



Motores sincrónicos de reluctancia asistidos por iman permanente: Un nuevo avance en el desarrollo de los motores eléctricos

Permanent magnet assisted synchronous reluctance motors: A new advance in electric motors development

Viego-Felipe Percy Rafael

Universidad de Cienfuegos, Cuba, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA)

Correo: pviego@ucf.edu.cu

Gómez-Sarduy Julio Rafael

Universidad de Cienfuegos, Cuba, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA)

Correo: jgomez@ucf.edu.cu

Sousa-Santos Vladimir

Universidad de la Costa, Programa de Eléctrica, Grupo de Investigación y Optimización Energética (GIOPEN)

Correo: vladimirsousasantos@gmail.com

Quispe-Oqueña Enrique Ciro

Universidad Autónoma de Occidente, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación en Energías (GIEN)

Correo: ecquispe@uao.edu.cu

Resumen

Se presenta un estudio sobre características fundamentales, parámetros básicos y algunas aplicaciones de los motores sincrónicos de reluctancia asistidos por imanes permanentes (PMa-SynRM), controlados por accionamientos de frecuencia variable (AFV) para cargas centrífugas, que posibilitan el ahorro. Se compararon las características de los PMa-SynRM (considerando distintos tipos de imanes), los motores sincrónicos de reluctancia (SynRM) y los motores de jaula (IM), evaluando las ventajas y limitaciones que presentan los primeros. Se partió de una explicación básica de los SynRM, porque de otra forma, se dificulta comprender los PMa-SynRM. El estudio teórico del PMa-SynRM se complementó comparando 3 conjuntos a corriente constante, demostrándose las ventajas de estos en factor de potencia, momento y potencia nominales. Se encontró que el rizado de momento del PMa-SynRM, aunque elevado y mayor que el del SynRM, es menor que el del IM. A partir de valores de la literatura y de cálculos de los autores, se compararon AFV-SynRM con AFV-PMa-SynRM (empleando imanes de tierras raras y de ferrita). Se evidenciaron las ventajas del AFV-PMa-SynRM en eficiencia, factor de potencia y momento. Se elaboró un estudio de caso en una empresa, de sustitución de un conjunto AFV-IM por uno con PMa-SynRM demostrándose, con el empleo de técnicas de descuento, la notable ventaja económica de este último, dada fundamentalmente por el menor AFV requerido.

Descriptores: Eficiencia energética en motores, motores sincrónicos de reluctancia asistidos por imanes permanentes, accionamientos de frecuencia variable, análisis económico con técnicas de descuento, comparación experimental de motores eléctricos.

Abstract

A study on the fundamental characteristics, basic parameters, and some applications of permanent magnet assisted synchronous reluctance motors (PMa-SynRM), controlled by variable frequency drives (AFV) for centrifugal loads, is presented. This system facilitates savings. PMa-SynRM (considering different types of magnets), synchronous reluctance motor (SynRM) and induction motors (IM) were compared, assessing advantages and limitations of the first. The study starts with a basic explanation of the SynRM because otherwise, the understanding of the PMa-SynRM may be difficult. The theoretical analysis of the PMa-SynRM was complemented with a comparison at constant current of the three systems, making clear the advantages of this machine in power factor, torque and output power in rated conditions. It was found that the studied motor ripple torque is higher than that of the SynRM, but is less than in the case of the IM. Using literature values and authors calculations, AFV-SynRM was compared with AFV-PMa-SynRM (using rare earth and ferrite magnets). The advantages of the AFV-PMa-SynRM in efficiency, power factor and torque was made clear. A case study in an enterprise of the replacement of an AFV-IM by an AFV-PMa-SynRM was elaborated. It was demonstrated by employing discount technics, the remarkable economic advantage of the last one, given basically by the smaller AFV required.

Keywords: Motors energy efficiency, permanent magnet assisted synchronous reluctance motors, variable frequency drives, economic analysis employing discount technics, electric motors experimental comparison.

INTRODUCCIÓN

El acelerado incremento a nivel mundial del uso de accionamientos de frecuencia variable (AFV) para controlar motores de inducción que manejan cargas de velocidad variable, ha hecho que se trabaje intensamente en el incremento de la eficiencia del sistema accionamiento-motor.

En el caso de la eficiencia del motor de inducción (IM), una solución inicial fue aplicar el AFV a motores de jaula de alta eficiencia. Sin embargo, una solución mejor se logra con el empleo del motor sincrónico de reluctancia (SynRM), en el cual se elimina el rotor con devanado de barras de aluminio o de cobre. En los motores de inducción modernos, las pérdidas asociadas al rotor alcanzan aproximadamente 20-35% de las pérdidas totales. El motor sincrónico elimina la casi totalidad de esas pérdidas.

Pero en la búsqueda de un accionamiento-motor aún más ventajoso, fundamentalmente eficiencia y el factor de potencia, se desarrolla actualmente el motor sincrónico de reluctancia asistido por imán permanente (PMA-SynRM).

En este trabajo se presenta, primeramente, un resumen de las características constructivas y operacionales de los SynRM, lo que resulta necesario para comprender el funcionamiento y características del PMA-SynRM, sus ventajas y limitaciones, que se analizan aquí.

A través de un estudio de caso en una empresa cubana, se evidencian las ventajas económicas de la utilización de un conjunto AFV- PMA-SynRM en lugar de un conjunto AFV-IM. Algunos datos son aproximados, ya que el motor PMA-SynRM no está generalizado en el mercado, especialmente para aplicaciones de potencia, encontrándose en este caso en etapa todavía experimental.

DESARROLLO

MOTOR SINCRÓNICO DE RELUCTANCIA

El SynRM usualmente se constituye por un núcleo de material ferromagnético en el estator con el mismo tipo de láminas que en el IM. Incluso, se puede usar el mismo estator para ahorrar inversión. Esto se puede observar en las Figuras 1a y b. En la Figura 1c se muestra una lámina de un estator.

Con el objetivo de reducir las pérdidas de núcleo (histéresis y corrientes parásitas) e incrementar la permeabilidad del acero (que disminuye la corriente de magnetización y mejora el factor de potencia del motor), se toman diferentes medidas. Para disminuir las pérdidas por histéresis e incrementar la permeabilidad, las láminas se construyen con mejores grados de acero al silicio (con o sin aleaciones con otras sustancias), y empleando diferentes procedimientos. Para disminuir las pérdidas por corrientes parásitas, se emplean láminas más finas (por ejemplo, 0.35 mm).

En cuanto al rotor, en la Figura 2a, se muestra un esquema de la estructura de una lámina tipo transversal; y en la 2b se observa el rotor con las láminas transversales montadas, mostrando cómo estas, en forma de disco, están apiladas y centradas en el árbol del rotor. Esta configuración se utiliza por su mayor facilidad constructiva. En la Figura 2c, se puede ver un esquema de la estructura de una lámina tipo axial, y en la 2d un rotor con las láminas axiales montadas. Con esta disposición las láminas axiales se apilan en dirección radial para formar cada polo. Como se puede observar, las láminas tienen dimensiones diferentes (Vartanian *et al.*, 2012; Hendershot, 2012).

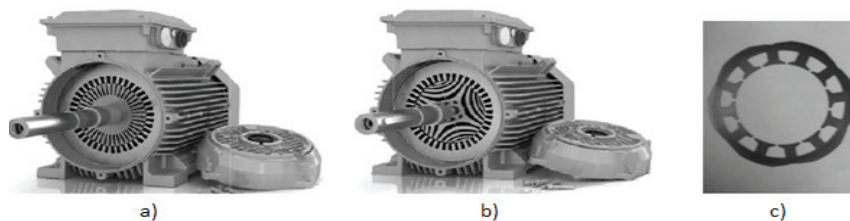


Figura 1. Motores con las láminas colocadas (ABB Motors and Generators, 2013) a) motor de inducción, b) motor sincrónico de reluctancia y c) detalle de una lámina de estator

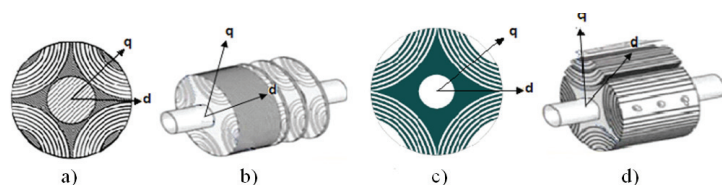


Figura 2. Esquemas que muestran los tipos de láminas para 4 polos, a) estructura de una lámina tipo transversal, b) rotor con las láminas transversales montadas, c) estructura de una lámina tipo axial y d) rotor con las láminas axiales montadas

En lo relacionado con las medidas para reducir las pérdidas de núcleo e incrementar la permeabilidad, son válidas las mismas consideraciones que para el estator.

En cada una de las figuras, se indican las direcciones de los ejes directo (eje d), y cuadrático (eje q), que identifican la dirección de mayor permeancia y de menor permeancia, respectivamente.

En la Figura 3 se halla el esquema de cómo se desarrolla el momento en un motor de este tipo.

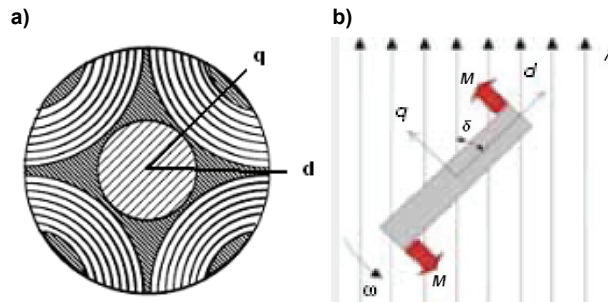


Figura 3. Esquema del desarrollo del momento (Lendenmann et al., 2011), a) ejes d y q vistos en las láminas del rotor, b) esquema del desarrollo del momento

En la Figura 3: M es el momento (N-m); ω es la velocidad (rad/s); y λ son las concatenaciones de flujo en el eje d establecidas por el campo rotatorio del estator (Wb-vuelta).

El momento se produce según el rotor, tiende a alinear su eje d con la dirección del campo magnético rotatorio del estator. La magnitud del momento que se desarrolla depende directamente de la diferencia entre las permeancias del eje d y del eje q, o lo que resulta análogo, de la diferencia ($L_d - L_q$), es decir, la diferencia entre las inductancias del eje d y del eje q. La ecuación de momento está dada por

$$M = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \{ (L_d - L_q) I_{ds} I_{qs} \} \quad (Nm) \quad (1)$$

donde

p = número de pares de polos
 L_d y L_q = inductancias en el eje d y q, respectivamente (H)
 I_{ds} e I_{qs} = corrientes en el eje d y q, respectivamente (A).

Vartanian et al. (2012) muestran en la Figura 6 de su artículo, un diagrama fasorial, que modificado, permite establecer el diagrama por fase del SynRM para acción motora lo que se observa en la Figura 4.

donde:

V_s = tensión en el estator (V)
 V_{ds} y V_{qs} = proyecciones de la tensión V_s sobre los ejes d y q, respectivamente (V)
 I_s = corriente en el estator (A)
 I_{ds} e I_{qs} = proyecciones de la corriente I_s sobre los ejes d y q, respectivamente (A)
 R_s = resistencia del estator (Ω)
 X_q y X_d = reactancias en el eje q y d, respectivamente (Ω)
 Φ = ángulo de factor de potencia (rad)

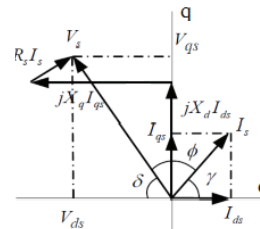


Figura 4. Diagrama fasorial por fase del SynRM

Las ecuaciones de tensión se expresan en las ecuaciones (2) y (3):

$$V_{ds} = R_s I_{ds} - \omega_r L_q I_{qs} \quad (V) \quad (2)$$

donde: ω_r es la velocidad sincrónica del rotor (rad/seg)

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_r L_d I_{ds} \quad (V) \quad (3)$$

Debido a que se trabaja con un devanado distribuido en el estator, los armónicos de flujo en el entrehierro solamente contribuyen ligeramente a un valor adicional de la inductancia de dispersión. De aquí, las ecuaciones que describen el comportamiento de la máquina, pueden derivarse de las ecuaciones convencionales de Park. En términos de las componentes d-q, el momento electromagnético es idéntico al de una máquina sincrónica convencional.

El factor de potencia ($\cos\Phi$) de un SynRM es bajo (más bajo que el de un IM de la misma potencia y velocidad). Esto se debe fundamentalmente a que, al no haber devanado en el rotor, en el estator tiene que circular una corriente de magnetización (altamente inductiva) que resulta mayor que en un IM.

En (Matsuo y Lipo, 1994) se lleva a cabo la demostración de una ecuación para obtener aproximadamente el valor máximo del factor de potencia ($\cos\Phi_{max}$) para un SynRM determinado. Esta ecuación (que resulta de un proceso de cierta complejidad) es muy dependiente de la relación L_{ds}/L_{qs} (llamada saliencia) y se identifica con el término k, es decir:

$$k = L_{ds}/L_{qs} \quad (4)$$

donde: k es la saliencia.

Es importante señalar que para máquinas con saliencias de 7 u 8 (que son elevadas), el factor de potencia máximo será solo ligeramente mayor que 0.8.

En la Tabla 1 se muestra una comparación de las características de dos motores, diseñados para la aplicación con cargas centrifugas (bombas y ventiladores), a flujo variable. Se observa el hecho de que el $\cos\phi_N$ es bastante inferior en el SynRM respecto al IM; y la eficiencia es mayor (Eficiencia en motores IE4 Super Premium y SynRM IE4-ABB, 2013 y Synchronous reluctance motor-drive package for machine builders. High performance for ultimate machine design, ABB Drives, 2013).

Como se observa en la cuarta columna de la Tabla 1, la eficiencia del SynRM es superior a la del IM. Esta mejora de la eficiencia del SynRM sobre el IM se logra fundamentalmente porque las pérdidas en el rotor se eliminan prácticamente, ya que no existirán las pérdidas de deslizamiento, porque no se tiene devanado en el rotor y dicho deslizamiento es cero.

Otras características comparativas pueden analizarse en Gamba (2013) y Moghaddam *et al.* (2010).

MOTOR SINCRÓNICO DE RELUCTANCIA ASISTIDO POR IMÁN PERMANENTE

Con el objetivo de mejorar el factor de potencia, la eficiencia y la densidad de momento del motor sincrónico de reluctancia, se plantean utilizar imanes permanen-

tes. El devanado trifásico del estator puede ser el mismo de un IM con propósitos de ahorro, pero en las ranuras del rotor se le colocan imanes permanentes. A esta topología se le nombra usualmente: "motor sincrónico de reluctancia asistido por imán permanente (PMA-SynRM)".

En la Figura 5 se muestra un esquema de este tipo de motor, con una determinada colocación, número, material magnético y dimensiones de los imanes, donde PM indica los imanes permanentes, C las costillas (segmento de material ferromagnético) y B, las barreras de flujo (constituidas por aire) (Niazi y Toliat, 2007).

La saliencia y las características de los imanes hacen variar el comportamiento del motor. Los imanes permanentes incluidos en el PMA-SynRM pueden ser de ferrita o imanes basados en tierras raras. El tipo ferrita logra menos mejoramiento del factor de potencia y de la densidad de momento (densidad remanente de flujo menor a 0.5 T) y tiene un mayor riesgo de demagnetización (debido a su menor fuerza coercitiva) que los basados en tierras raras: NdFeB (aleación de neodimio, hierro y boro), SmCo (imán de samario y cobalto), etcétera. Los de tierras raras tienen densidades de flujo remanentes de hasta alrededor de 1.3 T. Sin embargo, el tipo ferrita presenta una mayor ventaja en el costo por kg. Normalmente, los imanes de ferrita tienen un costo muy reducido, mientras los imanes a base de NdFeB (que son los imanes más poderosos) ofrecerán las mejoras mayores de factor de potencia y densidad de momento, pero el costo aumenta significativamente, en alrededor de 25 veces (Spargo, 2014).

Tabla 1. Características operacionales de IM y SynRM alimentados del AFV (400 V, 4 polos, IP 55, IC 411, clase de aislamiento: F)

IM 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
SynRM 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

donde: n es la velocidad del rotor (rpm); I es la corriente en los terminales del motor (A); P_{sal} es la potencia de salida (W); η es la eficiencia; $\cos\phi$ es el factor de potencia; M_{MAX} es el momento máximo (N-m); W es el peso (kg); J es el momento de inercia (kgm²); IE2 e IE4 son clases de eficiencia según la norma IEC 60034-30 (2008) y N es el subíndice que significa valores nominales

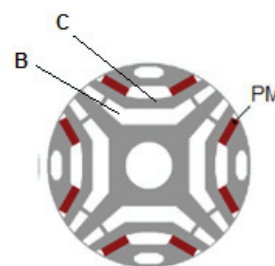


Figura 5. Esquema que muestra un corte transversal del rotor de un PMA-SynRM

En el PMA-SynRM, con los imanes colocados de manera que establecen un flujo magnético en la dirección del eje q , el momento desarrollado consiste de dos componentes:

- El momento de reluctancia y
- el momento debido a los imanes permanentes insertados.

EFECTO DE LOS IMANES PERMANENTES

El momento producido por los imanes permanentes se determina de la ecuación (1), añadiendo el término $\lambda_{PM} I_{ds}$, como se observa en la ecuación (5).

$$M = \frac{3}{2} p \{ (L_d - L_q) I_{ds} I_{qs} + \lambda_{PM} I_{ds} \} \quad (Nm) \quad (5)$$

donde λ_{PM} son las concatenaciones de flujo provocadas por los imanes permanentes (Wb-vuelta).

La Figura 6 muestra el diagrama fasorial de acción motora, donde la fuerza contra electromotriz está dada por la ecuación (6) (Vartanian *et al.*, 2012)

$$E_{PM} = p \omega_r \lambda_{PM} \quad (V) \quad (6)$$

En el caso del SynRM, V_d es siempre negativo y V_s queda en el segundo cuadrante (ver Figura 4). Sin embargo, para el PMA-SynRM en que aparece E_{PM} , según sea su valor, V_s se desplazará más o menos hacia el primer cuadrante y, en consecuencia, Φ y $\cos\Phi$ variarán. Por ejemplo, si E_{PM} aumenta, Φ disminuye y $\cos\Phi$ aumenta (Figura 6).

La densidad de momento puede mejorarse en aproximadamente 45% usando ferrita y 100% utilizando NdFeB (Spargo, 2014).

La colocación de los imanes en el eje q , lleva a la reducción de L_q , debido a que el flujo magnético en esa dirección se opone al flujo del estator. Como resultado, la relación de saliencia aumenta, lo que se evidencia,

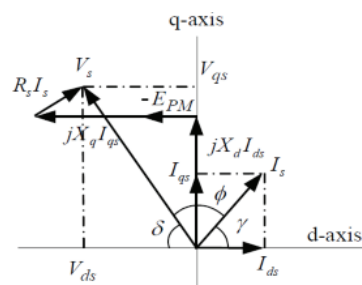


Figura 6. Diagrama fasorial de acción motor de PMA-SynRM

tanto si se expresa como L_d/L_q , como si se hace utilizando $(L_d - L_q)$. Hay que tener en cuenta que existe una ligera caída en las concatenaciones de flujo en el eje d , debida a la saturación de los dientes en el estator y en las costillas del rotor, con la consiguiente pequeña reducción de L_d . De todas formas, la disminución de L_q es siempre mucho mayor que la de L_d .

Con la inclusión de los imanes permanentes, el factor de potencia de estas máquinas puede aumentar de alrededor de 0.5 hasta 0.7 – 0.8 empleando ferrita, y puede sobrepasar 0.9 con el empleo de NdFeB (Vartanian y Toliyat, 2009).

Este comportamiento actúa en la dirección de aumentar la eficiencia de la máquina. La inclusión de imanes permanentes también permite una reducción de la capacidad en VA del AFV y por tanto, de las dimensiones. Esto lleva lógicamente a una reducción del costo. Si se utiliza ferrita, el costo de los imanes es pequeño.

En resumen, los principales beneficios de adoptar la PMA-SynRM son los siguientes (Spargo, 2014):

- Densidad de momento y potencia incrementada.
- Mayor eficiencia.
- Aumento del momento por unidad de volumen.
- Incremento del factor de potencia.
- Menor capacidad en VA del AFV.
- Reducción de sus dimensiones.
- Menor costo del mismo.

Sin embargo, estas máquinas presentan potenciales desventajas:

- Costo incrementado y algunas dificultades de fabricación.
- Riesgo de demagnetización magnética (especialmente con ferritas) (Barcaro *et al.*, 2011; Guglielmi, 2013).
- Pérdidas magnéticas (a las velocidades más altas).

A pesar de las posibles limitaciones, es indiscutible que el PMA-SynRM es una mejora importante del SynRM.

UNA COMPARACIÓN DEL PMA-SynRM CON IM Y SynRM

Una comparación de diferentes características del PMA-SynRM, el Syn-RM y el IM realizan Vartanian y Toliyat (2009), que permite comprender mejor las ventajas del PMA-SynRM.

La comparación se lleva a cabo con la utilización de estatores convencionales de IM y no de estatores diseñados específicamente para los motores de reluctancia

(Syn-RM y PMA-SynRM), lo que reduce el costo de estas máquinas (Barcaro *et al.*, 2011; Guglielmi, 2013).

Se investigan las características de un PMA-SynRM al que se le optimiza el rotor para un estator de frame NEMA, de 36 ranuras, utilizado en un IM de 7.5 hp (5.6 kW). Los resultados comparativos se obtienen con un análisis de elementos finitos. En la Figura 7 se muestra el modelo de rotor del PMA-SynRM optimizado para el estudio (Vartanian y Toliyat, 2009).

En la Tabla 2 se muestra la comparación de algunos parámetros nominales de estas tres máquinas. La comparación se hace para la misma corriente nominal del estator del IM para mantener las pérdidas de cobre de las tres máquinas iguales y asegurarse que los devanados están adecuadamente cargados.

En la Tabla 2 se evidencia que la potencia de salida de PMA-SynRM es 33% mayor que la del IM. Se muestra también que el factor de potencia es más reducido en el SynRM que en el motor de inducción (y evidentemente muy bajo), mientras que ese problema se resuelve en el PMA-SynRM, dando un valor del factor de potencia superior al de IM. Se puede observar también que el PMA-SynRM desarrolla más momento que el SynRM y el IM; y que el rizado de momento es mayor en el PMA-SynRM que en el SynRM, lo que se debe a momentos parásitos que son producidos por la presencia de los imanes permanentes. Sin embargo, aun así, resulta menor que en el IM.

La Tabla 3 muestra los resultados comparativos entre un SynRM, un PMA-SynRM con imán de ferrita y otro del mismo tipo, pero con un imán de tierras raras (NdFe35H) (Vartanian *et al.*, 2012). Los valores de las corrientes y de las tensiones, a partir del diagrama de la Figura 6, son valores máximos. Los autores calcularon valores que se añadieron en la Tabla 3. La comparación se realiza para un valor máximo de ($I_{s\max}$) de 8.5 A para los tres motores ($I_{s\text{rms}} = 6$ A). Se puede observar el aumento del factor de potencia, la eficiencia, la potencia de salida y el momento siguiendo el orden mencionado arriba. Deben reiterarse las diferencias en costos entre ambos tipos de imanes y en cuestiones operacionales entre ambos tipos de máquina.



Figura 7. Modelo del rotor optimizado para el estudio

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

ESTUDIO DE CASO. ANÁLISIS ECONÓMICO

Los motores PMA-SynRM poseen un costo capital superior a los SynRM por los aspectos que se han analizado anteriormente y ambos mayores que el costo de los IM. Sin embargo, como se analiza su operación en un conjunto con los accionamientos de frecuencia variable, que su costo depende fundamentalmente de la corriente que tienen que manejar, la valoración económica debe realizarse en función de ambos. Además, hay que considerar la tarifa eléctrica de la organización donde van a trabajar, los parámetros económicos donde van a depender sus gastos (impuestos, vida útil, inflación, etcétera).

De esta forma, es necesario, en cada aplicación en las empresas en que van a operar, realizar un análisis económico estricto para determinar si resulta rentable la inversión. Es imprescindible utilizar para estos estudios métodos de descuento (valor presente neto (VPN), período de recuperación de la inversión (PRI), tasa interna de retorno (TIR), etcétera. Sacar conclusiones empleando métodos simples de recuperación de la inversión (lo que resulta aún muy común) puede conducir a errores significativos.

Se realizó un estudio económico en una empresa cubana para valorar qué variante resultaba más ventajosa desde el punto de vista económico: si utilizar un conjunto AFV-IM, AFV-SynRM o AFV-PMA-SynRM para accionar bombas centrífugas. En esta instalación se trabajó en los tres turnos diarios. Los valores fundamentales para el estudio se muestran en la Tabla 4. Se utilizó el método del valor presente neto (VPN) diferencial. Este método permite eliminar costos iguales (o casi iguales).

Entre los costos que se eliminan se encuentran los costos de instalación, el costo de mantenimiento, el costo del estator (que en este caso será el mismo), etcétera.

Se consideraron los ahorros por menor costo capital (costo diferencial), reducción del consumo de energía y reducción de la demanda máxima. A la empresa en cuestión, se le aplica la tarifa eléctrica M1D, según la Resolución 28-2011 del Ministerio de Finanzas y Precios de Cuba.

En la Tabla 4, se dan los parámetros fundamentales para el estudio (ABB Motors and Generators, 2013; ABB Drives (Catalogue), 2013), incluyendo los parámetros económicos.

De acuerdo con lo que se expresó en la introducción, en el caso de la Tabla 4, los datos de eficiencia y factor de potencia se han extrapolado del SynRM y de otros motores PMA-SynRM de pequeña potencia existentes

Tabla 2. Algunos parámetros nominales de las máquinas

Parámetro	IM	SynRM	PMa-SynRM
Velocidad nominal (rpm)	1730	1800	1800
Corriente nominal por fase (A)	10.5	10.5	10.5
Momento nominal (N-m)	30.9	32.0	39.8
Saliencia	N/A	3.3	5.4
Rizado del momento (N-m)	20.0	8.0	16.0
Potencia nominal de salida (kW)	5.6	6.0	7.5
Factor de potencia ($\cos\phi$)	0.8	0.55	0.85

Tabla 3. Parámetros de los motores SynRM y PMa-SynRM para máximo momento por ampere a 1800 rpm

Parámetros de las máquinas	Tipo de máquina		
	SynRM	PMa-SinRM	PMa-SinRM
Tipo de imán	--	Ferrita	NdFe35H
R_s (Ω)	0.9	0.9	0.9
L_{ds} (H)	0.039	0.032	0.030
L_{qs} (H)	0.019	0.015	0.012
Saliencia	2.053	2.13	2.5
γ ($^\circ$)	45	38	34
λ_{PM} (Wb)	0	0.05	0.16
$I_{ds\ max}$ (A)	6	6.7	7
$I_{qs\ max}$ (A)	6	5.2	4.75
$I_{s\ max}$ (A)	8.5	8.5	8.5
$V_{ds\ max}$ (V)	-38	3.1	53
$V_{qs\ max}$ (V)	94	86	83
$V_{s\ max}$ (V)	101.39	86.06	98.48
Factor de potencia ($\cos\phi$)	0.39	0.64	0.91
Momento (N-m)	2.2	3.2	5.6
Velocidad (rpm)	1800	1800	1800
Potencia de salida (kW)	414.69	603.19	1055.58
Potencia de entrada (kW)	506.58	704.79	1144.04
Eficiencia	0.82	0.86	0.92

en el mercado. Un análisis de sensibilidad demostró que una pequeña variación de la eficiencia y del factor de potencia, no tienen un peso importante en los resultados, ya que predominan los costos iniciales, el consumo de energía y el tiempo de operación. Además, se verificó que coincidían con los intervalos planteados en Spargo (2014).

En lo que se refiere a los parámetros económicos, se seleccionaron de acuerdo con las siguientes consideraciones:

- *Tasa de impuestos:* Es la tasa de impuestos sobre la ganancia. El valor está establecido en la Ley 113, ar-

tículo 97, de 21 de noviembre 2012, República de Cuba.

- *Tasa de descuento:* Se determina a partir de lo establecido por la Dirección General de Tesorería del Banco Central de Cuba (BCC), según sea la rama de la economía, los sectores que se desean estimular, etcétera. El caso que nos ocupa es de 15%. Como ejemplo en otro sector, el valor es de 7 a 9% (para 60 meses) en la industria azucarera.
- *Tasa de inflación:* En un análisis empleando VPN diferencial, la inflación es solo importante en lo que se refiere al costo de la energía eléctrica. El valor seleccionado de 5% es el promedio que ocurrió en los úl-

Tabla 4. Valores fundamentales para el estudio económico comparativo entre conjuntos AFV-IM y AFV-SynRM

Conjunto AFV – IM IE2	Conjunto AFV – SynRM IE4
Potencia nominal del motor: 37 kW	Potencia nominal del motor: 37 kW
Potencia de entrada del motor: 39.79 kW	Potencia de entrada del motor: 38,5 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
Factor de potencia del motor: 0.84	Factor de potencia del motor: 0.64
Eficiencia nominal del motor: 93.0 %	Eficiencia nominal del motor: 96.2%
Corriente nominal del motor: 59.5 A	Corriente nominal del motor: 75.5 A
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: 8040 h	Tiempo de operación anual: 8040 h
Conjunto AFV – PMa-SynRM IE4	Parámetros económicos para el estudio
Potencia nominal del motor: 37 kW	Diferencia de costo entre los conjuntos 1 y 2: 1663 USD
Potencia de entrada del motor: 37.41 kW	Diferencia de costo entre los conjuntos 1 y 3: 581 USD
Tensión nominal del motor: 460 V	Tasa de impuestos: 35%
Frecuencia nominal del motor: 60 Hz	Tasa de descuento: 15%
Factor de potencia del motor: 0.89	Margen de riesgo: 3%
Eficiencia nominal del motor: 98.9%	Tasa de inflación: 5%
Corriente nominal del motor: 52.82 A	Vida útil: 10 años
Velocidad nominal: 1800 rpm	Tipo de depreciación: lineal
Factor de carga (FC) promedio: 0.8	Tarifa eléctrica: M1D
Eficiencia del conjunto a FC=0.8: 96.8%	
Tiempo de operación anual: 8040 h	
Principales resultados económicos	
Recuperación de la inversión con el conjunto AFV-SynRM en lugar del de IM: 2.75 años	
Valor presente neto con el conjunto AFV-SynRM en lugar del de IM: 2553 USD	
Recuperación de la inversión con el conjunto AFV-PMa-SynRM en lugar del de IM: 0.97 años	
Valor presente neto con el conjunto AFV-PMa-SynRM en lugar del de IM: 3426 USD	

timos 6 años. Este valor puede incrementarse o incluso llegar a ser negativo, si se reduce el costo, como puede ocurrir con el incremento del uso de la energía renovable.

- *Margen de riesgo:* Se le aplica a la tasa de descuento, como un margen de seguridad.
- *Vida útil:* Para los equipos eléctricos, esta suele estar entre 6 y 15 años, dependiendo del equipo y del ambiente, fundamentalmente. Se tomó un valor intermedio. En el caso del PMa-SynRM, la presencia de imanes no la afecta negativamente, ya que tanto los imanes con componentes de tierras raras (NdFeB) como de ferrita, conservan su magnetismo en cir-

cunstancias normales, durante un largo número de años. Solo las influencias externas, como el calentamiento o los campos magnéticos muy intensos pueden provocar su desmagnetización.

Como se puede observar en la Tabla 4, la utilización del conjunto AFV-PMa-SynRM en lugar del conjunto AFV-IM resulta ampliamente la mejor solución. Esto se debe fundamentalmente a la reducción del costo capital diferencial respecto al IM de 1663 USD a 581 USD, que a su vez está dado principalmente por la reducción del costo del AFV por la disminución de la corriente, según se muestra en la Tabla 4.

Como los parámetros económicos necesarios 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.

Para este caso, se realizó un análisis de sensibilidad cuyos resultados se muestran en las Figuras 8 y 9. Se puede observar que la rentabilidad de las propuestas para ambos conjuntos se encuentra en rangos aceptables ante variaciones de la tasa de descuento y la tasa de inflación. No se consideraron variaciones del margen de riesgo, ya que este afecta la tasa de descuento y queda incluido al variar esta.

CONCLUSIONES

Se realizó un estudio de las características constructivas y operacionales del PMA-SynRM. Se determinaron las ventajas y desventajas de esta máquina respecto al IM y el SynRM. En los tres casos, el estudio se concentró en la aplicación con AFV para cargas centrífugas a velocidad variable. También se consideró que se utiliza el mismo estator del IM para ahorrar costos. Estos análisis demostraron la superioridad del PMA-SynRM en casi todos los aspectos, en especial los fundamentales: eficiencia, factor de potencia, momento y costo. El elemento fundamental que permite al PMA-SynRM ser más eficiente, es que las pérdidas en el rotor resultan despreciables.

Además, por sus altos valores de eficiencia y factor de potencia, la corriente es menor lo que, para una mis-

ma potencia de salida, también reduce los valores nominales del AFV, sus dimensiones y costo.

Los autores realizaron un análisis económico utilizando técnicas de descuento (VPN diferencial y PRI), en una empresa industrial cubana, para determinar los ahorros de una sustitución de un conjunto AFV-IM por uno AFV- PMA-SynRM. El sistema trabaja 3 turnos diarios. Se demostró que con el AFV- PMA-SynRM se logra un ahorro importante: el VPN aumenta de 2553 USD con el primero a 3426 USD con el propuesto. El PRI disminuye de 2.75 años a 0.97 años. Un peso importante en los ahorros lo tiene la reducción del costo de AFV, de 1663 USD a 581 USD, debido a la disminución de la corriente. La rentabilidad de las propuestas para ambos conjuntos se encuentra en rangos aceptables ante variaciones de la tasa de descuento y la tasa de inflación.

Este tipo de solución constituye una importante contribución al ahorro en la industria.

REFERENCIAS

- Barcaro M., Bianchi N., Magnussen F. Permanent-magnet optimization in permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor for a wide constant-power speed range. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, volumen 59 (número 6), septiembre de 2011: 495-2502.
- Eficiencia en motores IE4 Super Premium y SynRM IE4 - ABB, 25 de jun. 2013, [en línea] [fecha de consulta: 2 de nov. de 2015]. Disponible en: <https://www.google.com/cu/search?q=Clases+de+eficiencia+según+norma+IEC++IE2%2C+IE4&cad=h>.
- Gamba M. *et al.* Design of a line-start synchronous reluctance motor, en: *Proceedings of the 2013 IEEE International Electric*

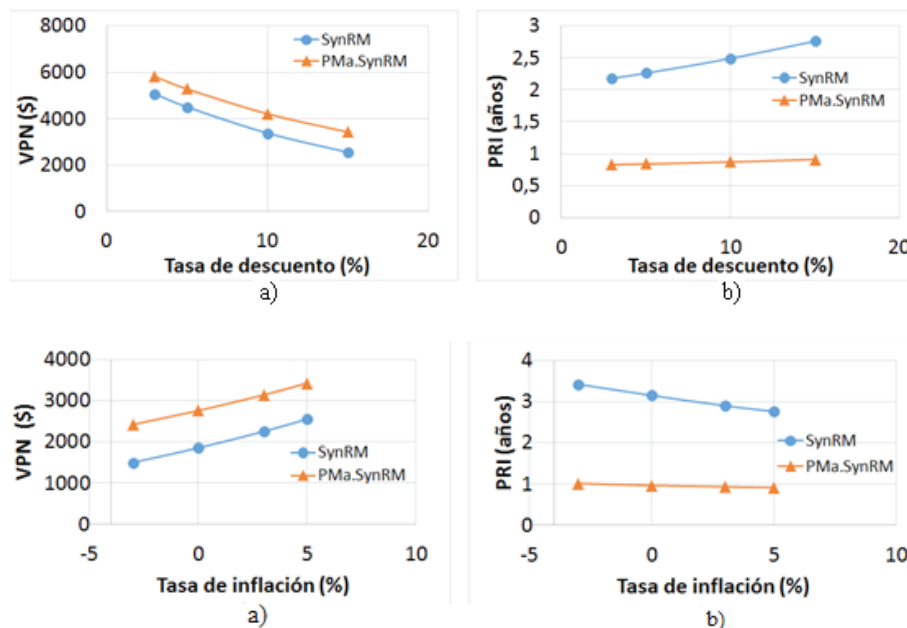


Figura 8. Curvas de análisis de sensibilidad para los dos casos: conjuntos AFV-SynRM y AFV-PMA-SynRM en lugar del conjunto AFV-IM a) VPN (\$) contra tasa de descuento (%) y b) PRI (años) contra tasa de descuento (%)

Figura 9. Curvas de análisis de sensibilidad para los dos casos: conjuntos AFV-SynRM y AFV-PMA-SynRM en lugar del conjunto AFV-IM a) VPN (\$) contra tasa de inflación (%), b) PRI (años) contra tasa de inflación (%)

- Machines and Drives Conference (IEMDC) (2013, Chicago, Illinois, USA), IEEE, mayo de 2013, pp. 675-682.
- Guglielmi P. *et al.* Permanent-magnet minimization in pm-assisted synchronous reluctance motors for wide speed range. *IEEE Transactions on Industry Applications*, volumen 49 (número 1), enero/febrero de 2013: 31-41.
- Hendershot J.R. Electric machine design. Tutorial lectures. Lecture 23: Reluctance Synchronous Motors, Motor Engineer 2012 [en línea] [fecha de consulta: 25 de marzo de 2016]. Disponible en: <https://www.google.com/cu/search?q=electric+machine+design+course.+Reluctance+Synchronous+machine+JR+Hendershot+cad=h>
- Lendenmann H. *et al.* Motoring ahead. Synchronous motors controlled by variable-speed drives are bringing higher efficiency to industrial applications, ABB Review, enero de 2011: 56 -61.
- Low voltage IE4 synchronous reluctance motor and drive package for pump and fan applications, ABB Motors and Generators, junio 2013, 48 p. [en línea] [fecha de consulta: 28 de diciembre de 2015]. Disponible en: www.abb.com/product/seitp322/4c7b92aedbcfd1d6c1257899002d9ecf.aspx?productLanguage=es&country=00.
- Low voltage general performance IE2 high efficiency motors according to EU MEPS, ABB Motors and Generators, 2013, 24 p. [en línea] [fecha de consulta: 28 de noviembre de 2013]. Disponible en: [www02.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/11c6e0af95bf9782c1257c010036a39a/\\$file/General%20performance%20IE2%20motorsEUMEPS9AKK105789EN01_2013%20Rev%20A.pdf](http://www02.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/11c6e0af95bf9782c1257c010036a39a/$file/General%20performance%20IE2%20motorsEUMEPS9AKK105789EN01_2013%20Rev%20A.pdf).
- Matsuo T. y Lipo T.A. Rotor design optimization of synchronous reluctance machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, volumen 9 (número 2), junio de 1994: 359-365.
- Moghaddam R.R., Magnussen F., Sadarangani C. Theoretical and experimental reevaluation of synchronous reluctance machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, volumen 57 (número 1) enero de 2010: 6-13.
- Niazi P. y Toliat A.H.A. Online parameter estimation of permanent-magnet assisted synchronous reluctance motor. *IEEE Transactions on Industrial Application*, volumen 43 (número 2), marzo/abril de 2007: 609-615.
- Spargo C.M. Synchronous reluctance technology-Part II, School of Electrical and Electronic Engineering, Newcastle University, UK, diciembre de 2014 [en línea] [fecha de consulta: 30 de marzo de 2016]. Disponible en: <https://www.dur.ac.uk/directory/profile/?id=14715>.
- Synchronous reluctance motor-drive package for machine builders. High performance for ultimate machine design, ABB Drives, 2013: 8 [en línea] [fecha de consulta: 8 de enero de 2016]. Disponible en: <http://www.sentrledge.com/news/abb-drives-and-motors-catalogue-2013/>.
- Synchronous reluctance motor-drive package for machine builders. High performance for ultimate machine design, ABB Drives (Catalogue), 2013, 8 p. [en línea] [fecha de consulta: 8 de enero de 2014]. Disponible en: <http://www.sentrledge.com/news/abb-drives-and-motors-catalogue-2013/>.
- Vartanian R., Toliat H.A., Akin B., Poley R. Power factor improvement of synchronous reluctance motors (SynRM) using permanent magnets for drive size reduction, en: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), (2012, Orlando, Florida, USA) IEEE, febrero 2012, pp. 628-633.
- Vartanian R. y Toliyat A.H.A. Design and comparison of an optimized permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor (PMA-SynRM) with an induction motor with identical NEMA Frame stators, en: Electric Ship Technologies Symposium (ESTS) (2009, Baltimore, USA), IEEE, abril de 2009, pp. 107-112.

Citación sugerida:

Citación estilo Chicago

Viego-Felipe, Percy Rafael, Julio Rafael Gómez-Sarduy, Vladimir Sousa-Santos, Enrique Ciro Quispe-Oqueña. Motores sincrónicos de reluctancia asistidos por imán permanente: Un nuevo avance en el desarrollo de los motores eléctricos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIX, 03 (2018): 267-277.

Citación estilo ISO 690

Viego-Felipe P.R., Gómez-Sarduy J.R., Sousa-Santos V., Quispe-Oqueña E.C. Motores sincrónicos de reluctancia asistidos por imán permanente: Un nuevo avance en el desarrollo de los motores eléctricos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XIX (número 3), julio-septiembre 2018: 267-277.

SEMBLANZAS DE LOS AUTORES

Viego-Felipe Percy Rafael. Recibió el título como Ingeniero Electricista en 1965, por la Universidad Central de Las Villas, Cuba. En el año 1978 obtuvo el grado de Doctor en Ciencias Técnicas (Ph.D.) por la Universidad Central de Las Villas, Cuba. Actualmente pertenece al Centro de Estudios CEEMA de la Universidad de Cienfuegos, Cuba. Se especializa en las áreas de máquinas eléctricas, calidad de la energía y eficiencia energética.

Gómez-Sarduy Julio Rafael. Recibió el título de Ingeniero Electricista en 1986, por la Universidad Central de Las Villas, Cuba. En el año 2006 obtuvo el grado de Doctor en Ciencias Técnicas (Ph.D.) por la Universidad Central de Las Villas. Actualmente pertenece al Centro de Estudios CEEMA de la Universidad de Cienfuegos, Cuba. Se especializa en las áreas máquinas eléctricas, calidad de la energía y eficiencia energética en sistemas eléctricos industriales.

Sousa-Santos Vladimir. Se tituló como Ingeniero Electricista en 2004 en la Universidad Central de Las Villas, Cuba. Obtuvo su Máster en Eficiencia Energética en 2006, por la Universidad de Cienfuegos y el Doctorado en Ciencias Técnicas (Ph.D.) por la Universidad Central de Las Villas en 2014. Actualmente trabaja en el Grupo de Investigación GIOPEN de la Universidad de la Costa (CUC), Colombia. Se especializa en máquinas eléctricas, calidad de la energía y eficiencia energética.

Quispe-Oqueña Enrique Ciro. Recibió el título como Ingeniero Electricista en 1980, por la Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. Máster en Ingeniería Eléctrica en 1994, Máster en Automatización industrial en 1997 y Ph.D en el año 2011 en la Universidad del Valle, Colombia. Dirige el Grupo de Investigación en Ingeniería de la Universidad Autónoma de Occidente, Colombia. Es especialista en máquinas eléctricas y accionamiento, calidad de la energía y gestión energética.