Influencia de la Geometría del Rotor en la Corriente del Estator de MSIP(s)

J.A. Güemes Alonso, A.M. Iraolagoitia Iriondo

Departamento de Ingeniería Eléctrica
E.U.I.T.I., Universidad del País Vasco
Plaza de la Casilla, 3, 48012 Bilbao (España)
Telef.: +34 946014363, 946014367, fax: +34 946014300
e-mail: joseantonio.guemes@ehu.es, ana.iraolagoitia@ehu.es

Resumen. En este trabajo, se analiza la influencia del tamaño de los imanes en el comportamiento de un motor síncrono de imanes permanentes (MSIP) de baja velocidad, con los imanes montados en la superficie del rotor. Se comparan dos motores con distintas geometrías del rotor (modificación del tamaño de los imanes) e igual estator y se observa la influencia en las características principales de la máquina. Hemos comprobado que para un motor de 5 kW, al aumentar el volumen de los imanes en un 66 %, el valor de la corriente del estator se reduce en un 49 %. El estudio del comportamiento del motor se realiza utilizando el método de elementos finitos (MEF). El método constituye una aplicación industrial al diseño y modelado de este tipo de máquinas y puede ser útil para determinar fórmulas precisas para el cálculo de la corriente del estator, par, factor de potencia y rendimiento de la máquina, cuando se modifica el tamaño de los imanes.

Palabras llave. Imanes permanentes, método de elementos finitos, modelado, motor síncrono, simulación.

1. Introducción

Los motores de imanes permanentes de ca puede dividirse en dos grandes grupos: los motores brushless dc (NLDC) que tienen forma de onda de la fuerza electromotriz trapezoidal y los motores síncronos de imanes permanentes (MSIP) que tienen forma de onda de la fuerza electromotriz senoidal.

El interés de los MSIP(s) está creciendo en un amplio abanico de aplicaciones. Las razones principales del incremento de aplicaciones de los MSIP(s) son en primer lugar, la eficiencia y las bajas pérdidas del rotor y en segundo lugar, la reducción del precio de los imanes (NdFeB).

En términos generales, los MSIP(s) son preferibles a los motores asíncronos, en todas aquellas aplicaciones que requieran una velocidad constante con arranque suave y funcionamiento silencioso.

En ingeniería eléctrica, normalmente las máquinas eléctricas son representadas por un circuito equivalente. El conocimiento de los diferentes parámetros del circuito equivalente de la máquina, nos permite conocer su comportamiento, bajo ciertas condiciones de funcionamiento, por aplicación de las leyes de los circuitos eléctricos.

El MEF, constituye una herramienta muy importante para los ingenieros eléctricos, en el análisis del comportamiento de máquinas eléctricas, al permitir conocer con un margen de error acotado, los diferentes parámetros de la máquina, así como su comportamiento en situaciones extremas de funcionamiento.

En el análisis por elementos finitos de motores síncronos de imanes permanentes, el primer paso es simular el comportamiento de la máquina "en reposo" (sin corriente por los devanados del estator), lo que nos permite conocer el valor de la "fuerza electromotriz" y estimar el valor de la corriente por los devanados del estator para la potencia útil de la máquina. En el valor de la "fuerza electromotriz", influye de una forma notable la geometría del rotor y el tamaño de los imanes.

La optimización de la geometría del rotor es muy importante, dado que podemos conseguir el mismo par con distintos valores de la corriente por los devanados del estator, disminuyendo en consecuencia el precio del controlador del motor.

En los últimos años, se han publicado distintos trabajos en los que se estudia la influencia de la forma y tamaño de los imanes (geometría del rotor) en el: a) diseño de circuitos magnéticos [1], b) estudio de ruidos y vibraciones de motores [2], y c) comportamiento de motores eléctricos [3] – [6].

En este trabajo se comparan dos motores con distintas geometrías de rotor e igual estator y comprobamos su influencia en las características principales de la máquina.

De acuerdo con lo anterior, el objetivo del trabajo es observar cómo influye el tamaño de los imanes (modificación de la geometría del rotor) en las

características del motor. La simulación y el estudio del comportamiento de la máquina, se realiza utilizando el MEF..

El método propuesto, puede ser muy útil para determinar fórmulas precisas, de aplicación industrial, que permitan calcular la corriente del estator, par, factor de potencia y rendimiento de la máquina, cuando se modifica el tamaño de los imanes.

2. Método

La "fuerza electromotriz en reposo" y por fase, en los devanados del estator, puede determinarse por medio de la expresión:

$$E_q = \pi\sqrt{2}NfK_w\phi \qquad (1)$$

Donde:

- E_q fuerza electromotriz inducida por el flujo de excitación del rotor (sin considerar la reacción de inducido);
- N número de espiras en serie por fase del devanado del estator;
- f frecuencia;
- K_w factor de devanado del estator;
- ϕ flujo máximo.

Considerando la relación existente entre el flujo y el vector potencial magnético ***A.***

$$\phi = \oint \boldsymbol{A}dl \qquad (2)$$

Para modelos planos en dos dimensiones, la ecuación (1) puede ponerse en la forma:

$$E_q = 2\pi\sqrt{2}\ NfAP \qquad (3)$$

Donde P es la profundidad del modelo (longitud del paquete de chapas).

Por otra parte, como es conocido, el par electromagnético de un motor síncrono trifásico de polos salientes puede determinarse por la ecuación:

$$T_e = \frac{3p}{\omega}\left[E_q I_q + \left(X_d - X_q\right)I_d I_q\right] \qquad (4)$$

Donde:

- p número de pares de polos;
- ω velocidad angular;
- X_d reactancia directa;
- X_q reactancia en cuadratura;
- I_d intensidad directa;
- I_q intensidad en cuadratura.

Al primer término de la ecuación (4), se denomina "par alineado con los imanes" y al segundo "par de reluctancia".

En los motores síncronos de imanes permanentes, con los imanes montados en la superficie del rotor, las reactancias directa y en cuadratura pueden admitirse iguales.

$$X_d = X_q = X_s \qquad (5)$$

En estas condiciones el par de reluctancia es nulo y la ecuación (4) puede escribirse:

$$T_e = \frac{3p}{\omega}E_q I_q \qquad (6)$$

De acuerdo con lo anterior, la potencia electromagnética de la máquina puede determinarse por medio de la expresión:

$$P_e = T_e\frac{2\pi n}{60} = 3E_q I_q \qquad (7)$$

Donde n es la velocidad del motor en rpm.

Finalmente la potencia útil se calcula, restando a la potencia electromagnética, las pérdidas en el hierro y las pérdidas mecánicas.

Las pérdidas mecánicas se calculan en función de la velocidad del rotor y las pérdidas en el hierro a partir de la densidad de flujo magnético en los elementos del modelo de elementos finitos [7].

De la ecuación (7) observamos que la potencia de un motor síncrono de imanes permanentes, con los imanes montados en la superficie, la potencia útil depende de la corriente y la "fuerza electromotriz en reposo". En consecuencia para conseguir un determinado valor de potencia/par de la máquina, puede ser interesante diseñar máquinas que tengan un alto valor de la "fuerza electromotriz en reposo", disminuyendo de esta forma la corriente por los devanados del estator y en consecuencia reduciendo, previsiblemente la potencia y, el costo del dispositivo controlador del motor.

Los factores que influyen en el valor de la "fuerza electromotriz en reposo" (1), son el número de espiras, la frecuencia y el flujo. La frecuencia viene determinada por la velocidad de la máquina. A su vez, en el valor del flujo influye la geometría del estator, la longitud de entrehierro, la geometría del rotor y, la forma, tamaño y dirección de imantación de los imanes.

En este trabajo estudiamos como influye en las características de la máquina, el valor del flujo (modificando el volumen de los imanes) permaneciendo constante el número de espiras.

Respecto a la forma de los imanes es aconsejable que tengan la cara interior y, principalmente la exterior de forma circular (radio similar al del rotor), pero esto encarece notablemente su precio, por lo que utilizaremos imanes de sección rectangular.

3. Motor

Las características principales del motor objeto de estudio son:

- Motor trifásico
- Tensión de entrada del controlador: 400 V
- Frecuencia de la tensión del controlador: 50 Hz
- Frecuencia de la tensión del motor: 12.5 Hz
- Velocidad nominal (referida a 12.5 Hz): 125 rpm
- Número de imanes permanentes: 12; p = 6
- Número de ranuras del estator: 72
- Potencia útil: 5 kW
- Tipo de imanes: NdFeB.

La figura 1 muestra un cuarto de la geometría del motor.

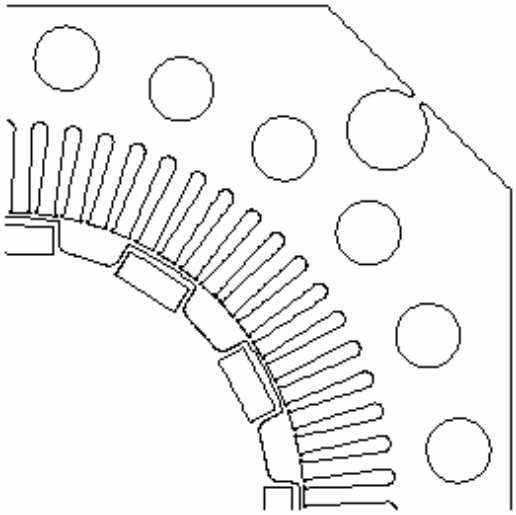


Fig. 1. Motor (rotor A)

Las características de par, potencia, rendimiento y factor de potencia del motor indicado, son comparadas con las del motor que se obtiene al sustituir el rotor por el mostrado en al figura 2 (permaneciendo constante la longitud de entrehierro). El volumen de los imanes se incrementa en un 66 %, (permaneciendo constante la altura y longitud de los imanes; el sentido de imantación y, el tipo de imanes).

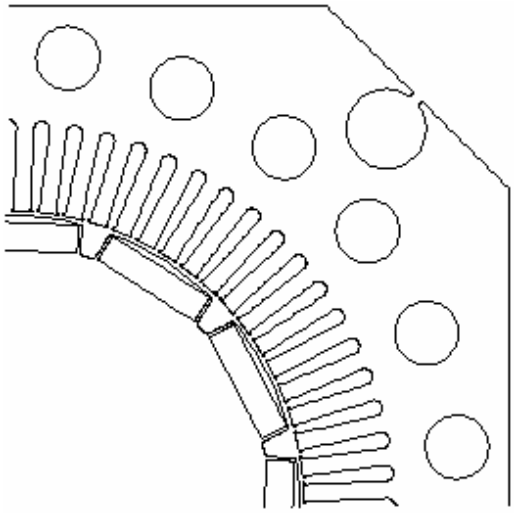


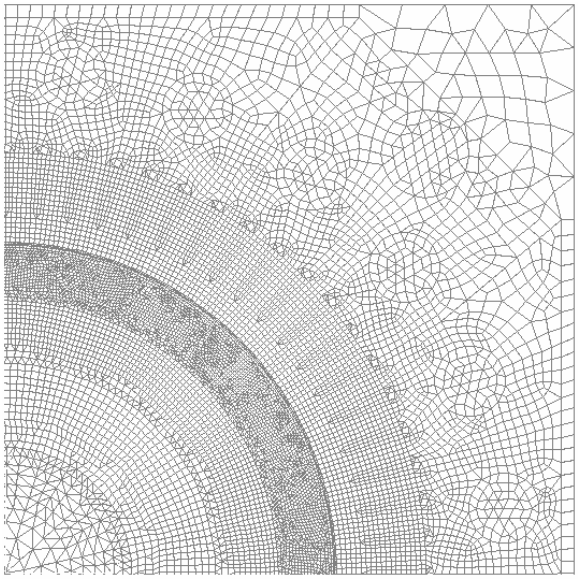
Fig. 2. Motor (rotor B)

La simulación y estudio del comportamiento de los motores (rotor A y rotor B), se realizan mediante el método de elementos finitos utilizando modelos en dos dimensiones.

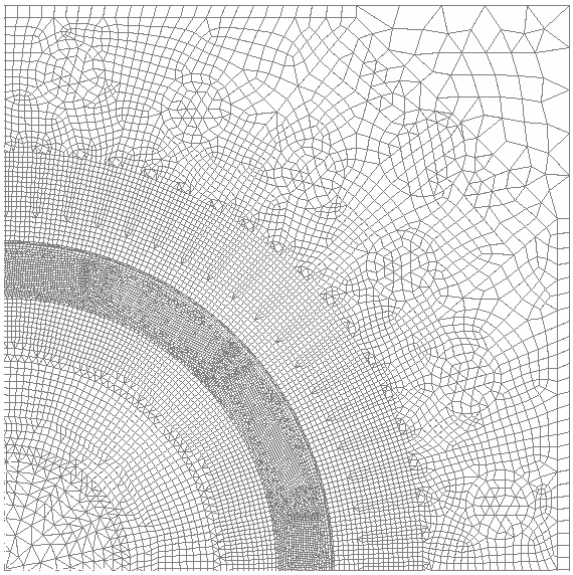
4. Modelo

El modelo de elementos finitos está constituido por una sección recta del motor y un espacio de aire que lo rodea.

La figura 3, muestra el mallado utilizado.



a) Rotor A



b) Rotor B

Fig. 3. Malla de elementos finitos (cuarto del modelo)

Las propiedades de los materiales se definen como sigue:

- Para el aire (entrehierro, comienzo ranuras del rotor y aire exterior) y el cobre (bobinado del estator) por medio de la permeabilidad magnética.

- Para el núcleo magnético del estator y rotor por medio de la curva BH, a la frecuencia de trabajo, del material con el que están construidas la chapas magnéticas.
- Los imanes por medio de su permeabilidad magnética y campo coercitivo en sus dos componentes (H_{CX} y H_{CY}).

Las excitaciones se definen por medio de las densidades de corriente en los devanados del estator.

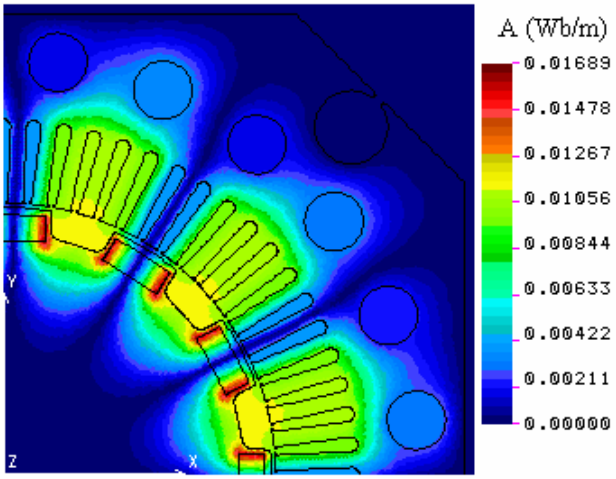
La condición de contorno es vector potencial magnético nulo en la periferia del modelo.

El tipo de análisis realizado es magnetostático.

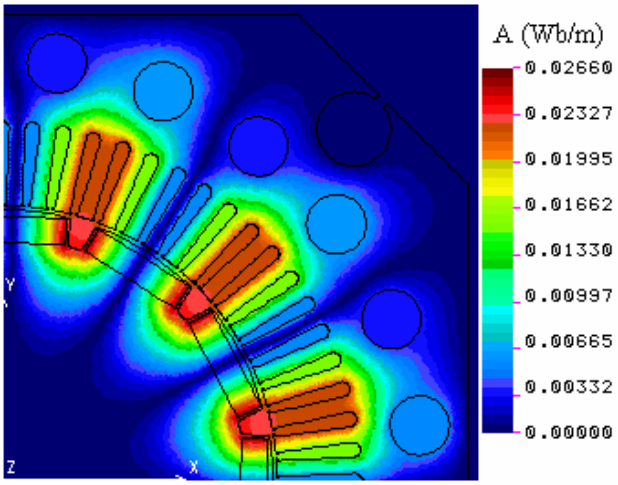
5. Análisis

En primer lugar se determina la "fuerza electromotriz" por fase, inducida en los bobinados del estator por los imanes (E_q), para lo cual se realiza la simulación del comportamiento de la máquina "en reposo".

Una vez realizado el análisis se tiene los mapas de vector potencial magnético mostrados en la figura 4.



a) Rotor A



b) Rotor B

Fig. 4. Vector potencial magnético "en reposo"

Podemos observar que el vector potencial magnético, se incrementa de una forma importante en el motor con el rotor B respecto al motor con el rotor A. El valor de la "fuerza electromotriz" por fase, calculada por medio de la ecuación (3), es 110 V para el primer motor y 224 V para el segundo motor (incremento del 204 %).

La potencia electromagnética esperada de cada uno de los motores, para valores de $0 < I_q < 20$ A, calculada de acuerdo con la expresión (7), se muestra en la figura 5.

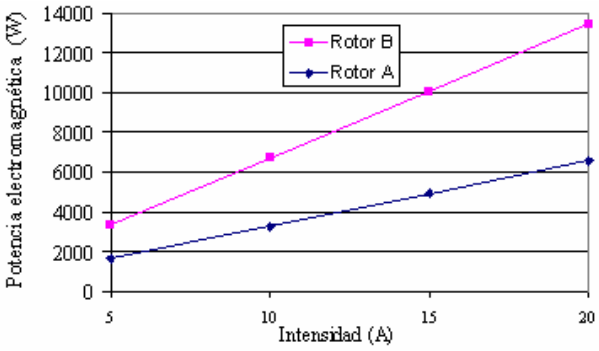


Fig. 5. Potencia electromagnética

Del gráfico anterior, se deduce que para una potencia útil de 5 kW y una vez estimadas las pérdidas mecánicas y en el hierro, la intensidad esperada es de 15,6 A para el primer motor y de 7,6 A para el segundo motor (reducción en el valor de la corriente del 49 %).

La figura 6, muestra el par electromagnético calculado de acuerdo con la expresión (6), para valores $0 < I_q < 20$ A.

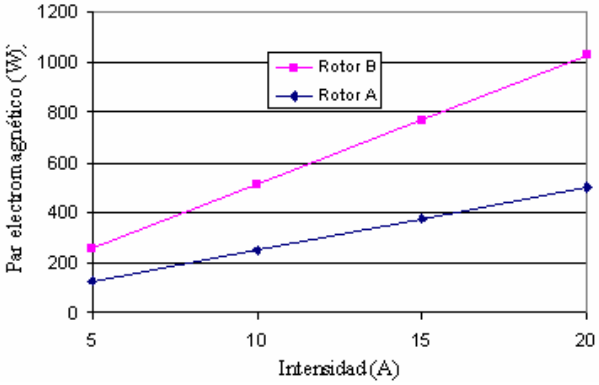


Fig. 6. Par electromagnético

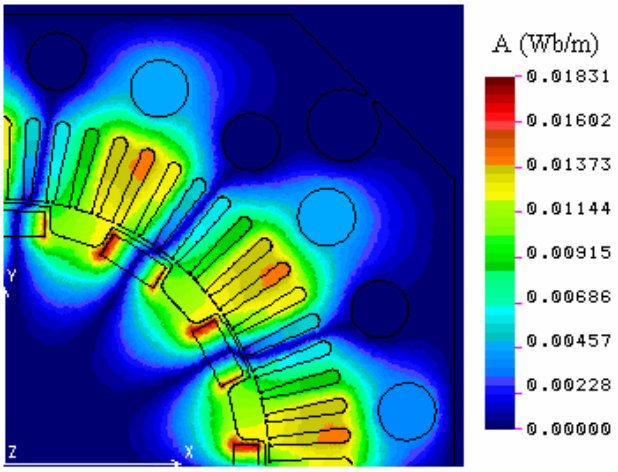
En segundo lugar, se ha simulado el comportamiento del motor (rotor A y B) para valores I_q de 5, 10, 15 y 20 A.

Una vez realizados los análisis para los valores de corriente indicados, se determina la fuerza electromotriz resultante en carga, por medio de la ecuación:

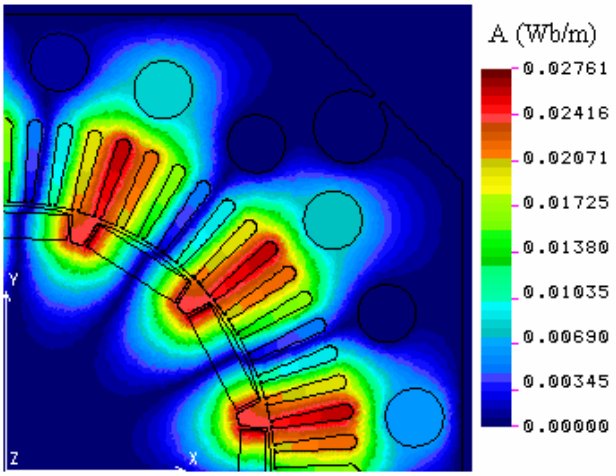
$$E_R = 2\pi\sqrt{2}\, NfA_R P \qquad (8)$$

Donde A_R es el valor máximo del vector potencial magnético resultante (debido a los imanes y corriente por el estator).

La figura 7 muestra la distribución del vector potencial magnético, en ambos motores, para 15 A.



a) Rotor A



b) Rotor B

Fig. 7. Vector potencial magnético en carga (I_q = 15 A)

El ángulo de retraso del rotor respecto del campo resultante, se determina por medio de la ecuación:

$$\delta_\phi = arcos \frac{\phi_q}{\phi_R} \tag{9}$$

Donde ϕ_R es el flujo resultante (debido a los imanes y corrientes).

La figura 8 muestra la variación del ángulo de retraso del rotor respecto del campo magnético resultante, en función de la corriente, para los dos motores analizados.

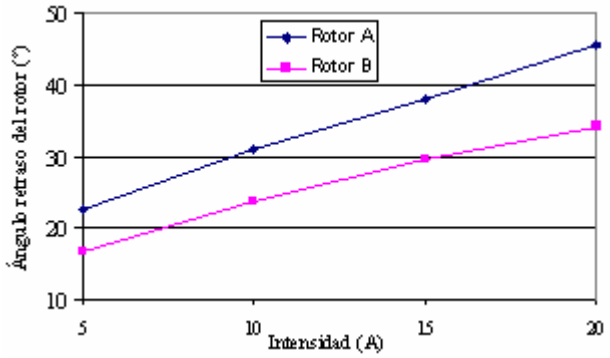


Fig. 8. Angulo de retraso del rotor.

La reactancia síncrona, se determina por medio de la expresión:

$$X_s = X + X_{cb} \tag{10}$$

Donde:

- X reactancia de reacción de inducido más la reactancia de dispersión del paquete de chapas;
- X_{cb} reactancia de dispersión de cabezas de bobina.

La reactancia de dispersión de cabezas de bobina, puede calcularse por medio de la expresión [8]:

$$X_{cb} = 4\pi f \cdot p \cdot n_{pf} \cdot Z_n^2 \cdot \lambda_{cb} \cdot L \tag{11}$$

Donde:

- f frecuencia;
- p número de pares de polos;
- n_{pf} número de ranuras por fase y polo;
- Z_n número de conductores por ranura;
- λ_{cb} permeancia por unidad de longitud;
- L longitud del inducido.

Finalmente el factor de potencia se determina por la ecuación:

$$\cos\varphi = \frac{E_q + RI_q}{U} \tag{12}$$

La figura 9 muestra la variación del factor de potencia, en función de la corriente, para cada uno de los motores estudiados.

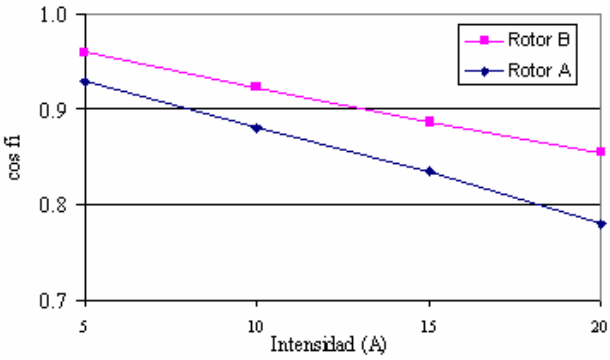


Fig. 9. Factor de potencia

Podemos observar que para la potencia deseada, el factor de potencia es 0,82 (muy bajo) para el primer motor (rotor A) y de 0,93 para el segundo motor (rotor B).

La tensión de alimentación por fase, es de 180 V para el primer motor y de 270 V para el segundo.

De acuerdo con lo indicado anteriormente podemos afirmar que para el mismo valor de potencia (5 kW), la intensidad esperada por los bobinados del estator en el motor con el rotor B es un 49,7 % menor que en el motor con el rotor B, mientras que el factor de potencia con el rotor B es un 13,5 % superior que con el rotor A.

6. Conclusiones

En este trabajo se ha simulado el comportamiento de un motor síncrono de imanes permanentes, observando como se modifican las características del motor al modificar el tamaño de los imanes.

Hemos verificado que en el prototipo inicial y para una potencia de 5 kW, el factor de potencia es muy bajo y la tensión de alimentación es inferior a los 400V.

Al incrementar el volumen de los imanes en un 66 % respecto de su tamaño en el prototipo inicial, la corriente del estator se reduce para la misma potencia en un 49 %.

El método expuesto en este trabajo puede ser muy útil para determinar fórmulas fiables al cálculo de la corriente del estator, factor de potencia y rendimiento de la máquina, cuando se modifica el tamaño de los imanes, la longitud de entrehierro o el número de espiras.

Referencias

[1] T. Nakata y N. Takahasshi, "New design method of permanent magnets by using finite element method", IEEE Trans.Magnetics, vol. 6, no. 6, pp. 2494-2497, noviembre 1983.

[2] G.H. Jang y D.K. Lieu, "The effect of magnet geometry on electric motor vibration", IEEE Trans. Magnetics, vol. 27, no. 6, pp. 5202-5204, noviembre 1991.

[3] D. Pavlik, V.K. Garg, J.R. Repp y J. Weiss, "A finite element technique for calculating the magnet sizes and inductances of permanet magnet machines", IEEE Trans. Energy Conversion", vol. 3, no. 1, pp. 116-122, marzo 1988.

[4] Seong-Pyo Hong, Han-Sam Cho, Hae-Seok Lee y Hyun-Rae Cho, "Effect of the magnetization direction in permanent magnet on motor characteristics", IEEE Trans. Magnetics, vol. 35, no. 3, pp. 1321-1234, mayo 1999.

[5] Maxime R. Dubois, Henk Polider y Jan A. Ferreira, "Magnet shaping for minimal magnet volume in machines", IEEE Trans. Magnetics, vol. 38, no. 5, pp. 2985-2987, septiembre 2002.

[6] Yong Li, Jibin Zou, y Yongping Lu, "Optimun design of magnet shape in permanent-magnet synchonous motors", IEEE Trans. Magnetics, vol. 39, no. 6, pp. 3523-3526, noviembre 2003.

[7] Jacek F. Gieras y Mitchell Wing, Permanent Magnet Motor Technology, Ed. Marcel Dekker, New York 2002, pp. 551-556.

[8] J. Corrales Martín, Cálculo industrial de máquinas eléctricas. Tomo I, Marcombo Bouxareu Editores. Barcelona 1982.