

# Điều khiển chuyển mạch trong hệ thống sạc động không dây cho xe điện

## Switching control in the dynamic wireless charging system for electric vehicles

Nguyễn Thị Điệp<sup>1</sup>, Nguyễn Kiên Trung<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Khoa Điều khiển và Tự động hóa, Trường Đại học Điện lực

<sup>2</sup> Khoa Tự động hóa, Trường Điện – Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

\*Corresponding author E-mail: [trung.nguyenkien1@hust.edu.vn](mailto:trung.nguyenkien1@hust.edu.vn)

### Abstract

To reduce magnetic field radiation and power loss in the dynamic wireless charging system for electric vehicles, normally the power is not supplied to the entire transmission lane, but only to the transmission segments where the electric vehicle passes. This paper proposes a new method for switching control of transmission lane segments according to the electric vehicle position. The proposed method does not need to use additional sensors, cameras, or other devices to recognize the electric vehicle position, but simply measures the current on the coils below the transmission lane. In addition, the switching control position had chosen so that the power pulsation is minimal. Research results have shown the switching order of the modules in the transmission lane, electric vehicle position is recognized accurately, the maximum power pulse rate is 8.3%.

**Keywords:** Dynamic wireless charging, electric vehicle, switching control

### Tóm tắt

Để giảm bức xạ từ trường và tổn hao công suất trong hệ thống sạc động không dây cho xe điện, thông thường nguồn điện không được cấp cho toàn bộ làn đường truyền mà chỉ cấp cho đoạn đường truyền có xe điện đi qua. Bài báo này đề xuất một phương pháp mới điều khiển chuyển mạch các đoạn đường truyền theo vị trí của xe điện. Phương pháp điều khiển đề xuất không cần sử dụng thêm các loại cảm biến, camera hay các thiết bị phụ khác để nhận biết vị trí của xe điện mà chỉ cần đo dòng điện trên các cuộn dây ở dưới làn đường truyền. Ngoài ra, vị trí điều khiển chuyển mạch được chọn sao cho độ đập mạch công suất tải là nhỏ nhất. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra thứ tự chuyển mạch các mô đun trong làn đường truyền, vị trí xe điện được nhận biết chính xác, độ đập mạch công suất trong toàn dải điều chỉnh lớn nhất bằng 8.3%.

### 1. Giới thiệu chung

Xe điện (Electric Vehicle - EV) đã và đang dần trở thành xu hướng tất yếu trong tương lai bởi nó giúp cải thiện đáng kể tình trạng ô nhiễm môi trường đang ngày nghiêm trọng, đồng thời tiết kiệm nguồn tài nguyên thiên nhiên đang dần cạn kiệt. Song hành cùng với sự phát triển của EV đó là các hệ thống sạc cho xe điện. Ngoài phương pháp sạc dùng dây cáp truyền thống, gần đây các hệ thống sạc không dây cho xe điện đã và đang được nghiên cứu, phát triển mạnh mẽ [1]. Xe điện sử dụng sạc không dây sẽ tiện lợi hơn và an toàn hơn so với sử dụng sạc cắm dây. Hiện nay, hai phương pháp sạc đang được nghiên cứu phát triển là sạc không dây tĩnh và sạc không dây động [1], [2]. Trong đó, hệ thống sạc không dây động có nhiều ưu điểm vượt trội như xe điện có thể vừa di chuyển vừa sạc, đồng thời cần một dung lượng ắc quy nhỏ hơn phương pháp

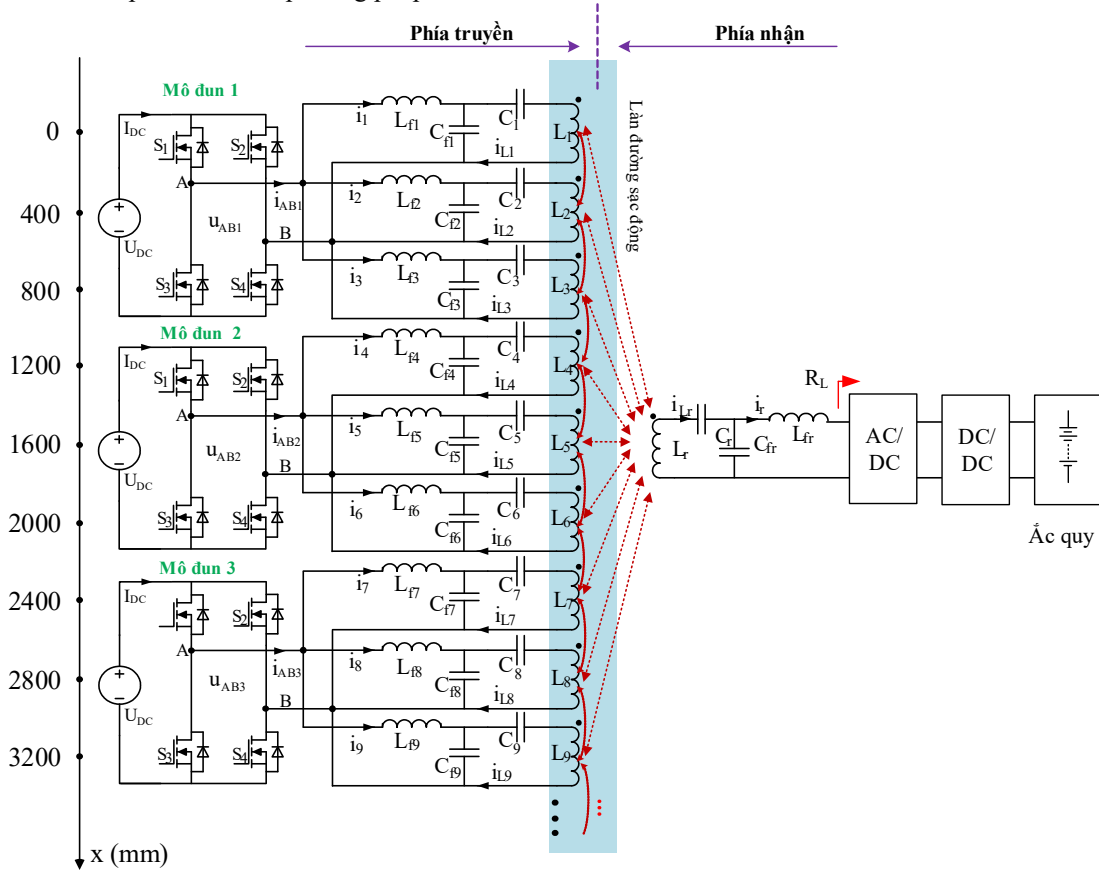
sạc truyền thống, giúp cho giá thành xe điện được giảm xuống đáng kể.

Làn đường sạc là một phần quan trọng của hệ thống sạc động, bao gồm hai dạng chính là kiểu đường dài và kiểu đoạn [3, 4, 5]. Làn đường sạc kiểu đường dài có cấu trúc đơn giản và điều khiển dễ dàng. Tuy nhiên, toàn bộ làn đường truyền được cấp nguồn ngay cả ở những đoạn không có EV. Điều đó gây tổn thất điện năng và bức xạ từ trường (EMF). Làn đường sạc kiểu đoạn tránh được các vấn đề trên, tuy nhiên cần phải điều khiển để chuyển mạch các đoạn của đường truyền theo vị trí của EV [6, 7, 8]. Ngoài ra, cần tìm vị trí của EV để chuyển mạch sao cho đập mạch công suất tải nhỏ nhất.

Một số nghiên cứu đã được thực hiện để phát hiện vị trí của EV, nghiên cứu [9] đề xuất sử dụng kết hợp cảm biến và camera để phát hiện EV. Nghiên cứu [10] đưa ra giải pháp phát hiện vị trí EV bằng phương thức truyền thông hai phía truyền-nhận. Tuy nhiên, các giải pháp này chỉ hoạt động hiệu quả khi EV di chuyển với tốc độ thấp. Nghiên cứu [11] sử dụng hệ thống các cuộn dây phụ để nhận biết vị trí của EV, hệ thống này cồng kềnh, tăng chi phí. Ngoài ra, các nghiên cứu trên chưa xem xét đến vị trí của EV để chuyển mạch các đoạn của đường truyền sao cho đập mạch công suất ra là nhỏ nhất.

Bài báo này đề xuất một phương pháp mới điều khiển chuyển mạch các đoạn đường truyền trong hệ thống sạc động không dây cho xe điện theo vị trí của EV mà vẫn đảm bảo độ đập mạch của công suất tải nhỏ. Đầu tiên, đặc tính hệ số kết nối điện từ của đường truyền được phân tích. Sau đó, các phương án chuyển mạch các mô đun truyền được phân tích để tìm vị trí chuyển mạch sao cho độ đập mạch công suất nhỏ nhất. Tiếp theo bài báo trình bày phương pháp nhận biết vị trí của EV bằng cách đo giá trị hiệu dụng trên các cuộn dây của mạch bù

và thuật toán điều khiển chuyển mạch. Cuối cùng một mô hình mô phỏng được thiết lập để xác minh phương pháp đề xuất.



Hình 1: Cấu trúc hệ thống sạc động không dây cho xe điện

## 2. Cơ sở lý thuyết

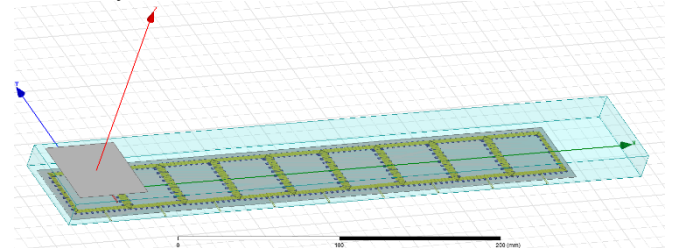
### 2.1. Cấu trúc hệ thống sạc động

Cấu trúc của hệ thống sạc động không dây cho xe điện gồm hai phía truyền và nhận được mô tả như trên Hình 1. Phía truyền được thiết kế kiểu mô đun, mỗi mô đun truyền bao gồm ba cuộn dây được cấp điện bởi một bộ nghịch lưu. Mỗi cuộn dây được nối với một mạch bù LCC riêng và được nối song song với các cuộn dây truyền khác. Với mỗi mô đun truyền, điện áp vào một chiều  $U_{DC}$  được biến đổi thành điện áp xoay chiều  $u_{AB}$  tần số cao bằng bộ nghịch lưu cầu một pha và đưa đến các cuộn dây truyền thông qua mạch bù LCC. Dòng điện tần số cao trong các cuộn truyền tạo ra từ trường xoay chiều. Ở phía nhận, cuộn dây nhận cảm ứng được một điện áp xoay chiều tần số cao, qua mạch bù LCC đưa đến bộ biến đổi AC/DC. Sau đó, qua các bộ biến đổi DC/DC điều khiển trạng thái sạc của ắc quy và cấp nguồn cho ắc quy. Cuộn dây nhận  $L_r$  được đặt ở dưới gầm xe, các cuộn dây truyền  $L_i$  ( $i = 1 \div n$ ) được gắn dưới lòng đường tạo thành làn đường sạc. Thông số của cuộn dây và mạch bù được thiết kế theo [12].

### 2.2. Đặc tính hệ số kết nối điện từ

Để truyền điện không dây, có ít nhất hai bộ ghép từ trong hệ thống. Ở phía truyền được gọi là bộ ghép từ phía truyền, ở phía nhận gọi là bộ ghép từ phía nhận. Các bộ ghép từ trong hệ thống được thiết kế bao gồm ba lớp, lớp thứ nhất là cuộn

dây đơn cực hình chữ nhật, dây Litz được sử dụng nhằm giảm tổn thất xoay chiều khi làm việc ở tần số cao. Lớp thứ hai là các thanh ferrite, được sử dụng để tăng cường kết nối điện từ. Lớp thứ ba là tấm chắn nhôm, có tác dụng che chắn rò từ trường ra môi trường xung quanh. Trong bài báo này, đường truyền được thiết kế theo kiểu đoạn, các bộ ghép từ phía truyền được đặt liền kề nhau để giảm đập mạch công suất ra tải [12]. Cấu trúc làn đường truyền được thiết kế bằng phần mềm Ansys Maxwell và được biểu diễn như trên Hình 2.



Hình 2: Cấu trúc làn đường truyền

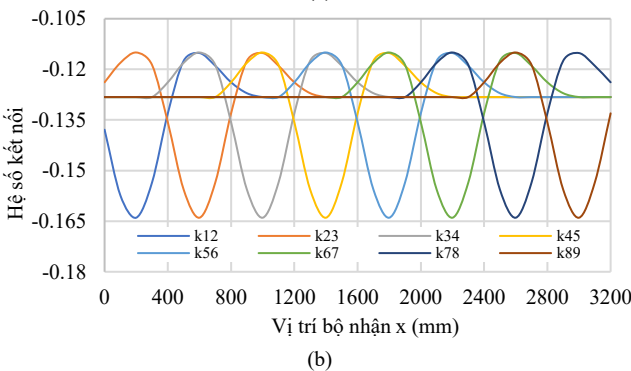
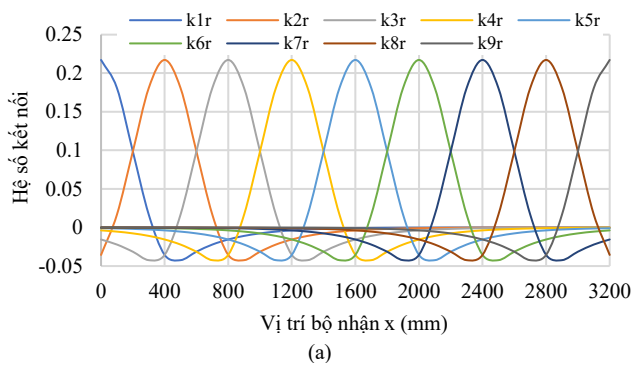
Các cuộn dây truyền được thiết kế giống hệt nhau, kích thước của mỗi cuộn dây truyền được thiết kế là 400mm x 400mm x 4.2mm; Kích thước của cuộn dây nhận là 500mm x 400mm x 4.2mm. Mỗi cuộn dây được quấn 10 vòng, khoảng cách truyền là 150mm. Mô phỏng phân tử hữu hạn FEA (finite element analysis) được thực hiện để khảo sát đặc tính của hệ số kết nối điện từ. Vì giới hạn dung lượng bộ nhớ của thiết bị mô phỏng, mô hình làn đường sạc được xây dựng với chín cuộn dây truyền, một cuộn dây nhận. Giả thiết khoảng cách

truyền được giữ không đổi và bằng 150mm. Cho bộ nhận di chuyển thẳng trục theo hướng x (không có lệch bên), vị trí của bộ nhận được định nghĩa là x. Khảo sát từ vị trí đầu (ứng với x = 0) khi cuộn dây nhận  $L_r$  thẳng tâm với cuộn truyền thứ nhất  $L_1$  tới vị trí cuối (ứng với x = 3200) khi cuộn nhận  $L_r$  thẳng tâm với cuộn truyền thứ chín  $L_9$ , kết quả mô phỏng được biểu diễn trên Hình 3.

Hình 3a là kết quả mô phỏng FEA hệ số kết nối điện từ của các cuộn dây truyền với cuộn dây nhận khi bộ nhận di chuyển theo hướng x. Hệ số kết nối điện từ của cuộn dây truyền thứ i với cuộn nhận được ký hiệu là  $k_{ir}$ , với i là chỉ số của cuộn dây truyền (i = 1 ÷ 9); r là chỉ số của cuộn dây nhận. Kết quả cho thấy, hệ số kết nối  $k_{ir}$  có giá trị lớn nhất khi cuộn dây nhận ở vị trí thẳng tâm với cuộn dây truyền đó, giá trị này giảm khi bộ nhận di chuyển ra xa vị trí của cuộn dây truyền. Ngoài ra, đặc tính của các hệ số kết nối  $k_{ir}$  giống nhau về hình dạng và độ lớn, chỉ sai khác theo vị trí với một khoảng  $\Delta = 400mm$ . Từ đặc điểm này, tiến hành nhận dạng hàm số  $k_{ir}$  theo vị trí x của cuộn nhận để có được đặc tính khi số cuộn truyền tăng đến n.

Sử dụng phần mềm Matlab nhận dạng đặc tính của  $k_{ir}$  theo vị trí x của cuộn nhận, kết quả thu được hàm số dưới đây:

$$k_{ir}(x) = a_1 e^{-\left(\frac{x-(i-5)\Delta-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 e^{-\left(\frac{x-(i-5)\Delta-b_2}{c_2}\right)^2} \quad (1)$$



**Hình 3:** Kết quả mô phỏng FEA hệ số kết nối điện từ: (a) giữa các cuộn dây truyền với cuộn dây nhận; (b) giữa các cuộn dây truyền với nhau.

**Bảng 1:** Bảng tham số nhận dạng hệ số kết nối

Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị
$a_1$	0.175	$d_1$	0.04201
$b_1$	1522	$e_1$	-0.0001362
$c_1$	145.6	$f_1$	0.1567
$a_2$	0.1602	$d_2$	0.141
$b_2$	1705	$e_2$	212.7
$c_2$	139.8	$f_2$	622.4
$\Delta$	400 mm	$x$	0 ÷ 3200 mm

Với giá trị của các hệ số  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, \Delta$  được trình bày trong Bảng 1. Trong thực tế, làn đường sạc có số cuộn dây truyền lớn hơn rất nhiều so với 9 cuộn như trong mô phỏng FEA. Do vậy, đặc tính hệ số kết nối điện từ  $k_{ir}$  như trong biểu thức (1) có thể được áp dụng cho làn đường sạc với số lượng cuộn dây truyền bất kỳ.

Mối quan hệ giữa giá trị của điện cảm hồ cảm và hệ số kết nối điện từ giữa các cuộn dây truyền và nhận như sau:

$$M_{ir}(x) = k_{ir}(x) \sqrt{L_i L_r} \quad (2)$$

Ở đây,  $L_i, L_r$  là giá trị điện cảm tự cảm của các cuộn dây truyền và cuộn dây nhận.

Hình 3b là kết quả mô phỏng FEA hệ số kết nối điện của các cuộn dây truyền kề với nhau  $k_{i(i+1)}$ . Kết quả cho thấy hệ số kết nối giữa hai cuộn dây truyền kề nhau có giá trị đáng kể. Hệ số này âm nhất khi bộ nhận ở vị trí giữa giữa hai cuộn truyền liền kề. Các đặc tính này cũng có dạng giống nhau, chỉ sai khác theo vị trí một khoảng  $\Delta = 400mm$ . Sử dụng phần mềm Matlab để nhận dạng hàm số  $k_{i(i+1)}$ , kết quả như trong biểu thức (3).

$$k_{i(i+1)}(x) = d_1 e^{-\left(\frac{x-(i-1)\Delta-e_1}{f_1}\right)^2} + d_2 e^{-\left(\frac{x-(i-1)\Delta-e_2}{f_2}\right)^2} \quad (3)$$

Với giá trị của các hệ số  $d_1, d_2, e_1, e_2, f_1, f_2$  được đưa ra trong bảng Bảng 1. Đặc tính như trong (3) cũng có thể được áp dụng cho làn đường sạc với số lượng cuộn dây truyền bất kỳ. Ngoài ra, các cuộn dây truyền nằm ở vị trí xa nhau hệ số kết nối gần như bằng không, trong nghiên cứu này bỏ qua giá trị hệ số kết nối của các cuộn dây truyền xa nhau.

Mối quan hệ giữa giá trị của điện cảm hồ cảm và hệ số kết nối điện từ của các cuộn dây liền kề được trình bày trong (4).

$$M_{i(i+1)}(x) = k_{i(i+1)}(x) \sqrt{L_i L_{i+1}} \quad (4)$$

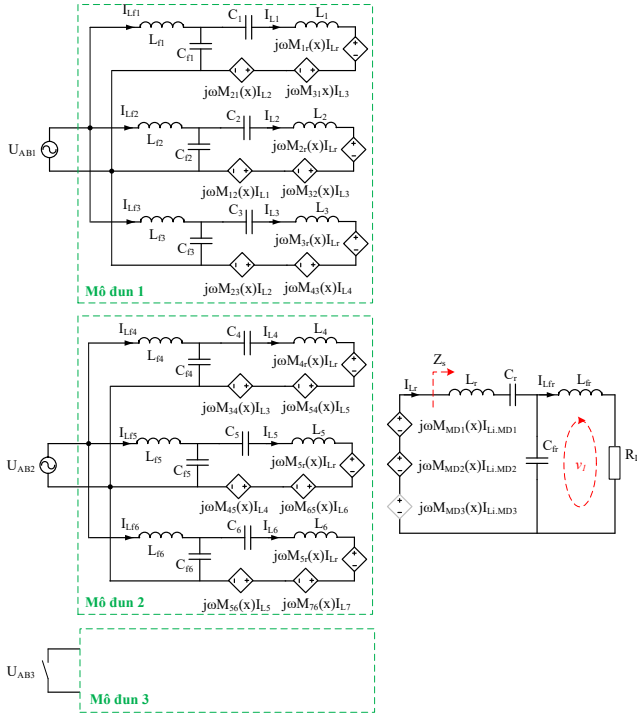
### 2.3. Phương án chuyển mạch các mô đun truyền

Trong hệ thống này, phía truyền được thiết kế theo kiểu mô đun. Cần điều khiển chuyển mạch linh hoạt các mô đun truyền ứng với vị trí EV di chuyển qua để giảm từ trường rò và tăng hiệu suất hệ thống. Ngoài ra, cần tìm vị trí chuyển mạch sao cho đáp mạch công suất tải nhỏ nhất.

Xem xét cụ thể ba mô đun đầu tiên của làn đường sạc như trên Hình 1. Để đảm bảo cung cấp năng lượng cho xe, khi EV vào làn đường sạc thì mô đun 1 và mô đun 2 được cấp nguồn. Khi EV di chuyển tới vị trí chuyển mạch thì cắt nguồn cấp cho mô đun 1 và cấp nguồn cho mô đun 3. Có ba phương án chuyển mạch có thể được thực hiện: phương án 1 là tắt mô đun 1 trước sau đó bật mô đun 3; phương án 2 là bật mô đun 3 trước sau đó mới tắt mô đun 1; phương án 3 là tắt mô đun 1 và bật mô đun 3 đồng thời. Sau đây, sẽ xem xét cơ sở lý thuyết để lựa chọn phương án bật/tắt các mô đun truyền sao cho đáp mạch công suất tải nhỏ nhất.

Quan hệ hồ cảm giữa các cuộn dây truyền với cuộn dây nhận được biểu diễn bằng các điện áp cảm ứng, các điện áp cảm ứng này phụ thuộc vào giá trị điện cảm hồ cảm và dòng điện trên cuộn dây khác. Trong trường hợp tổng quát, cuộn dây nhận kết nối điện từ với tất cả các cuộn dây truyền, sơ đồ tương đương mạch phía nhận được đưa ra trên Hình 4. Ở đây,  $R_L$  là trở kháng xoay chiều tương đương nhìn từ đầu vào bộ AC/DC đến ắc quy.

Các cuộn dây truyền được thiết kế giống hệt nhau và sử dụng mạch bù LCC thì dòng điện trên các cuộn dây truyền luôn bằng nhau và chỉ phụ thuộc vào điện áp đầu ra của bộ nghịch lưu phía truyền như biểu thức dưới đây [12].



Hình 4: Sơ đồ mạch tương đương phía nhận

$$\begin{cases} I_{L1} = I_{L2} = I_{L3} = I_{L_{Li.MD1}} = -j\omega C_{r1} U_{AB1} \\ I_{L4} = I_{L5} = I_{L6} = I_{L_{Li.MD2}} = -j\omega C_{r2} U_{AB2} \\ I_{L7} = I_{L8} = I_{L9} = I_{L_{Li.MD3}} = -j\omega C_{r3} U_{AB3} \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó,  $I_{L_{Li.MD1}} = I_{L_{Li.MD2}} = I_{L_{Li.MD3}} = I_{L_i}$

Trong trường hợp tất cả các mô đun phía truyền đều được cấp nguồn thì điện áp cảm ứng nhận được trên cuộn dây truyền:

$$U_{Lr} = j\omega M_{MD1}(x)I_{L_{Li.MD1}} + j\omega M_{MD2}(x)I_{L_{Li.MD2}} + j\omega M_{MD3}(x)I_{L_{Li.MD3}} + \dots \quad (6)$$

Với  $M_{MD1}$ ,  $M_{MD2}$ ,  $M_{MD3}$  là điện cảm hỗ cảm tổng của các cuộn dây truyền trong mô đun 1, 2, 3, ... với cuộn dây nhận:

$$\begin{cases} M_{MD1}(x) = M_{1r}(x) + M_{2r}(x) + M_{3r}(x) \\ M_{MD2}(x) = M_{4r}(x) + M_{5r}(x) + M_{6r}(x) \\ M_{MD3}(x) = M_{7r}(x) + M_{8r}(x) + M_{9r}(x) \\ \dots \end{cases} \quad (7)$$

Dòng điện trên cuộn dây nhận  $I_{Lr}$  được tính như sau:

$$I_{Lr} = \frac{U_{Lr}}{Z_s} \quad (8)$$

Với  $Z_s$  là trở kháng tương đương nhìn từ cuộn dây nhận tới tải tương đương  $R_L$ :

$$Z_s = \frac{\omega^2 L_{fr}^2}{R_L} \quad (9)$$

Xem xét mạch vòng  $v_1$  trên Hình 4 và dựa vào các điều kiện cộng hưởng theo [12], dòng điện chạy qua tải được tính theo công thức:

$$I_{Lfr} = \frac{j\omega L_{fr}}{R_L} I_{Lr} \quad (10)$$

Công suất trên tải được tính như sau:

$$P = R_L I_{Lfr}^2 \quad (11)$$

Từ các biểu thức (8) đến (11) thấy rằng, công suất tải tỷ lệ thuận với dòng điện trên cuộn dây nhận  $I_{Lr}$ . Do đó, đập mạch công suất tải tỷ lệ với đập mạch dòng điện trên cuộn dây nhận  $I_{Lr}$ . Sau đây tính toán độ đập mạch dòng điện  $I_{Lr}$  theo 3 phương án chuyển mạch đã phân tích ở trên.

**Phương án 1:** tắt mô đun 1 trước sau đó bật mô đun 3.

Khi chuyển từ trạng thái bật mô đun 1 và 2 sang tắt mô đun 1, độ đập mạch dòng điện:

$$\Delta I_{Lr,12,2} = -AM_{MD1}(x) \quad (12)$$

Khi chuyển từ trạng thái bật mô đun 2 sang trạng thái bật mô đun 2 và 3, độ đập mạch dòng điện:

$$\Delta I_{Lr,2,23} = AM_{MD3}(x) \quad (13)$$

Với  $A = \frac{j\omega}{Z_s} I_{L_i}$

**Phương án 2:** bật mô đun 3 trước sau đó mới tắt mô đun 1.

Khi chuyển từ trạng thái bật mô đun 1 và 2 sang trạng thái bật thêm mô đun 3, khi đó cả ba mô đun 1, 2, 3 được bật, độ đập mạch dòng điện:

$$\Delta I_{Lr,12,123} = AM_{MD3}(x) \quad (14)$$

Khi chuyển từ trạng thái bật mô đun 1, 2, 3 sang trạng thái tắt bớt mô đun 1, độ đập mạch dòng điện:

$$\Delta I_{Lr,123,23} = -AM_{MD1}(x) \quad (15)$$

**Phương án 3:** tắt mô đun 1 và bật mô đun 3 đồng thời.

Khi chuyển từ trạng thái bật mô đun 1 và 2 sang trạng thái bật mô đun 2 và 3 (tắt mô đun 1 và bật mô đun 3 đồng thời), độ đập mạch dòng điện:

$$\Delta I_{Lr,12,23} = A[M_{MD3}(x) - M_{MD1}(x)] \quad (16)$$

Với mục tiêu đập mạch công suất nhỏ nhất, từ các biểu thức (12) đến (16) thấy rằng sai lệch công suất bằng không có thể đạt được trong phương án 3, khi:

$$M_{MD3}(x) - M_{MD1}(x) = 0 \quad (17)$$

Kết hợp (17) với (1) và (2), có thể viết lại (17) như sau:

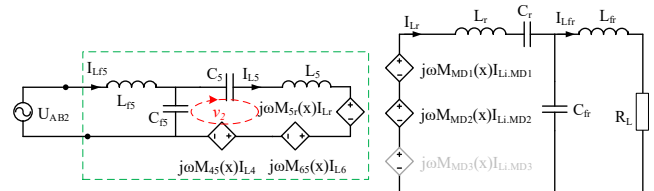
$$[k_{7r}(x) + k_{8r}(x) + k_{9r}(x)] - [k_{1r}(x) + k_{2r}(x) + k_{3r}(x)] = 0 \quad (18)$$

Nhận thấy, (18) là phương trình đơn biến phụ thuộc vào vị trí  $x$  của EV. Khảo sát phương trình (18) nhận được nghiệm  $x = 1600mm$ . Giá trị  $x$  này tương ứng với EV ở vị trí chính giữa của mô đun truyền thứ 2 hay cuộn nhận thẳng tâm với cuộn truyền thứ 5.

Như vậy, để đập mạch công suất nhỏ nhất phương án chuyển mạch số 3 được lựa chọn. Với hệ thống  $n$  mô đun truyền, phương án chuyển mạch các mô đun truyền cũng hoạt động theo nguyên tắc trên. Nghĩa là chuyển mạch là khi EV ở vị trí thẳng tâm với cuộn dây truyền giữa (cuộn thứ 2) của mô đun truyền.

## 2.4. Xác định dấu hiệu nhận biết quá trình chuyển mạch

Mục 2.3 đã xác định được vị trí của EV khi chuyển mạch để đập mạch công suất tải là nhỏ nhất. Vấn đề đặt ra là làm thế nào để xác định được thời điểm EV ở vị trí đó.



Hình 5: Sơ đồ thay thế

Trong trường hợp mô đun 1 và mô đun 2 đang được cấp nguồn, sơ đồ mạch thay thế tách riêng cuộn dây truyền  $L_5$  được biểu diễn trên Hình 5. Phương trình cân bằng áp trong vòng  $v_2$ :

$$\left(\frac{1}{j\omega C_5} + j\omega L_5\right)I_{L5} + j\omega M_{sr}(x)I_{Lr} + j\omega M_{65}(x)I_{L6} + j\omega M_{45}(x)I_{L5} - \frac{1}{j\omega C_{f5}}(I_{Lr5} - I_{L5}) = 0 \quad (19)$$

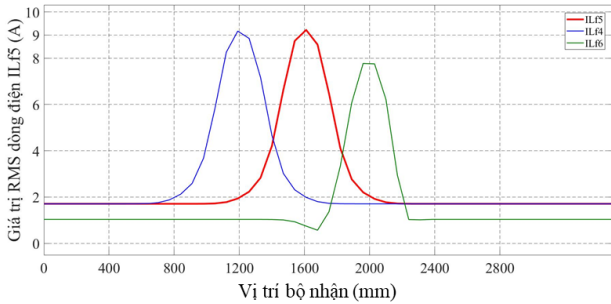
Kết hợp các phương trình (19) với các phương trình (5) đến (9), phương trình dòng trên cuộn dây bù  $L_{f5}$  được biểu diễn như sau:

$$I_{Lr5} = [B + C(M_{45}(x) + M_{65}(x)) + DM_{sr}(x)(M_{MD1}(x) + M_{MD2}(x))]I_{Li} \quad (20)$$

Trong đó,

$$\begin{cases} B = 1 + \frac{C_{f5}}{C_5} - \omega^2 L_5 C_{f5} \\ C = -\omega^2 C_{f5} \\ D = -j\omega \frac{C_{f5}}{L_{fr}} R_L \end{cases} \quad (21)$$

Từ phương trình (20) cho thấy, dòng điện trên các cuộn dây bù phụ thuộc vào giá trị của điện cảm hồ cảm giữa các cuộn dây truyền với cuộn dây nhận và giá trị điện cảm hồ cảm của các cuộn dây truyền lân cận. Mà giá trị của các điện cảm hồ cảm này phụ thuộc vào vị trí của EV, nên dòng điện trên cuộn bù phụ thuộc vào vị trí của EV.



Hình 6: Đặc tính dòng điện hiệu dụng qua các cuộn bù  $L_{f4}$ ,  $L_{f5}$ ,  $L_{f6}$

Khảo sát đặc tính dòng điện hiệu dụng trên các cuộn dây bù theo vị trí của bộ nhận, kết quả biểu diễn trên Hình 6. Kết quả này cho thấy, có thể nhận biết thời điểm chuyển mạch từ mô đun 1 sang mô đun 3 thông qua việc đo dòng điện hiệu dụng trên cuộn bù  $L_{f5}$ . Thời điểm chuyển mạch chính là thời điểm giá trị hiệu dụng của  $I_{L_{f5}}$  đạt giá trị cực đại, tương ứng với vị trí  $x = 1600mm$ . Đây chính là vị trí chuyển mạch tối ưu theo cơ sở lý thuyết được trình bày ở mục 2.3.

Ngoài ra, đặc tính Hình 6 cũng cho thấy, có thể nhận biết các vị trí khác của EV thông qua việc đo dòng điện trên các cuộn dây bù khác như thời điểm giá trị hiệu dụng của dòng  $I_{L_{f4}}$  đạt giá trị lớn nhất tương ứng với thời điểm EV ở vị trí  $x = 1200mm$ , thời điểm giá trị hiệu dụng của dòng  $I_{L_{f6}}$  đạt giá trị lớn nhất tương ứng với thời điểm EV ở vị trí  $x = 2000mm$ .

### 2.5. Thuật toán điều khiển chuyển mạch

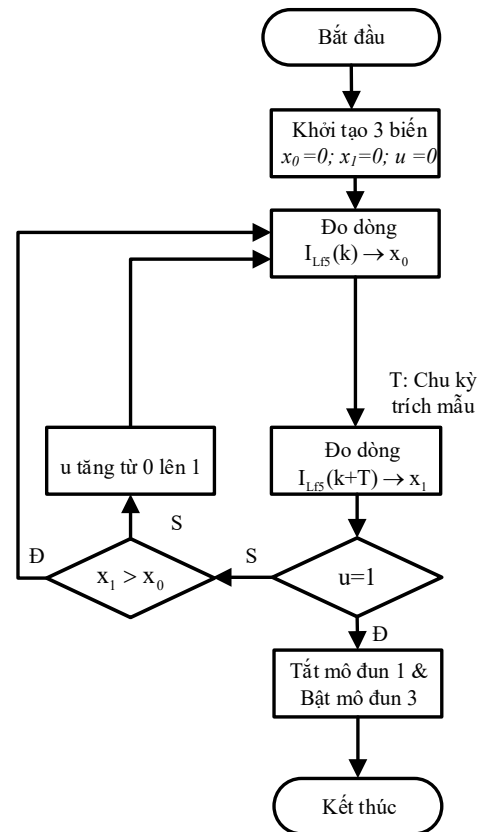
Từ kết quả mô phỏng dòng điện hiệu dụng  $I_{L_{f5}}$  theo vị trí bộ nhận thu được trên Hình 6, thấy rằng giá trị hiệu dụng của dòng  $I_{L_{f5}}$  được chia thành hai vùng: vùng trước và vùng sau vị trí  $x = 1600mm$ . Với vùng trước vị trí  $x = 1600mm$  độ lớn dòng điện hiệu dụng  $I_{L_{f5}}$  có xu hướng tăng, khi đó dòng điện hiệu dụng  $I_{L_{f5}}$  tại thời điểm  $k$  sẽ lớn hơn dòng điện hiệu dụng tại thời điểm  $(k-1)$ :

$$I_{L_{f5}}(k) - I_{L_{f5}}(k-1) > 0 \quad (22)$$

Với vùng sau vị trí  $x = 1600mm$  độ lớn dòng điện hiệu dụng  $I_{L_{f5}}$  có xu hướng giảm, khi đó dòng điện hiệu dụng  $I_{L_{f5}}$  tại thời điểm  $k$  sẽ nhỏ hơn dòng điện hiệu dụng tại thời điểm  $(k-1)$ :

$$I_{L_{f5}}(k) - I_{L_{f5}}(k-1) < 0 \quad (23)$$

Các biểu thức (22) và (23) là cơ sở để đưa ra lưu đồ thuật toán điều khiển chuyển mạch trên Hình 7. Đầu lần đường sạc, khi mô đun 1 và mô đun 2 được bật, vi điều khiển sẽ tiến hành khởi tạo ba biến  $x_0$ ,  $x_1$ ,  $u$ . Trong đó, biến  $x_0$  dùng để lưu trữ giá trị hiệu dụng của dòng  $I_{L_{f5}}$  tại thời điểm  $(k-1)$ , biến  $x_1$  để lưu trữ giá trị hiệu dụng của dòng  $I_{L_{f5}}$  tại thời điểm  $k$ ,  $u$  là biến phát tín hiệu chuyển mạch. Mạch đo dòng sẽ tiến hành trích mẫu tín hiệu dòng điện gửi về vi điều khiển. Vi điều khiển sẽ đọc giá trị hiệu dụng của  $I_{L_{f5}}$  gán vào  $x_0$  và  $x_1$  và tiến hành so sánh giá trị của  $I_{L_{f5}}$ . Nếu  $x_1 > x_0$  tiến hành gán giá trị của  $x_1$  vào  $x_0$ , sau đó xóa giá trị của biến  $x_1$  để lưu trữ giá trị dòng điện hiệu dụng  $I_{L_{f5}}$  ở lần trích mẫu tiếp theo. Quá trình sẽ diễn ra liên tục cho tới khi  $x_1 < x_0$ , lúc này cuộn nhận đã tới vị trí chuyển mạch tối ưu  $x = 1600mm$ , giá trị tín hiệu  $u$  lúc này sẽ thay đổi từ 0 lên 1. Khi tín hiệu  $u = 1$ , vi điều khiển sẽ phát tín hiệu bật mô đun 3 và tắt mô đun 1 đồng thời bằng cách tác động vào góc mở van mosfet của mạch nghịch lưu tần số cao.



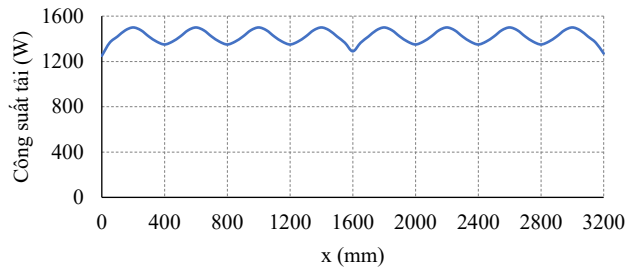
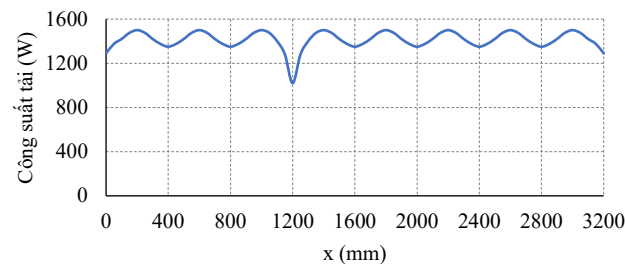
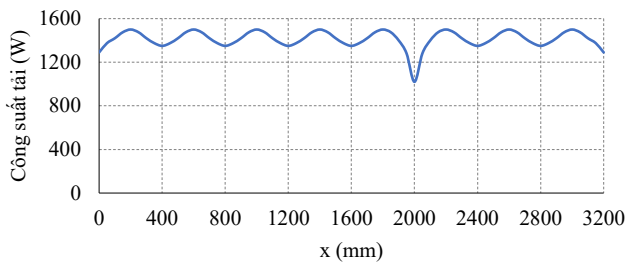
Hình 7: Lưu đồ thuật toán điều khiển chuyển mạch

### 3. Kết quả mô phỏng

Để xác minh phương pháp chuyển mạch đề xuất, một mô hình mô phỏng hệ thống sạc động với công suất 1,5kW được thiết lập trên phần mềm Matlab-Simulink. Mối quan hệ điện từ giữa các cuộn dây truyền với nhau và giữa các cuộn dây truyền với các cuộn dây nhận được thiết lập theo (2) và (4). Các thông số hệ thống và thông số mạch bù được thiết lập theo Bảng 2.

**Bảng 2:** Tham số của hệ thống và mạch bù

Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị
$P_0$	1.5 kW	$f_{sw}$	85 kHz
$U_{DC}$	310 V	$C_i$	100 nF
$L_i$	102 $\mu$ H	$L_{fr}$	28.9 $\mu$ H
$L_r$	120 $\mu$ H	$C_{fr}$	120.9 nF
$L_{fi}$	52.6 $\mu$ H	$C_r$	38.5 nF
$C_{fi}$	66.5 nF		

a) Chuyển mạch bằng đo dòng trên cuộn bù  $L_{75}$ b) Chuyển mạch bằng đo dòng trên cuộn bù  $L_{f4}$ c) Chuyển mạch bằng đo dòng trên cuộn bù  $L_{f6}$ **Hình 8:** Đặc tính công suất tải khi điều khiển chuyển mạch

Phương án chuyển mạch được lựa chọn là bật mô đun 3 và tắt mô đun 1 đồng thời, dấu hiệu nhận biết thời điểm chuyển mạch là khi dòng điện trên cuộn bù  $L_{75}$  đạt giá trị lớn nhất. Đặc tính công suất tải được khảo sát khi thực hiện thuật toán chuyển mạch được biểu diễn trên Hình 8. Hình 8a là đặc tính công suất khi hệ thống chuyển mạch nhận tín hiệu đo dòng hiệu dụng trên cuộn bù  $L_{75}$ . Kết quả cho thấy độ đập mạch công suất không bị thay đổi nhiều khi thực hiện chuyển mạch tắt mô đun 1 và bật mô đun 3 đồng thời. Độ đập mạch công suất trong toàn dải điều chỉnh lớn nhất bằng 8.3%. Độ đập mạch này cũng phù hợp với đặc điểm của đường truyền.

Để so sánh phương án chuyển mạch đã thiết kế so với các vị trí khác, thay vì sử dụng cảm biến đo dòng trên cuộn bù  $L_{75}$  thì thực hiện đo dòng trên các cuộn bù  $L_{f4}$  và  $L_{f6}$ . Kết quả đặc tính hiệu suất như trên Hình 8b và Hình 8c. Kết quả cho thấy, khi đo dòng trên cuộn bù  $L_{f4}$ ,  $L_{f6}$  thời điểm chuyển mạch trùng với vị trí của EV tương ứng là  $x = 1200\text{mm}$  và  $x = 2000\text{mm}$ . Các vị trí này phù hợp với đặc tính dòng trên Hình 6. Độ đập mạch công suất trong đoạn chuyển mạch bằng 27%. Như vậy có thể thấy phương án thiết kế trong nghiên cứu này là tối ưu.

## 4. Kết luận

Bài báo đã phân tích và đề xuất một phương pháp mới điều khiển chuyển mạch các đoạn đường truyền trong hệ thống sạc động không dây cho xe điện. Vị trí của EV được nhận biết thông qua việc đo dòng điện trên các cuộn dây của mạch bù phía truyền. Kết quả mô phỏng xác minh tính khả thi của phương pháp. Với phương án đã thiết kế, độ đập mạch trong toàn dải điều chỉnh lớn nhất bằng 8.3%, thấp hơn nhiều so với phương án chuyển mạch ở các vị trí khác.

## Tài liệu tham khảo

- [1] S. Li and C. C. Mi, "Wireless power transfer for electric vehicle applications," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 4–17, 2015, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2319453.
- [2] L. A. Maglaras, F. V. Topalis, and A. L. Maglaras, "Cooperative approaches for dynamic wireless charging of Electric Vehicles in a smart city," *ENERGYCON 2014 - IEEE Int. Energy Conf.*, pp. 1365–1369, 2014, doi: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850600.
- [3] S. Lee, J. Huh, C. Park, N.-S. Choi, G.-H. Cho, and C.-T. Rim, "On-Line Electric Vehicle using inductive power transfer system," in *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, GA, Sep. 2010, pp. 1598–1601. doi: 10.1109/ECCE.2010.5618092.
- [4] S. Choi, J. Huh, W. Y. Lee, S. W. Lee, and C. T. Rim, "New Cross-Segmented Power Supply Rails for Roadway-Powered Electric Vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 12, pp. 5832–5841, Dec. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2013.2247634.
- [5] Y. J. Jang, Y. D. Ko, and S. Jeong, "Optimal design of the wireless charging electric vehicle," in *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, Greenville, SC, USA, Mar. 2012, pp. 1–5. doi: 10.1109/IEVC.2012.6183294.
- [6] A. Kamineni, M. J. Neath, A. Zaheer, G. A. Covic, and J. T. Boys, "Interoperable EV Detection for Dynamic Wireless Charging With Existing Hardware and Free Resonance," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 3, no. 2, pp. 370–379, Jun. 2017, doi: 10.1109/TTE.2016.2631607.
- [7] X. Zhang, Z. Yuan, Q. Yang, Y. Li, J. Zhu, and Y. Li, "Coil Design and Efficiency Analysis for Dynamic Wireless Charging System for Electric Vehicles," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, no. 7, pp. 1–4, Jul. 2016, doi: 10.1109/TMAG.2016.2529682.
- [8] Liang Chen, G. R. Nagendra, J. T. Boys, and G. A. Covic, "Double-Coupled Systems for IPT Roadway Applications," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 37–49, Mar. 2015, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2325943.
- [9] V. Cirimele, O. Smiai, P. Guglielmi, F. Bellotti, R. Berta, and A. De Gloria, "Maximizing power transfer for dynamic wireless charging electric vehicles," *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 429, pp. 59–65, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-55071-8\_8.
- [10] X. Dai, J. C. Jiang, and J. Q. Wu, "Charging Area Determining and Power Enhancement Method for Multiexcitation Unit Configuration of Wirelessly Dynamic Charging EV System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 5, pp. 4086–4096, 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2860537.
- [11] D. Patil, J. M. Miller, B. Fahimi, P. T. Balsara, and V. Galigekere, "A Coil Detection System for Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicle," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 5, no. 4, pp. 988–1003, Dec. 2019, doi: 10.1109/TTE.2019.2905981.
- [12] N. T. Diep, N. K. Trung, and T. T. Minh, "Wireless power transfer system design for electric vehicle dynamic charging application," *Int. J. Power Electron. Drive Syst. IJPEDS*, vol. 11, no. 3, p. 1468, Sep. 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i3.pp1468-1480.