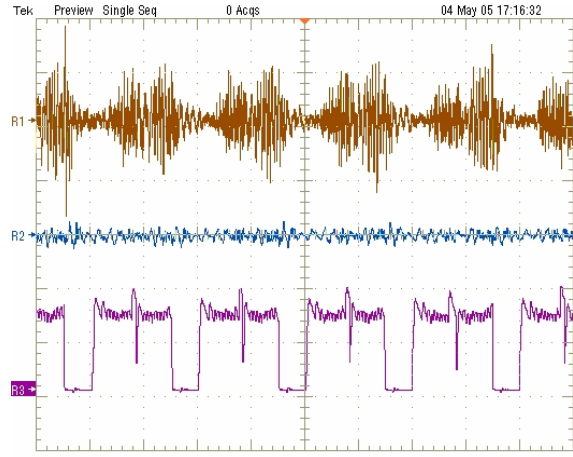


Fig. 7. Vibración, R1, (20 m/s²/div); ruido acústico, R2, (0,2 N/m²/div) y corriente en el bus de conmutación, R3, (5 A/div) funcionamiento con fase abierta. Velocidad 750 rpm, carga 1.8 Nm, tiempo: 10 ms/div.

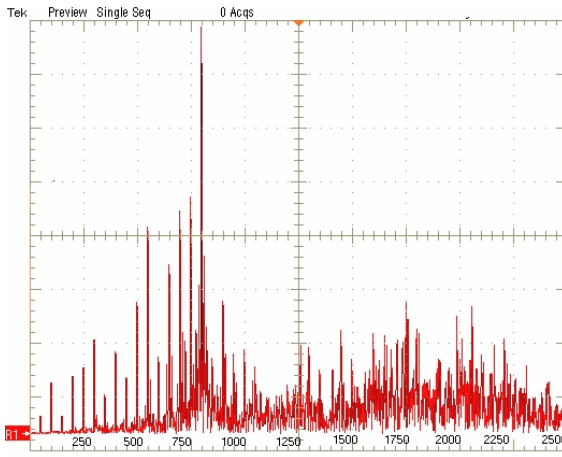


Fig. 8. Espectro de la aceleración en funcionamiento normal, Velocidad 750 rpm, carga 1.8 Nm, 0.15 m/s²/div, 250 Hz/div.

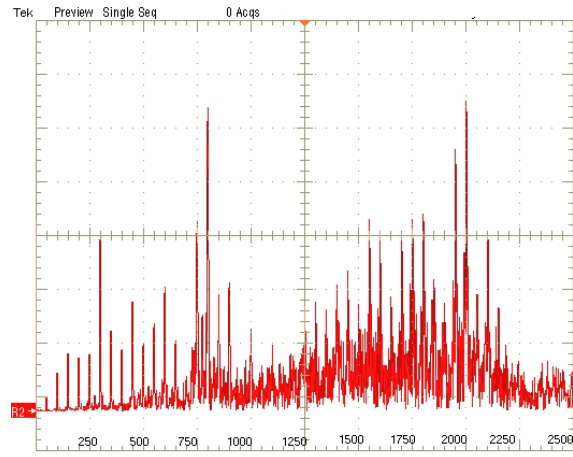


Fig. 9. Espectro de la aceleración en funcionamiento con una fase abierta. Velocidad 750 rpm, carga 1.8 Nm, 0.15 m/s²/div, 250 Hz/div.

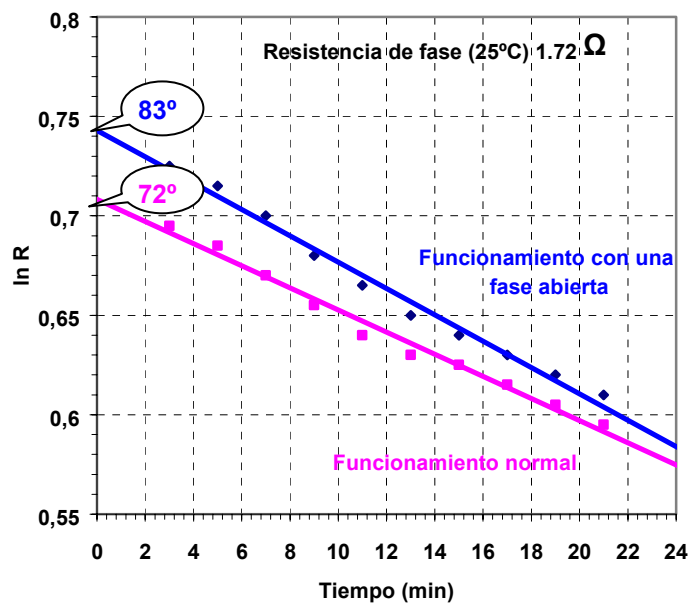


Fig. 10. Valores de la resistencia, para $t = 0$, R_0 , para la determinación de la temperatura. Operación con una fase abierta (curva superior), funcionamiento normal (curva inferior) 1000 rpm, 1.8Nm

Anexo II Banco de pruebas

El accionamiento SRM puede soportar distintos tipos de faltas y continuar su funcionamiento manteniendo las exigencias de la carga aunque con algunas perturbaciones. El diseño de los SRM para aplicaciones tolerantes a faltas, ha de considerar el incremento de la corriente y de la temperatura en las fases sanas, cuando ocurre una falta, esto implica incrementar el tamaño del motor y del convertidor de potencia. En algunos casos será deseable reducir los efectos del rizado de par cuando funciona con una fase abierta, esto puede conseguirse aumentando el ángulo de conducción de las fases sanas, pero requiere un control específico de mayor complejidad, [7].

Conclusiones

En esta comunicación se ha presentado un accionamiento SRM para aplicaciones de velocidad variable tolerante a faltas. Este accionamiento, presenta un buen comportamiento tanto en régimen permanente como cuando una vez aislada una falta ha de funcionar con una fase abierta. En estas condiciones el accionamiento puede continuar funcionando, aunque con algunas perturbaciones. Se han mostrado los resultados experimentales del análisis del funcionamiento post a la falta, con especial atención a magnitudes como vibraciones, ruido acústico y temperatura. De los resultados de este análisis pueden extraerse valiosas consideraciones para mejorar accionamientos SRM para aplicaciones de altas prestaciones que requieran una elevada tolerancia a las faltas.

Agradecimientos

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

Anexo I

6/4 SRM Parámetros del motor

Tamaño IEC	80
Par nominal	2.4 Nm
Potencia nominal	0.75 kW
Velocidad nominal	3000 rpm
Voltaje	300 V
Inductancia alineada	98 mH
Inductancia no alineada	16 mH
Resistencia de fase (25°C)	1.72 Ω
Momento de inercia	0,0007 kgm ²

El equipo para la validación de resultados experimentales de SRM 6/4 se muestra en la Fig. 11. El transductor de par es un HBM T34FN-10 Nm, la carga es un máquina sincrónica de imanes permanentes con rotor de disco Mavilor MA-6, 3.6 Nm, 6000 rpm, La frecuencia natural del banco de ensayo es de 189 Hz. En los diferentes ensayos se ha utilizado el equipamiento siguiente: sonómetro Brüel & Kjaer 2260 observer, acelerómetro piezoeléctrico ICP PCB Modelo 352C33, osciloscopio Tektronix TDS5034 B.

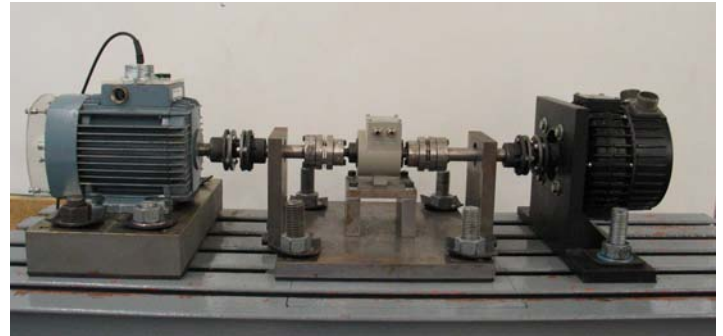


Fig. 11. Fotografía del equipo experimental

Referencias

- [1] C.Mecrow, A.G. Jack, J.A. Haylock, J. Coles. Fault Tolerant Permanent Magnet Machine Drives. IEE Electrical Machines and Drives Conference, 11-13 September 1995, pp 433-437.
- [2] Ch. Stephens. Fault Detection and Management System for Fault-Tolerant Switched Reluctance Motor Drives. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, N° 6, pp 1098-1102, November/December 1991.
- [3] A.A. Arkadan and B.W. Kielgas. Switched Reluctance Motor Drive Systems Dynamic Performance Prediction under Internal and External Fault Conditions. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, N° 1, March 1995, pp 45-52.
- [4] T.J.E. Miller. Faults and Unbalance Forces in the Switched Reluctance Machine. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, N° 2, March/April 1995, pp 319-328.
- [5] V.K. Sharma, S.S. Murthy, B. Singh. Analysis of Switched Reluctance Motor Drive under Fault Conditions. 33° IAS Conference 1998, pp 553-562.
- [6] I.Husain, M.N.Anwar. Fault Analysis of Switched Reluctance Motor Drives. International Conference Electric Machines and Drives, IEMD'99, pp 41-43.
- [7] C.Hao, Z Chao. Analysis of Electrical fault for switched reluctance motor drives. Proc. World Congr. Intell. Automat. 2000, pp 666-669.
- [8] H.Chen, J.Jiang, C.Zhang, G. Xie. Analysis of the four-phase switched reluctance motor drive under the lacking one phase-fault. IEEE-APCCAS. IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems 2000, pp 304-308.
- [9] S.Mir, M.I.Islam, T.Sebastian, I.Hussain. Fault-Tolerant Switched Reluctance Motor Drive Using Adaptive Fuzzy Logic Controller. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 19, N° 2, March 2004, pp 289-295.

