

# Determinación experimental on-line de la característica magnética de un motor de reluctancia conmutada

Francisco José Pérez Cebolla<sup>1</sup>, Abelardo Martínez<sup>1</sup>, Javier Vicuña<sup>2</sup>, Bonifacio Martín<sup>1</sup>, Eduardo Laloya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones, Universidad de Zaragoza, María de Luna, 3 50.018 Zaragoza  
Tel.:+34 976 762546, fax:+34 976 7621111, e-mail: fperez@unizar.es, amiturbe@unizar.es, bmb@unizar.es,  
elaloya@unizar.es,

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de la Rioja, javier.vicuna@die.unirioja.es,

**Resumen.** El estudio del comportamiento de un motor de reluctancia conmutada, así como el desarrollo de algoritmos para su control, requiere del conocimiento de su característica magnética. En esta comunicación se presenta una herramienta implementada mediante una tarjeta de adquisición de datos que posibilita, junto con un método de excitación alternativo a los descritos en la literatura, la determinación on-line de dicha característica. A través de ensayos experimentales realizados sobre el prototipo de un motor plano de 4 fases se detalla como errores en la medida de la corriente, la tensión y la resistencia en una fase afectan a la determinación del flujo concatenado. Además, se muestran resultados que ponen de manifiesto la influencia de efectos no ideales asociados al núcleo sobre la característica magnética del motor.

## Palabras llave

SRM, magnetic characterization, on-line, model, test bench.

## 1. Introduction

La identificación de la característica electromagnética de un motor de reluctancia conmutada (SRM) resulta crucial para el posterior análisis de su comportamiento. Los métodos propuestos en la literatura para la determinación de dicha característica se pueden clasificar en tres tipos: analíticos, basados en simulaciones mediante elementos finitos y experimentales [1].

Los métodos asociados a los dos primeros tipos resultan especialmente útiles en la fase inicial de cálculo y diseño del motor, sin embargo, no consideran anomalías asociadas a su manufacturado, efectos electromagnéticos no ideales propios del tipo de material empleado en la construcción del núcleo, u otras alteraciones que modifican el comportamiento ideal del mismo. En consecuencia, si se desea una determinación de la característica electromagnética del motor lo más real posible, un método experimental resulta más adecuado.

En esta comunicación se presenta un método experimental alternativo a los propuestos en la literatura, el cual posibilita la determinación on-line de la

característica electromagnética de un motor de reluctancia conmutado [2,3,5-8]. En primer lugar se detallan los cálculos necesarios para la determinación del flujo concatenado por una fase del motor. A continuación se describe el banco de pruebas, el método de excitación propuesto y la herramienta desarrollada para la determinación experimental on-line de la característica magnética del motor. Seguidamente se muestran los resultados obtenidos sobre el prototipo para el cual se han realizado los ensayos de caracterización, y por último se exponen algunas conclusiones relativas a los apartados anteriores.

## 2. Modelo de una fase del motor

Suponiendo despreciable la inductancia mutua entre fases, la ecuación en tensión del modelo circuital de una fase de un motor de reluctancia conmutada se expresa como:

$$V_F = R \cdot I_F + \frac{d\lambda(\theta, I_F)}{dt} \quad (1)$$

donde R representa la resistencia del cobre, y  $\lambda(\theta, I_F)$  el flujo concatenado, el cual depende de la corriente de fase,  $I_F$ , y de la posición del rotor,  $\theta$ . Siendo  $V_F$  la tensión en bornes de dicha fase.

En cuanto a la resistencia del cobre, su valor se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$R_C = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V_F dt}{\int_{t_1}^{t_2} I_F dt} \quad (2)$$

donde el límite de integración inferior,  $t_1$ , se corresponde con el instante inicial de excitación de la fase del motor, y el límite de integración superior,  $t_2$ , con el instante de cancelación de la tensión de fase, el cual resulta posterior al instante de anulación de la corriente de fase si el núcleo magnético del motor presenta histéresis [3].

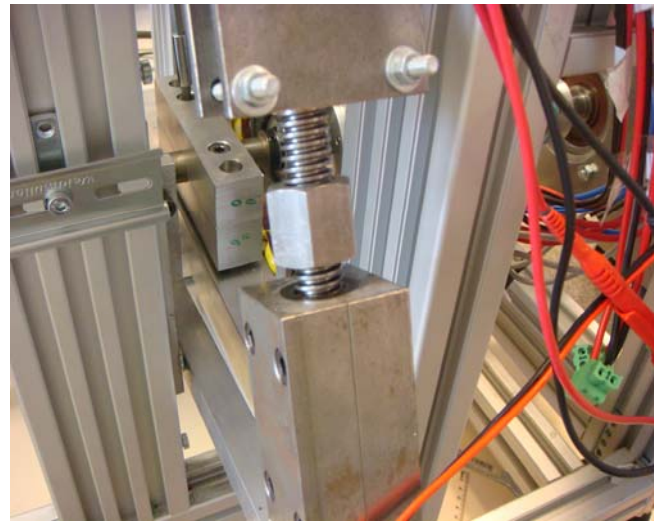
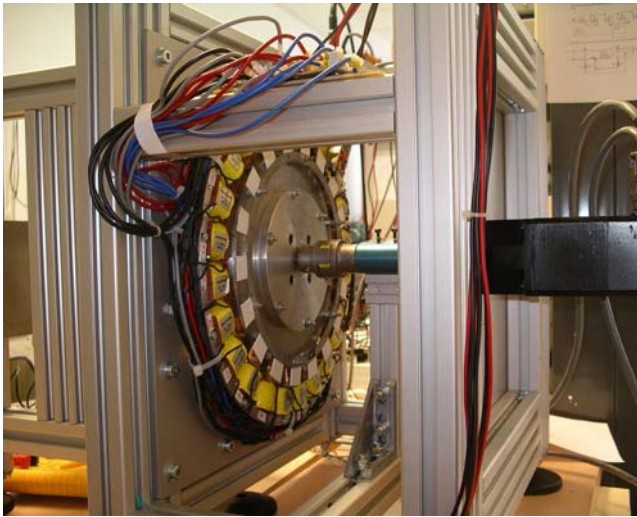


Fig.1. Fotografías del banco de ensayos, donde se puede apreciar prototipo del motor y un detalle del sistema de enclavamiento del eje.

A partir de las expresiones (1) y (2), el flujo concatenado puede ser calculado como se indica a continuación:

$$\lambda(\theta, I_F) = \lambda_0 + \int (V_F - R \cdot I_F) dt \quad (3)$$

donde el valor residual del flujo concatenado,  $\lambda_0$ , suele asumirse despreciable.

La característica magnética del motor, expresada a través de curvas flujo concatenado-corriente-posición, ha de determinarse para un número significativo de valores de corriente y posiciones del rotor. Con el propósito de reducir el número de ensayos, el procedimiento seguido habitualmente se realiza en dos fases, primero se bloquea el rotor en una posición y a continuación se excita una fase del motor y se toman muestras de la corriente de fase. De esta forma se determina la característica flujo concatenado vs. corriente para dicha posición, repitiendo el ensayo únicamente para tantas posiciones como sea necesario.

Si se pretende forzar la saturación magnética del núcleo, el circuito de excitación debe de ser capaz de proporcionar valores de corriente suficientemente altos sin que ésta presente oscilaciones. Debe tenerse en cuenta que para maximizar su rendimiento, este tipo de motores operan en la región no lineal de las curvas flujo concatenado-corriente cuando el par demandado es alto.

### 3. Descripción del banco de ensayos

Los ensayos se han realizado sobre un prototipo de un motor plano diseñado para operar de forma directa sobre el tambor de una lavadora de uso doméstico. Se trata de un motor de cuatro fases con una estructura del tipo 8/6 repetida 3 veces (24 polos en el estator y 18 polos en el rotor). La distancia angular entre polos del estator es de  $20^\circ$  y el ángulo de paso de  $5^\circ$ .

La posición se mide mediante un encoder incremental (KUBLER Type 5020). La resolución del sistema es de  $0.025^\circ$ , suficientemente baja para una caracterización

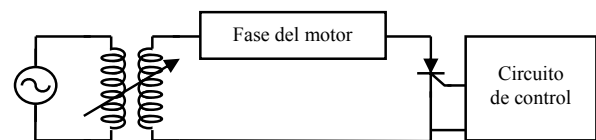


Fig.2. Diagrama de bloques del circuito de excitación.

magnética en posiciones distantes entre sí  $0.5^\circ$ . Así, dado que las posiciones de no alineamiento y alineamiento del motor están separadas  $10^\circ$  mecánicas, el número de curvas flujo-corriente-posición a determinar será 21.

Dado que la posición ha de mantenerse fija para cada ensayo, se ha diseñado un sistema mecánico que permite primero desplazar el motor hasta la posición deseada mediante un husillo con una resolución superior a la del encoder, y a continuación dejarlo bloqueado mediante una pieza en forma de mordaza (fig.1).

El banco de ensayos ofrece además la posibilidad de determinar la característica par-corriente-posición del motor. Una descripción con mayor detalle del mismo se presentó en una comunicación anterior [4].

### 4. Circuito de excitación propuesto

En la literatura se describen diferentes circuitos de excitación capaces de generar valores de corriente lo suficientemente elevados para asegurar la saturación magnética del núcleo. Así en [3,5] la tensión de un bus de continua se aplica, durante un reducido intervalo de tiempo, mediante una rama de convertidor Miller generando una señal rectangular bipolar sobre una fase del motor. Un método similar se muestra en [2], donde la señal aplicada es un onda rectangular unipolar generada mediante un único transistor en serie con la fase a excitar y un diodo en antiparalelo con ésta. En ambos casos el condensador del bus de continua debe de ser alto valor para evitar oscilaciones de la corriente de fase. Una alternativa se muestra en [6] donde la tensión del bus de continua se obtiene directamente de una batería. Otros autores proponen circuitos de excitación mediante la

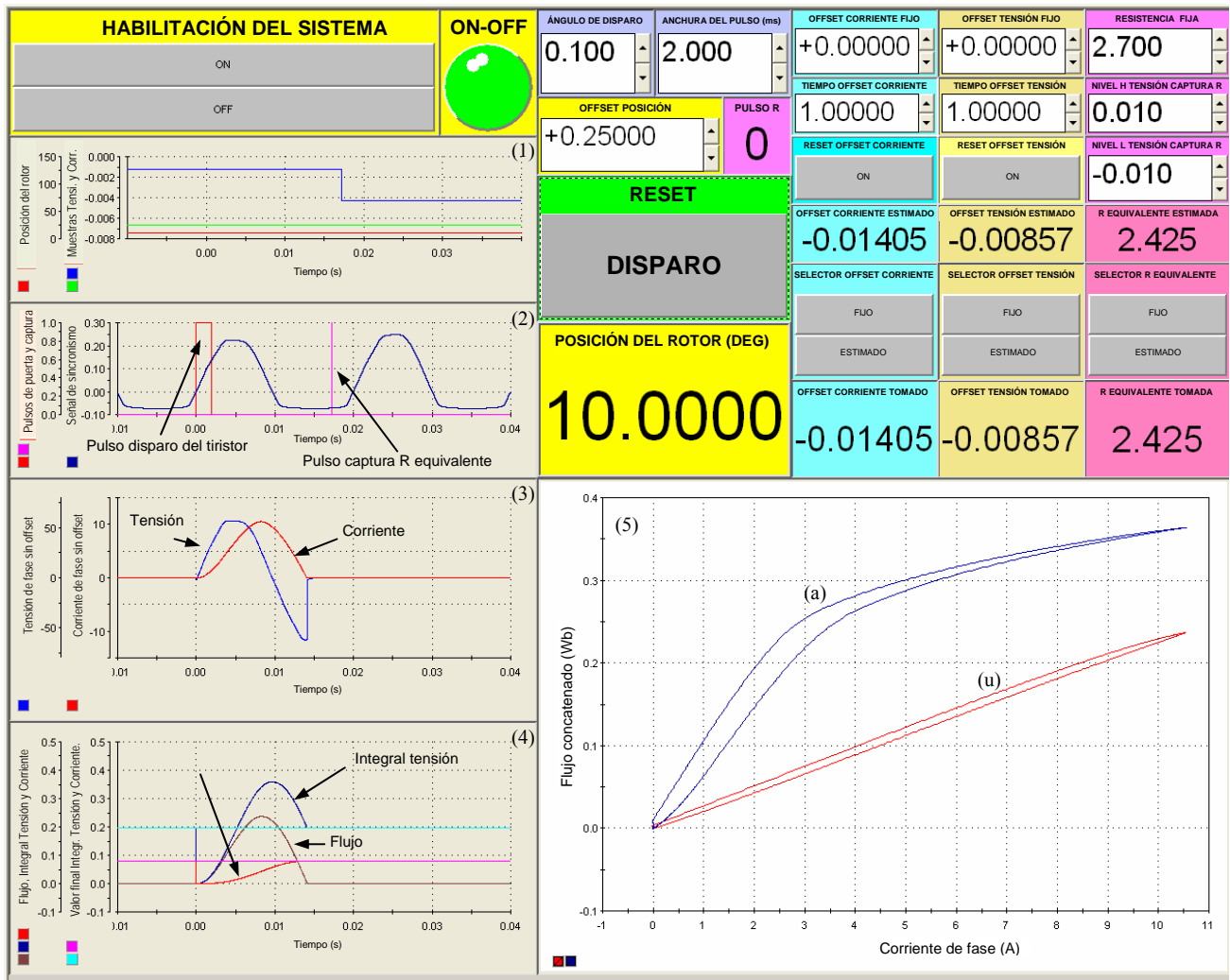


Fig.3. Imagen del panel de control, donde se puede apreciar el resultado de la caracterización magnética del motor en las posiciones de alineamiento (gráfica 5(a)), y no alineamiento (gráfica 5(u)).

aplicación de una señal sinusoidal [7] o su rectificadas en media onda [8]. Mediante estos dos métodos de excitación, si bien se elimina la necesidad de altos valores de condensadores o baterías, al tratarse de una excitación mantenida, el valor de la resistencia de cobre se vera alterado conforme se incremente su temperatura. Además, si se pretenden alcanzar valores de corriente suficientemente altos, podría deteriorarse el devanado.

El diagrama de bloques del circuito de excitación propuesto se muestra en la fig.2. La tensión monofásica de suministro eléctrico se atenúa mediante un auto-transformador y se aplica mediante un tiristor sobre una fase del motor. El valor máximo de la corriente de fase se controla mediante el auto-transformador, si bien éste podría eliminarse dada la posibilidad que ofrece la herramienta de control para modificar el ángulo de disparo de tiristor. En este caso se ha mantenido el auto-transformador por protección y se ha fijado el ángulo de disparo del tiristor en 0 grados, permitiendo generar pulsos de excitación cuasi sinusoidales.

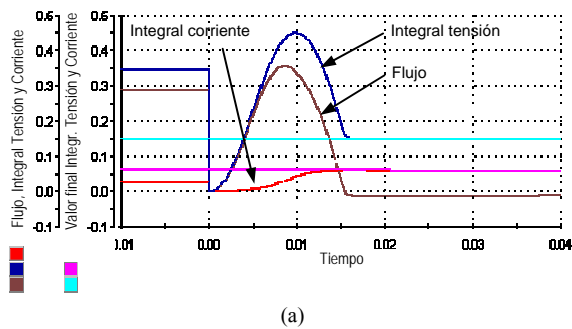
En cada ensayo únicamente se realiza un disparo del tiristor, de este modo dado el carácter transitorio de la excitación, la corriente de fase puede alcanzar valores

suficientemente elevados como para saturar el núcleo magnético.

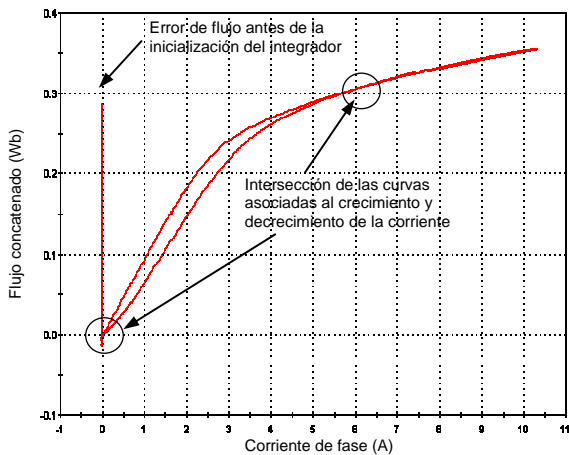
Por consiguiente, mediante este método de excitación se aúnan algunas ventajas de los métodos anteriormente citados. Es decir, la tensión de excitación es un pulso único de forma cuasi sinusoidal, lo cual implica un menor contenido armónico y una mínima variación del valor de la resistencia equivalente de fase. Por otro lado, se evitan otras desventajas como la necesidad de condensadores de alto valor o baterías lo cual encarece el sistema. Además, emplea un único dispositivo electrónico de potencia, el cual no tiene que soportar valores elevados de potencia a pesar de manejar corrientes altas, si bien debe prestarse especial atención al parámetro  $I_{TSM}$  del tiristor.

## 5. Descripción de la herramienta para la caracterización on-line del motor

La determinación de la característica magnética del motor se logra mediante un procesador digital de señal (DSP) alojado en una tarjeta de adquisición de datos comercial (Dspace 1103). Esta tarjeta además proporciona entradas y salidas analógicas y digitales que



(a)



(b)

Fig.4. Resultado del ensayo de caracterización en la posición de alineamiento sin ajustar ni el offset de las sondas de tensión y corriente, ni el valor de la resistencia equivalente.

posibilitan la captura de las señales procedentes del encoder incremental para determinar la posición del rotor, así como de la corriente y de la tensión de fase.

Inicialmente, la programación del DSP se ha realizado a través de algoritmos de control y de cálculo descritos en el entorno Matlab-Simulink. Dichos algoritmos son compilados y transferidos posteriormente al DSP mediante una herramienta del tipo Real Time Workshop que el fabricante de la tarjeta de adquisición de datos proporciona para el entorno de trabajo de Matlab.

Dado que el cálculo de la resistencia del cobre y del flujo concatenado se realiza integrando muestras de tensión y corriente de fase, tal como se indicó en (2) y (3) respectivamente, el posible nivel de offset que presenten estas señales podría ser causa de error. Para estimar el valor de offset de estas señales se realiza la integración de las mismas durante un intervalo de tiempo prefijado en ausencia de excitación de entrada, y el valor resultante se divide por el intervalo de tiempo transcurrido.

La representación on-line de la característica flujo concatenado-corriente-posición se muestra sobre un panel de control (fig.3). Este panel ha sido desarrollado mediante la aplicación ControlDesk proporcionada por Dspace, la cual, además de posibilitar un diseño flexible basado en instrumentos virtuales, permite la captura de señales para su posterior procesado en Matlab.

Mediante dicho panel, el usuario es capaz de establecer el ángulo de disparo del tiristor, la anchura de dicho pulso de disparo y el tiempo para la estimación del offset de las señales de tensión y corriente de fase.

Para poder estudiar la influencia del offset de tensión y de corriente, así como del valor de la resistencia del cobre, en la determinación del flujo concatenado, el usuario puede prefijar dichos valores o dejar que el sistema los estime on-line.

En cuanto a las señales visualizadas, además de la característica flujo concatenado-corriente-posición, se puede observar la posición del rotor, el valor instantáneo de la tensión de fase y su integral, la corriente de fase y su integral, y el flujo concatenado. También se muestran otras señales para poder comprobar el correcto funcionamiento del sistema. Estas señales son: la tensión de fase atenuada, el pulso de disparo del tiristor, el pulso que determina el instante de cálculo de la resistencia del cobre y el valor que toman la tensión y la corriente de fase en ese instante, así como el de sus integrales.

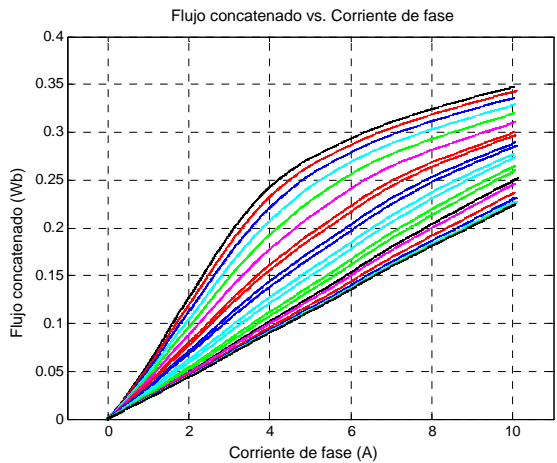
Puesto que la captura de la tensión y corriente de fase es continua, así como el cálculo de la integral de dichas señales, si el valor de offset de la tensión y de la corriente han sido estimados correctamente, el valor de las integrales de la tensión y la corriente debe de ser el mismo en el instante de disparo del tiristor ( $t_1$ ), coincidente con la inicialización del integrador, y en el instante ( $t_2$ ), en el cual se estima el valor de la resistencia de fase. Estos tiempos son los mismos que se definieron en la descripción de la ecuación (2).

## 6. Resultados experimentales

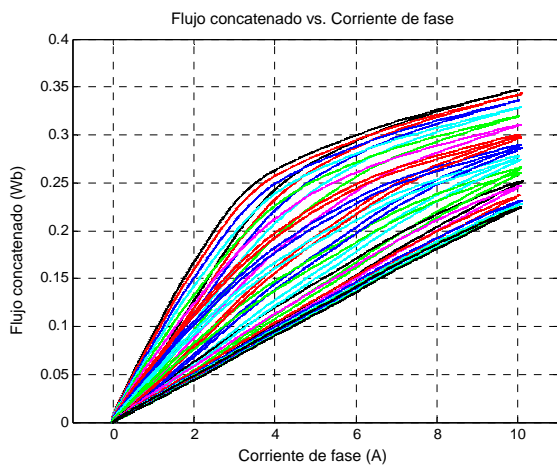
En fig.3 se muestra una imagen del panel de control donde se representan las curvas de flujo concatenado-corriente en las posiciones de alineamiento y no alineamiento del motor (fig.3 (5)). Tal como se puede observar las características magnéticas resultantes de los intervalos de subida y de bajada de la corriente difieren, poniendo de manifiesto la influencia sobre el núcleo magnético de efectos no ideales como la histéresis.

También se puede apreciar como los valores iniciales y finales de la integral de la tensión y de la integral de la corriente coinciden, lo cual indica la correcta determinación del nivel de offset asociado a dichas señales (fig.3 (4)). Igualmente se observa que el valor inicial y final del flujo resulta nulo, verificándose la correcta estimación de la resistencia equivalente del modelo.

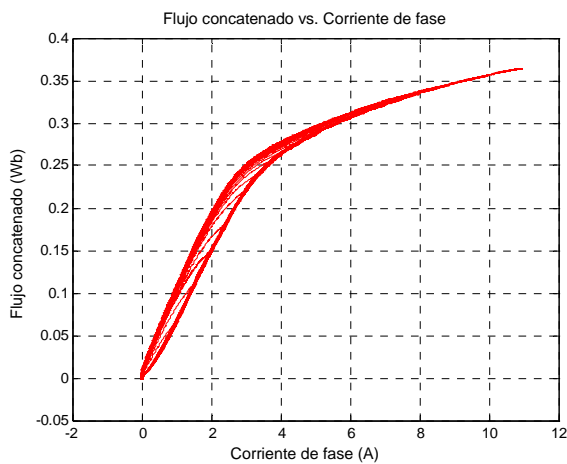
Para poder comprobar si los niveles de offset, así como una pequeña variación de la resistencia equivalente, podría influir en la determinación de la característica magnética, se realizó un ensayo en la posición de alineamiento dejando sin compensar dichos niveles, y asumiendo como correcto el valor de resistencia de fase medida directamente con un polímetro convencional



(a)



(b)



(c)

Fig.4. Flujo concatenados vs. corriente de fase: (a) características asociadas al intervalo de subida de la corriente; (b) características asociadas al intervalo de subida y de bajada de la corriente; (c) características asociadas a los intervalos de subida y de bajada de la corriente, para diferentes valores máximos de corriente sobre la posición de alineamiento

( $2.66\Omega$  frente a  $2.42$  estimada). Tal como se puede observar en fig.4 (a), el valor del flujo concatenado antes de la inicialización del integrador presenta un error considerable. Además, el valor final del flujo concatenado queda por debajo de cero lo cual indica una

incorrecta estimación de la resistencia del cobre. En cuanto a los valores de las integrales de tensión y corriente, se comprueba que su valor inicial dista considerablemente del valor final alcanzado tras la inicialización de ambas, denotando un error provocado por los niveles de offset.

La representación de la relación flujo concatenado corriente de fase resultante del mismo ensayo (posición de no alineamiento) se muestra en fig.4 (b). En esta gráfica se puede apreciar como se cruzan las características magnéticas asociadas a los intervalos de subida y bajada de la corriente, volviendo a ponerse de manifiesto un claro error en la estimación de la resistencia de fase equivalente.

El conjunto completo de curvas entre las posiciones de alineamiento y no alineamiento del motor durante el intervalo de subida de la corriente se muestran en fig.5 (a). Se ha fijado un incremento angular de  $0.5$  grados y un valor máximo de corriente de fase de unos  $10A$ . En fig.5 (b) se muestra de nuevo dichas curvas teniendo en cuenta los intervalos de subida y bajada de la corriente.

Con el propósito de analizar la influencia del valor máximo de corriente para el cual se realiza el ensayo sobre la determinación de la característica magnética, se fijó el motor en la posición de alineamiento y se repitieron los ensayos para un valor máximo de corriente entre  $0$  y  $11A$  con incrementos de corriente de  $0.5A$ . El resultado se muestra en fig.5 (c), donde se puede advertir como durante el intervalo de decaimiento de la corriente existe una curva diferente para cada valor máximo de corriente.

De los resultados anteriores se deduce que en un motor afectado por efectos no ideales asociados al núcleo magnético como la histéresis y las corrientes de Foucault, se pierde la relación unívoca flujo concatenado-corriente-posición sobre la cual se basan múltiples métodos sensorless para la estimación de la posición del rotor [1,5], resultando válida únicamente durante el intervalo de crecimiento de la corriente.

## 7. Conclusiones

En este trabajo se ha descrito un método alternativo de excitación para la determinación de la característica magnética de un motor de reluctancia conmutada. El circuito de excitación proporciona un pulso único de tensión cuasi sinusoidal y es capaz de inducir altos valores de corriente que aseguran la saturación del núcleo, mantiene la resistencia equivalente de fase prácticamente inalterada y evita el uso de condensadores elevados o baterías, reduciendo a un tiristor el número de dispositivos electrónicos de potencia.

Se ha presentado una herramienta que permite la determinación on-line de dicha característica magnética. Esta herramienta permite estimar el offset de las señales

de tensión y corriente de fase, así como de la resistencia equivalente de una fase del motor para la correcta determinación del flujo concatenado.

Los ensayos experimentales realizados indican la influencia de los efectos no ideales asociados al núcleo magnético sobre la característica magnética del motor. Por tanto la relación unívoca flujo concatenado-corriente-posición en la que se basan múltiples métodos sensorless para la determinación de la posición del rotor, sólo resulta válida durante el intervalo de crecimiento de la corriente.

## Referencias

- [1] R. Krishnan “Switched Reluctance Motor Drives: Modeling Simulation Analysis, Design and Applications” , CRC Press Publication, 2001.
- [2] C. S. Dragu, R. Belmans, “Measurement of magnetic characteristics of switched reluctance motors “. IEEE 10th Conf. Power Electr. Appli., Sep 2003.
- [3] Charton, J.T., Corda, J., Stephenson, J.M. and Randall, S.P. (2006) Dynamic modelling of switched reluctance machines with iron losses and phase interactions. IEE Proceedings - Electric Power Applications, 153 (3). pp. 327-336. ISSN 1359-7043. By C. S. Dragu, R. Belmans, “Measurement of magnetic characteristics of switched reluctance motors “. IEEE 10th Conf. Power Electr. Appli., Sep 2003.
- [4] A. Martínez, F.J. Pérez Cebolla, J.E.Vicuña et al, “Test Bench for Switched Reluctance Motor Drives”. 13<sup>th</sup> IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, pp. 1146-1149, 16-19 May 2006.
- [5] E. Mese and D.A. Torrey, “An approach for Sensorless Position Estimation for Switched Reluctance Motors Using Artificial Neural Networks”, IEEE Trans. Power Electronics, Vol.17. No.1, pp. 66-75, January 2002.
- [6] V. K. Sharma, S. S. Murthy, B. Singh. “An Improved Method for the Determination of Saturation Characteristics of Switched Reluctance Motors”. IEEE Trans. on Instrum. and Meas., vol. 48, October 1999.
- [7] Ferrero, A., Raciti, A., “A digital method for the determination of the magnetic characteristic of variable reluctance motors”, IEEE. Trans. Instrum. and Meas. Vol. 39, pp. 604 – 608, Aug. 1990.
- [8] Parreira, B., Rafael, S., Pires, A.J.; Branco, P.J.C., ”Obtaining the magnetic characteristics of an 8/6 switched reluctance machine: from FEM analysis to the experimental tests”, IEEE. Trans. Industrial Electronics Vol. 52, pp.1635 – 1643, Dec 2005.