

DESARROLLO DE UN AEROGENERADOR SUPERCONDUCTOR PARA BAJAS VELOCIDADES

Granados Martínez Luis Fernando¹ y González Parada Adrian²

RESUMEN

El empleo de fuentes no convencionales de energía es una necesidad imperante a nivel mundial, en donde una de las fuentes más utilizada es la energía eólica, que es utilizada para convertirla en energía eléctrica mediante los aerogeneradores. La operación de estas máquinas son con velocidades de viento por encima de los 4 m/s. En el caso del estado de Guanajuato, la velocidad del viento promedio es de 3 m/s lo cual no hace factible el uso de estos grandes aerogeneradores, por tal motivo el desarrollo de aerogeneradores para bajas velocidades de viento viene a ser una necesidad. El desarrollo de este trabajo está encaminado al análisis y diseño conceptual de un aerogenerador superconductor para bajas velocidades de viento.

PALABRAS CLAVE Generador eléctrico/ Flujo Axial/ Superconductores/ Baja velocidad de viento/ Arreglo de Halbach.

INTRODUCCIÓN

La energía eólica es una de las energías renovables más importante que existe, siendo su fuente la fuerza del viento. La razón por la cual diseñamos el aerogenerador es para el aprovechamiento de la energía eólica en los distintos tipos de generación eólica.

Los tipos de generación eólica son:

1. Universidad de Guanajuato. Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km 3.5+1.8, Comunidad de Palo Blanco, Guanajuato, Salamanca, C.P. 36885, Teléfono: 014646479940; lf.granadosmartinez@ugto.mx.

2. Adrián González Parada, Universidad de Guanajuato. Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km 3.5+1.8, Comunidad de Palo Blanco, Guanajuato, Salamanca, C.P. 36885, Guanajuato, Salamanca, Teléfono: 014646479940, ext. 2454; gonzaleza@ugto.mx.

Baja potencia: entregan una potencia de hasta de 100 kW. Se utiliza principalmente para abastecer viviendas, así como establecimientos de pequeño tamaño, reservándose casi exclusivamente al ámbito privado.

Granjas eólicas: Una granja eólica produce energía eléctrica por medio de un gran número de turbinas eólicas dispuestas próximas entre sí, la que es inyectada a la red en el punto de conexión. Los rangos normales de potencia que oscilan entre 300 y 750 kW.

Marinas: La potencia de los aerogeneradores en el mar es superior a las que están en tierra. Llegan a producir 5 MW. Las plataformas de sus aerogeneradores son flotantes en aguas profundas.

En el estado de Guanajuato la velocidad de viento en promedio es de 3 m/s lo cual es una velocidad de viento baja a comparación con otros estados de la república Mexicana lo cual no son aplicables los aerogeneradores para mayores velocidades. Con la energía eólica presentándose como una de las alternativas más fiables como fuentes de energía alternativa, los generadores de flujo axial ofrecen una solución eficiente y de bajo costo comparado con las otras tecnologías. Esta idea ha surgido como una propuesta muy prometedora para solventar problemas de generación de energía eléctrica para casas habitación para tener casas energéticamente sustentables.

Tipos de generadores

Los generadores de imanes permanentes pueden ser de flujo axial o radial (figura 1) y la justificación de trabajar con la configuración de flujo axial y no radial son las siguientes:

Es compacto, tiene un buen rendimiento y no necesitan excitación externa.

Tiene una densidad de potencia alta, y al fabricarse de forma modular es muy fácil ampliarlos e integrarlos con otros componentes mecánicos, como turbinas.

Al funcionar a bajas velocidades se evita el uso de multiplicación de velocidad, con lo que se reduce el costo y se aumenta el rendimiento al disminuir las pérdidas mecánicas.

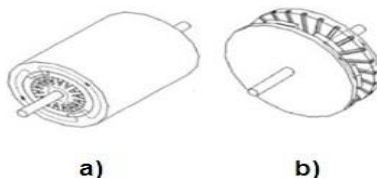


Figura 1. Configuración de generadores de a) flujo radial y b) flujo axial.

Los materiales superconductores son aquellos que poseen la capacidad de conducir corriente eléctrica sin resistencia y pérdida de energía en determinadas condiciones. La resistividad eléctrica disminuye a medida que la temperatura baja hasta llegar a una temperatura crítica donde la resistividad eléctrica es cercana a cero que a diferencia de los conductores normales donde la resistividad de estos nunca se aproxima a la obtenida por un material superconductor.

MÉTODOS Y MATERIALES

La calidad de la tensión de salida (armónicos de la FEM) en los generadores de flujo axial con imanes permanentes depende de la geometría de los imanes y también de la distancia adyacente que hay entre los imanes. El número de imanes es mucho más flexible debido a su geometría. Hay que tener en cuenta que un mayor número de imanes ofrece un mayor par para el mismo nivel de

corriente. Por otro lado, un mayor número de imanes implica un menor sitio para implementarlo. El número ideal de imanes dependerá de la geometría del generador y de las propiedades de los imanes utilizados.

La clave de esto está relacionado con el con el vector de magnetización de los imanes como una función de la distancia a lo largo del arreglo tal como se muestra en la figura 2, a esto es se le llama arreglo de Halbach.

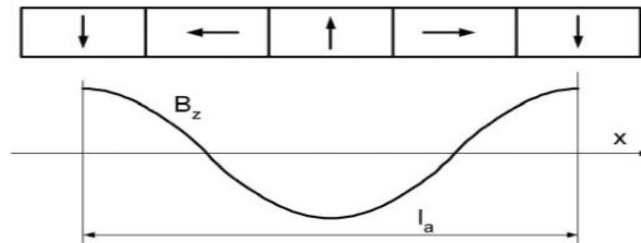


Figura 2. Arreglo de Halbach para un generador de imanes permanentes.

En donde si se requiere encontrar el campo magnético generado por los imanes a una cierta distancia del rotor, se puede calcular de acuerdo a la siguiente ecuación (1):

$$B_{m0} = B_r \left[1 - e^{-\beta h_M} \right] \frac{\sin\left(\frac{\pi}{n_M}\right)}{\frac{\pi}{n_M}} \quad (1)$$

Donde B_{m0} es el valor pico de la densidad de flujo magnético en la superficie activa, B_r es la densidad de flujo magnético remanente del imán, $\beta=2\pi/l_a$, l_a es el periodo espacial (longitud de onda) de el arreglo, n_M es el número de imanes permanentes por longitud de onda y h_M es la altura de los imanes.

La componente tangencial como se da la ecuación (2) y la componente normal de acuerdo como en la ecuación (3) del arreglo de Halbach a la distancia desde la superficie de los imanes permanentes son:

$$B_x(x, z) = B_{m0} \cos(\beta x) e^{-\beta z} \quad (2)$$

$$B_z(x, z) = B_{m0} \sin(\beta x) e^{-\beta z} \quad (3)$$

En donde la Fem de inducción en estator debido a la excitación del rotor está dado por la ecuación (4):

$$E_f = \frac{\pi}{4} \sqrt{2} n_s N_1 k_{w1} B_z D_{out}^2 (1 - k_d^2) \quad (4)$$

Donde $k_d = D_{in}/D_{out}$, n_s es la velocidad en rpm, k_{w1} es el factor de devanado como se ve en la ecuación (5), k_p es el factor de paso, k_{d1} es el factor de distribución, q_1 número de ranuras por polo por fase

$$k_{w1} = k_{n1} k_{d1} \quad (5)$$

$$k_{p1} = \sin\left(\beta \frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

$$k_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m_1}\right)}{q_1 \sin\left(\frac{\pi}{2m_1 q_1}\right)} \quad (7)$$

$$q_1 = \frac{s_1}{2pm_1} \quad (8)$$

Ahora para determinar la corriente de fase es necesario aplicar la ecuación básica de la fuerza tangencial lo cual está dado por la ecuación (9).

$$d\vec{F} = I_a (d\vec{r} \times \vec{B}_x) = A(r) (d\vec{S} \times \vec{B}_x) \quad (9)$$

Donde $A(r)$ es la densidad de corriente de línea y está expresada por la ecuación (10).

$$A(r) = \frac{A_m}{\sqrt{2}} = \frac{m_1 \sqrt{2} N_1 I_a}{\pi r} = \frac{m_1 N_1 I_a}{\pi r} \quad (10)$$

Multiplicando la fuerza por el radio obtenemos el torque e integrando y calculando $dS = 2\pi r dr$ tal como se muestra en la ecuación (11)

$$\int_T d\tau = \int_F r dF = \int_{D_{in}}^{D_{out}} \frac{2\pi \alpha_i k_{w1} m_1 N_1 I_a B_z r^2 dr}{\pi r} = \frac{1}{4} \alpha_i k_{w1} m_1 N_1 I_a B_z (D_{out}^2 - D_{in}^2) \quad (11)$$

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} \quad (12)$$

RESULTADOS

Modelo por elemento finito

Con el fin de hacer un estimado del comportamiento del generador y considerando las ec. anteriormente mostradas se realizó una simulación por medio de elemento finito (ver figura 3) por medio del programa FEMM en donde se consideraron los siguientes materiales mostrados en las tablas siguientes:

Las cintas superconductoras utilizadas en los estatores son de bismuto (BSCCO2223), corriente crítica de 124 A, temperatura crítica de 77 K y cuyas dimensiones son de ancho 4.8mm (± 2 mm) y de espesor 0.3mm (± 2 mm).

Los imanes de Neodimio-Fierro-Boro (NdFeB) utilizados en el rotor tienen un flujo de 13200 Gauss y cuyas dimensiones son de 25.4 mm de diámetro y 3.18 mm de altura.

La geometría construida fue en una configuración de 2D, debido a que el software tiene limitaciones para el análisis en 3D, pero es un buen indicador del comportamiento del generador.

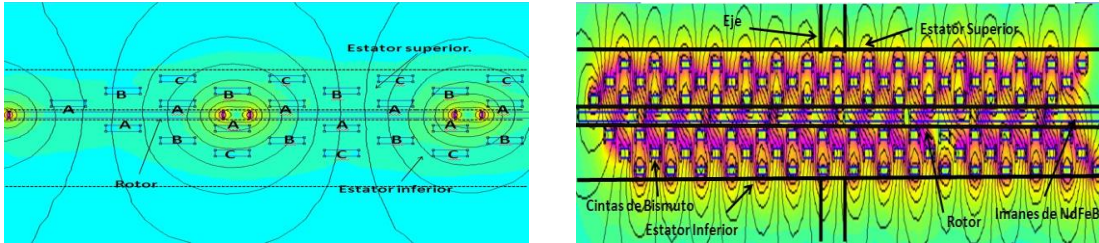
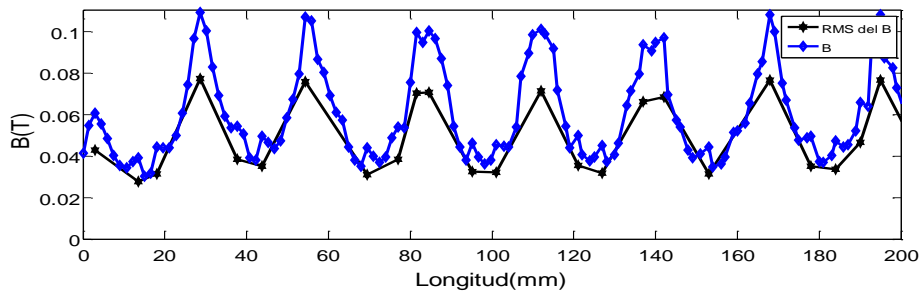


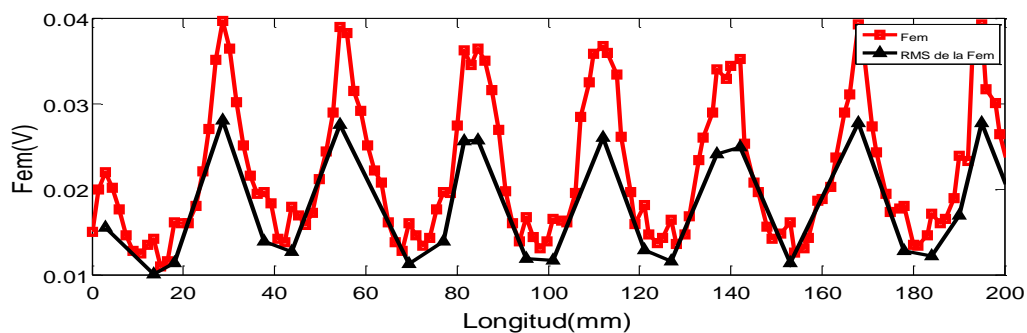
Figura 3. Simulación en elemento finito.

A partir de la simulación realizada se obtuvieron los valores simulados por el campo magnético interactuando con el material superconductor, en donde el comportamiento de la densidad campo magnético es de acuerdo a la figura 3 obteniéndose una distribución de acuerdo a la grafica, en donde se observa la oscilación de la distribución del campo magnético de acuerdo a la geometría de los imanes.



Grafica 1. Comportamiento del campo normal y el RMS del Campo

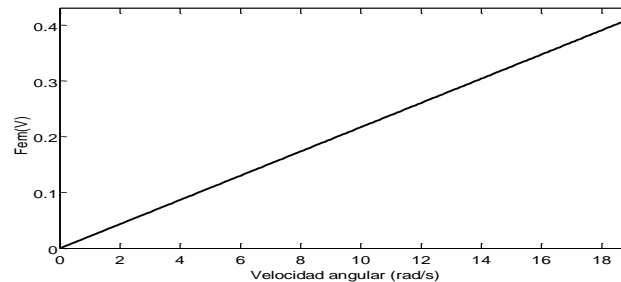
En donde la tensión generada de acuerdo al campo de la grafica 1 y tomando la ec. 2 y 4, se puede observar en la grafica 2, mostrando los valores pico y rms de la FEM generada.



Grafica 2 Fem y RMS de la Fem.

Debido a la oscilación del campo magnético y considerando una velocidad de rotación de 184 rpm, se tiene una oscilación de la tensión generada a todo lo largo del estator, tal y como se muestra en la gráfica 2.

El comportamiento de la tensión generada en función de la velocidad se observa en la grafica 3, notando la variación de esta en función de la velocidad de giro del rotor.



Gráfica 3. Comportamiento de la Fem con respecto a la velocidad angular.

De acuerdo a la velocidad de generación y considerando un estimado de la velocidad del viento el generador puede girar a una velocidad de 184 rpm, lo cual nos puede representar una tensión de generación de 0.45 V. Las oscilaciones en la curva rms de la fem pueden representar un problema para la red eléctrica, las cuales pueden ser evitadas con una mejor distribución de los imanes tal y como se menciono anteriormente.

CONCLUSION

En un generador lo importante es generar potencia y esto dependerá de la velocidad angular, la intensidad de la componente normal del campo y de los diámetros interiores y exteriores del estator. Se ha realizado un modelado preliminar de un arreglo de generador en configuración de flujo axial en donde se ha determinado parámetros principales. Es necesaria la construcción de un prototipo a escala similar para poder realizar una comparación con los resultados obtenidos del modelo simulado.

REFERENCIA

- Adrian González Parada, Rafael Guzmán Cabrera, Miguel Ángel Gómez Martínez, Oscar Gerardo Ibarra-Manzano, José Antonio Gordillo Sosa, (2009). "Optimización de Estatores para Motores Superconductores de Flujo Axial".
 Luisa Herrera, Alexander Alarcón, Edwin Rivas Trujillo, (2013). "Axial Flux Generator Design by Using the Finite Elements Method".
 Gieras, J. F. et al., (2006), "Axial Flux Permanent Magnent Brushless Machines", ISBN 1-4020-2661-7, 2004.
 Irving L. Kosow Ph. D. (1993). Electric Machinery and Transformers. Wordcrafters Editorial Services, Inc.