

Accionamientos de reluctancia autoconmutados con control de par para dirección asistida eléctrica

Torque control of switched reluctance motor drives for electric power steering



Marcos Gomila-González, José Antonio Sánchez-López, Pere Andrada-Gascón, Balduí Blanqué-Molina, Eusebi Martínez-Piera, José Ignacio Perat-Benavides y Marcel Torrent-Burgués

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA (UPC). ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA DE VILANOVA I LA GELTRÚ (EPSEVG).

Departament d'Enginyeria Elèctrica. Avenida Víctor Balaguer, s/n - 08800 Vilanova i la Geltrú (Barcelona). Tfno: +34 938 967732.

pere.andrada@upc.edu

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7638> | Recibido: 29/04/2015 • Aceptado: 04/04/2016

ABSTRACT

- Nowadays, the power steering is a standard device in commercial vehicles. The electric power steering is becoming an alternative to the traditional hydraulic power steering. Right now, the electric drive commonly used in this application is the DC brush motor drive. Today, different electric drives are seen as a future option but the best candidate seems to be the permanent magnet synchronous motor drive. However due to its constructive simplicity, absence of permanent magnets and fault tolerance the switched reluctance motor drive is an alternative that should not be ignored. In this article a switched reluctance motor drive is presented for a rack-type electric power steering for midsize cars with a rack force 10 kN. The drive consists of a switched reluctance motor of four-phase with 8 stator poles and 6 rotor poles fed through an electronic power converter with Power MOSFETs switches, an incremental encoder and digital torque control to minimize torque ripple and to mitigate disturbances that appear when clearing a fault and the drive works with one or two open phases. The drive has been built and tested in the laboratory and experimental results have confirmed its suitability as a drive for power steering.
- **Key Words:** electric power steering, switched reluctance motor drives, torque control.

RESUMEN

La dirección asistida es ya un dispositivo de serie en los automóviles comerciales. La dirección asistida eléctrica se está convirtiendo en una alternativa a la tradicional dirección asistida hidráulica. En estos momentos el accionamiento eléctrico comúnmente utilizado para esta aplicación utiliza el motor de corriente continua con escobillas. Hoy por hoy, diferentes accionamientos eléctricos se ven como una opción de futuro, aunque el mejor candidato es el accionamiento con motor síncrono con imanes permanentes. No obstante, debido a su sencillez constructiva, ausencia de imanes permanentes y tolerancia a faltas, el accionamiento con motor de reluctancia autoconmutado es una alternativa que no debe ignorarse. En este artículo se presenta un accionamiento con un motor de reluctancia autoconmutado para dirección asistida eléctrica para automóviles de tamaño medio con una fuerza en el eje de la cremallera (Rack Axis Force) de 10 kN. El accionamiento está constituido por un motor de reluctancia autoconmutado de cuatro fases con 8 polos en el estator y 6 polos en el rotor, ali-

mentado a través de un convertidor electrónico de potencia con interruptores Power Mosfets, encoder incremental y control digital para minimizar el rizado de par y mitigar las perturbaciones que aparecen al despejar una falta, trabajando el accionamiento con una o dos fases abiertas. El accionamiento se ha construido y se ha probado en el laboratorio, confirmando los resultados experimentales su idoneidad como accionamiento para dirección asistida eléctrica.

Palabras Clave: dirección asistida eléctrica, accionamientos con motores de reluctancia autoconmutados, control de par.

1. INTRODUCCIÓN. DIRECCIÓN ASISTIDA ELÉCTRICA (DAE)

Ya en los primeros tiempos de la era del automóvil se desarrollaron sistemas de dirección asistida mecánicos de ayuda a la conducción, sobre todo para las maniobras de baja velocidad y especialmente en las de aparcamiento [1]. En 1926 Francis W. Davis inventó la primera dirección asistida hidráulica [2]. Chrysler montó el primer sistema comercial de dirección asistida hidráulica, con el nombre de *Hydroguide*, en el Chrysler Imperial en 1951. A partir de esta fecha la dirección asistida hidráulica se fue introduciendo progresivamente en los automóviles de turismo hasta convertirse hoy en día en un dispositivo de serie. La dirección asistida eléctrica (DAE) fue introducida por Koyo [3] y Mitsubishi Electric Corp. [4] en la columna de dirección de micro coches en Japón en 1988. Desde entonces la DAE empezó a utilizarse en muchos automóviles, especialmente en vehículos compactos en los que la dirección asistida hidráulica era difícil de montar por cuestión de espacio. La DAE tiene más ventajas que la tradicional dirección asistida hidráulica, a parte de una reducción de volumen y peso, disminuye el consumo de combustible, ya que la potencia se suministra sólo cuando es necesaria y no continuamente por medio de una bomba accionada por el motor de combustión interna. Desde el punto de vista medioambiental contribuye a una menor emisión de gases a la atmósfera, prescinde de un fluido embarazoso y además puede integrar funciones como sensibilidad a la velocidad y control de deriva, que mejoran la seguridad en la conducción [5]. Aunque hoy en día hay una clara tendencia a utilizar DAE en lugar de la dirección asistida hidráulica en todo tipo de vehículos, su implementación requiere de baterías de mayor capacidad, y cableado de mayor sección, es decir de un sistema eléctrico capaz de suministrar la potencia adicional exigida por la DAE [6], por lo tanto la elección de utilizar una DAE es una decisión que se ha de tomar en la fase inicial de diseño del vehículo.

La dirección asistida eléctrica proporciona un par de asistencia que depende del par que el conductor ejerce, en todo momento, sobre el volante. Es un sistema realimentado que consta de un sensor de par y de posición, de un accionamiento eléctrico, y de una unidad electrónica de control y diagnóstico, *Electronic Control Unit* (ECU). En la Figura 1 se muestra un diagrama esquemático de dirección asistida eléctrica. Según la ubicación del motor en el sistema, la dirección asistida eléctrica puede clasificarse en:

- DAE de columna
- DAE de piñón
- DAE de cremallera

En la Figura 2 se muestra una fotografía de una DAE de piñón adecuada para un vehículo de tamaño medio.

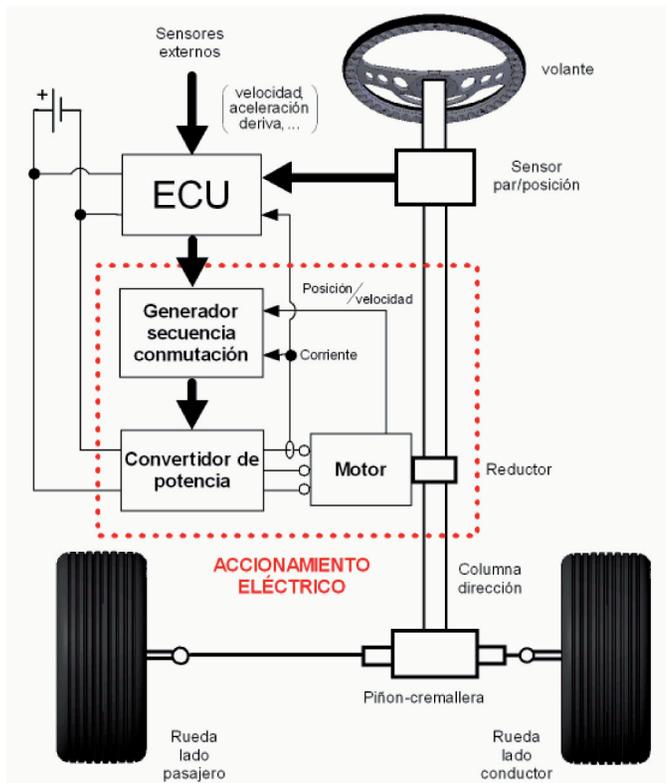


Fig. 1: Representación esquemática de un sistema de dirección asistida eléctrica

En la selección de un sistema de dirección asistida es fundamental la magnitud de la fuerza en el eje de la cremallera (*Rack Axis Force*) que está determinada por el esfuerzo axial que se ha de realizar para mover las ruedas delanteras del vehículo en las distintas condiciones de marcha, del tipo de suspensión utilizada y de los neumáticos, así como del par ejercido por el conductor en el volante. Otros aspectos que se han de tener en consideración son:

- El espacio disponible, para su ubicación, en el interior del automóvil.
- La tensión del sistema eléctrico del automóvil.
- Los esfuerzos mecánicos en la transmisión piñón cremallera.
- Las exigencias de seguridad contra colisión.
- Las medidas para garantizar la impermeabilización y la disipación térmica.

En la Tabla 1 se muestran los requisitos de los distintos tipos de DAE según el tamaño del automóvil.

El principal objetivo de este trabajo es demostrar que los accionamientos con motor de reluctancia autoconmutado pueden ser una alternativa ventajosa a los accionamientos tradicionalmente utilizados para DAE. A partir de las especificaciones requeridas por la DAE de vehículos de tamaño medio se dimensionará un accionamiento con motor de reluctancia autoconmutado para este fin, incluyendo: convertidor electromecánico, convertidor electrónico de potencia, dispositivos para la captación de la posición y control digital. El control, a parte de proporcionar el par solicitado con un reducido rizado de par en las distintas condiciones de conducción, ha de ser capaz de mitigar las perturbaciones que aparecen al despejar una falta y trabajar con una o dos fases abiertas. Una vez construido el prototipo se probará en un banco de ensayo para evaluar, mediante resultados experimentales, su adecuación como accionamiento para DAE.

2. ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS PARA DAE

Los accionamientos eléctricos para DAE son accionamientos controlados electrónicamente que han de cumplir con las siguientes especificaciones:

- Elevada relación potencia/peso.
- Baja inercia.



Fig. 2: DAE de piñón

Tipos de DAE	Tamaño del automóvil	Fuerza en el eje de la cremallera (kN)	Tensión Recomendada (V)	Potencia requerida del accionamiento eléctrico
DAE de columna	Pequeño	6	12	Pequeña
DAE de piñón	Medio	8	42	Media
DAE de cremallera	Grande	12	42	Elevada

Tabla 1: Requisitos de los diferentes tipos de DAE según tamaño del automóvil

- Reducido par de fricción.
- Par de gran calidad (reducido rizado de par).
- Tolerancia a faltas.

En la Tabla 2 se muestra la adecuación a estas especificaciones de los accionamientos eléctricos hoy por hoy considerados candidatos para DAE. Hasta ahora los accionamientos con motor de c.c. con escobillas han sido la opción generalmente utilizada, sin embargo el motor síncrono con imanes permanentes es, como consecuencia de lo reflejado en la Tabla 2, el mejor candidato [7-14]. En su contra se puede argumentar que debido a la utilización de imanes de neodimio su coste es elevado y a medio plazo, dadas las circunstancias del mercado de las tierras raras, aún puede serlo más [14].

3. ACCIONAMIENTOS CON MOTORES DE RELUCTANCIA AUTOCONMUTADOS PARA DAE

El motor de reluctancia autoconmutado, *Switched Reluctance Motor* (SRM), es un accionamiento de corriente continua sin escobillas y sin imanes permanentes, que está constituido por una estructura magnética con polos salientes tanto en el estator como en el rotor. En los polos estáticos se ubican bobinas concentradas que conectadas entre sí en serie, a pares diametralmente opuestos, forman las fases del motor. La conmutación de las corrientes en las fases se realiza mediante un convertidor electrónico de potencia, en el que la secuencia de conmutación de los interruptores de estado sólido que lo componen está controlada por la posición del rotor a través de sensores ópticos o magnéticos según estrategias de control preestablecidas.

Los accionamientos con motor de reluctancia autoconmutados (SRM) pueden ser una alternativa a los accionamientos hasta ahora utilizados para la DAE ya que presentan las siguientes ventajas competitivas:

- Simplicidad constructiva de la estructura electromagnética y por tanto menores costes de fabricación.
- Ausencia de imanes permanentes.
- Característica par-velocidad adaptable a las especificaciones de las cargas a impulsar.
- Se trata de un accionamiento tolerante a faltas.

Con controles específicos, sin demasiada incidencia en el coste final del accionamiento, pueden minimizarse los aspectos más negativos tradicionalmente atribuidos al SRM, como el rizado de par y el ruido acústico.

Para demostrar la adecuación de este tipo de accionamientos a la DAE se ha diseñado un accionamiento con motor de reluctancia autoconmutado, para automóviles de tamaño medio con una fuer-

za en el eje de la cremallera (*Rack Axis Force*) de 10 kN. En estas condiciones el motor deberá dar una potencia nominal de 475 W y proporcionar un par de 2.52 Nm a 1800 rpm. En las maniobras de baja velocidad se exigirá un par de 5 Nm durante 5 s sobre un periodo de 1 minuto (S3, 8.3%). La tensión de alimentación será de 42 V y la temperatura ambiente estará comprendida entre -40 °C y 125 °C. El diseño comprenderá el dimensionamiento de su estructura electromagnética, del convertidor electrónico de potencia, la selección de los dispositivos para la captación de posición, y la implementación del control digital, incluyendo controles específicos para reducir el rizado de par [15], para un par de 4 Nm éste debe limitarse a ± 0.5 Nm, y para mitigar las perturbaciones que aparecen al despejar una falta y trabajar el accionamiento con una o dos fases abiertas [16].

3.1. CONVERTIDOR ELECTROMECAÁNICO, MOTOR DE RELUCTANCIA AUTOCONMUTADO

Se ha elegido una configuración de motor de reluctancia autoconmutado 8/6, con cuatro fases, ocho polos en el estator y seis polos en el rotor con el fin de minimizar el rizado de par y asegurar un mejor comportamiento en condiciones de falta. En la Figura 3 se ven fotografías del rotor y del estator del prototipo construido



Fig. 3: Fotografías del prototipo construido: rotor (izquierda), estator (derecha)

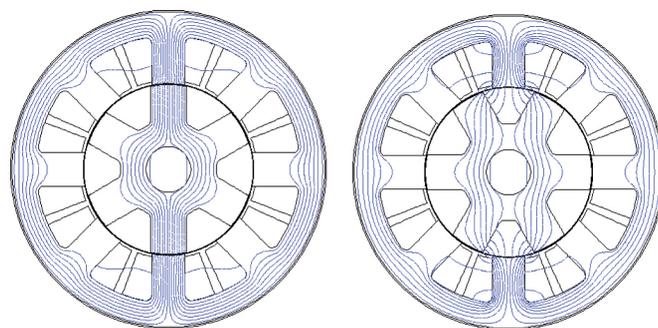


Fig. 4: Análisis mediante elementos finitos del prototipo, distribución de las líneas de campo magnético en la posición alineada (izquierda) y no alineada (derecha) para una corriente de 25 A

	Motores c.c. con escobillas	Motores c.c. sin escobillas	Motores síncronos con imanes
Control	Sencillo	Trapezoidal	Senoidal
Sensor de posición	No es necesario	Sensores Hall; Sencillo y barato	Encoder absoluto, Resolver; caro
Convertidor de Potencia	Puente en H	Inversor VSI trifásico	Inversor VSI trifásico
Inercia	Elevada	Baja	Baja
Fricción	Elevada	Baja	Baja
Rizado de par	Bajo	Elevado	Bajo

Tabla 2: Adecuación de los accionamientos eléctricos a las especificaciones de la DAE

y en el anexo se detallan los principales datos del motor. Se ha optimizado el dimensionamiento del motor utilizando el método de los elementos finitos, en la Figura 4 se muestran la distribución de las líneas de campo magnético en el motor para las posiciones de alineamiento y de no alineamiento entre los polos del estator y del rotor, para una corriente de 25 A. En el diseño del motor se han tenido en cuenta, además, criterios de eco-diseño como: reducción del número de materiales, minimización de materiales no reciclables, facilidad para el montaje y desmontaje del motor, así como que el desguace de los devanados pueda hacerse de forma sencilla [17].

3.2. CONVERTIDOR ELECTRÓNICO DE POTENCIA

Para asegurar la independencia de las fases del motor en condiciones de falta se ha optado por un convertidor electrónico de potencia en puente asimétrico o clásico de cuatro fases con dos interruptores *Power Mosfet* (IXFN180N20) y dos diodos (DS-

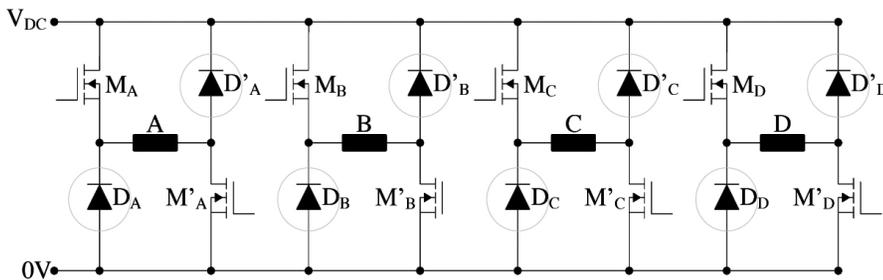


Fig. 5: Esquema del convertidor de potencia en puente asimétrico con A, B, C y D fases del motor



Fig. 6: Fotografía del convertidor electrónico tetrafásico construido

GI2x61) por fase, cuya disposición esquemática puede verse en la Figura 5. En la Figura 6 se muestra una fotografía del convertidor electrónico de potencia construido incluyendo drivers, sensores de corriente, *snubbers*, condensadores, ventiladores y disipadores.

3.3. DISPOSITIVOS PARA LA CAPTACIÓN DE LA POSICIÓN

Aunque lo deseable sería un sistema sin sensores de posición, la mayor complejidad y menor fiabilidad de esta opción han recomendado recurrir a alternativas más convencionales, y finalmente se decidió optar por un encoder incremental *Hengstler* 0530 172 ya que la DSP que se eligió para implementar el control del accionamiento integraba la función *encoder*.

3.4. CONTROL DIGITAL

El accionamiento ha de ser capaz de proporcionar el par requerido, en todo momento según las condiciones de conducción, de forma rápida y con un reducido rizado de par. También ha de prever controles para mitigar las perturbaciones en la forma de onda de par que aparecen al despejar una falta y trabajar el accionamiento con una o dos fases abiertas. Para alcanzar estos objetivos se consideraron en un principio alternativas fundamentadas en el control directo del par instantáneo con controladores de histéresis [18-19] que introducían algunas mejoras en los inicialmente propuestos por Inderka et al. [20].

Finalmente se optó por una nueva alternativa de control de par, utilizando un control PI de par y controladores PWM con frecuencia de conmutación de 16 kHz, con sólo el interruptor superior de una rama del convertidor electrónico de potencia troceando (*soft-chopping*); esta alternativa, además, era ventajosa para reducir uno de los principales inconvenientes atribuidos a los motores de reluctancia autoconmutados que es el ruido audible.

En la Figura 7 se muestra el diagrama de bloques del control de par utilizado. En todo momento la consigna de par, T_{ref} , se compara con el par medio, T_{med} , calculado a partir de los valores instantáneos de posición y de corriente mediante una tabla de par-posición-corriente, obtenida previamente del análisis con elementos finitos de la estructura electromagnética del motor y validada experimentalmente, Figura 8. La señal de error de par, e_t , pasa a través de un regulador proporcional integral que a su salida produce una consigna de corriente, i_{ref} que se compara con la señal de corriente de fase. El error de corriente, e_i , se introduce en un regulador proporcional que genera la relación cíclica, duty cycle. Simultáneamente, en el controlador de conmutación se deciden los ángulos de inicio, Θ_{ON} y final de conducción, Θ_{OFF} adecuados para minimizar el rizado de par en función de la velocidad a la que gira el accionamiento, usando para ello la posición real del rotor y el par medio de cada una de las fases, T_{fase} , así como el par medio total T_{med} obtenidos en el bloque calculador de par. Finalmente, en el bloque PWM a partir de la relación

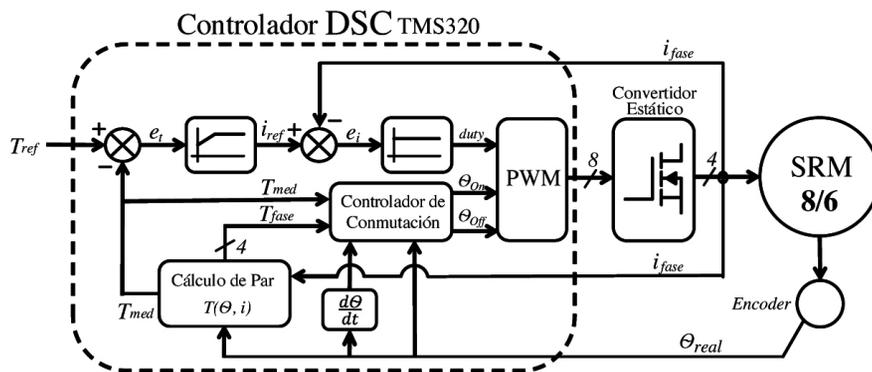


Fig. 7: Diagrama de bloques del control de par utilizado, mostrando en el recuadro en línea discontinua las tareas que realiza el DSP TMS320F28335

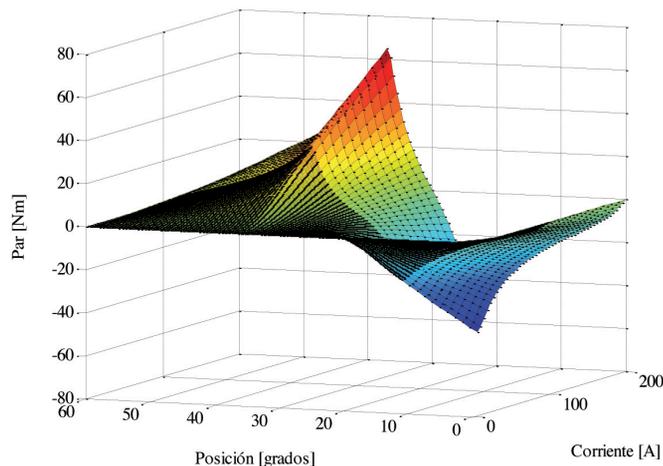


Fig. 8: Gráfico tridimensional de la tabla par-posición-corriente $T(\Theta, i)$ para el SRM considerado obtenido por análisis con elementos finitos

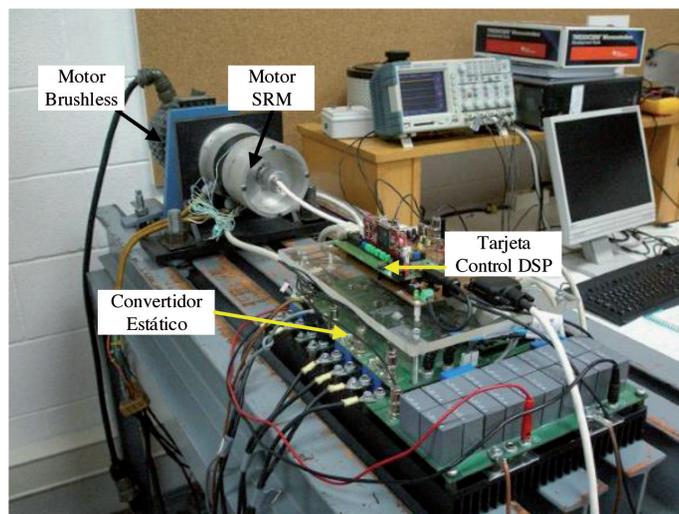


Fig. 10: Fotografía del banco de ensayos

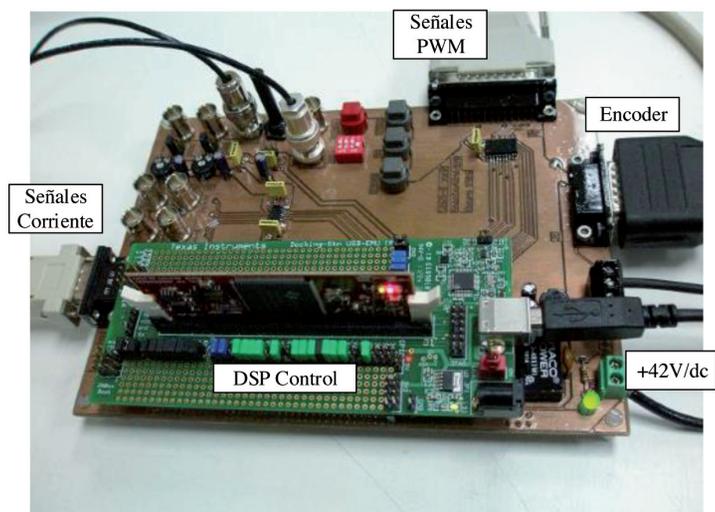


Fig. 9: Placa de control implementada con DSP TMS320F28335

cíclica y de los ángulos de inicio y de final de conducción se generan las señales de disparo de los ocho interruptores de estado sólido del convertidor electrónico de potencia. De esta manera, el motor proporciona el par de asistencia necesario, según la consigna exigida en cada instante con un rizado de par dentro de los límites previstos. El sistema de control diseñado monitoriza la corriente de fase y el par en cualquier modo de operación. De esta manera en el caso de producirse una falta el sistema de detección y actuación de faltas, deshabilita la fase afectada, decidiendo los nuevos ángulos de inicio y final de conmutación, independientes para cada una de las fases activas. Ángulos, almacenados en el controlador de conmutación, que han sido previamente determinados de forma experimental para las distintas velocidades de operación de tal manera que compensan la ausencia de par en la fase deshabilitada, modificando el tiempo de conducción en las fases sanas.

Para implementar el sistema de control expuesto se ha utilizado una DSP TMS320F28335, con una arquitectura de 32 bits y CPU con coma flotante y una frecuencia de reloj de 150 MHz. Se han utilizado técnicas de optimización para conseguir un funcionamiento más rápido. En la Figura 9 se muestra la placa de control implementada con la DSP TMS320F28335 y todos sus periféricos.

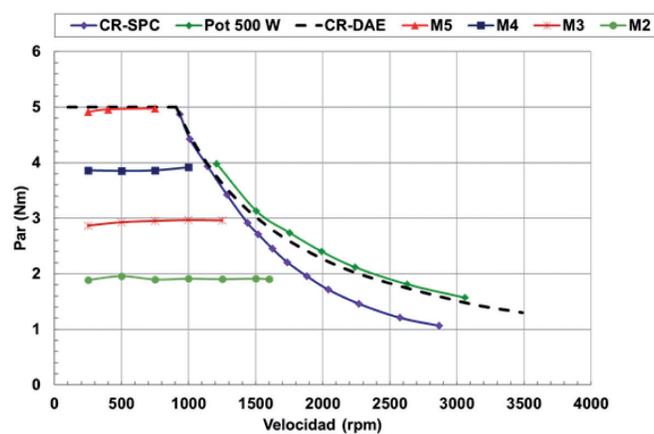


Fig. 11: Resultados experimentales curvas par-velocidad

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para evaluar el funcionamiento del accionamiento se ha montado un banco de ensayo, en el cual el accionamiento se ha cargado con un motor síncrono con imanes permanentes (*brushless* A.C.) como se observa en la Figura 10.

Los resultados experimentales han permitido obtener las curvas de par-velocidad que se muestran en la Figura 11. En trazo discontinuo se ha representado la curva par-velocidad, CR-DAE, exigida por la DAE de la cual, en el apartado 3, se han especificado sus valores más significativos. La curva Pot 500 W es la característica de funcionamiento a una potencia constante de 500 W con ángulos de inicio y final de conducción variables. La curva CR-SPC es la característica par-velocidad con ángulos constantes de inicio y final de conducción (-2° , 13°). Las curvas M2, M3, M4, M5 son características de funcionamiento a par constante. Los resultados obtenidos permiten afirmar que el accionamiento es capaz de verificar las especificaciones solicitadas por la DAE.

En la Figura 12 se pueden ver los registros osciloscópicos de las formas de onda de par instantáneo total y de corriente de la fase A, junto con las señales de disparo de los interruptores POWER MOSFETs de la fase A, destacándose el troceado del interruptor superior, funcionamiento *softchopping*.

En la Figura 13 se muestran las formas de onda de par ins-

tantáneo y de las corrientes de fase, con excepción de la fase D, viéndose que para una consigna de par de 4 Nm el rizado de par a 1130 rpm se mantiene dentro de una ventana de ± 0.5 Nm de acuerdo con las especificaciones que ha de satisfacer la DAE.

Aunque la reducción del ruido audible no es uno de los requisitos exigidos sí que es conveniente evaluar los valores de la presión acústica media, L_{pA} , y de la potencia acústica media, L_{wA} , del accionamiento. En la Tabla 3 se muestran los resultados experimentales obtenidos en distintas condiciones de operación en el banco de ensayo. Como referencia decir que, según UNE 203001-17:2000 y UNE-EN 60034-9:2006, para un motor asíncrono trifásico de cuatro polos de potencia nominal $1.0 < P_N$ (kW) < 2.2 alimentado con convertidor el nivel máximo de potencia acústica media, L_{wA} en vacío estaría comprendida en la banda de 75 a 85 dB(A). Por lo que el nivel de ruido acústico del accionamiento está dentro de unos límites aceptables.

Condiciones del ensayo	L_{pA} dB(A)	L_{wA} dB(A)
800 rpm (vacío)	70,4	81,4
2500 rpm (vacío)	75,5	86,5
1100 rpm (4Nm)	75,1	86,1
1800 rpm (2Nm)	73	84

Tabla 3. Valores experimentales presión acústica media, L_{pA} y de la potencia acústica media, L_{wA}

La aptitud del control de par para mitigar los efectos de la deshabilitación de una fase, como consecuencia de una falta, se muestra en la Figura 14. En los oscilogramas de la pantalla superior se reproducen las formas de onda de par instantáneo y de corrientes en las fases sanas en el momento en que se deshabilita la fase en la que se ha producido la falta, mientras que en la pantalla inferior se pueden ver estas formas de onda cuando actúa el control modificando la conducción de las fases adyacentes a la fase deshabilitada.

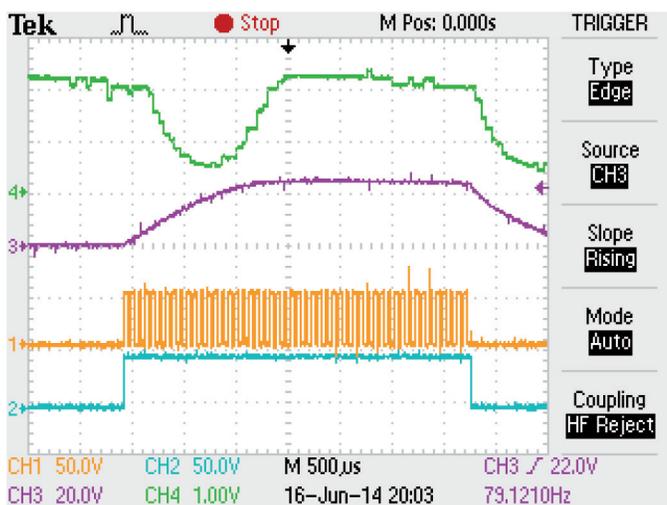


Fig. 12: Formas de onda de par instantáneo, de corriente y de las señales de disparo generadas enviadas a las puertas de los POWER MOSFETs de la fase correspondiente: Canal 3 (magenta) corriente fase A, Canal 1 (naranja) señales de disparo del PowerMosfet superior de la rama correspondiente a la fase A, Canal 2 (azul) señales de disparo del PowerMosfet inferior de la rama correspondiente a la fase A, Canal 4 (verde) par instantáneo total

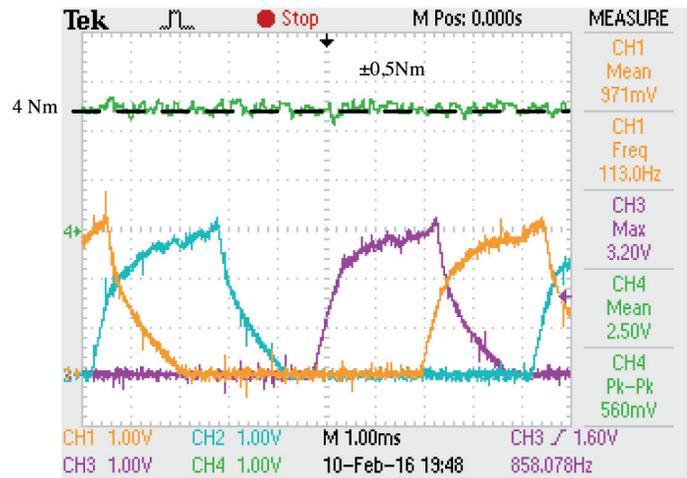


Fig. 13: Control de rizado de par. Los canales 1 (magenta), 2 (naranja) y 3 (azul) muestran las corrientes de fase A, B y C, la corriente de la fase D no se muestra. El canal 4 (verde) muestra el par instantáneo total de 4 Nm con un rizado de par de ± 0.5 Nm a 1130 rpm

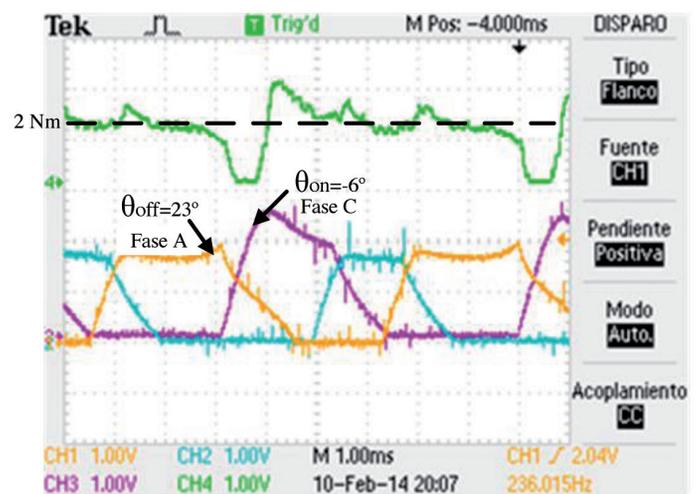
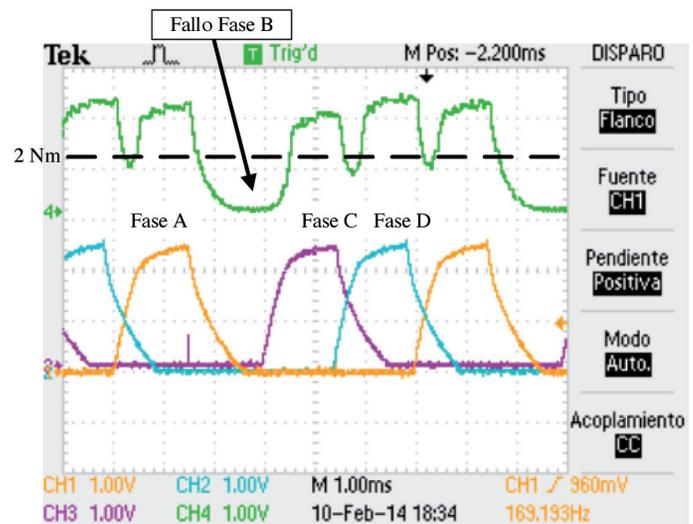


Fig. 14: En la pantalla superior se muestra la forma del par instantáneo después de que, como consecuencia de una falta en la fase B, ésta fuera deshabilitada, manteniendo los ángulos constantes para todas las fases (el control no actúa). En la pantalla inferior se observa como el control de mitigación de faltas actúa alargando la conducción de la fase A (naranja), anticipando el disparo de la fase C (magenta) y modificando los ángulos de conducción de la fase D (azul)

5. CONCLUSIONES

En este artículo, tras una explicación de la dirección asistida eléctrica, se ha mostrado que los accionamientos con SRM presentan ventajas competitivas frente a otros tipos de accionamientos eléctricos como: su simplicidad constructiva, ausencia de imanes permanentes, adaptabilidad de su característica par-velocidad a las necesidades de la carga y tolerancia a faltas. Se ha diseñado un accionamiento SRM para DAE de vehículos de tamaño medio constituido por un SRM tetrafásico de 8 polos en el estator y 6 polos en el rotor, alimentado a través de un convertidor electrónico de potencia asimétrico con interruptores Power MOSFETs, y con controles que, aparte de dar el par de asistencia a la conducción necesario en todo momento, minimizan los principales inconvenientes de los SRM, especialmente el rizado de par, y sacan provecho de su tolerancia a faltas. El accionamiento se ha construido y las pruebas efectuadas en el laboratorio han demostrado que es capaz de proporcionar la característica de par-velocidad requerida por las especificaciones de la DAE. Se ha probado que proporciona una forma de onda de par instantáneo con un rizado de par dentro de los requisitos exigidos. También se ha constatado la capacidad del control para mitigar las perturbaciones que aparecen en el par al despejar una falta y trabajar el accionamiento con una o dos fases abiertas. Demostrándose con todo ello la idoneidad de los accionamientos con SRM para DAE.

En un futuro se prevé instalar el prototipo desarrollado en un automóvil para evaluarlo en condiciones reales de operación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Robert Twyford. Driving gear for motor-carriage US 646477, 1900.
- [2] H. Branch and W. Smith. "The unreasonable american: Francis W. Davis, inventor of power steering". Washington, Acropolis Books for the Academy of Applied Science, 1968.
- [3] Ijiri W, Tsutsui T. "Technical trends of Electric Power Steering Systems". Koyo Engineering Journal, English Edition n° 162E, 2003.
- [4] T. Tanaka, A. Doikoku, A. Imagi, Y. Yoshikuwa. "An advanced electrical power steering motor" SAE Technical Paper Series 2000-01-0824. Reprinted from Steering and Suspension Technology Symposium 2000. SAE 2000 World Congress, Detroit Michigan, March 6-9, 2000. (doi: 10.4271/2000-01-0824).
- [5] Emadi A, Eshani M, Miller M. "Vehicular electric power systems (Land, sea, air and space vehicles)". Marcel Dekker 2004.
- [6] Murthy S, Sebastian T, Liu B. "Implications of 42 V battery power on the design of motors for electric steering system". SAE Technical paper 2000-00FFT-58.
- [7] Tanaka T. "Motors for electric power steering". Mitsubishi Electric ADVANCE. September 2003, pp 8-11.
- [8] Ombach G, Junak J. "Two rotors design's comparison of permanent magnet brushless synchronous motor for an electric power steering application". EPE 2007. Aalborg, September 2007. (doi: http://dx.doi.org/10.1109/EPE.2007.4417327).
- [9] Barton AW. "Innovation drivers for electric power steering". IEEE Control Systems Magazine. December 2003, pp 30-39.
- [10] Bianchi N, Prè MD, Bolognani S. "Design of fault tolerant IPM motor for electric steering". IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 55, n° 4, July 2006, pp 1102-1110. (doi: http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2006.877716).
- [11] Torrey D, Kokernak J. "Power steering brushless DC or switched reluctance". Power Electronics Tech, August 2002.
- [12] Oprea C, Martis C. "Fault tolerant permanent magnet synchronous machine for electric power steering systems". SPEEDAM 2008, pp 256-261. (doi: http://dx.doi.org/10.1109/SPEEDHAM.2008.4581310).
- [13] Bianchi N, Bolognani S, Prè MD, Tomasini M, Peretti L, Zigliotto M. "The steering effect: PM motor drives for automotive systems". IEEE Industry Applications magazine, Vol. 14, n° 2, pp 40-48. (doi: 10.1109/MIA.2007.914272).
- [14] Critical materials strategy. US Department of Energy. December 2011.
- [15] Husain I, "Minimization of torque ripple in SRM drives". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, n° 1, 2002, pp 28-39. (doi: http://dx.doi.org/10.1109/41.982245).

- [16] Sánchez JA, Andrada P, Blanqué B, Torrent M, Perat JI. "Post-fault performance of a fault-tolerant switched reluctance motor drive". EPE 2005. Desden, September 2005. (doi: 10.1109/EPE.2005.219561).
- [17] Andrada P, Blanqué B, Martínez E, Perat JI, Sánchez JA, Torrent M. "Switched reluctance motor for electric power-assisted steering". EPE 2009. Barcelona, September 2009.
- [18] Castro J, Andrada P, Blanqué B. "Minimization of torque ripple using switched reluctance motor drives using direct instantaneous torque control". ICREPQ 2012. Santiago de Compostela, Marzo 2012.
- [19] Castro J, Andrada P, Blanqué B. "Minimization of torque ripple using switched reluctance motor drives using an enhanced direct instantaneous torque control". ICEM 2012. Marsella, September 2012. (doi: http://dx.doi.org/10.1109/ICEIMach.2012.6350001).
- [20] Inderka RB, De Doncker RW. "DITC - Direct instantaneous torque control of switched reluctance drives". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, n° 4, 2003, pp 1046-1051. (doi: http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2003.814578).

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a Ignacio Sandalinas y Javier Castro sus aportaciones al proyecto. A Meia SL por la construcción del motor y a Rectificadores Guasch por la construcción del convertidor electrónico de potencia. El proyecto RELASIS (Accionamientos de reluctancia autoconmutados tolerantes a faltas para dirección asistida eléctrica adaptados al futuro sistema de 42 V) fue financiado inicialmente por el Ministerio de Ciencia e Innovación y por fondos FEDER DPI2006-09880.

ANEXO: PRINCIPALES DATOS DEL MOTOR 8/6 SRM

Parámetro	Símbolo	Valor
Número de polos estator	N_s	8
Numero de polos rotor	N_r	6
Diámetro exterior estator	D_o	104 mm
Longitud	L	80 mm
Diámetro interior del estator	D_i	88 mm
Diámetro del estator en el entrehierro	D_s	56.7 mm
Diámetro del rotor en el entrehierro	D	56 mm
Entrehierro	g	0.35 mm
Ángulo polar estator	β_s	22.37°
Ángulo polar rotor	β_r	24.12°
Anchura polo estator	b_s	11 mm
Anchura polo rotor	b_r	11.7 mm
Grosor corona	h_v	8 mm
Grosor corona rotor	h_n	8.5 mm
Profundidad ranura estator	h_s	15.65 mm
Profundidad ranura rotor	h_r	12 mm
Diámetro del eje	D_e	15 mm
Diámetro del eje (lado accionamiento)	D_{out}	12 mm
Chapa magnética		FeV 270-50 HA
Numero de espiras por polo	N_p	28
Diámetro conductor	d_c	1.4 mm
Clase de aislamiento		180°C