

KHẢO SÁT TỪ TRƯỜNG CỦA DÂY NAM CHÂM KÉP SẮP XẾP THEO CẤU TRÚC HALBACH TRONG MÁY PHÁT TUYẾN TÍNH SỬ DỤNG TRONG THIẾT BỊ CHUYỂN ĐỔI NĂNG LƯỢNG SÓNG

Đỗ Huy Diệp^{1*}, Nguyễn Văn Đức¹, Nguyễn Xuân Quỳnh², Đặng Thế Ba¹

¹Trường Đại học Công nghệ - ĐH Quốc gia Hà Nội

²Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Các thiết bị máy tuyến tính sử dụng nam châm vĩnh cửu có ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực khác nhau. Trong lĩnh vực chuyển đổi năng lượng sóng, việc sử dụng máy phát tuyến tính trước đây được coi là khó khăn và không kinh tế do gặp nhiều vấn đề về mặt kỹ thuật. Nhiều nỗ lực nghiên cứu đã được thực hiện để vượt qua những khó khăn đó, tuy nhiên kết quả thực tế vẫn còn nhiều hạn chế. Trong nghiên cứu này, nỗ lực cải thiện mật độ từ thông trong máy phát tuyến tính đã được thực hiện. Cấu trúc dây nam châm kép Halbach được khảo sát theo các thông số kích thước của máy phát điện trong thiết bị chuyển đổi năng lượng sóng nhằm tăng cường mật độ từ thông trong khe hở không khí, từ đó chọn lựa các thông số hợp lý để cải thiện hiệu suất đầu ra của máy phát điện tuyến tính. Kết quả số từ phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng để mô phỏng và quan sát phân phối từ thông trong máy. Kết quả cũng cho thấy việc sử dụng nam châm cấu trúc Halbach kép đã tăng mật độ từ thông so với thiết bị sử dụng cấu trúc nam châm thông thường.

Từ khóa: Thiết bị chuyển đổi năng lượng sóng; máy phát điện tịnh tiến; dây nam châm Halbach; mô phỏng số; từ trường.

Ngày nhận bài: 13/8/2020; Ngày hoàn thiện: 15/11/2020; Ngày đăng: 30/11/2020

EXAMINATION OF THE MAGNETIC FIELD OF A LINEAR GENERATOR ARRANGED WITH DUAL HALBACH ARRAY STRUCTURE USING IN WAVE ENERGY CONVERTERS

Do Huy Diep^{1*}, Nguyen Van Duc¹, Nguyen Xuan Quynh², Dang The Ba¹

¹University of Engineering and Technology - VNU

²Hanoi University of Science & Technology (HUST)

ABSTRACT

Permanent magnet linear devices have wide applications in various fields. In the field of wave energy conversion, the use of linear generator has earlier been regarded as difficult and uneconomical due to technical problems. Many studies have been carried out to overcome these difficulties, but the actual results are still limited. In this study, an attempt to improve the magnetic flux density in linear generator was made. A dual Halbach array structure was investigated on parameters of line generator in wave energy converter to enhance flux density in air gap, thereby selecting the appropriate parameters to improve the output performance of linear generator. The numerical results from the finite element method were used to simulate and observe the magnetic flux distribution in the machine. The results also show that the dual Halbach array magnets has increased the magnetic flux density compared to the schema used in linear generator of Direct driven wave energy conversion.

Keywords: Wave energy converter; linear generator; Halbach array magnet; numerical simulation; magnetic field.

Received: 13/8/2020; Revised: 15/11/2020; Published: 30/11/2020

* Corresponding author. Email: diepdh@vnu.edu.vn

1. Giới thiệu

Năng lượng sóng, còn được gọi là năng lượng đại dương hoặc năng lượng sóng biển, là năng lượng khai thác từ sóng biển. Dao động thẳng của sóng biển trên bề mặt đại dương chứa rất nhiều năng lượng cơ học, chúng cần được thu giữ bởi các công nghệ năng lượng để thực hiện các nhiệm vụ hữu ích, ví dụ như tạo ra điện, khử nước và bơm nước vào các hồ chứa.

Năng lượng sóng về cơ bản là năng lượng được rút ra từ dao động cơ học của sóng. Khi gió thổi qua mặt biển, nó truyền năng lượng cho sóng. Đó là nguồn năng lượng dồi dào và không bị giới hạn. Sản lượng năng lượng của sóng được đo bằng tốc độ sóng, chiều cao sóng, bước sóng và mật độ nước. Sóng càng mạnh thì càng có khả năng tạo ra năng lượng. Năng lượng thu được thông qua các bộ chuyển đổi năng lượng sóng (WEC) sau đó có thể được sử dụng để phát điện, cung cấp năng lượng cho các nhà máy hoặc bơm nước [1].

WEC là thiết bị chuyển đổi năng lượng cơ học của sóng thành năng lượng điện. Thông thường, các WEC sử dụng một hệ thống chuyển đổi chuyển động tuyến tính chậm của bộ hấp thụ năng lượng sóng thành chuyển động quay tốc độ cao của các máy phát điện, điều đó đòi hỏi các cơ cấu chuyển đổi cơ học phức tạp. Ngoài ra, trong nhiều ứng dụng, nó có thể sử dụng như máy phát điện tốc độ thấp hoặc máy phát tuyến tính. Ý tưởng về máy phát điện tuyến tính truyền động trực tiếp đã được đưa ra với mục tiêu giảm độ phức tạp của các cơ cấu cơ học, trong đó giảm số lượng các bộ phận có thể di chuyển và để giảm thiểu tổn thất mát mẻ cơ năng. Các cơ cấu truyền động trực tiếp này được dự kiến có thể nâng thời gian sử dụng lâu hơn và ít phải bảo trì hơn [2].

Một máy phát điện tuyến tính sử dụng 3 dây cặp nam châm vĩnh cửu đã được phát triển trong dự án VNU - QG.14.01. Ưu điểm của mô hình này là không có lõi thép trong cuộn dây, điều đó có nghĩa là không có lực cản cảm ứng do lõi thép từ gây ra. Điểm hạn chế

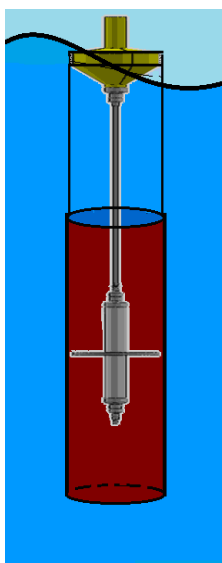
của mô hình này là công suất đầu ra yếu do từ trường giới hạn bên trong stato của máy phát. Mục tiêu của nghiên cứu này nhằm tăng mật độ từ thông và công suất đầu ra của máy phát điện tuyến tính bằng cách sử dụng 2 dây nam châm vĩnh cửu Halbach. Trong nghiên cứu, các khảo sát từ trường của nam châm vĩnh cửu với các kích cỡ khác nhau đã được tiến hành.

2. Máy phát tuyến tính sử dụng trong thiết bị chuyển đổi năng lượng sóng

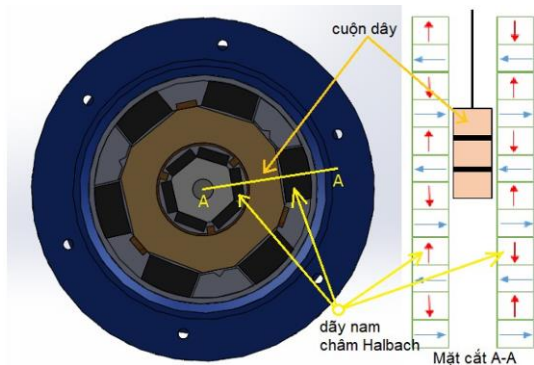
Một sơ đồ của bộ biến đổi năng lượng sóng phao kép có thể được phác thảo như hình 1 [2], [3]. Nó bao gồm hai phao hấp thụ dao động sóng biển. Phao thứ nhất là một chiếc phao nổi kích thước lớn, kết nối với một ống. Cái còn lại là một chiếc phao nhỏ hơn có thể dịch chuyển tự do bên trong ống trên. Máy phát điện tuyến tính sử dụng nam châm vĩnh cửu là một máy phát điện có cơ chế chuyển đổi chuyển động trực tiếp kết nối giữa hai phao. Máy phát điện gồm phần dịch chuyển (rotor) với các cuộn dây ở dạng piston và stator gồm nam châm vĩnh cửu với phân cực nam châm xen kẽ. Phần dịch rotor kết nối với phao thứ nhất và stator có liên kết cứng nối với phao thứ hai. Sự dịch chuyển tương đối giữa hai phao gây ra dịch chuyển tương đối giữa rotor và stator. Khi phần dịch rotor di chuyển tương đối với stator, từ trường xen kẽ trong stator sẽ sản sinh ra suất điện động trong các dây dẫn. Năng lượng đầu ra của máy phát điện sẽ được kết nối với hệ thống tích trữ bên ngoài.

Mô hình máy phát trong dự án VNU – QG.14.01 đã được thiết kế để phù hợp sử dụng trong chuyển đổi năng lượng sóng bằng cơ cấu truyền chuyển động thẳng trực tiếp. Dựa trên nguyên tắc, một sơ đồ của máy phát và kết nối từ máy phát đến phao được thể hiện trong Hình 1 và 2. Trong thiết kế của máy phát, phần lõi cuộn dây được sử dụng bằng vật liệu không có yếu tố từ tính từ đó loại bỏ được lực cogging. Nhìn chung, máy phát điện đã được thiết kế dưới dạng hình ống có sử dụng các cặp nam châm tạo khe từ (Hình 2).

Một trong những tham số quan trọng nhất trong máy phát điện là thông lượng từ có trong mặt phẳng chuyển động của dây dẫn trong cuộn dây. Suất điện động tự cảm phụ thuộc vào số vòng của cuộn dây, mật độ từ thông trong máy phát. Với khối lượng cố định trong máy phát, dây nam châm kép sắp xếp theo cấu trúc Halbach được áp dụng để tăng cường độ đầu ra. Lược đồ của trình tạo được hiển thị trong Hình 3.



Hình 1. Máy phát điện nối với hệ phao



Hình 2. Giản đồ của máy phát điện (a) mặt cắt ngang và (b) các cuộn dây và nam châm trong mặt cắt A-A

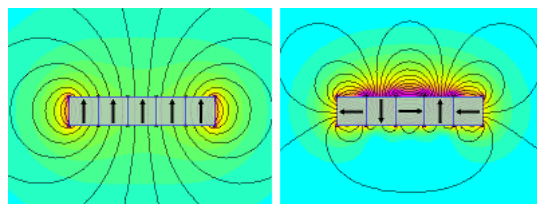
Dây nam châm sắp xếp theo cấu trúc Halbach

Dây nam châm Halbach là sự sắp xếp có định hướng của nam châm vĩnh cửu làm cho từ trường ở một bên của dây mạnh hơn, đồng thời triệt tiêu từ trường về gần 0 ở phía bên

kia. Điều này rất khác với từ trường xung quanh một nam châm. Với một nam châm duy nhất, bạn có một từ trường cường độ bằng nhau ở hai bên của nam châm, như hình bên trái hình 3.

Hình 3 bên trái là dây nam châm gồm 5 nam châm nhỏ có tất cả các cực Bắc hướng lên trên. Từ tính của dây trong trường hợp này giống như một nam châm dài duy nhất. Hình 3 bên phải là dây nam châm được sắp xếp lại theo cấu trúc Halbach. Cường độ trường được biểu thị bằng thang màu, mạnh bằng nhau ở mặt trên và mặt dưới của nam châm. Ngược lại, mảng Halbach hiển thị bên phải có trường rất mạnh ở phía trên và trường khá yếu ở phía dưới. [4]

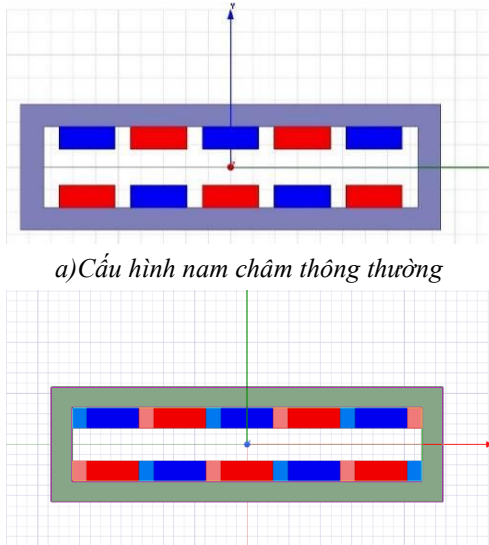
Hiệu ứng ban đầu được phát hiện một cách ngẫu nhiên bởi John C. Mallinson vào năm 1973 và được ông mô tả là cấu trúc "thông lượng một phía". Vào những năm 1980, nhà vật lý Klaus Halbach đã độc lập phát minh ra mảng Halbach để tập trung các chùm hạt, electron và laser.



Hình 3. Dây nam châm sắp xếp theo phân cực đồng nhất và theo cấu trúc Halbach [4]

3. Từ trường trong máy phát điện

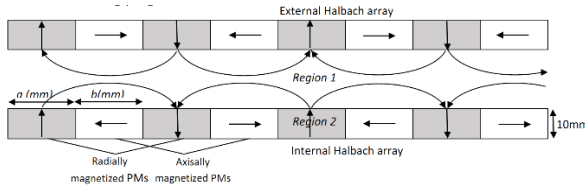
Do tính đối xứng trục, từ trường 2D sẽ được khảo sát dọc theo trục máy phát và xuyên qua tâm đối xứng của một khe từ. Để phân tích từ thông từ trường trong máy phát với các dây nam châm, hai trường hợp mô phỏng đã được nghiên cứu. Trong trường hợp đầu tiên, nam châm vĩnh cửu có kích thước dài 25 mm và rộng 10 mm được bố trí thường xuyên với không gian 7 mm như trong dự án VNU - QG.14.01 (Hình 4a) để xác nhận tính chính xác của phương pháp mô phỏng. Trong phần hai, nghiên cứu sẽ thực hiện khảo sát từ trường của các nam châm mảng Halbach kép (Hình 4b).



b) Cấu hình nam châm theo cấu trúc Halbach

Hình 4. Cách sắp xếp nam châm theo 2 cấu hình

Dựa trên sự sắp xếp các nam châm vĩnh cửu, phân bố từ trường trong máy phát được mô tả với các phương trình Laplace và Poisson. Tính toán số từ phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng để phân tích và quan sát sự thay đổi từ thông trong khe hở không khí của máy phát [5]-[8].

**Hình 5.** Thông số hình học và cấu trúc phân cực từ của dây nam châm Halbach kép

Thông số quan trọng nhất trong một máy phát điện là trường thông lượng từ cắt ngang với dịch chuyển của dây dẫn trong cuộn cảm. Theo các công thức tính toán trường điện từ của Maxwell, không gian trong máy phát được chia làm 2 vùng dựa trên đặc tính từ của vật liệu. Khe không khí giữa 2 dây nam châm máy phát hay khoảng không gian của các cuộn dây di chuyển có từ thẩm là 1.0 được kí hiệu là vùng 1. Vùng nam châm vĩnh cửu cấu tạo bởi vật liệu đất hiếm được kí hiệu là vùng 2. Đặc tính từ trường của vùng 1 và 2 được biểu diễn bởi mối quan hệ giữa cường độ từ trường, H (A/m) và mật độ thông lượng từ, B (Tesla) qua công thức:

$$\vec{B}_1 = \mu_0 \vec{H}_1, \quad (1)$$

$$\vec{B}_2 = \mu_0 \mu_r \vec{H}_2 + \mu_0 \vec{M} \quad (2)$$

Trong đó μ_0 là độ từ thẩm của chân không với giá trị là $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, μ_r là độ từ thẩm của các nam châm vĩnh cửu, $\vec{M} = \vec{B}_{rem}/\mu_0$ là vector độ từ dư hóa đơn vị tính theo A/m, và $\vec{B}_{rem}$ là cảm ứng từ dư.

Việc giải các phương trình mô tả từ trường, ví dụ như phương trình Laplace và phương trình Poisson, là cần thiết để có hình dung cụ thể về từ trường trong máy phát. Định luật Gauss cho từ tính phát biểu rằng

$$\nabla \cdot \vec{B}_i = 0 \text{ trong đó } i = 1, 2.$$

Vì thế vector từ $\vec{A}_i$ có thể biểu diễn theo công thức

$$\vec{B}_i = \nabla \times \vec{A}_i \quad (3)$$

Theo đó, phương trình có thể viết

$$\nabla \times \vec{B}_i = -\nabla^2 \vec{A}_i \quad (4)$$

Trong vùng 1, kết hợp phương trình Maxwell và phương trình 1 đem lại

$$\nabla \times \vec{B}_1 = \nabla \times \mu_0 \vec{H}_1 = \mu_0 \vec{J} \quad (5)$$

Thay phương trình 4 vào 5 thu được $\nabla^2 \vec{A}_1 = -\mu_0 \vec{J}$; trong đó, $\vec{J}$ (A/m²) là mật độ dòng trong trường. Trong nam châm vĩnh cửu $\vec{J} = 0$, từ đó phương trình Laplace cho vùng 1 có thể biểu diễn là:

$$\nabla^2 \vec{A}_1 = 0 \quad (6)$$

Đối với vùng 2, sự kết hợp phương trình Maxwell và phương trình 2 đưa tới

$$\nabla \times \vec{B}_2 = \mu_0 \mu_r \vec{J} + \mu_0 \nabla \times \vec{M} \quad (7)$$

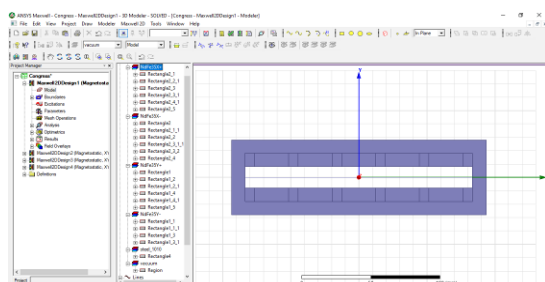
Tương tự, phương trình 4 và phương trình 7 dẫn đến phương trình Poisson cho vùng 2.

$$\nabla^2 \vec{A}_2 = -\mu_0 \nabla \times \vec{M} \quad (8)$$

4. Phân tích phần tử hữu hạn và kết quả mô phỏng

Thực hiện giải bài toán trên bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), phần mềm Ansys Maxwell đã được sử dụng.

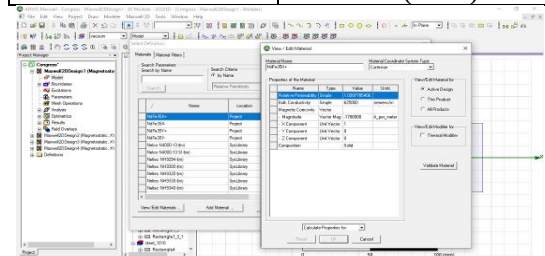
Đầu tiên, xây dựng mô hình nam châm trong bài toán như hình 6.



Hình 6. Xây dựng model trong Ansys Maxwell

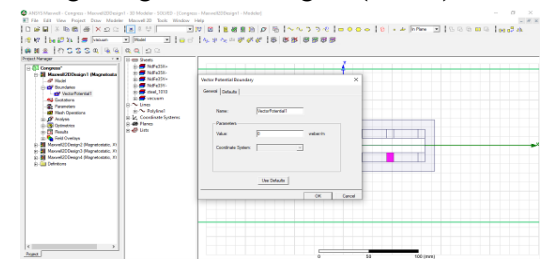
Thiết lập các thông số kích thước, đặc tính vật liệu từ của nam châm sử dụng trong mô phỏng là NdFe35 với các thông số sau (hình 7).

Độ từ thẩm nam châm	1.0997785406
Lực từ kháng	-890000 (A/m ²)
Độ dẫn điện khối	625000 (Siemens/m)
Từ dư Br	1.23 (Tesla)



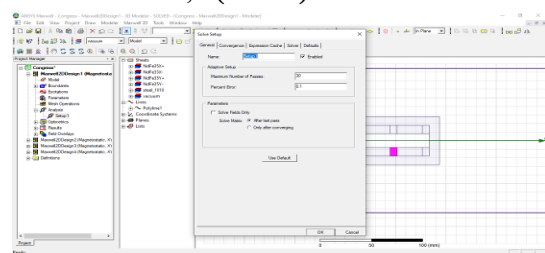
Hình 7. Thiết lập đặc tính trong Ansys Maxwell

Thiết lập điều kiện biên trong bài toán, vector từ thế trong điều kiện biên đặt bằng 0 do không có nguồn từ bên ngoài (hình 8).



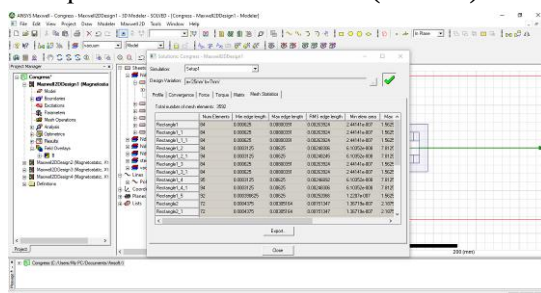
Hình 8. Thiết lập điều kiện biên cho bài toán

Thiết lập điều kiện cho bộ giải toán với phần trăm sai số là 0,1 (hình 9).



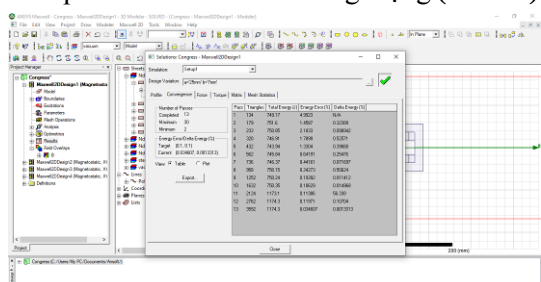
Hình 9. Thiết lập solution trong Ansys Maxwell

Kết quả chia lưới cho bài toán (hình 10).



Hình 10. Kết quả chia lưới trong bài toán

Kết quả tính toán về sai số năng lượng (hình 11).

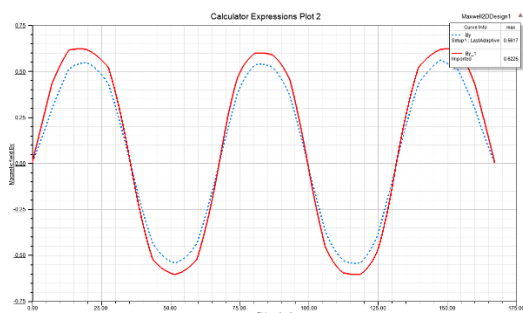


Hình 11. Kết quả năng lượng trong bài toán

4.1. Tính toán mô phỏng cho 2 cấu hình nam châm trong máy phát điện

Cấu hình 1 được sắp xếp như trong Hình 4a, cấu hình 2 được sắp xếp như trong Hình 4b. Trong cấu hình 1, cấu trúc gồm 2 dây nam châm phân cực dọc theo hướng thẳng đứng cách nhau 7 mm và kích thước nam châm là: dài 25 mm, rộng 10 mm sắp xếp như trong Hình 4a. Cấu hình 2 khác với cấu hình 1 bởi sự hiện diện của các nam châm phân cực ngang lấp đầy khoảng cách giữa các nam châm phân cực thẳng xen kẽ trong cấu hình 1 và được biểu diễn như Hình 4b. Các nam châm dài 7mm, rộng 10 mm. Khoảng cách giữa hai nam châm là 16 mm.

Kết quả mô phỏng như Hình 12 cho thấy mật độ từ thông tăng khi cấu trúc mảng Halbach được sử dụng. Đường chấm màu xanh cho thấy mật độ từ thông tại đường trung tâm của máy phát được giới thiệu trong dự án VNU-QG.14.01, và đường màu đỏ cho thấy mật độ từ thông của máy phát khi sử dụng cấu trúc mảng Halbach kép. Giá trị tối đa của mật độ từ thông tại trung tâm có thể được cải thiện khoảng 10,8% do đó hiệu suất đầu ra có thể tăng đáng kể.

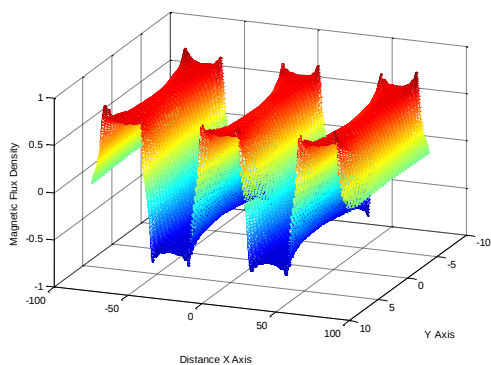


Hình 12. Cường độ từ trường của nam châm trong 2 cấu hình

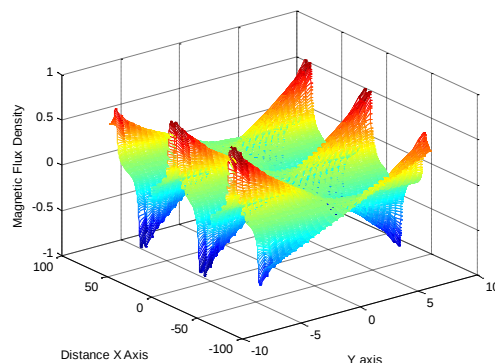
So với cấu hình cũ, máy phát điện sử dụng cấu trúc dây Halbach kép cho thấy rõ sự vượt trội trong việc tạo ra mật độ từ thông B với giá trị tối đa lớn hơn trước. Do đó, các khảo sát về sự thay đổi mật độ từ thông, từ trường B trong máy phát đối với các kích thước khác nhau của nam châm là cần thiết để tìm ra các đặc tính và thông số kích thước tối ưu cho máy phát điện.

4.2. Mô phỏng phân bố mật độ từ thông trong diện tích mặt cắt của máy phát theo cấu hình Halbach

Hình 13 mô tả phân bố từ trường phương thẳng đứng và Hình 14 mô tả phân bố từ trường phương ngang của một máy phát tuyến tính hình ống với dây Halbach kép. Các tham số cấu trúc của dây nam châm Halbach trong các tính toán số: Nam châm phân cực phương thẳng đứng có kích thước chiều dài 25 mm và chiều rộng 10 mm, nam châm phân cực theo phương ngang có chiều dài 7 mm và chiều rộng 10 mm. Trong mô phỏng này, nam châm được mô phỏng với vật liệu NdFe35 với $B_r = 1,23$.

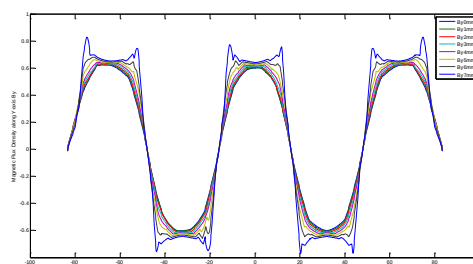


Hình 13. Phân bố từ trường theo phương thẳng đứng của máy phát tuyến tính Halbach



Hình 14. Phân bố từ trường theo phương ngang của máy phát tuyến tính Halbach

Trong máy phát điện, cuộn cảm rotor chuyển động ngang theo trục X, do đó chỉ thành phần của từ trường B_y có phương vuông góc với dịch chuyển của cuộn dây tạo ra từ thông biến thiên. Trong mô phỏng, từ trường thành phần B_y có thể được biểu diễn như Hình 13.



Hình 15. Phân bố từ trường theo phương thẳng đứng từ đường trung tâm đến mặt nam châm của máy phát tuyến tính Halbach

Như hình vẽ trên mô tả, mật độ thông lượng từ có cấu trúc điều hòa phụ thuộc vào kích thước của các nam châm. Giá trị cực đại của mật độ từ trường ở trung tâm (cách đều 2 mặt nam châm) có giá trị nhỏ nhất và tăng dần khi đến gần mặt nam châm.

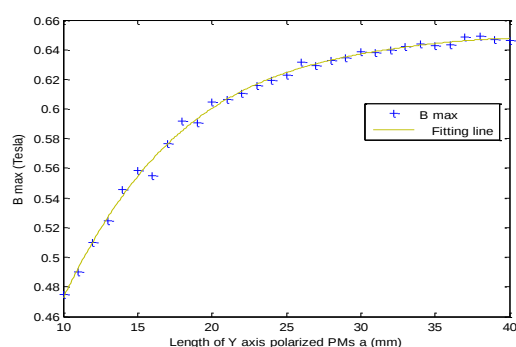
Theo định luật Faraday, suất điện động cảm ứng sinh ra trong cuộn dây tính bằng công thức.

$$\varepsilon = - \frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$$

Trong đó ε là suất điện động cảm ứng, Φ_B là từ thông. Do đó, để cải tiến suất điện động cảm ứng, mật độ thông lượng từ cần được tăng lên.

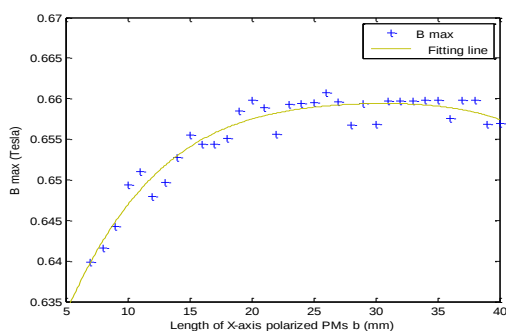
4.3. Khảo sát sự phụ thuộc cường độ từ trường cực đại với thông số kích thước nam châm

Với mục đích tăng cường mật độ thông lượng từ, các khảo sát thông số chiều dài khác nhau của nam châm phân cực dọc trục cũng như nam châm phân cực ngang được tiến hành. Thực hiện khảo sát giá trị cực đại của mật độ từ thông bằng cách thay đổi độ dài của nam châm phân cực dọc trục a (mm) từ 10 mm đến 40 mm, và sự phụ thuộc của nó vào chiều dài của nam châm phân cực trục X b (mm) (Mô tả trong Hình 5).



Hình 16. Biểu đồ sự phụ thuộc của mật độ từ thông với kích thước nam châm phân cực thẳng

Quan sát biểu đồ sự phụ thuộc của mật độ từ thông với kích thước nam châm phân cực dọc trục ta thấy khi kích thước nam châm tăng thì cường độ cực đại của từ trường tăng nhanh và tiệm cận tới giá trị ngưỡng khi chiều dài nam châm phân cực dọc trục tiến tới $a = 32$ mm. Tiếp theo, với độ lớn của nam châm có độ phân cực dọc xác định $a = 32$ mm, chúng tôi tiếp tục nghiên cứu sự thay đổi của $B_{\max}$ với sự thay đổi kích thước của nam châm phân cực ngang.



Hình 17. Biểu đồ sự phụ thuộc của mật độ từ thông với kích thước nam châm phân cực ngang

Nhìn vào biểu đồ, chúng ta chọn giá trị tối ưu của cường độ phân cực ngang $b = 25$ mm. Từ kết quả mô phỏng trên, để có được giá trị từ thông cực đại khi kích thước của nam châm phân cực dọc trục Y là 32 mm và kích thước của nam châm phân cực ngang dọc theo trục X là 25 mm.

Đối với các tham số hình học ở trên, mảng Halbach giúp tăng công suất đầu ra của máy phát khoảng 15%.

5. Kết luận

Để khắc phục nhược điểm về công suất thấp của máy phát điện tuyến tính trong bộ biến đổi năng lượng sóng, chúng tôi đã đề xuất phương án sử dụng dãy Halbach kép nhằm tăng cường từ thông cho máy phát điện tuyến tính lõi không lõi sắt.

Phần mềm Ansys Maxell đã được sử dụng để mô phỏng từ trường trong máy phát điện. Kết quả mô phỏng cho ta hình ảnh trực quan về từ trường của dãy nam châm Halbach kép trong máy phát điện tịnh tiến.

Để cải thiện hiệu quả của dãy nam châm Halbach, việc phân tích từ trường đối với ảnh hưởng của thông số kích thước nam châm đã được nghiên cứu, kết quả đã đưa ra một cấu hình với cường độ từ thông cực đại tăng 15% so với cấu hình đang sử dụng.

Kết quả của nghiên cứu này sẽ được áp dụng để phát triển bộ chuyển đổi năng lượng sóng dạng phao kép trong các đề tài của UET-VNU.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1]. T. B. Dang, "Numerical simulation of a wave energy converter using linear generator," *Vietnam Journal of Mechanics*, vol. 35, no. 2, pp.103-111, 2013.
- [2]. T. B. Dang, V. T. Doan, and H. Q. Nguyen, "Designing and Analyzing of a Dual-Bouy 5kW Wave Energy Converter," *The 8th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics-APHydro*, Hanoi - Vietnam, 2016.
- [3]. T. B. Dang, D. A. Nguyen, and V. N. Phung, "Numerical Simulation and Experimental Analysis for A Linear Trigonal Double-Face Permanent Magnet Generator Used in Direct

- Driven Wave Energy Conversion,” *Procedia Chemistry*, vol. 14, pp. 130-137, 2015.
- [4]. Anon, “K&J Magnetics, Inc,” 2020. [Online]. Available: <https://www.kjmagnetics.com/blog.asp?p=halbach-arrays>. [Accessed July 2020].
- [5]. L. Yan, L. Zhang, T. Wang, Z. Jiao, C.-Y. Chen, and I-M. Chen, “Magnetic field of tubular linear machines with dual halbach array,” *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 136, pp. 283-299, 2013.
- [6]. N. Yao, L. Yan, T. Wang, and S. Wang, “Magnetic Flux Distribution of Linear Machines with Novel Three-Dimensional Hybrid Magnet Arrays,” *Sensors*, vol. 17, p. 2662, 2017, doi: 10.3390/s17112662.
- [7]. W. Zhao, “design optimization of a linear generator with dual halbach array for human motion energy harvesting,” M.S.thesis, Dept. Elect. & Comput. Eng., Nebraska Univ., Lincoln, NE, 2015.
- [8]. J. Jun, Y. Shin, S.-J. Cho, Y.-W. Cho, S. H. Lee, and J. H. Kim, “Optimal linear generator with Halbach array for harvesting of vibration energy during human walking,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no, 5, pp. 1-8, 2016.