

Optimización Del Rotor En Un Motor Superconductor De Inducción

Emiliano Daniel Camacho Lespron (1), Adrián González Parada (2)

1 Licenciatura en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Guanajuato | camachoemiliano5@gmail.com

2 Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato | gonzaleza@ugto.mx

Resumen

Al tratar el tema de máquinas rotativas, existe un gran campo de trabajo que tratar, este proyecto se refiere específicamente en la optimización del rotor en un motor superconductor de flujo axial, el cual tiene diferentes características en común con los motores de materiales usuales como aluminio, cobre y acero ELECTRICO, pero algunas de ellas son bastante particulares debido al comportamiento de los materiales y la geometría utilizada en tal trabajo. Lo que se trata en este estudio, es el análisis de un ángulo específico en las ranuras DEL ROTOR, que se elaboran en este componente de la máquina, de tal manera que se obtenga una mejora en la oscilación del torque y una REDUCCION en la distorsión armónica.

Abstract

When speaking about rotative machines, there is a huge field to work on, in this work, is referring specifically to the optimization of the rotor in a superconductive axial motor, which has several characteristics in common with a regular-materials motors like aluminum, copper and electrical steel, but some of them are quite particular due to the materials behavior and geometry used in this project. This study, is referred to analysis of a specific angle in the rotor skew of this component in the rotative machine, so it gets an improvement in the torque oscillation and decreasing in the harmonic distortion.

Palabras Clave

Flujo Axial 1; Torque 2; Distribución Magnética 3; Ranura 4; Angulo 5

INTRODUCCIÓN

El rotor es una parte fundamental de un motor eléctrico, de este depende el funcionamiento de la máquina, este puede ser fabricado de diferentes maneras y diseños, dependiendo de la aplicación que vaya a tener la máquina, debido a esto no todos los motores tienen las mismas características de operación y construcción.

El objetivo principal en el diseño de un motor de inducción, es crear una distribución uniforme de campo magnético en el estator, el cual genera las fuerzas inducidas en el rotor.

Una de las características es el ranurado del rotor, estas ranuras ayudan a la máquina a romper la inercia en el momento del arranque. En los motores de inducción del tipo de jaula de ardilla, los rotores se encuentran ranurados con el objeto de mejorar su desempeño en operación, en este proyecto, estas ranuras serán simuladas como barras conductoras en una configuración axial. Algunos efectos que se pueden reducir con el uso de estas ranuras, es la reducción del ruido magnético, el torque llega a tener un mejor comportamiento y con el ranurado adecuado, se puede llegar a una eliminación de armónicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Barras Conductoras Estos conductores regularmente son fabricados con materiales que tengan buenas propiedades conductoras, para así poder tener el nivel de pérdidas menor posible, como lo son el cobre y el aluminio, pero aun estos materiales en sus estados más puros llegan a presentar ciertos niveles de pérdidas. Con el uso de materiales superconductores y con una resistencia cercana a cero, las pérdidas en el rotor se reducen considerablemente. La curva V-I para materiales superconductores puede ser descrita con la ecuación (1):

$$E(I) = E_c \left(\frac{I}{I_c}\right)^N \quad (1)$$

Donde $E(I)$ es la caída de voltaje a lo largo del superconductor, E_c es el campo eléctrico a $1.0 \mu V/cm$, I es la corriente en el superconductor y N un exponente. Entre más alto sea el valor de la exponencial N , indica un mejor comportamiento del material. Un buen material superconductor, tendrá un exponente N alto. Las pérdidas por centímetro longitudinal, es igual al producto de $E(I)$ por I . Generalmente, I es una fracción de I_c y un valor mayor de N , se traduce en menores pérdidas. [1]

Existe una posibilidad para eliminar el efecto de un armónico del campo, si las ranuras centrales del rotor, no está estrictamente en paralelo a los ejes de la máquina, sino crean un eje espiral a lo largo de la pieza, esta modificación de usa específicamente en máquinas de tamaño pequeño o medio, por razones técnicas de producción. [2] Esto se pretende implementar en el motor a desarrollar para eliminar el efecto que se presenta en motores convencionales.

Reglas aplicadas al diseño del rotor.

Diferentes autores [3], [4], [5] muestran que para un cierto número de fases existen cierto número de combinaciones en número de polos y de ranuras. Si S , es el número de ranuras en el estator y S_r es el número de ranuras en el rotor, o en el caso actual el número de cintas conductoras, se deben seleccionar considerando los siguientes requerimientos:

1. Para evitar ruidos y vibraciones, la relación entre S y S_r deberá ser tal que $S-S_r \neq \{\pm 1, \pm 2, \pm (p\pm 1), \pm (p\pm 2)\}$.
2. Para evitar puntos muertos y picos en la corriente de arranque, la diferencia $S-S_r$ deberá ser diferente de cualquier múltiplo de $3p$.
3. S_r debe ser diferente a los números impares de barras del rotor.

De acuerdo a estudios previos, las ranuras con ángulos de inclinación se usan con objeto de suministrar el torque de arranque cuando los

motores tienen igual número de ranuras en el estator y en el rotor, como menciona Müller-Tomfelde en su tesis doctoral [6].

Algunos otros efectos que se pueden reducir con el adecuado ángulo de inclinación de estas ranuras, como pueden ser la reducción del ruido magnético, mejoras en el torque y en algunos casos específicos y con el ángulo preciso, se puede lograr una reducción o completa eliminación de efectos armónicos. Tal armónico no forman parte en los voltajes inducidos o en la generación de ruido y vibración. Debido a la inclinación de las ranuras, las corrientes de corto circuito y de torque tienden a disminuir.

Este ángulo está estrictamente relacionado a las características de diseño y construcción de las maquinas, la inclinación de estas ranuras aumenta la resistencia propia del motor debido a que existe un alargamiento de la ranura.

Por definición, el paso polar (ρ_p) es el espacio que ocupa un polo en el embobinado, esto referido al caso de que el embobinado ocupe una superficie de 360° , se define como:

$$\rho_p = \frac{360^\circ}{P} \quad (2)$$

El paso de bobina (ρ) se refiere a la distancia entre dos superficies de una bobina individual en el embobinado, definido como:

$$\rho = \frac{\theta_m}{\rho_p} \quad (3)$$

Donde P = Numero de polos, θ_m = Grados mecánicos de la bobina.

Con estos factores, el análisis nos puede llevar al factos de paso (k_p) el cual está definido por:

$$k_p = \sin \frac{v\rho}{2} \quad (4)$$

Finalmente, el factor de paro para un armónico específico, definido como la proporción entre el flujo para una configuración de ranuras anguladas y el factor para un patrón no ranurado está definido como:

$$k_p = \frac{\sin\left(\frac{\lambda\gamma}{2}\right)}{\lambda\frac{\gamma}{2}} \quad (5)$$

Donde v = Nivel de distorsión armónica, λ = Pares de polos, γ = Ángulo de inclinación.

Flujo magnético óptimo y curva de torque.

Una estimación del comportamiento de la oscilación del torque en operación del motor considerando el cambio de la energía en el entrehierro y considerando la posición del rotor, se puede dar por la relación [6]:

$$T_{ripple} = \frac{2p}{\pi} m N k_w \phi I_a \quad (6)$$

Donde ϕ es el flujo magnético en el entrehierro, I_a es la corriente del estator, p el número de polos, m el número de fases de la máquina, N el número de vueltas en serie por fase, y k_w el factor de embobinado definido como el producto del factor de distribución (k_d) por el factor de paso (k_p).

Para el cálculo de la oscilación del torque, es necesario definir el flujo magnético que cruza a través del entrehierro. La densidad de flujo en cualquier punto a través puede ser calculado por definición, asumiendo $\lambda \ll r$, como se detalla a continuación [7]:

$$B_\lambda = \frac{\mu_0 e_{mmf}}{\lambda} \sin \frac{v}{2} \theta \quad (7)$$

Donde e_{mmf} es la fuerza magnetomotriz y λ es el espesor del entrehierro como se muestra en la Figura 1.

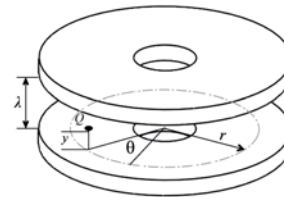


Figura 1. Parámetros de distribución en una máquina de flujo axial.

De (7) y asumiendo un flujo magnético constante por polo, el flujo magnético correspondiente por polo puede ser estimado como se muestra a continuación [8]:

$$\Phi_{pole} = \left(\frac{D_o^2}{D_i^2} - 1 \right) \frac{D_i^2}{4p} B_\lambda \quad (8)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a las reglas aplicadas al diseño del rotor y considerando las características que se tienen previas a la construcción de este, se construyeron los rotores en aluminio, para poder trabajar sobre estos.

Teniendo un estator de 8 polos, y una configuración trifásica, se obtiene que:

$$S - S_r \neq \{\pm 1, \pm 2, \pm(p \pm 1), \pm(p \pm 2)\}$$

$$S - S_r \neq \{\pm 1, \pm 2, \pm 6, \pm 7, \pm 9, \pm 10\}$$

$$S - S_r \neq \{\text{cualquier múltiplo de } 3p\}$$

$$S - S_r \neq \{24, 48, 72, 96 \dots\}$$

Obteniendo con estos cálculos diferentes resultados, entre ellos $S_r=16$ y 32 , los cuales fueron construidos y evaluados junto con un disco uniforme de aluminio, sumergiendo el rotor y estator en nitrógeno líquido, para poder alcanzar una temperatura alrededor de los 77 K para el funcionamiento de los materiales superconductores (BISCCO2223) de los cuales está compuesto el estator.

Al evaluar estos rotores, se encontró que, debido al espaciamiento entre barras, cada modelo presentaba diferentes comportamientos a específicos campos magnéticos aplicados.

Los resultados obtenidos de estas pruebas se muestran a continuación.

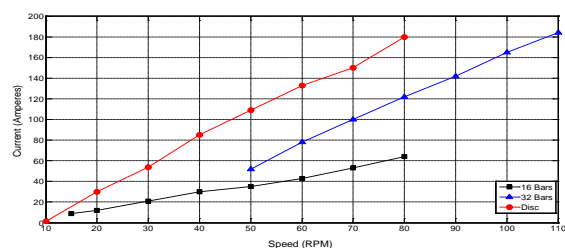


Figura 2. Gráfica Comparativa de velocidad de giro de los Rotores con diferente número de barras.

Como se muestra en la Figura 2, se puede notar que el desempeño del rotor de 32 barras, comparado con el de 16 barras es claramente superior, una vez evaluado ambos con diferentes magnitudes de corriente cuyo rango va de los 15 a los 110 amperes. Esto debido a la geometría, diseño del estator y rotor y acoplamiento magnético entre las piezas.

En el cálculo de los ángulos para las ranuras, se obtuvieron ángulos los cuales se encontraban alrededor de 1 grado de inclinación respecto a la vertical, sin embargo, se realizaron simulaciones en un software de elemento finito, en donde se proyectó una extensión longitudinal de la máquina y se le dieron las características como son curvas B-H, permeabilidad relativa de cada material, corriente circulante y conexión de las fases, el cual nos demuestra que para un ángulo de inclinación de 3 grados, se mejora la estabilidad de la oscilación del torque.

Le comparación geométrica de los rotores evaluados se puede ver a continuación (Figura 3).



Figura 3. Comparativa de un rotor común y uno mejorado.

Una vez teniendo definidos los ángulos, la simulación se creó dibujando la distribución de la máquina en el software, como se muestra a continuación (Figura 4).

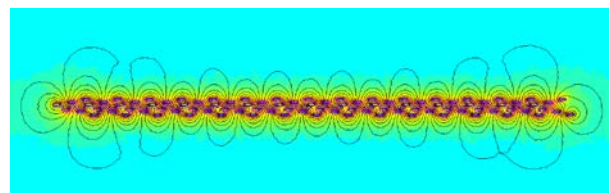


Figura 4. Simulación de la distribución flujo magnético en la máquina y representación de la Densidad de Flujo.

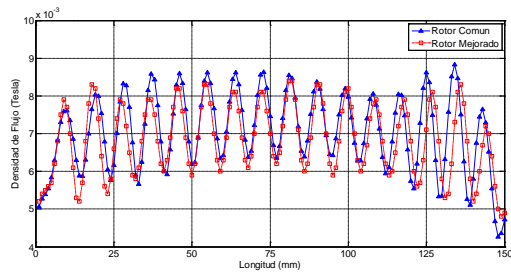


Figura 5. Comportamiento de la Densidad de Flujo a través del rotor.

Se puede apreciar en la densidad de flujo, que cruza a lo largo del rotor que, en la curva representativa del rotor con las ranuras anguladas, se presenta una oscilación menor del torque que en diseño previo, esto nos ayuda a tener una distribución de campo más uniforme y una menor oscilación del torque en la máquina.

Haciendo un análisis del torque generado debido a la distribución magnética en ambos rotores, el resultado obtenido de acuerdo a (6), aplicando a los datos obtenidos de la Figura 5, las curvas de oscilación del torque obtenidas se muestran a continuación.

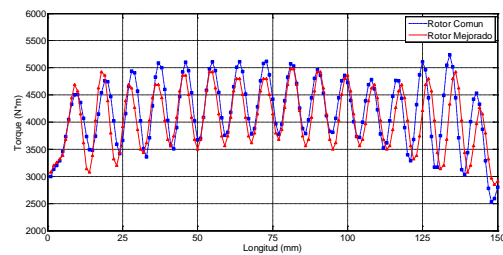


Figura 6. Oscilación del Torque debido a la Distribución Magnética.

En la Figura 6 se observa, de igual manera, el torque es ligeramente menor, pero con una distribución más uniforme, lo cual mejora la calidad de trabajo de la máquina, ayudando inclusive en mejorar la vida útil de ésta.

CONCLUSIONES

El análisis realizado en el software de Elemento Finito nos permite ver los resultados gráficos obtenidos, con el ángulo dado en las barras del rotor, la mejora en la densidad de flujo es de magnitudes pequeñas pero la calidad de la oscilación del torque que se ve reflejada nos indica cierta mejora en el desempeño del motor, dando con esto un desempeño más alto con consumos menores de energía.

Se pretende de la misma manera, en un futuro, fabricar el rotor optimizado en materiales puramente superconductores, de manera que se logre corroborar los resultados de este estudio y obtener una máquina de materiales superconductores en todas las piezas que involucran la operación de un motor.

REFERENCIAS

- [1] Swarn Singh Kalsi, "Applications of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment", IEEE Press, 2011, USA.
- [2] Handbook of Electric Motors, Hamid A. Toliyat, Gerald B. Kliman; CRC Press.
- [3] Z.Q. Zhu, D. Howe, "Influence of Design parameters on cogging torque in permanent magnet machines", IEEE transaction on energy conversion, vol 15, No. 4, pp 407-412, Dec. 2000.
- [4] K. Atallah, J. Wang, D. Howe, "Torque-Ripple minimization in modular permanent-magnet brushless machines", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol 39, No. 6, pp 1689-1695, Dec 2003.
- [5] A. Gonzalez-Parada, F.J. Espinosa-Loza and R. Bosch-Tous, "Inductive method for determination of the critical current I_c of HTS stators in axial flux configuration", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol 22, No. 3, pag. 9500104, Jun. 2012.
- [6] S L Nau, "The Influence Of The Skewed Rotor Slots On The Magnetic Noise Of Three-Phase Induction Motors", WEG Motores Ltda, EMD 1-3, Conference Publication No. 44, IEEE 1997, Brazil.