



Motores sincrónicos de reluctancia controlados con variadores de frecuencia: una aplicación para ahorrar energía

Synchronous reluctance motors controlled by variable frequency converters: an application to save energy

Percy Rafael - Viego Felipe
Julio Rafael - Gómez Sarduy
Enrique Ciro – Quispe Oqueña

Recibido: mayo de 2014

Aprobado: septiembre de 2014

Resumen/ Abstract

Se presenta un estudio sobre aplicaciones de los motores sincrónicos de reluctancia (MSR) controlados por accionamientos de frecuencia variable (AFV), que posibilitan el ahorro de energía. Se realizó una comparación entre las características constructivas de los MSR y los motores asincrónicos de jaula (MA), evaluando las ventajas y limitaciones que aquellos presentan. Una ventaja notable del MSR es que las pérdidas en el rotor se eliminan prácticamente. Una comparación experimental evidenció que para igual momento, el MSR presenta una mayor eficiencia; y que para igual incremento de temperatura, con las mismas dimensiones IEC, se logra más potencia. Por comparaciones entre datos de un fabricante, se demostró las ventajas de utilizar, con el mismo AFV y para cargas centrífugas, un MSR de mayor clase de eficiencia que la de un MA. Un análisis económico con técnicas de descuento, evidenció una atractiva recuperación de la inversión cuando se opera todo el año.

Palabras clave: accionamientos de frecuencia variable, análisis económico con técnicas de descuento, comparación experimental de motores eléctricos, eficiencia energética, motor sincrónico de reluctancia.

A study on applications of synchronous reluctance motor (SynRM) controlled by variable frequency drives (VFD) for energy saving is presented. A comparison between the basic construction elements of the SynRM and the squirrel cage induction motor (IM) is carried out, evaluating advantages and disadvantages. A nearly complete elimination of rotor losses is a significant asset of the SynRM. An experimental comparison showed that at the same torque, the SynRM presents a higher efficiency than the IM; and that at the same temperature rise, more power is obtained with the same IEC frame for both motor types. Comparing data from a manufacturer, the advantages of using, with the same VFD and for centrifugal loads, a higher efficiency class SynRM than that of a lower efficiency IM was demonstrated. An economical study using discount techniques, made evident an attractive pay back when operating all year around.

Key words: variable frequency drives, economical analysis using discount techniques, experimental comparison of electric motors, energy efficiency, synchronous reluctance motor,

INTRODUCCIÓN

Los motores eléctricos significan, a nivel mundial, aproximadamente el 60 – 65 % de la electricidad consumida en la industria. El incremento de la eficiencia de los motores, está en el centro de la búsqueda continuada de un uso efectivo de la energía en estas máquinas. Grandes ahorros de energía son obtenidos también por medio del uso de accionamientos de frecuencia variable (AFV). Hoy en día, en los países desarrollados, hasta un 30 – 40 % de todos los motores nuevos que son instalados, adoptan esta

tecnología. La inversión inicial y el servicio continuo, también demandan un incremento de la fiabilidad y de la vida útil de los motores. Para dar respuesta a los anteriores requerimientos y que el motor sea perfectamente adaptable a los AFV, se han repensado distintas opciones tecnológicas.

Una de las opciones es la utilización de motores sincrónicos. Estos motores giran a velocidad sincrónica, mientras que el motor asincrónico (MA) presenta un deslizamiento, de cuya magnitud dependen las pérdidas de deslizamiento. En los motores de inducción modernos, las pérdidas asociadas al rotor alcanzan aproximadamente un 20 – 35 % de las pérdidas totales del motor. El motor sincrónico elimina la mayoría de estas pérdidas. Como un ejemplo, para dos motores de un determinado tipo de 220 kW y 3 kW, la no existencia de las pérdidas de deslizamiento llevaría a un incremento de la eficiencia de alrededor de 0,6 % en el primero y de 8 % en el caso del segundo [1]. Los motores sincrónicos se producen en diferentes variantes: con rotor bobinado alimentado con excitatrices de corriente directa CD de diferentes tipos (cuyas pérdidas hay que considerar); los de imán permanente; los basados en el principio de la reluctancia, entre los que se encuentran los de reluctancia conmutada y los sincrónicos de reluctancia (MSR). (La nueva variante híbrida llamada “motor sincrónico de reluctancia asistido por imán permanente”, más cara y compleja que el MSR, no fue considerada [2]). El rotor de un MSR no tiene jaula de ardilla como el de un MA, ni imanes permanentes o devanados de excitación de campo. La superficie lisa del rotor de los MSR reduce las pérdidas e incrementa la eficiencia y hace que el rotor sea más compacto. La posibilidad de lograr un nivel estándar de potencia y momento con menor incremento de temperatura, aumenta la vida útil del aislamiento del motor y de los rodamientos e incrementa los intervalos de lubricación. Para la misma clase de aislamiento y de incremento nominal de temperatura, los MSR son físicamente más pequeños (menor dimensión IEC), lo que ayuda a obtener un equipo más compacto, ligero y más eficiente. Como consecuencia, hay un incremento de 20 – 40 % en la densidad de potencia y de momento [1-3].

Adicionalmente, la posibilidad de operar a altas velocidades, ayuda a eliminar elementos de transmisión de potencia, tal como cajas de engranes. Esto permite la integración del equipamiento del motor y la carga, lo cual constituye una demanda común que está en incremento.

MOTOR SINCRÓNICO DE RELUCTANCIA

El rotor consiste en una estructura con una dirección con la mayor permeancia (d) y en una dirección perpendicular (q), la de menor permeancia, tal como se observa en el esquema de la figura 1(a). En la figura 1 (b), se muestra un diagrama de cómo se desarrolla el momento en una estructura con distinta permeancia en las direcciones de los ejes d y q .

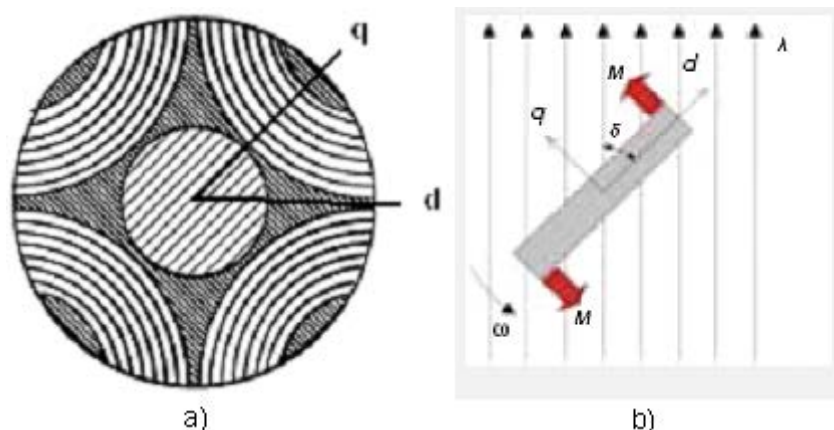


Fig. 1. Diagramas esquemáticos del rotor del MSR [1]:
 a) ejes d y q vistos en laminaciones del rotor
 b) esquema del desarrollo del momento

El momento es producido según el rotor tiende a alinear su eje d con la dirección del campo magnético del estator. La magnitud del momento que se desarrolla, está directamente relacionada con la relación de

saliencia, esto es, la relación entre las permeancias del eje d y del eje q, o lo que resulta análogo, con el inverso de las inductancias en los ejes q y d ($1/L_q$ y $1/L_d$), tal como se expresa en la ecuación (1), [4]:

$$M = \frac{3}{2} p \left(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d} \right) \lambda^2 \text{sen}(2\delta) \quad (\text{N-m}) \quad (1)$$

donde: M es el momento desarrollado (N-m); p es el número de pares de polos, λ son las concatenaciones de flujo del estator (Wb-vuelta); δ (rad) es el ángulo entre el eje d y el eje de las concatenaciones de flujo λ . Resulta importante notar el contraste de los MSR con los motores de reluctancia conmutada o motores por pasos, los cuales presentan un estator enteramente diferente y ondas de corriente no sinusoidales, y frecuentemente considerados inadecuados para el uso industrial debido, entre otros aspectos, a su elevado ruido.

Una desventaja citada con relación al MSR es su mayor demanda de corriente para el mismo momento, comparado con el motor de imán permanente, debido a que el rotor debe ser magnetizado a través del estator. La mayor corriente de magnetización conduce a un factor de potencia menor. Sin embargo, el factor de potencia, visto desde la red, está determinado por el AFV y es cercano a la unidad en todos los modos de operación. De esta forma, en los diseños del MSR y del AFV correspondiente - para máquinas de pequeña dimensión IEC - la corriente de línea vista desde la red, que es proporcional al inverso del factor de potencia y de la eficiencia, es en realidad menor que para un MA de la misma dimensión IEC al mismo momento y velocidad. Esto es debido fundamentalmente a la gran ganancia en eficiencia. Solo para grandes motores, la corriente que demanda el convertidor es mayor que para un MA del mismo momento. La eliminación de la mayor parte de las pérdidas en el rotor y su estructura lisa, resulta en una serie de beneficios para el MSR. Un motor con esta tecnología puede ser operado al nivel estandarizado de potencia para una dimensión IEC dada. En este caso, la ganancia en eficiencia va desde más de 5 puntos porcentuales en máquinas de varios kW, hasta cerca de 0,5 puntos para los motores más grandes (por ejemplo, dimensión 315). Consecuentemente, donde un MA tendría un incremento de temperatura permisible de aislamiento clase F, el MSR opera al correspondiente a uno clase B, o incluso, clase A. Esta baja temperatura de operación incrementa el tiempo de vida del aislamiento del motor y de los rodamientos (o sus intervalos de lubricación). Este efecto sobre los rodamientos constituye una importante ventaja, ya que de acuerdo con algunos estudios los fallos en ellos son la raíz de aproximadamente el 70 % de todas las salidas de servicio no planificadas de los motores. Estos fenómenos son particularmente pronunciados a las velocidades más altas. Por otra parte, cuando se requiere un reemplazo de los rodamientos, al no haber fuerzas magnéticas (a diferencia del caso del motor de imán permanente), el procedimiento resulta tan fácil como en un MA. Otra variante, es que - para el mismo incremento de temperatura - se puede lograr la misma potencia del MSR con dimensión IEC una o dos veces menor en comparación con el MA.

Características constructivas

La mayoría de los aspectos técnicos de los sistemas de accionamiento con el MSR están directamente basados en la tecnología existente. La carcasa, la caja de terminales, el estator, el diseño y tecnología del devanado, y las variantes de rodamientos, son idénticos a los de los MA. Los AFV pueden ser iguales para ambos tipos de motor, siempre que las rutinas de software incluyan el MSR. Entonces, solo el rotor será diferente [5]. El rotor del MSR es menos complejo constructivamente que el del MA y el de imán permanente. La complejidad está en el diseño. Se emplean diferentes métodos de optimización y simulaciones con el método de elementos finitos para diseñar cuidadosamente la sección transversal, en términos de propiedades eléctricas y mecánicas [6-8]. Constituyen importantes elecciones en el diseño el número de segmentos ferromagnéticos y las formas exactas de las barreras de aire. Esto determina el momento y la corriente de magnetización del motor. Es crucial minimizar esta corriente reactiva. El resultado final se logra mediante una compleja optimización con el uso de métodos de inteligencia artificial [9]. La exacta colocación de los segmentos a lo largo de la periferia es esencial para crear un momento lo más constante posible durante la rotación, manteniendo el ruido del motor tan bajo como en los motores convencionales. En la figura 2, se observa la estructura de las laminaciones colocadas en el rotor, en una comparación entre el MA y el MSR.



Fig. 2. Motores con las laminaciones colocadas:
a) motor asincrónico b) motor sincrónico de reluctancia.

COMPARACIÓN ENTRE EL MOMENTO DEL MA Y EL DEL MSR

Momento del motor asincrónico

Para demostrar la capacidad del MSR de desarrollar momento, es conveniente comparar esta máquina con el MA de jaula de ardilla, suponiendo que el devanado del estator es idéntico para ambas máquinas.

Empleando la teoría de los ejes d-q, el momento instantáneo (M_i) desarrollado por un MA de jaula simétrica, se puede escribir como en la ecuación (2), [10]:

$$M_i = \frac{3}{2} p (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (\text{N-m}) \quad (2)$$

donde: λ_{ds} y λ_{qs} son las concatenaciones de flujo del estator en los ejes d y q, respectivamente, (Wb-vuelta); i_{ds} e i_{qs} son las corrientes del estator de los eje d y q, respectivamente (A).

Las concatenaciones de flujo del estator se relacionan con las corrientes a través de las ecuaciones (3) y (4):

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (\text{Wb-vuelta}) \quad (3)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (\text{Wb-vuelta}) \quad (4)$$

siendo: $L_s = L_m + L_{ls}$

donde: L_s es la inductancia total del devanado del estator (H); L_m es la inductancia mutua entre el devanado del estator y del rotor (H); L_{ls} es la inductancia de dispersión del estator (H); i_{dr} e i_{qr} son las corrientes del rotor de los eje d y q, respectivamente (A).

Para evaluar la ecuación de momento (2) resulta útil expresar las concatenaciones de flujo en términos del rotor en lugar de hacerlo en términos del estator, según las ecuaciones (5) y (6):

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (\text{Wb-vuelta}) \quad (5)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (\text{Wb-vuelta}) \quad (6)$$

donde: L_r es la inductancia total del devanado del rotor (H); λ_{dr} y λ_{qr} son las concatenaciones de flujo del rotor en los ejes d y q, respectivamente (Wb-vuelta).

Si se resuelven las ecuaciones (5) y (6) para i_{dr} e i_{qr} y el resultado se sustituye en las ecuaciones (3) y (4), se obtienen las ecuaciones (7) y (8):

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m \frac{(\lambda_{dr} - L_m i_{ds})}{L_r} \quad (\text{Wb-vuelta}) \quad (7)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m \frac{(\lambda_{qr} - L_m i_{qs})}{L_r} \quad (\text{Wb-vuelta}) \quad (8)$$

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación (1), resulta la ecuación (9):

$$M_i = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds}) \quad (\text{N-m}) \quad (9)$$

Resulta importante mencionar que la ecuación (9), es válida en cualquier marco de referencia, esto es, los ejes d-q pueden rotar o permanecer fijos. Si los ejes se hacen rotar con el vector de flujo del rotor, los

dos componentes se proyectan como valores constantes en los ejes d-q (suponiendo que prevalecen condiciones de balance). Y más aún, si se alinea uno de los dos ejes con el vector de flujo (por ejemplo, el eje d), entonces el componente en el eje q se hace cero. En este caso, la ecuación (9), se reduce a la ecuación (10):

$$M_i = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr} i_{qs}) \quad (\text{N-m}) \quad (10)$$

Aquí es adecuado señalar que esta ecuación es la forma típica empleada para el control de campo orientado de las máquinas asincrónicas. Dado que la razón de cambio en el tiempo del flujo del rotor es aplicada a través de la resistencia del rotor, la corriente en el mismo debe estar en fase con la razón de cambio del flujo del rotor y, por tanto, en cuadratura con las concatenaciones de flujo; esto es, $i_{dr} = 0$. Entonces la ecuación (5), se reduce a la ecuación (11):

$$\lambda_{dr} = L_m i_{ds} \quad (\text{Wb-vuelta}) \quad (11)$$

y la ecuación (9), se convierte en la ecuación (12):

$$M_i = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (L_m i_{ds} i_{qs}) \quad (\text{N-m}) \quad (12)$$

Momento del motor sincrónico de reluctancia

El momento instantáneo producido por el MSR se puede expresar por medio de una ecuación análoga a la ecuación (1), que es la ecuación (13):

$$M_r = \frac{3}{2} p (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (\text{N-m}) \quad (13)$$

En este caso, en las condiciones normales de operación de esta máquina en estado estable, las corrientes del rotor son cero, y como consecuencia, λ_{ds} se expresa como en la ecuación (14):

$$\lambda_{ds} = L_{ds} i_{ds} \quad (\text{Wb-vuelta}) \quad (14)$$

donde: L_{ds} inductancia del estator en el eje d (H)

De manera semejante, λ_{qs} viene dada por la ecuación (15):

$$\lambda_{qs} = L_{qs} i_{qs} \quad (\text{Wb-vuelta}) \quad (15)$$

donde: L_{qs} es la inductancia del eje q (H)

Utilizando las ecuaciones (14) y (15), la ecuación (13), puede escribirse como la ecuación (16):

$$M_r = \frac{3}{2} p (L_{ds} - L_{qs}) i_{qs} i_{ds} \quad (\text{N-m}) \quad (16)$$

Las inductancias L_{ds} y L_{qs} comprenden tanto las inductancias de dispersión (idénticas para ambos ejes en esta máquina) como las de magnetización; esto es, se expresan según las ecuaciones (17) y (18):

$$L_{ds} = L_{ls} + L_{md} \quad (\text{H}) \quad (17)$$

donde: L_{ls} es la inductancia de dispersión de estator (H); y L_{md} es la inductancia de magnetización del eje d (H).

$$L_{qs} = L_{ls} + L_{mq} \quad (\text{H}) \quad (18)$$

donde: L_{mq} es la inductancia de magnetización del eje q (H)

Entonces, la ecuación (16), se puede transformar (en términos de las inductancias de magnetización) en la ecuación (19):

$$M_r = \frac{3}{2} p (L_{md} - L_{mq}) i_{qs} i_{ds} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left(1 - \frac{L_{mq}}{L_{md}} \right) (L_{md} i_{ds}) i_{qs} \quad (\text{N-m}) \quad (19)$$

Relación entre los momentos del MSR y el MA

La relación entre los momentos del MSR y el del MA puede entonces ser evaluada dividiendo la ecuación (19) entre la ecuación (12). Realizando esa operación y transformando, queda como la ecuación (20):

$$\frac{M_r}{M_i} = \frac{(L_{md} - L_{mq})}{\frac{L_m}{L_r} L_m} = \frac{\frac{L_{md}}{L_m} \left(1 - \frac{L_{mq}}{L_{md}} \right)}{\frac{L_m}{L_r}} \quad (20)$$

Por lo tanto, la relación entre los momentos del MSR y el MA dependen de tres factores:

1. El inverso de la relación de saliencia L_{mq}/L_{md} .
2. La relación entre la inductancia de magnetización y la inductancia total del rotor (L_m/L_r) del MA.
3. La relación entre la inductancia de magnetización del eje d del MSR y la inductancia de magnetización del MA (L_{md}/L_m).

En Lipo (1991), se plantea con respecto al primer factor que se pueden encontrar relaciones de saliencia en los MSR de hasta 7 – 8 [10]. La inductancia de magnetización de un MA está, típicamente, entre 1 y 2 p.u., mientras que la reactancia de dispersión del rotor (L_r) se encuentra entre 0,07 y 0,1 p.u.

Por lo tanto, el segundo factor (L_m/L_r) oscila entre un máximo de $2/(2+0,07) = 0,966$ y un mínimo de $1/(1+0,1) = 0,909$.

Finalmente, si los entrehierros de las dos máquinas son iguales, la relación entre la reactancia de magnetización del eje d del MSR con respecto a la correspondiente al MA (L_{md}/L_m), depende fundamentalmente del valor del arco de polo del rotor del MSR con relación valor del paso de polo del MA. Esta relación se calcula a partir de la ecuación (21), [10]:

$$\frac{L_{md}}{L_m} = \frac{\int_{(\pi-\theta_p)/2}^{(\pi+\theta_p)/2} \text{sen}^2(\theta d\theta)}{\int_0^{\pi} \text{sen}^2(\theta d\theta)} \quad (21)$$

donde: θ_p es el arco de polo del rotor del MSR (rad)

Con las laminaciones del rotor de los MSR modernos el arco de polo se puede aproximar al paso de polo ($\theta_p = \pi$), [3]. Con $\theta_p = \pi$ y un valor muy conservador de θ_p de $2\pi/3$, la magnitud de (L_{md}/L_m), según la ecuación (21), alcanza un valor máximo de 1 para el primer caso y un mínimo de 0,94 para el segundo. Considerando el análisis realizado con relación a los valores máximos y mínimos de los 3 factores que determinan la relación entre los momentos (M_r/M_i) de ambas máquinas, se tienen los valores dados, respectivamente, por las ecuaciones (22) y (23):

$$\text{Valor máximo: } \frac{M_r}{M_i} = \frac{\frac{L_{md}}{L_m} \left(1 - \frac{L_{mq}}{L_{md}} \right)}{\frac{L_m}{L_r}} = \frac{1 \left(1 - \frac{1}{8} \right)}{0,909} = 0,963 \quad (22)$$

$$\text{Valor m\u00ednimo: } \frac{M_r}{M_i} = \frac{\frac{L_{md}}{L_m} \left(1 - \frac{L_{mq}}{L_{md}}\right)}{\frac{L_m}{L_r}} = \frac{0,94 \left(1 - \frac{1}{7}\right)}{0,966} = 0,834 \quad (23)$$

Las ecuaciones (22) y (23), indican que el MSR, en cualquiera de las circunstancias comunes, desarrolla un momento menor que el MA para la misma magnitud de corriente. Sin embargo, hay que considerar que las p\u00e9rdidas en el MSR son menores debido a que las p\u00e9rdidas en el rotor son muy peque\u00f1as. A partir de este hecho, una aplicaci\u00f3n ventajosa de esta tecnolog\u00eda, es dise\u00f1ar el MSR para un incremento de temperatura nominal igual al del MA (frecuentemente la correspondiente a un aislamiento clase F). Dado que las p\u00e9rdidas en el rotor se eliminan pr\u00e1cticamente (que como se dijo t\u00edpicamente constituyen un 20 – 35 % en el MA), se puede lograr un sustancial incremento del momento y, proporcionalmente, de la potencia.

Otras caracter\u00edsticas del msr

Otra ventaja clave del MSR es la estructura lisa del rotor. Sin imanes permanentes, electroimanes o jaula, la construcci\u00f3n del rotor es m\u00e1s robusta que la de los MA o la de los de im\u00e1n permanente [1, 7]. Adem\u00e1s, no hay riesgo de empeoramiento permanente de sus caracter\u00edsticas operacionales debido a una potencial desmagnetizaci\u00f3n en el caso de situaciones de falla o de sobrecalentamiento. La m\u00e1quina es inherentemente segura en su operaci\u00f3n ya que, sin imanes, no hay tensiones inducidas de fuerza contra electromotriz y la protecci\u00f3n de sobre tensi\u00f3n del convertidor resulta superflua. Adicionalmente, los materiales de tierras raras para imanes permanentes son relativamente caros y pueden tener un suministro limitado para algunos mercados, debido a la concentraci\u00f3n geogr\u00e1fica de los suministradores de materia prima. Una ganancia adicional es la reducci\u00f3n de la carga t\u00e9rmica en elementos cercanos, particularmente en gabinetes cerrados.

El MSR mantiene una alta eficiencia a\u00fan a cargas parciales, lo cual es t\u00edpico de las m\u00e1quinas sincr\u00f3nicas. Esta es una caracter\u00edstica particularmente apreciada para los AFV con cargas de ventiladores o bombas centr\u00edfugas. Finalmente, estos rotores se comportan con una inercia reducida en alrededor de 30 – 50 %, debido a la ausencia de jaula y de imanes. En aplicaciones marcadamente din\u00e1micas tal como gr\u00fas, esta reducci\u00f3n significa beneficios adicionales en eficiencia energ\u00e9tica, as\u00ed como el logro de ciclos de izaje m\u00e1s r\u00e1pidos.

Evaluaci\u00f3n experimental

Una evaluaci\u00f3n experimental comparativa entre el MA y el MSR fue llevada a cabo en un trabajo desarrollado por Boglietti (2005) [11]. Estas pruebas experimentales fueron realizadas a diferentes velocidades, tanto a momento constante, como a temperatura del devanado constante.

Con el objetivo de reducir los errores, ambos motores fueron alimentados con el mismo inversor y solo las rutinas en el software fueron adaptadas en dependencia del tipo de motor. El inversor emplea modulaci\u00f3n por vectores espaciales, a una frecuencia de corte de 10 kHz.

En la tabla 1, se presentan los aspectos fundamentales de la comparaci\u00f3n experimental para una determinada velocidad de operaci\u00f3n, igual para el MA y el MSR.

Las mediciones de temperatura y de las dem\u00e1s cantidades, fueron llevadas a cabo en condiciones de estado estable, empleando el m\u00e9todo de la temperatura media del devanado por medici\u00f3n de resistencias del estator. Los momentos nominales de los motores fueron obtenidos de la placa de los mismos. Para el caso del punto de operaci\u00f3n de los dos motores mostrados en la tabla 1, la velocidad es menor que la nominal. Esto se logr\u00f3 reduciendo la frecuencia y la tensi\u00f3n aplicada por el AFV siguiendo el principio de $V/f \approx \text{constante}$.

Como puede observarse en ambos motores en la tabla 1, para igual momento, se observa un incremento de temperatura mucho menor para el MSR con respecto al MA (aproximadamente correspondiente a una clase de aislamiento menor). Esto lleva a las ventajas sealadas para este caso, siendo notable el aumento de la eficiencia. Se observa un incremento de la corriente y un factor de potencia inferior. Sin embargo, el factor de potencia pr\u00f3ximo a la unidad que introduce la presencia del AFV en el sistema, hace que la corriente en la red sea menor que la del MA (no mostrado aqu\u00ed).

Para igual incremento de temperatura, en el caso del motor de 4 kW, se muestra un aumento del momento (y de la potencia correspondiente) de 1,15 veces con respecto al MA. En el caso del motor de 2,2 kW, el aumento es de 1,09 veces. Otros estudios sobre comparaciones experimentales llegan a conclusiones similares [7,12].

	Motor de 4 kW, 400V, 50 Hz, 4 polos			Motor de 2,2 kW, 400V, 50 Hz, 4 polos		
	MA	MSR (igual M)	MSR (igual Δt)	MA	MSR (igual M)	MSR (igual Δt)
M	27,1	27,1	31,7	15,2	15,1	16,6
n	1101	1100	1100	1190	1200	1200
Δt	104	80	108	102	85	103
V	323	305	317	350	336	346
I	8,63	9,56	10,8	5,32	5,45	5,92
P_{in}	4050	3750	4480	2673	2390	2690
P_{sal}	3125	3122	3652	1894	1897	2086
η	0,772	0,832	0,815	0,709	0,794	0,775
$\cos\phi$	0,839	0,743	0,756	0,830	0,754	0,757

donde: M es el momento nominal (N-m); n es la velocidad del rotor (rpm); Δt es el incremento de temperatura ($^{\circ}\text{C}$); V es la tensión aplicada a los terminales del motor (V); I es la corriente en los terminales del motor (A); P_{in} y P_{sal} son la potencia de entrada y salida del motor, respectivamente (W); η es la eficiencia del motor; $\cos\phi$ es el factor de potencia del motor.

Comparación de características operacionales

En la tabla 2, se dan las características operacionales de motores proporcionadas por un fabricante, diseñados para la aplicación con cargas centrífugas (bombas y ventiladores) a flujo variable [13-14]. En la tabla se relacionan los valores nominales de algunos motores. Estos valores corresponden a los motores alimentados con el variador de frecuencia utilizado, que es del mismo tipo para todas las máquinas. También todos los motores fueron fabricados con aislamiento clase F. Los tres primeros (a, b, y c) presentan un Δt a potencia nominal correspondiente a un aislamiento clase B, es decir, hay un margen de temperatura de una clase (20°C), lo cual es una práctica usual entre los fabricantes.

Para la misma frecuencia de 50 Hz (a y b), el MSR con clase de eficiencia IE4, superior en este aspecto al MA IE2 [15-16], está diseñado para lograr un incremento de la eficiencia, con momentos nominales aproximadamente iguales. El mayor peso del MSR IE4 se debe a que la mayor eficiencia se logra, entre otros factores (como mejores materiales ferromagnéticos y rodamientos, diseño optimizado, etc.), con mayores volúmenes del material activo (aunque con las mismas dimensiones IEC). Esto es similar a lo que ocurre al comparar, por ejemplo, un MA de eficiencia estándar con cualquier motor similar de alta eficiencia. Por las mismas razones, se evidencia un mayor momento de inercia para los MSR de 37 y 55 kW. Como se había señalado anteriormente, la corriente nominal del MSR es mayor para momentos similares del MA, dado que el rotor se magnetiza a través del estator. Por ser el componente de magnetización del MSR elevado, el factor de potencia es bajo. Sin embargo, como también se señaló, el factor de potencia, visto desde la red, está determinado por el AFV y se acerca a la unidad.

Como se había señalado anteriormente, la corriente nominal del MSR es mayor para momentos similares del MA, dado que el rotor se magnetiza a través del estator. Por ser el componente de magnetización del MSR elevado, el factor de potencia es bajo. Sin embargo, como también se señaló, el factor de potencia, visto desde la red, está determinado por el AFV y se acerca a la unidad. Una desventaja del MSR es su menor momento máximo, pero esto raramente constituye un problema con cargas centrífugas. Para mayor frecuencia de diseño del MSR, como por ejemplo se muestra para 100 Hz en el grupo c, al ser el doble la velocidad, por las conocidas relaciones entre valores de diseño, el volumen de la máquina resulta menor, y se reduce su peso y su momento de inercia. El momento nominal, lógicamente, es la mitad que para 50 Hz. Al diferir las relaciones entre las dimensiones de la máquina, las corrientes nominales tienen valores, aunque cercanos, ligeramente mayores. El factor de potencia resulta muy semejante. Con la variante d, se alcanza un Δt_N igual al Δt de diseño del aislamiento clase F (20°C más) del MSR. Por lo tanto, se puede obtener la misma potencia nominal con menores dimensiones. Lógicamente, el momento de inercia es también menor.

La eficiencia resulta ligeramente menor. Para el caso d, no se muestra un motor de 55 kW, porque el fabricante no lo comercializa de esa potencia.

Tabla 2. Características operacionales de MA y MSR alimentados de un AFV (400 V, 4 polos, IP 55, IC 411, clase de aislamiento: F).									
a. MA IE2 (Δt_N de aislamiento clase B)									
P_{salN} (kW)	f (Hz)	n_N (rpm)	η_N (%)	$\cos\phi_N$	I_N (A)	M_N (N-m)	M_{MAX}/M_N	W (kg)	J (kgm ²)
11	50	1463	90,2	0,85	20,7	71,7	3,0	134	0,084
37	50	1479	93,0	0,84	68,3	238,0	2,9	293	0,309
55	50	1478	93,5	0,85	99,8	355,0	3,0	342	0,478
b. MSR IE4 (Δt_N de aislamiento clase B)									
11	50	1500	93,3	0,68	24,9	70,0	1,5	160	0,070
37	50	1500	95,2	0,68	82,0	236,0	1,5	428	0,575
55	50	1500	95,7	0,69	121,0	350,0	1,5	454	0,633
c. MSR IE4 (Δt_N de aislamiento clase B)									
11	100	3000	92,6	0,69	25,0	35,0	1,5	133	0,058
37	100	3000	94,8	0,67	84,6	118,0	1,5	259	0,207
55	100	3000	95,3	0,68	122,0	175,0	1,5	282	0,242
d. MSR IE4 de potencia incrementada (Δt_N de aislamiento clase F)									
11	100	3000	91,2	0,67	26,1	35,0	1,5	33	0,0081
37	100	3000	93,7	0,67	85,6	118,0	1,5	89	0,0332
Donde: M_{MAX} es el momento máximo (N-m); W es peso (kg); J es el momento de inercia; IE2 e IE4 son clases de eficiencia según la norma IEC 60034-30 (2008) [15]; y N es el subíndice que significa valores nominales.									

Estudio de caso. Análisis económico

Al ser el MSR IE4 de una eficiencia superior al MA IE2, su costo capital resulta mayor. De esta forma, es necesario, en cada aplicación, realizar un análisis económico para determinar si resulta rentable la inversión. Resulta muy común que las empresas suministradoras realicen este análisis por un método de recuperación simple, en lugar de hacerlo con un método de descuento. El error suele ser significativo. Un estudio económico se realizó en una empresa cubana, para valorar cuál variante resultaba más ventajosa desde el punto de vista económico: utilizar un conjunto AFV-MA IE2 ó AFV-MSR IE4. En esta instalación se trabaja en los tres turnos diarios. Los valores fundamentales para el estudio se muestran en la tabla 3. Se utilizó el método del valor actual neto (VAN) diferencial. Este método permite eliminar costos iguales (o casi iguales). Entre estos costos que se eliminan se encuentran: el costo capital del variador (que es el mismo para ambos casos, como anteriormente se señaló); los costos de instalación y el costo de mantenimiento. Se consideraron los ahorros por reducción del consumo de energía y por reducción de la demanda máxima, con el uso de un sistema más eficiente con el MSR IE4. Se realizó el estudio con la tarifa eléctrica que se aplica a la empresa en cuestión, según la Resolución 28-2011 del Ministerio de Finanzas y Precios de Cuba.

Tabla 3. Valores fundamentales para el estudio económico comparativo entre conjuntos AFV-MA IE2 y AFV-MSR IE4 [13-14].	
<i>Conjunto AFV – MA IE2</i>	<i>Conjunto AFV – MA IE2</i>
Potencia nominal del motor: 37 kW	Potencia nominal del motor: 37 kW
Tensión nominal del motor: 460 V	Tensión nominal del motor: 460 V
Frecuencia nominal del motor: 60 Hz	Frecuencia nominal del motor: 60 Hz
Velocidad nominal: 1775 rpm	Velocidad nominal: 1800 rpm
Factor de carga (FC) promedio: 0,8	Factor de carga (FC) promedio: 0,8
Eficiencia del conjunto a FC=0,8: 92,8 %	Eficiencia del conjunto a FC=0,8: 0,948 %
Tiempo de operación anual: 8000 h	Tiempo de operación anual: 8000 h
<i>Parámetros económicos para el estudio</i>	
Diferencia de costo entre los conjuntos: 1663 USD	Tasa de impuestos: 35 %
Tasa de descuento: 15 %	Vida útil: 10 años
Margen de riesgo: 3 %	Tipo de depreciación: lineal
Tasa de inflación: 5 %	

Los resultados, utilizando un método desarrollado en Excel para el VAN diferencial, son los siguientes:

- Flujo de caja: 762,16 USD
- VAN diferencial: 2553,05 USD
- Período de recuperación de la inversión (PRI): 2,6 años

Resulta económicamente atractivo invertir en utilizar el MSR, tanto por el VAN que resulta muy superior al costo adicional (1663 USD) del conjunto AFV-MSR IE4, como por el PRI de 2,6 años para una vida útil de 10 años. En este buen resultado influye de manera importante el hecho de que el equipo trabaja en forma continua 8000 horas. Si, por ejemplo, fueran solo 4000 horas de trabajo (con todos los otros parámetros iguales), el VAN sería solamente de 712,09 USD (mucho menor que la inversión), y el PRI sería 5,4 años (con una vida útil de 10 años). Estos valores harían que la inversión no fuera atractiva, más teniendo en cuenta las incertidumbres con relación a los parámetros económicos. Como los parámetros económicos necesarios para aplicar las técnicas de descuento están sujetos a variaciones que pueden resultar marcadas e inesperadas (máxime con las incertidumbres en la economía existentes actualmente), es siempre recomendable llevar a cabo un análisis de sensibilidad con los principales valores que influyen en los resultados. Se debe señalar que de haberse utilizado el método de la recuperación simple, la recuperación de la inversión aparentemente se produciría a los 1,5 años, lo cual significaría cometer un error de peso. Un error como este puede resultar catastrófico en los casos en que, si se aplicaran técnicas de descuento, los resultados fueran dudosos.

CONCLUSIONES

El estudio realizado sobre las características operacionales y constructivas del MSR en comparación con las del MA, evidencian que aquel presenta ventajas, especialmente en lo que se refiere a eficiencia, calentamiento, peso e inercia. Esto permite afirmar que constituyen una importante perspectiva para su uso generalizado en la industria, especialmente en la aplicación con variadores de frecuencia y, en particular, con cargas centrifugas. El elemento fundamental que permite al MSR ser más eficiente, es que las pérdidas en el rotor resultan mínimas.

Se utilizan AFV que se pueden aplicar lo mismo a los MA, que a los MSR.

Se presentó una comparación experimental entre conjuntos AFV-MSR y AFV-MA. Para igual momento, con respecto a la variante con el MA, la del MSR resulta más eficiente; para igual incremento de temperatura, con las mismas dimensiones, la variante con el MSR entrega mayor potencia útil. También puede buscarse entregar la misma potencia útil con menores dimensiones.

Resulta ventajoso económicamente utilizar un conjunto AFV-MSR con una clase de eficiencia superior a la de un conjunto AFV-MA, trabajando con una carga centrifuga.

Un análisis económico utilizando técnicas del VAN diferencial evidenció, en una empresa industrial cubana, un PRI atractiva cuando se opera en forma continua durante 8000 horas anuales

REFERENCIAS

- [1]. LENDENMANN, H.; *et al.*, "Motoring Ahead: Synchronous Motors Controlled by Variable-speed Drives are Bringing Higher Efficiency to Industrial Applications". *ABB Review*, 2005, n.1, p. 56-61, [consultado: 4 de noviembre de 2013], Disponible en: <http://www.abb.com/cawp/abbzh254/699bd5d4cb7e7706c1256dab003085da.aspx>, ISSN 1013-3119.
- [2]. VARTANIAN, R.; *et al.*, "Performance Analysis of a Rare Earth Magnet Bases NEMA Frame Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine with Different Magnet Type and Quantity". En: *Proceedings of the 2013 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*. Chicago, May 2013, p. 503-510, ISBN: 978-1-4673-4973-4.
- [3]. ABB, "Low Voltage: IE4 Synchronous Reluctance Motor and Drive Package for Pump and Fan Applications". *ABB Motors and Generators (Catalogue)*, June 2013, 48 p., [consultado: 28 de noviembre de 2013], Disponible en: <http://www.abb.com/product/seitp322/4c7b92aedbcfd1d6c1257899002d9ecf.aspx?productLanguage=es&country=00>]

- [4]. PILLAY, P.; LEVIN, V., "Mathematical Models for Induction Machines". En: *Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference*. Thirtieth IAS Annual Meeting, Orlando, Oct 1995, vol.1, p. 606-616, ISBN: 0-7803-3008-0.
- [5]. BOLOGNANI, S.; *et al.*, "Online MTPA Control Strategy for DTC Synchronous-reluctance-motor drives". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, vol.26, n.1, p. 20-28, ISSN 0885-8993.
- [6]. MOGHADDAM, R.R.; *et al.*, *Novel Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine for High Torque Density*. En: 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), Bristol, UK, March 2012, p. 1-4, ISBN: 978-1-84919-616-1.
- [7]. GAMBÀ, M.; *et al.*, "Design of a Line-Start Synchronous Reluctance Motor". En: Proceedings of the 2013 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Chicago, May 2013, p. 675-682, ISBN: 978-1-4673-4973-4.
- [8]. BOROUJENI, S.T.; *et al.*, "Fast Estimation of Line-Start Reluctance Machine Parameters by Finite Element Analysis". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, vol.26, n.1, p. 1-8, ISSN 0885-8969.
- [9]. PELLEGRINO, G.; *et al.*, *Barriers Shapes and Minimum Set of Rotor Parameters in the Automated Design of Synchronous Reluctance Machines*. En: Proceedings of the 2013 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Chicago, May 2013, p. 1204-1210, ISBN: 978-1-4673-4973-4.
- [10]. LIPO, T.A., "Synchronous Reluctance Machines - A Viable Alternative for ac Drives?". *Electric Machines and Power Systems*, 1991, vol.19, n.6, p. 659-671, [consultado: 8 de enero de 2014]; Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07313569108909556>, ISSN 0731-356X.
- [11]. BOGLIETTI, A.; *et al.*, *Experimental comparison of induction and synchronous reluctance motors performance*. En: Conf. Rec. 40th IEEE IAS Annual Meeting, Oct. 2005, vol.1, p. 474-479, ISBN: 0-7803-8803-8.
- [12]. MOGHADDAM, R.R.; *et al.*, "Theoretical and Experimental Reevaluation of Synchronous Reluctance Machine". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, vol.57, n.1, p. 6-13, ISSN 0278-0046.
- [13]. ABB, "Low Voltage: General Performance IE2 high Efficiency Motors According to EU MEPS". *ABB Motors and Generators (Catalogue)*, 2013, 24 p., [consultado: 28 de noviembre de 2013]; Disponible en: [http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/11c6e0af95bf9782c1257c010036a39a/\\$file/General_performance_IE2_motors_EU_MEPS_9AKK105789_EN_01_2013_Rev_A.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/11c6e0af95bf9782c1257c010036a39a/$file/General_performance_IE2_motors_EU_MEPS_9AKK105789_EN_01_2013_Rev_A.pdf).
- [14]. ABB, "Synchronous Reluctance Motor-drive Package for Machine Builders. High Performance for Ultimate Machine Design", *ABB Drives (Catalogue)*, 2013, 8 p., [consultado: 8 de enero de 2014]; Disponible en: <http://www.sentrledge.com/news/abb-drives-and-motors-catalogue-2013/>.
- [15]. International Electrotechnical Commission (IEC). *Rotating Electrical Machines-Part 30: Efficiency classes of single-speed, three phase, cage-induction motors*. IEC 60034-30. 1st Edition, Geneva, Switzerland: IEC, 30 Nov. 2010, ISBN: 978-2-8322-1415-2.
- [16]. International Electrotechnical Commission (IEC). *Rotating Electrical Machines-Part 31: Selection of Energy-Efficient Motors Including Variable Speed Applications-Application Guide*. IEC 60034-31. 1st Edition, Geneva, Switzerland: IEC, 26 April, 2010, ISBN: 978-2-88910-023-1.

AUTORES

Percy Rafael Viego Felipe

Ingeniero Electricista. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cuba.

e-mail: pviego@ucf.edu.cu

Julio Rafael Gómez Sarduy

Ingeniero Electricista. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cuba.

e-mail: jgomez@ucf.edu.cu

Enrique Ciro Quispe Oqueña

Ingeniero Electricista. Doctor en Ingeniería Eléctrica. Profesor Titular. IEEE *Senior Member*. Universidad Autónoma de Occidente. Colombia.

e-mail: ecquispe@uao.edu.co