

OPTIMIZACIÓN DEL BOBINADO DE GENERADORES ELÉCTRICOS LINEALES DE COBRE Y SUPERCONDUCTOR

González Cardona, Diego Alejandro¹, González Parada, Adrián²

¹ [Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle] | Dirección de correo electrónico: [diego.alejandro.gonzalez@correounivalle.edu.co]

² [Departamento de Ingeniería Eléctrica, DICIS, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [gonzaleza@ugto.mx] (DICIS)

Resumen

Este trabajo se describe un criterio para la optimización del bobinado de un generador eléctrico lineal de imanes permanentes que está conformado de cintas superconductoras de alta temperatura (HTS) con el objetivo de que no se presenten niveles significativos de pérdidas en el devanado. Por lo tanto, es necesario considerar las características de los materiales superconductores en la etapa de diseño y optimización de la bobina. Al tener el bobinado del generador eléctrico línea dividido por capas con igual número de vueltas en cada una de ellas, se logra observar cómo el nivel de energía generado y la tensión en cada una de las capas va disminuyendo conforme al campo magnético se va debilitando. La configuración se optimizó mediante el uso del software de simulación por elemento finito, se buscó una considerando la característica B-I, el campo magnético central, la homogeneidad de campo, generación de energía uniforme en cada una de las diferentes capas, igualdad de tensión generada por capa y mantener el campo magnético por capa de tal manera que no exceda la corriente crítica. Se muestran los detalles del método de optimización y un ejemplo de su aplicación al superconductor utilizando cintas BSCCO 2223.

Abstract

This work describes a criterion for the winding optimization of a linear electric generator of permanent magnets that is formed by high temperature superconducting tapes (HTS) with the objective of not presenting significant levels of losses in the winding. Therefore, it is necessary to consider the superconducting materials characteristics in the design and optimization stage of the coil. By having the winding of the electric generator line divided by layers with an equal number of turns in each of them, it is possible to observe how the level of energy generated and the tension in each of the layers decreases as the magnetic field weakens. The configuration was optimized through the use of simulation software by finite element, considering the characteristic BI, the central magnetic field, the field homogeneity, uniform energy generation in each of the different layers, equality of tension generated by layer and maintain the magnetic field per layer in that manner that it does not exceed the critical current. The details of the optimization method and an example of its application to the superconductor are shown using BSCCO 2223 tapes.

Palabras Clave

Superconductor, Generador lineal, anisotropía, sostenibilidad energética, bobina superconductoras

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han venido realizando varias investigaciones acerca de los diferentes medios para la generación de energía eléctrica renovable, este sistema de conversión de energía eléctrica a partir de las olas es un candidato que aprovecha una fuente alternativa de energía. Recientemente, se han estado analizando y explorando el uso de material superconductor en máquinas eléctricas rotativas especiales, como los generadores de energía eólica, con varios materiales superconductores de baja y alta temperatura en el campo o bobinados de armadura [1]-[3]. En las investigaciones pasadas no se ha encontrado una determinación clara o explícita de una optimización del bobinado, que permita que sus niveles de energía y voltaje por capa se mantengan entre ellas. [4]-[5]

En este trabajo se busca un criterio para la optimización del bobinado superconductor de un generador eléctrico lineal de imanes permanentes el cual está conformado por cintas superconductoras de BISCCO 2223 dispuesto de forma que puedan cortar las líneas del campo magnético creado por los imanes permanentes que se encuentran en centro del generador, a través de la simulación de estos dos tipos de bobinas en F.E.M.M (Finite Element Method Magnetics). Se quiere que los niveles de tensión y energía en cada una de las capas superconductoras se mantengan y sus niveles de generación sean aún mayores a los diseños convencionales utilizados en los bobinados de generadores lineales. Al tener el bobinado del generador eléctrico línea dividido por capas con igual número de vueltas en cada una de ellas, se logra observar cómo el nivel de energía generado y la tensión en cada una de las capas va disminuyendo conforme al campo magnético se va debilitando, por eso se propone una nueva configuración más óptima para los dos diferentes tipos de devanados. [6]-[7]

Los materiales superconductores han demostrado una anisotropía en la corriente crítica frente a la característica del campo magnético externo aplicado, como se puede observar en la Figura 1. las características de la cinta superconductoras van a variar dependiendo de cómo la dirección de las líneas del flujo magnético atraviesen la cintas superconductoras, haciendo que el flujo magnético y la corriente crítica vista por las cintas sea mayor o menor, y es necesario considerar esta característica anisotrópica B-I de las cintas en la etapa de diseño. [8]-[10]

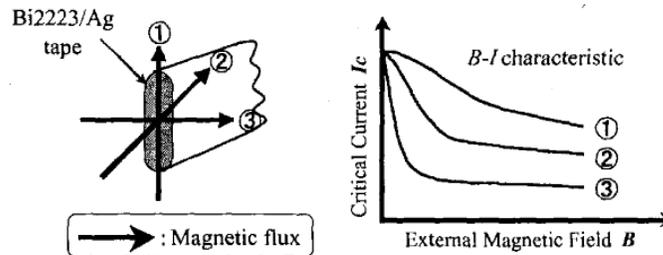


Figura 1. Característica anisotrópica B-I de la cinta superconductoras

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño de la bobina se puede seleccionar calculando las dimensiones del calibre del conductor y el estator, que gira con un número N_s que puede generar el voltaje deseado V_{gen} [V]. El número de vueltas por unidad de longitud está determinado por la ecuación 1 [11].

$$N_s = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{gen}}{B_m \cdot \pi R_s^2 \cdot v_m} \quad (1)$$

Donde R_s es el radio promedio del bobinado del estator en [m], v_m la velocidad promedio en [m/s] y B_m representa las líneas de campo magnético en [T], en cada una de las capas.

Al tener un bobinado con una sección transversal ordinaria y una distribución uniforme del número de vueltas por capa, como se observa en la Figura 2a la tensión generada estará dada por la ecuación 2.

$$V_{gen} = \frac{N_s \cdot B_m \cdot \pi R_s^2 \cdot v_m}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

Se observa de la ecuación 2, como el voltaje generado por capa depende del campo magnético presente, las capas más lejanas presentan menor campo magnético y serán éstas las que generan menor cantidad de voltaje.

Por lo anterior en la Figura 2 se muestra la comparación de los prototipos de las bobinas de cobre y superconductor normal y optimizada desarrollada en el software F.E.M.M (Finite Element Method Magnetics).

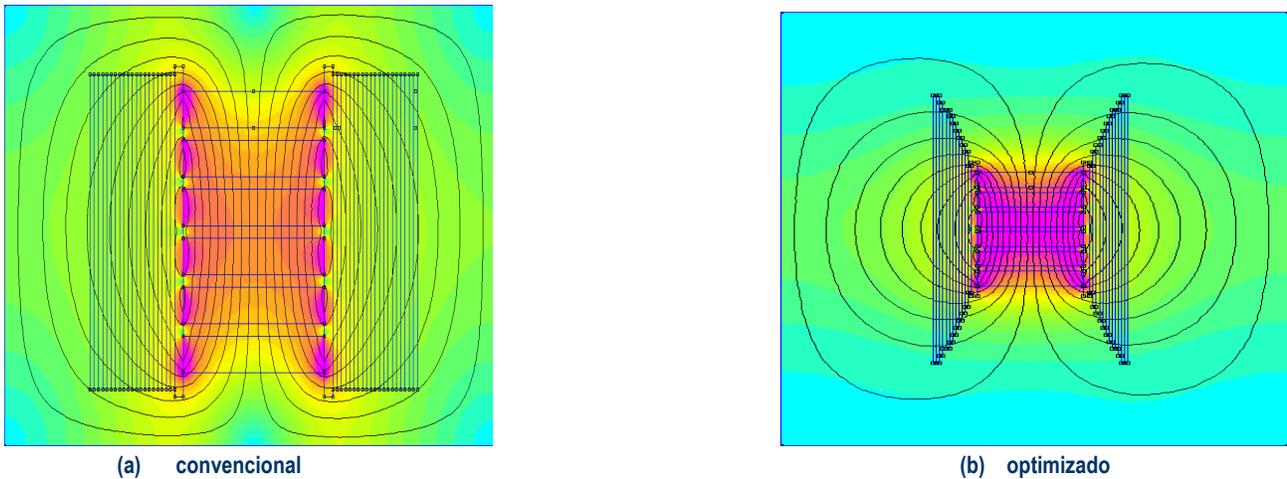


Figura 2. Simulación del bobinado con cintas superconductoras: convencional y optimizado.

A medida que aumenta la componente del campo magnético externo que consta de un ángulo de 45° , se reduce la corriente crítica, como se observa en la Figura 3 [12]. Por lo tanto, lo que se busca con la optimización es que en cada una de las capas, sin importar la intensidad de campo magnético presente, cuenten con el mismo nivel de tensión generada.

Esto se logra considerando la tensión generada en la primera capa con un número de vueltas fijo, con ese valor se determina el número de vueltas que necesita cada capa para mantener la tensión y energía, teniendo en cuenta que la intensidad de campo magnético presente en cada capa será menor, por lo tanto, el número de vueltas ira aumentando, tomando la forma de un escalón ascendente como se logra ver en la Figura 2b.

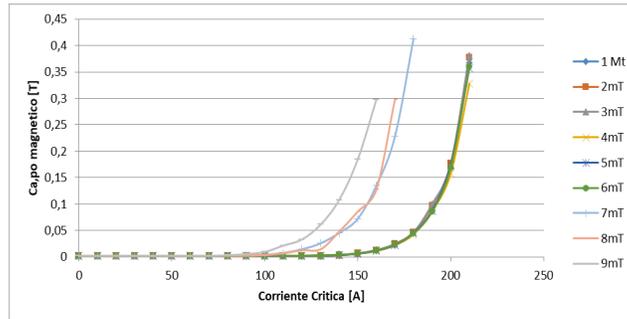
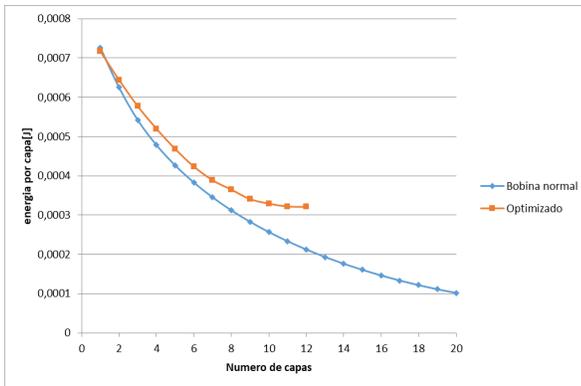


Figura 3. Característica anisotrópica B-I con una entrada de 45° a la cinta superconductora

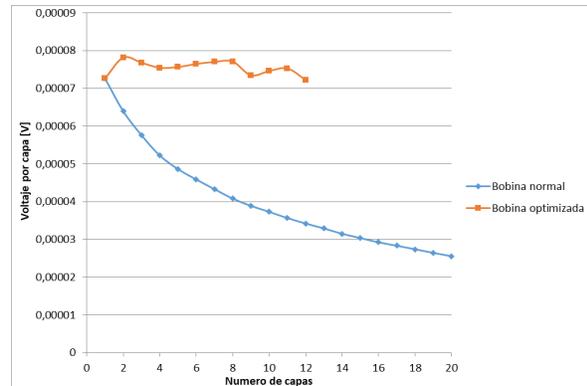
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se observa en la Figura 4.a la energía generada va disminuyendo a través de cada una de las capas del bobinado tanto para la bobina convencional como para la optimizada, de la bobina optimizada se resalta como ésta almacena mayor energía con un número menor de capas, pero con un número mayor de vueltas.

De la Figura 4.b, se observa como la tensión generada en el bobinado convencional va disminuyendo a través de cada una de sus capas, pero una vez se optimiza la bobina, se empieza a mantener en un rango mínimo de tensión, aunque lo que se desea es que este voltaje sea constante, esto no se logra debido a que no se puede llegar al número de vueltas exactas para mantener un nivel de tensión constante por capa.



a) Energía obtenida en cada una de las capas



b) Tensión generada en cada una de las capas

Figura 4. Energía y Tensión generada en la bobina convencional y optimizada.

La Figura 5 muestra que el voltaje es aproximadamente un patrón diente de sierra, porque a mitad del ciclo el voltaje alcanza un máximo y la polaridad se revierte rápidamente una vez que los imanes pasan al punto donde están centrados en la bobina. A su vez considerando la tensión total generada en la máquina, se tiene un incremento de un 4% aproximadamente.

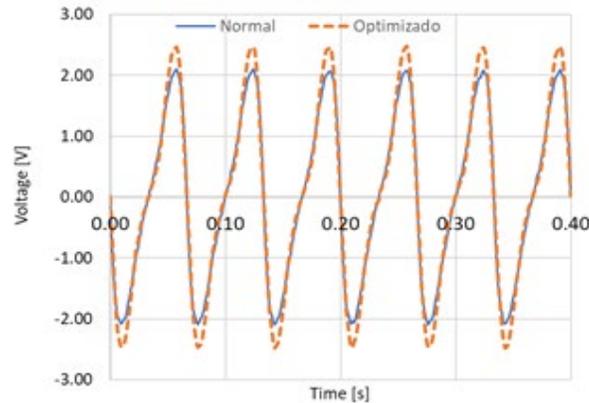


Figura 5. Voltaje generado por la bobina normal y optimizada

CONCLUSIONES

Se logra observar que al realizar el criterio de optimización del bobinado el parámetro de energía y voltaje generado, se mantuvieron por capa logrando así que la generación que se puede sacar en cada uno de estos bobinados optimizados pueda ser mayor. Los resultados muestran que el generador lineal superconductor proporciona más potencia y tensión que el generador eléctrico lineal de cobre.

REFERENCIAS

- [1] N. P. Gargov and A. F. Zoba, "Multi-phase air-cored tubular permanent magnet linear generator for wave energy converters," *IET Renewable Power Generation*, vol. 6, no. 3, pp. 171-176, May 2012.
- [2] J. Zhang, H. Yu, Q. Chen, M. Hu, L. Huang and Q. Liu, "Design and experimental analysis of ac linear generator with Halbach PM arrays for direct-drive wave energy conversion," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 3, Article number 0502704, June 2014.
- [3] Y. Hong, M. Eriksson, V. Castellucci, C. Boström and R. Waters, "Linear generator-based wave energy converter model with experimental verification and three loading strategies," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 3, pp. 349-359, 2016.
- [4] D. Wang, C. Shao, X. Wang and C. Zhang, "Performance characteristics and preliminary analysis of low cost tubular linear switch reluctance generator for direct drive WEC," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 7, Article number 0612205, 2016.
- [5] P. C. Binh, N. M. Tri, D. T. Dung, K. K. Ahn, S. J. Kim and W. Koo, "Analysis, design and experiment investigation of a novel wave energy converter," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 2, pp. 460-469, 2016.
- [6] Y. Hong, M. Eriksson, V. Castellucci, C. Boström and R. Waters, "Linear generator-based wave energy converter model with experimental verification and three loading strategies," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 3, pp. 349-359, 3 2016.
- [7] K. Moriya, S. Goto, T. Akita, H. Kosaka, "Development of free piston engine linear generator system Part3 -novel control method of linear generator for improve efficiency and stability," *SAE Technical paper*, pp. 1-6, 2016.
- [8] Y. Tian, H. Zhang, G. Li, X. Hou, F. Yu, F. Yang, Y. Yang, Y. Liu, "Experimental study on free piston linear generator (FPLG) used for waste heat recovery of vehicle engine," *Applied Thermal Engineering*, vol. 127, pp. 184-193, 2017. "Experimental study on free piston linear generator (FPLG) used for waste heat recovery of vehicle engine," *Applied Thermal Engineering*, vol. 127, pp. 184-193, 2017.
- [9] A.B. Abrahamsen, N. Magnusson, B.B. Jensen, M. Runde, "Large superconducting wind turbine generators," *Energy Procedia*, vol. 24, pp. 60-67, 2012.
- [10] Hae-Jin Sung, Gyeong-Hun Kim, Kwangmin Kim, Minwon Park, In-Keun Yu, Jong-Yul Kim, "Design and comparative analysis of 10 MW class superconducting wind power generators according to different types of superconducting wires," *Physica C: Superconductivity*, vol. 494, pp. 255-261, 2013.
- [11] Song, P., Qu, T. M., Lai, L. F., Wu, M. S., Yu, X. Y., and Han, Z. "Thermal analysis for the HTS stator consisting of HTS armature windings and an iron core for a 2.5 kW HTS generator," *Superconductor Science and Technology*, 29 (5), 2016.
- [12] Sumitomo Electric Industries, Ltd., "Sumitomo BSCCO Wire (BSCCO) Type HT," http://global-sei.com/super/hts_e/type_ht.html. 2017. Magnetika Saiffe, S.A. de C.V., "Neodymium Ring Magnets," <http://www.imanes.com.mx/jalisco/verProducto.php?mod=NR27MAGNA>. 2017.