

## Optimización de Estatores para Motores Superconductores de Flujo Axial

Adrián González Parada\*, Rafael Guzmán Cabrera\*, Miguel Ángel Gómez Martínez\*, Oscar Gerardo Ibarra-Manzano\* y José Antonio Gordillo Sosa\*\*.

### RESUMEN

El desarrollo de máquinas eléctricas superconductoras ha estado encaminado principalmente a diseñar y construir motores superconductores con el campo magnético en configuración radial, como los motores tradicionales, por lo que el diseño y construcción de máquinas eléctricas rotativas en configuración de flujo axial ha venido a ser una alternativa para el diseño y construcción de este tipo de motores. En el presente trabajo se presentan los cálculos preliminares para la optimización del estator de un motor superconductor en configuración de flujo axial, basados en las ecuaciones generales de potencia de las máquinas rotativas en configuración de flujo axial. Se realiza la construcción, optimización y evaluación de modelos de estatores en geometrías de 4, 6 y 8 polos, con cintas superconductoras de alta temperatura de Bismuto. Los resultados obtenidos muestran la viabilidad del diseño implementado, lo cual se comprueba por medio de una disminución significativa de la corriente de operación del motor superconductor.

### ABSTRACT

The development of superconducting electrical machines has been designed primarily to design and build engines with the superconducting magnetic field in radial configuration, as traditional engines, so the design and construction of rotating electrical machines in axial flow configuration has become an alternative for the design and construction of such engines. In this paper we present preliminary calculations for the optimization of the stator of a superconducting motor in axial flow configuration, based on the equations of general power of the rotary axial flow configuration. It performs the construction, optimization and evaluation of models of stators in geometries of 4, 6 and 8 poles with high-temperature superconducting tapes of Bismuth. The results show the feasibility of the design implemented, which is verified by a significant decrease in the current of superconducting motor operation.

Recibido: 23 de Mayo de 2009  
Aceptado: 14 de Agosto de 2009

### INTRODUCCIÓN

El estudio y aplicación de la superconductividad a motores eléctricos a nivel industrial inició a principios de la década de los 70 en donde los primeros motores eran fabricados con materiales superconductores de baja temperatura a base de Niobio (Nb), material desarrollado desde 1961, en donde la limitante para este tipo de motores fue su operación a baja temperatura y por debajo de los 20 K, donde la mayoría de las aplicaciones utilizaban helio líquido a 4,2 K como medio refrigerante. Esto implicó una fuerte limitante en cuanto a la aplicación y desarrollo de los motores superconductores, influenciado por el costo y la operación de trabajar con Helio (He) líquido. Los sistemas de refrigeración de He son complicados, de gran volumen y su costo de operación los excluye de las aplicaciones industriales, quedando restringida su aplicación a la investigación (Edrick *et al.*, 1992).

#### Palabras clave:

Motores superconductores, cintas de alta temperatura, motores de flujo axial, optimización de estatores.

#### Keywords:

Superconductor motors, HTS tapes, axial flux motors, stators optimization.

Con el desarrollo de los materiales superconductores de alta temperatura a base de Bismuto (BSCCO) e Itrio (YBCO), los cuales pueden operar a temperaturas de nitrógeno líquido (77 K), se ha tenido un gran avance en el desarrollo de nuevas aplicaciones de equipos y materiales para la industria eléctrica, como pueden ser su aplicación en motores, transformadores, cables y limitadores de corriente de falla entre otros. En el caso de requerir

\* Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago km. 3.5 + 1.8km. Comunidad de Palo Blanco. Tel. 464-6479940 . Fax 2311, Correo electrónico: gonzalez@salamanca.ugto.mx, guzmanc@salamanca.ugto.mx, gomezma@salamanca.ugto.mx e ibarrao@salamanca.ugto.mx.

\*\* UTSOE, Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato, Departamento de Tecnologías de la Información y la Comunicación.

grandes campos magnéticos estos materiales pueden operar a 30 K, mejorando mucho sus prestaciones y los equipos disponibles para la operación a estas temperaturas son más accesibles desde el punto de vista económico (Cardwell *et al.*, 1995).

En el caso de requerir grandes campos magnéticos, los materiales superconductores de alta temperatura a base de Bismuto (BSCCO) e Itrio (YBCO) pueden operar a 30 K, mejorando mucho sus prestaciones, y los equipos disponibles para la operación a estas temperaturas son más accesibles desde el punto de vista económico (Cavagnino, 2001).

El rápido avance tecnológico en el desarrollo de este tipo de materiales en la última década ha resuelto la problemática de la construcción de los electroimanes hechos con materiales superconductores, que pueden operar a temperaturas más altas que los de baja temperatura, con la consecuente utilización de sistemas de refrigeración más simples, menos costosos y mucho más eficientes (Driscoll *et al.*, 2001).

En los últimos años, un gran número de motores y generadores se han estado diseñando, construyendo y evaluando en todo el mundo en potencias que van desde los 70 KW hasta rangos de 600 MVA, en donde los resultados obtenidos han sido superiores a los esperados en los diseños preliminares (Chan, 1987).

En paralelo al diseño de nuevos motores eléctricos superconductores se han estado realizando trabajos de investigación encaminados a tener materiales superconductores a niveles industriales y comercializados a costos competitivos con los de los motores basados en cobre, lo que abre nuevas expectativas para el uso de este tipo de materiales (Leung, 1980).

Las máquinas eléctricas de flujo axial se diferencian de los motores eléctricos convencionales (las cuales tienen un flujo radial en el entrehierro y solamente cuentan con un estator y un rotor) en que:

- 1) El flujo en el entrehierro es en la dirección axial y los conductores se encuentran en la dirección radial.
- 2) El estator y el rotor son en forma de disco.

El uso de superconductores con campo atrapado en el rotor ha demostrado ser más eficiente en la configuración axial debido al menor camino que presenta el flujo magnético, teniendo una reducción en la reluctancia y mejorando la distribución del campo magnético en el motor (Granados, 1997).

En el presente trabajo se presentan los parámetros de diseño, el diseño y optimización de estatores de un motor superconductor de flujo axial, en configuración bilateral, el cual fue construido con cintas superconductoras de alta temperatura de BSCCO-2223. La ventaja en este caso son las dimensiones pequeñas del motor, lo cual hace que exista un mejor acoplamiento entre el rotor y el estator, mejorando su desempeño (González, 2006).

El resto del artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección dos se presenta la teoría que fundamenta la aplicación de los materiales superconductores en máquinas eléctricas así como las consideraciones a tomar en cuenta para su diseño y operación. En la sección tres se presentan las consideraciones tomadas en cuenta para la construcción del estator. En la sección cuatro se presentan las evaluaciones realizadas así como los resultados de prueba obtenidos. Terminamos en la sección 5 con las conclusiones y el trabajo futuro.

## ECUACIONES DE LA POTENCIA DE SALIDA

Una máquina eléctrica rotativa, ya sea en configuración radial o axial, consiste en un núcleo ferromagnético en el rotor, el cual gira dentro de otro núcleo de hierro con devanados de cobre que generan el campo magnético. Para una máquina eléctrica tradicional las dimensiones más importantes son el diámetro del entrehierro  $d$  y la longitud efectiva  $l$ . En cambio, para un motor de flujo axial las dimensiones principales son el diámetro interno  $D_i$  y su diámetro externo  $D_o$ .

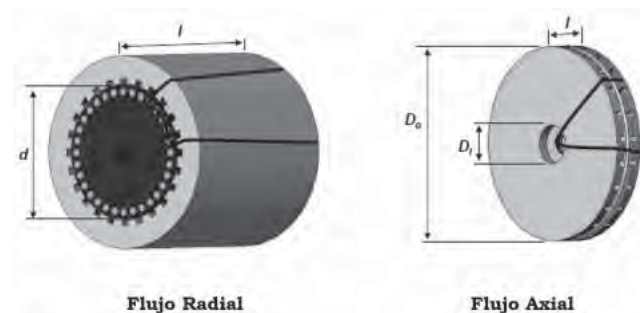


Figura 1. Representación esquemática de los motores eléctricos de flujo radial y flujo axial

En la figura 1 se muestran la representación esquemática para una máquina convencional y una máquina de flujo axial así como los parámetros de cada una de ellas.

La ecuación de potencia de salida,  $P_s$ , de una máquina eléctrica en VA puede ser expresada como (Gieras, 2004):

$$P_S = 2mE_p I_p \times 10^{-3} \quad (1)$$

donde:  $E_p = 4.44k \frac{pm}{2} \phi N$ , donde:  $m$  es el número de fases,  $E_p$  representa la fuerza electromotriz de la fase,  $I_p$  la corriente de fase,  $P$  el número de polos,  $n$  la velocidad (RPM),  $\Phi$  el flujo por polo y  $N$  representa el número de vueltas por fase.

Un parámetro importante en el diseño de las máquinas eléctricas de flujo axila es la relación entre los diámetros interior y exterior, representado por  $\lambda$ , ( $\lambda = D_i / D_o$ ) (Cavagnino, 2001; Chan, 1987; Campbell, 1974), éste determina la potencia entregada de acuerdo a la ecuación 1. En la bibliografía se reportan valores óptimos del parámetro  $\lambda$ , los cuales oscilan entre 0,57 y 0,63, dependiendo de la configuración de la máquina (Cavagnino, 2001). La ecuación 1 puede quedar en función de  $D_i$  y  $D_o$  de la siguiente manera:

$$P_S = K_a (D_o + D_i)^2 (D_o - D_i) n \quad (2)$$

donde:  $K_a = 2.74kBA \times 10^{-3}$

Además:  $B = \frac{p\phi}{\frac{\pi}{4}(D_o^2 - D_i^2)}$  y  $A = \frac{2mNI_p}{\frac{\pi}{2}(D_o + D_i)}$

donde:  $k$  es el factor de devanado,  $B$  la densidad de flujo y  $A$  la densidad de corriente.

De acuerdo a lo anterior, se realizó la simulación de la optimización para encontrar el valor óptimo de acuerdo a las dimensiones propuestas para los modelos de los estatores superconductores de flujo axial, en donde se evaluó el parámetro  $\lambda$  en un rango de 0 a 0.90 con una configuración de 4 polos, 6 polos y 8 polos.

### CONSTRUCCIÓN DE ESTATOR

Para la construcción de los estatores se emplearon cintas superconductoras de alta temperatura a base de Bismuto (BSCCO-2223) suministradas por Ameri-

can Superconductor (AMSC), con las siguientes características: Tipo: Resistencia a la compresión; Corriente crítica ( $I_c$ ): 124 A ( $a 77 K, B=0, 1 \mu V/cm$ ); Ancho: 4,8 mm ( $\pm 0.2$  mm); Espesor: 0.3 mm ( $\pm 0.02$  mm); Diámetro de doblez mínimo: 70 mm ( $a 95\%$  de retención de  $I_c$ ), esfuerzo crítico a compresión mínimo: 0,11 % ( $a 95\%$  de retención de  $I_c$ ).

En la figura 2 se observa la optimización del comportamiento de la potencia de salida del motor respecto al parámetro  $\lambda$ , en donde el valor óptimo para esta su geometría se encuentra en el rango de 0,3 a 0,45 aproximadamente, y depende del número de polos de la máquina, como se puede apreciar, los puntos más altos en los 3 casos presentados caen dentro de este intervalo.

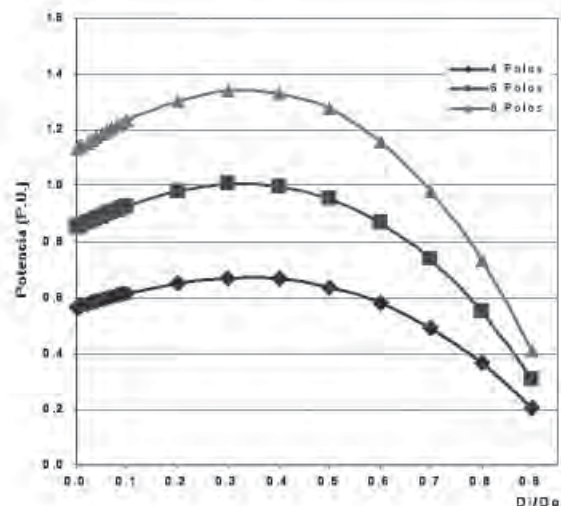


Figura 2. Relación de Potencia Vs Parámetro  $\lambda$ .

Debido a las características de los materiales superconductores y los campos magnéticos generados por éstos, se utilizó una construcción sin medio ferromagnético, colocando únicamente las cintas superconductoras en las geometrías seleccionadas. En la figura 3 se muestran tanto los nombres como las formas de las geometrías construidas para los estatores superconductores evaluados.



Figura 3. Geometrías de estatores superconductores evaluados.

La configuración B1 fue realizada en forma de estrella (con siete polos) a fin de minimizar las uniones soldadas para evitar la disminución de  $I_c$  y las geometrías A1 y A2 con una configuración de devanado ondulado, considerando una mejor distribución del campo magnético del estator y su acoplamiento con el rotor.

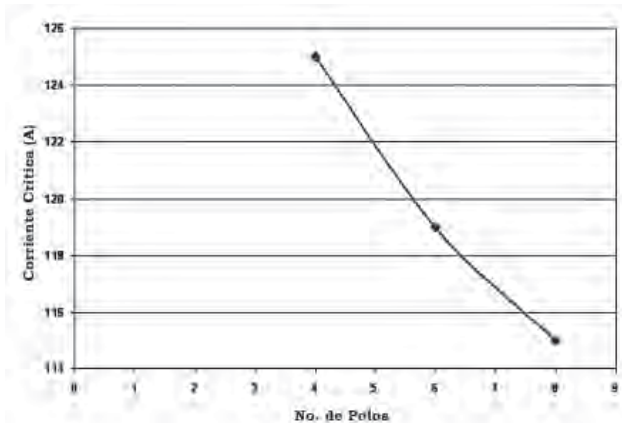


Figura 4. Reducción de  $I_c$  en función del número de polos

Para la construcción de los estatores se tomó como criterio de diseño un valor de  $\lambda = 0,45$ , teniendo las siguientes características:  $D_o = 87$  mm (sección activa),  $D_i = 40$  mm (sección activa) y  $l = 5$  mm (entre los dos estatores).

La construcción se efectuó cortando y realizando uniones soldadas para obtener las geometrías propuestas, mostradas en la figura 3. Las cintas fueron soldadas entre sí con soldadura Sn-Ag, a fin de formar las configuraciones y después fueron colocadas sobre una matriz de resina epóxica con la finalidad de darle rigidez y soporte mecánico. De estas uniones soldadas se tuvo una reducción significativa de la corriente crítica  $I_c$ , como se puede apreciar en la figura 4.

Tabla 1.  
Geometría de estatores evaluados

Identificación	No. de Polos	$\lambda$
B1	7	0.37
A1	4	0.25
A2 - 4	4	0.45
A2 - 6	6	0.45
A2 - 8	8	0.45

Se puede observar además, que esta reducción de  $I_c$  depende de la cantidad de uniones soldadas que se hagan en el estator, por lo que los estatores con un

mayor número de polos tendrán más uniones y por lo tanto una  $I_c$  menor.

En la tabla 1 se dan las características de cada uno de los estatores construidos en donde se especifica el número de polos y el valor de  $\lambda$ .

## EVALUACIONES Y RESULTADOS DE PRUEBA

Las evaluaciones fueron realizadas, colocando los prototipos dentro de un baño de Nitrógeno líquido a 77 K y presión atmosférica, como se muestra en la figura 5.



Figura 5. Motor Superconductor

Con el fin de conocer el comportamiento del motor en condiciones similares, para el proceso de evaluación de los rotores se empleó un rotor en forma de disco de aluminio. Los motores fueron evaluados incrementando la corriente de 0 a 100 A, con el fin de obtener las curvas velocidad-corriente y así obtener el mejor acoplamiento magnético entre los diferentes estatores y el rotor de aluminio. Se aplicó una corriente máxima de 100 A, para no sobrepasar el valor de corriente crítica para el estator de 8 polos.

En la figura 6 se puede observar que las configuraciones con un factor  $\lambda$  que tienen un valor diferente del óptimo, presentan un bajo acoplamiento magnético entre el rotor y los semi-estatores, lo que implica el aplicar una mayor cantidad de corriente para tener una velocidad equivalente al resto de los motores evaluados.

En esta misma figura se puede apreciar que el motor alcanza una velocidad mayor con una corriente menor en la medida en que se incrementa el número de polos. Obteniendo los mejores resultados, por esta razón, para el motor de 8 polos (A-8).

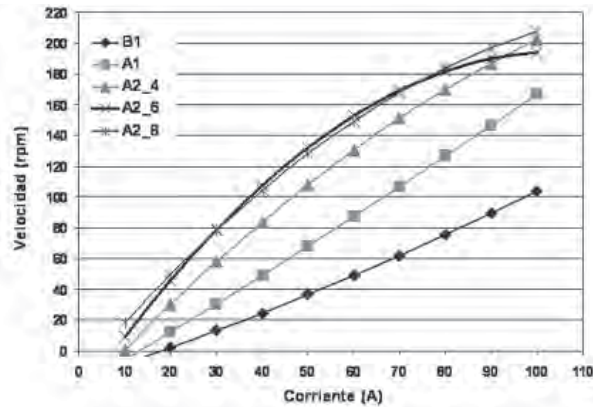


Figura 6. Comportamiento velocidad-corriente de los estatores evaluados.

## CONCLUSIONES

Es factible el empleo de cintas superconductoras de alta temperatura, para el diseño y construcción de rotores con una geometría convencional, considerando el acoplamiento magnético entre el rotor y el estator.

Se han construido y evaluado una serie de configuraciones de estatores superconductores para ser empleadas en máquinas rotativas de flujo axial en donde se ha observado su comportamiento Corriente-Velocidad.

El empleo de materiales superconductores en máquinas eléctricas rotativas de flujo axial se ve favorecido, debido a que estas geometrías son factibles de realizar con el uso de ellos, lo cual no es posible si se emplean diseños empleando devanados de cobre y material ferromagnéticos.

Se tiene una disminución de  $I_c$  en las uniones soldadas del estator y ésta disminuye en función de la cantidad de uniones que se tengan, por lo que la construcción con uniones soldadas en cintas superconductoras se debe de evitar en lo posible.

Las construcción B1 y A1 mostraron un bajo acoplamiento magnético con el rotor de A1, ya que para poner el motor en funcionamiento, es necesario una mayor cantidad de corriente que en el resto de las geometrías evaluadas, lo que nos indica que para esta configuración es necesario trabajar con valores de  $\lambda$  dentro de la zona óptima de 0,35 a 0,45.

La optimización de las geometrías evaluadas se hizo con base a la ecuación general de salida para un motor eléctrico en configuración de flujo axial, en donde el diseño óptimo se obtiene cuando el factor  $\lambda$  es máximo.

No todas las geometrías de estatores pueden ser aplicadas a los motores superconductores en configuración de flujo axial, tal como se demostró con la geometría B1, ya que esto puede llegar a limitar la eficiencia del motor debido a que cada geometría y su aplicación deben ser estudiadas tomando en cuenta la aplicación a fin de tener un comportamiento óptimo.

Como continuación de este trabajo, está el desarrollo de un motor superconductor de flujo axial de tres fases, dado el interés que este tipo de desarrollo de motores tiene en el campo de la superconductividad aplicada.

## REFERENCIAS

- Campbell, P. (1974), "Principle of a Permanent Magnet Axial Field DC Machine", *Proc. Inst. Elec.* Vol 121, Dec 1974, pp 1489-1494.
- Cardwell D.A., Campbell A.M, (1995), "The design of Electrical Machines Using High Temperature Superconductors", IEE Savoy Place, London WC2R 0BL, UK.
- Cavagnino, A. *et al.*, (2001), "A Comparison Between the Axial Flux and the Radial Flux Structures for PM Synchronous Motors", *0-7803-7116-X/01*, IEEE 2001.
- Chan, C. (1987), "Axial Field Electrical Machines – Design and Applications", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. EC-2, No. 2, June 1987.
- Driscoll D.I., (2001), "A Review of Superconducting Motor Technology Development" IEEE 0-7803-6672-7/01.
- Edick J.D., Schiferl R., Jordan H.E., (1992), "High Temperature Superconductivity Applied to Electric Motors," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol 2, 4, December 1992.
- Gieras, J. F. *et al.*, (2004), "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines", ISBN 1-4020-2661-7, 2004.
- González, A. *et al.*, (2006), "Superconducting wound rotor for axially excited electrical motor", *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 67 (2006) 583-585.
- Granados, X. *et al.*, (1997), "Hyterisis motor whit self sustained rotor for high speed applications", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Velthoven Hollan, Jul 1997.
- Leung, W.S. *et al.*, (1980), "A new design approach for axial-field electrical machines", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS 99, No. 4 July, Aug 1980