

NGHIÊN CỨU PHÂN BỐ TỪ TRƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TRUYỀN NĂNG LƯỢNG KHÔNG DÂY SỬ DỤNG VẬT LIỆU BIẾN HÓA LINH HOẠT CƠ HỌC

Nguyễn Như Dương^{1,2}, Phạm Thanh Sơn^{3,*}, Bùi Hữu Nguyên⁴, Bùi Xuân Khuyển²,
Bùi Sơn Tùng¹, Vũ Đình Lâm¹

¹Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,
Số 18 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô, Hà Nội

²Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Số 18 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô, Hà Nội

³Trường Điện - Điện tử, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, Số 298 Cầu Diễn, Tây Tựu, Hà Nội

⁴Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Số 18 Phố Viên, Đông Ngạc, Hà Nội

*Email: sonpt@hau.edu.vn

Tóm tắt:

Nghiên cứu này đề xuất một phương pháp mới nhằm điều hướng và tái cấu trúc phân bố từ trường trong hệ thống truyền năng lượng không dây (Wireless Power Transfer - WPT) thông qua việc điều chỉnh góc nghiêng của các ô cơ sở trong tấm vật liệu biến hóa (Metamaterials - MMs). Hệ thống được tối ưu bằng cách sử dụng mô hình cuộn phát (Tx) và cuộn thu (Rx) hoạt động tại tần số 12,75 MHz, kết hợp với tấm MMs gồm 25 ô cơ sở. Cấu trúc ô cơ sở của MMs dạng cuộn xoắn ốc 6 vòng tích hợp tụ điện trên diện tích cấu trúc tổng thể là $64 \times 64 \text{ mm}^2$ cho khả năng điều khiển linh hoạt về mặt cơ học. Cấu trúc đề xuất của MMs cho phép các ô cơ sở điều chỉnh góc nghiêng từ 0° đến 90° khi hoạt động. Kết quả quan trọng cho thấy, khi tấm MMs có các ô cơ sở đồng phẳng (0°), từ trường phân bố không đồng đều và lan tỏa ra phần rìa của cấu trúc. Khi nghiêng các hàng ở rìa tấm (15° - 45°), từ trường tập trung mạnh hơn vào trung tâm cấu trúc. Đặc biệt với góc nghiêng 30° , hệ thống WPT đạt hiệu suất tối ưu với hệ số truyền qua $S_{21} = 0,71$ (tăng 25 % so với hệ đồng phẳng). Bên cạnh đó, khi tăng góc nghiêng từ 60° - 90° , hiệu ứng điều khiển từ trường giảm đi do sự tăng cường thu được từ tấm vật liệu nhỏ hơn mất mát sinh ra trên chính nó. Kết quả này khẳng định, giải pháp điều chỉnh cơ học linh hoạt cấu trúc MMs là chìa khóa cho điều khiển sự lan truyền năng lượng từ trường trong không gian, nâng cao hiệu suất và độ định hướng của công nghệ truyền dẫn/quản lý năng lượng trong các hệ WPT thông minh.

Từ khóa: Truyền năng lượng không dây, vật liệu biến hóa, tái cấu hình, điều hướng từ trường.

GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, công nghệ truyền năng lượng không dây (Wireless Power Transfer - WPT) đã thu hút sự quan tâm đặc biệt của cộng đồng nghiên cứu và các ngành công nghiệp ứng dụng. Với ưu điểm vượt trội như tính an toàn, độ linh hoạt cao và khả năng truyền năng lượng mà không cần tiếp xúc vật lý, WPT đang dần trở thành một giải pháp năng lượng hiệu quả cho các hệ thống yêu cầu cấp nguồn trong điều kiện đặc biệt, như thiết bị y tế cấy ghép, cảm biến môi trường, thiết bị đeo, robot siêu nhỏ, xe điện hoặc thiết bị bay không người lái [1-5].

Trong số các kỹ thuật WPT, truyền năng lượng không dây dựa trên cộng hưởng từ (Magnetic Resonant Wireless Power Transfer - MR-WPT) là một trong những phương pháp được ứng dụng rộng rãi trong vùng trường gần (near-field) do hiệu suất cao và khoảng cách truyền phù hợp. MR-WPT hoạt động dựa trên nguyên lý ghép cặp cộng hưởng giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu, cho

phép truyền năng lượng hiệu quả ngay cả khi hai cuộn không hoàn toàn đồng trục. Tuy nhiên, một trong những thách thức lớn của MR-WPT là làm thế nào để điều khiển và phân bố từ trường một cách tối ưu nhằm tập trung năng lượng vào khu vực thu, đặc biệt trong môi trường phức tạp, có thể gây phân tán hoặc suy giảm từ trường như: vật liệu không đồng nhất, cấu trúc bị che chắn, hoặc điều kiện lắp đặt không được đối xứng [6-8].

Để cải thiện hiệu quả truyền năng lượng, nhiều nghiên cứu đã đề xuất ứng dụng vật liệu biến hóa (metamaterials - MMs), đặc biệt là các tấm MMs có độ từ thẩm âm (negative permeability). Các cấu trúc MMs này được chế tạo bằng cách sắp xếp các ô cơ sở có kích thước nhỏ hơn bước sóng làm việc (subwavelength), có khả năng tương tác mạnh với trường điện từ tại tần số cộng hưởng. Việc đặt các tấm MMs gần hoặc chính giữa hai cuộn cộng hưởng có thể làm tăng cường mật độ từ thông tại vị trí thu, từ đó cải thiện hiệu suất truyền năng lượng và giảm tổn hao do rò rỉ trường.

Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu hiện tại chỉ tập trung vào việc thiết kế cấu trúc ô cơ sở của MMs hoặc tối ưu thông số cộng hưởng bằng cách thay đổi giá trị tụ điện [9-11]. Trong khi đó, vấn đề về điều khiển hình học không gian của toàn bộ tấm vật liệu biến hóa, đặc biệt là theo hướng ba chiều (3D), vẫn chưa được khai thác đầy đủ. Một hạn chế phổ biến của các hệ thống sử dụng MMs cố định là hiện tượng từ trường phân bố không tập trung, dẫn đến suy giảm năng lượng tại các vùng trung tâm của tấm, nơi mà cuộn thu Rx thường được đặt.

Trước thực tế đó, nghiên cứu này đề xuất một giải pháp đơn giản nhưng hiệu quả: sử dụng cấu hình tấm vật liệu biến hóa có khả năng tái cấu trúc hình học - cụ thể là điều chỉnh góc nghiêng của các ô cơ sở trong tấm vật liệu biến hóa. Thay vì sử dụng các phần tử chủ động, vi điều khiển hoặc kỹ thuật phức tạp, giải pháp này tận dụng hiệu ứng hình học để định hướng lại trường từ, hướng năng lượng về khu vực cần thiết. Đây là một cách tiếp cận linh hoạt, khả thi trong thực tiễn, và dễ triển khai cho các hệ thống WPT sử dụng các cấu trúc cơ khí đơn giản. Bằng việc khảo sát chi tiết ảnh hưởng của các góc nghiêng khác nhau lên phân bố từ trường và hệ số truyền qua (S_{21}), nghiên cứu nhằm mục tiêu tìm ra cấu hình hình học tối ưu cho hệ thống truyền năng lượng không dây sử dụng tấm vật liệu biến hóa. Kết quả không chỉ có ý nghĩa về mặt lý thuyết trong việc hiểu rõ hơn cơ chế điều hướng trường từ trong môi trường cộng hưởng, mà còn mở ra ứng dụng thực tiễn cho các hệ thống truyền năng lượng đa điểm, linh hoạt và hiệu suất cao trong tương lai.

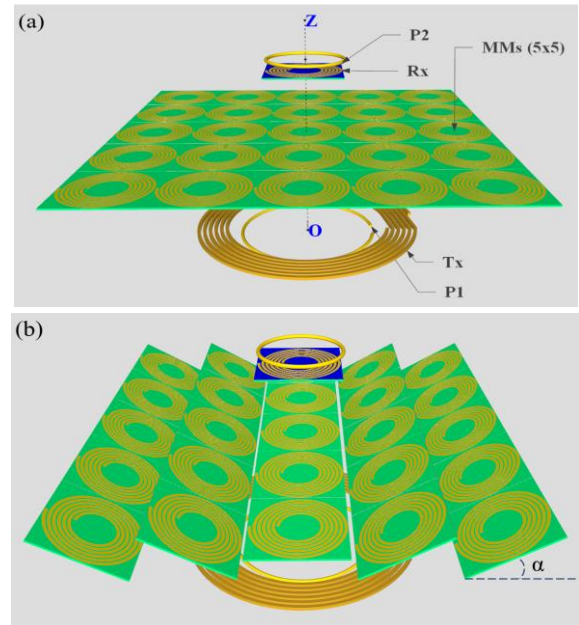
THỰC NGHIỆM

Hệ thống truyền năng lượng không dây tích hợp vật liệu biến hóa (MM-WPT) trong nghiên cứu này gồm có 5 thành phần chính: Ăng ten phát (P1), cuộn cộng hưởng phát (Tx), tấm vật liệu biến hóa (MMs), cuộn cộng hưởng thu (Rx) và ăng ten thu (P2). Cấu hình được bố trí theo trục thẳng đứng (Oz) với P1 ở đáy và P2 ở phía trên cùng (Hình 1(a)).

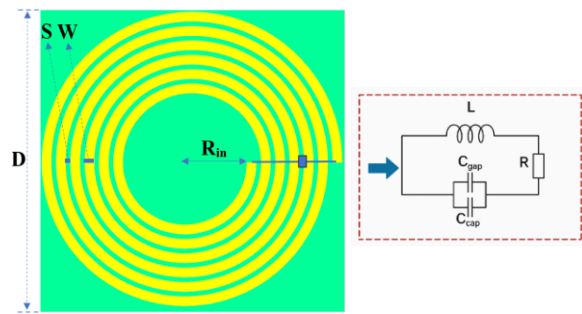
Cuộn cộng hưởng phát được thiết kế dưới dạng cuộn dây xoắn ốc gồm 6 vòng dây có đường kính ngoài 100 mm và chiều dày vòng dây 3 mm. Khoảng cách giữa cuộn Tx và tấm MMs là $d_{Tx-M} = 100$ mm. Cuộn cộng hưởng thu có cấu trúc tương tự ô cơ sở và được đặt phía trên tấm MMs với khoảng cách $d_{Rx-M} = 62$ mm.

Tấm vật liệu biến hóa được cấu thành từ 25 ô cơ sở bố trí theo ma trận 5×5. Mỗi ô cơ sở là một cuộn

dây đồng dạng xoắn ốc 6 vòng phẳng có bán kính trong $R_{in} = 13$ mm, độ rộng dây $W = 2$ mm, khoảng cách giữa các dây $S = 1$ mm và độ dày 0,035 mm. Cuộn dây đồng được đặt trên tấm đế làm bằng vật liệu FR4 có kích thước 64 mm × 64 mm, độ dày 1,6 mm. Để tạo cộng hưởng từ tại tần số làm việc, mỗi ô cơ sở được ghép nối với một tụ điện rời có giá trị $C = 95$ pF, cấu thành mạch cộng hưởng LC (Hình 2).



Hình 1: Cấu hình hệ thống truyền năng lượng không dây (a) với tấm MM phẳng đồng nhất và (b) MM được tái cấu trúc hình học với góc nghiêng α

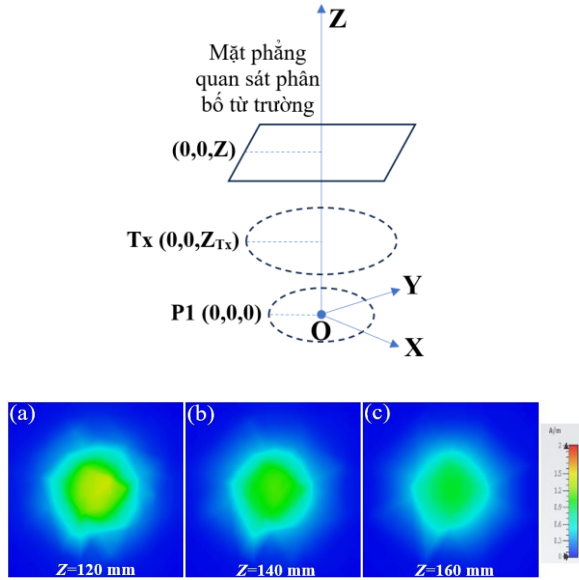


Hình 2: Cấu hình ô cơ sở của tấm vật liệu biến hóa và sơ đồ mạch điện tương đương rút gọn

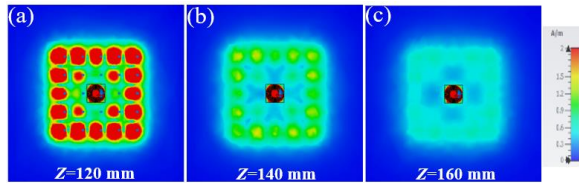
KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Các cấu hình MM-WPT với tấm vật liệu biến hóa được giới thiệu ở phần trên đã được đánh giá mô phỏng bằng phần mềm CST Studio Suite. Trong các mô phỏng này điều kiện biên “open” được sử dụng cho mọi hướng của hệ thống WPT. Hình 3 trình bày các kết quả phân bố từ trường tại mặt cắt $Z = 120, 140, 160$ mm khi không có tấm vật liệu

biến hóa. Các kết quả cho thấy rằng từ trường có sự suy giảm cường độ tại các bề mặt ở xa cuộn cộng hưởng và từ trường có xu hướng tập trung vào trung tâm của mặt cắt. Điều đó phù hợp với cấu hình của cuộn cộng hưởng.



Hình 3: Phân bố từ trường theo trục Z của hệ WPT khi không có tấm MM tại khoảng cách (a) 120 mm, (b) 140 mm và (c) 160 mm

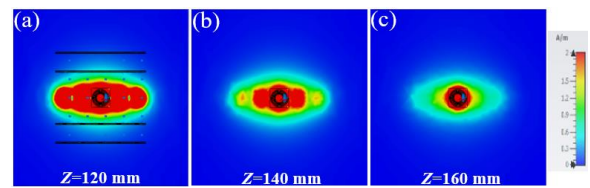


Hình 4: Phân bố từ trường theo trục Z của hệ WPT khi có tấm vật liệu biến hóa - cấu trúc phẳng đồng nhất

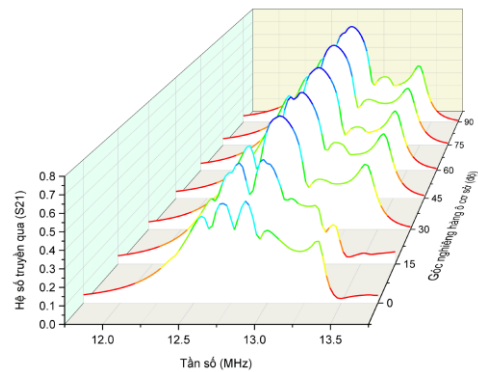
Hình 4 minh họa phân bố từ trường của hệ WPT-MMs tại các vị trí như trong Hình 3 khi có tấm MMs phẳng đồng nhất (hàng ô cơ sở không nghiêng, góc $\alpha = 0^\circ$). Đây là trường hợp cơ bản, nơi tất cả ô cơ sở nằm trên mặt phẳng song song với cuộn phát (Tx) và thu (Rx). So với khi không có tấm MMs (Hình 3), từ trường được tăng cường hơn, cụ thể: Tại $Z = 120$ mm (gần tấm MMs) từ trường tương đối đều nhưng cao hơn ở rìa, suy giảm nhẹ trung tâm do tương tác từ tính đồng nhất giữa ô cơ sở. Tại $Z = 140$ mm suy giảm rõ rệt vùng trung tâm. Tại $Z = 160$ mm (gần Rx) từ trường tiếp tục lan tỏa, giảm từ thông đến Rx, hệ số truyền qua $S_{21} \approx 0,57$.

Hình 5 minh họa phân bố từ trường khi có tấm MMs tái cấu trúc hình học với các hàng ô cơ sở

ngiên (các hàng rìa nghiêng góc 30°). Điều này tạo ra cấu trúc tấm MMs không đồng nhất về hình học, tận dụng hiệu ứng định hướng để điều khiển trường từ. Tại $Z = 120$ mm từ trường bắt đầu tập trung mạnh hơn về trung tâm so với phân bố tại Hình 4, với cường độ cao ở vùng giữa (hàng ô cơ sở không nghiêng) và giảm dần ra rìa (hàng ô cơ sở nghiêng). Tại $Z = 140$ mm và 160 mm tuy có giảm so với $Z = 120$ mm nhưng từ trường vẫn tập trung mạnh vào trung tâm, tăng mật độ từ thông đến Rx. Tổng thể, phân bố có xu hướng “định xứ” làm giảm tổn hao năng lượng từ trường lan tỏa ra vùng không tải, do đó năng lượng nhận được tại cuộn thu được tăng cường.



Hình 5: Phân bố từ trường theo trục Z của hệ WPT khi có tấm MM - cấu trúc hàng ô cơ sở nghiêng tại khoảng cách (a) 120 mm, (b) 140 mm và (c) 160 mm



Hình 6: Hệ số truyền qua S_{21} khi các hàng ô cơ sở không nghiêng (0°) và nghiêng ở lần lượt 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°

Hình 6 cho thấy kết quả so sánh hệ số truyền qua (S_{21}) khi sử dụng tấm MMs cấu trúc phẳng đồng nhất và tấm MMs tái cấu trúc hình học với góc nghiêng α khác nhau. Trường hợp không nghiêng ($\alpha = 0^\circ$) từ trường phân bố không đều, đặc biệt suy giảm rõ rệt tại vùng trung tâm, giá trị $S_{21} \sim 0,57$.

Khi $\alpha = 15^\circ$ từ trường tập trung mạnh hơn về vùng trung tâm, giá trị $S_{21} \sim 0,64$ (tăng $\sim 12\%$ so với cấu hình phẳng). Với $\alpha = 30^\circ$, từ trường phân bố đồng đều và tập trung vào vùng trung tâm và thu được giá trị hệ số truyền qua tối ưu đạt: $S_{21} = 0,71$ (tăng 25% so với cấu hình phẳng).

Kết quả cho thấy, với sự điều khiển linh hoạt về cơ học (ngiên các ô bên rìa một góc phù hợp, đặc biệt là 30°), hệ thống có thể điều hướng từ trường về trung tâm và tăng hiệu suất truyền dẫn lên hơn 25 % so với cấu hình phẳng truyền thống. Khác với các hướng dùng vật liệu biến hóa có thể điều chỉnh giá trị tụ điện gắn ngoài, giải pháp cơ khí chủ động này có tiềm năng ứng dụng cao do dễ chế tạo, không đòi hỏi mạch điều khiển phức tạp.

KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã chứng minh rằng điều chỉnh hình học các ô cơ sở của tấm vật liệu biến hóa là phương pháp hiệu quả để điều hướng và tập trung từ trường trong hệ thống WPT. Cấu hình có các hàng ô cơ sở nghiêng 30° cho kết quả tốt nhất, mở ra khả năng thiết kế tấm vật liệu biến hóa tái cấu hình theo yêu cầu định hướng truyền năng lượng. Các góc nghiêng khác cũng có thể tăng cường từ trường cho những cấu hình khác của hệ thống WPT sẽ tiếp tục được triển khai nghiên cứu.

Lời cảm ơn: Công trình này được thực hiện với sự hỗ trợ của đề tài Nghiên cứu cơ bản và phát triển vật liệu đặc biệt do Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam tài trợ, mã số NCPTVL.03.24-25.

Tài liệu tham khảo

1. S. Mahmud, M. Hasan, I. Y. Hossain, Bioelectronic Medicine, 10 (2024).
2. W. Onreabroy, S. Piemsomboon, S. Traikunwaranon, N. Wilaiprajuabsang, A. Kaewpradap, World Electric Vehicle Journal, 16(1), 48 (2025).
3. S.R. Khan, S. K. Pavuluri, G. Cummins, M. P. Y. Desmulliez, Sensors, 20(12), 3487 (2020).
4. M. Särestöniemi, M. Hämäläinen, J. Iinatti, IEEE Access, 5, 18845-18856 (2017).
5. J. Lian, X. Qu, X. Chen, C. C. Mi, IEEE JESTPE, 10(1), 128-137 (2022).
6. Z. Gong, Q. Zhang, C. M. Li, Applied Sciences, 10(23), 8506 (2020).
7. L. Xu, S. Chen, J. Yan, ACS Applied Materials & Interfaces, 17(6), 14323-14333 (2025).
8. D. Shan, H. Wang, K. Cao, J. Zhang, Scientific Reports, 12(1), 331 (2022).
9. B.X. Khuyen, L.T.H. Hiep, Q.M. Ngo, V.D. Lam, T.S. Pham, Materials, 15(19), 6583 (2022).
10. T.S. Pham, B.X. Khuyen, V.D. Lam, Journal of Electronic Materials, 50(2), 443-449 (2021).
11. B.H. Nguyen, et al., Crystals, 14(11), 999 (2024).