

Sạc ổn dòng với cấu trúc bộ nhận hai pha trong hệ thống sạc động không dây cho xe điện

Constant current charging with dual-phase receiver structure in dynamic wireless charging systems for electric vehicles

Trần Đức Hiệp^{1,2}, Trần Trọng Minh¹, Nguyễn Thị Diệp³ and Nguyễn Kiên Trung^{1,*}

¹Khoa Tự động hóa, Trường Điện – Điện tử, Đại học Bách Khoa Hà Nội

²Khoa Tự động hóa, Trường Điện – Điện tử, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

³Khoa Điều khiển và Tự động hóa, Trường Đại học Điện lực

*Corresponding author E-mail: trung.nguyenkien1@hust.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.64032/mca.v29i2.262>

Abstract

Wireless dynamic charging is a solution to address the issues of travel distance and charging time for electric vehicles. A constant current charging mode is generally required to maximize energy transfer to the vehicle's energy storage system in the shortest time. This paper proposes a new method for designing constant current charging with a dual-phase receiver structure in electric vehicles' wireless dynamic charging system. Specifically, a dual-sided LCC compensation circuit is proposed to achieve constant current charging, while the dual-phase receiver structure reduces current ripple during charging. Simulation and experimental results indicate that the constant current charging mode is achieved with a small deviation of approximately 3.1%.

Keywords: Electric Vehicle; Dynamic wireless charging; Design coils; LCC compensation circuit; Constant current charging.

Tóm tắt

Sạc động không dây (DWC - Dynamic wireless charging) là giải pháp hiệu quả nhằm giải quyết các vấn đề về khoảng cách di chuyển và thời gian sạc của xe điện. Để truyền tải năng lượng tối đa đến hệ thống lưu trữ năng lượng của xe trong thời gian ngắn nhất, hệ thống thường yêu cầu chế độ sạc ổn dòng. Bài báo này đề xuất một phương pháp mới trong thiết kế bộ sạc ổn định dòng cho hệ thống DWC của xe điện, dựa trên cấu trúc bộ nhận hai pha. Cụ thể, mạch bù LCC hai phía được thiết kế nhằm duy trì chế độ sạc ổn định dòng, trong khi cấu trúc bộ nhận hai pha có vai trò giảm thiểu độ dao động của dòng điện sạc, góp phần nâng cao hiệu suất và độ tin cậy của hệ thống. Một mô hình mô phỏng được xây dựng trên phần mềm Matlab, kết hợp với mô hình thực nghiệm triển khai trong phòng thí nghiệm, nhằm kiểm chứng tính khả thi của phương pháp đề xuất. Kết quả thu được từ cả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy chế độ sạc ổn định dòng được duy trì với độ dao động nhỏ, khoảng 3,1%.

1. Giới thiệu chung

Trong những năm gần đây số lượng xe điện (EV - Electric Vehicle) trên thế giới đã gia tăng mạnh mẽ [1], [2], tuy nhiên, dung lượng pin và vấn đề sạc pin là những hạn chế lớn làm giảm sự phổ biến của xe điện. Gần đây, hệ thống DWC cho EV được đề xuất sử dụng nhằm khắc phục các hạn chế trên [3]. Trong hệ thống này, xe điện có khả năng sạc trong khi di chuyển, loại bỏ nhu cầu dừng lại để nạp năng lượng. Cơ chế này cho phép EV được bổ sung năng lượng liên tục khi vận

hành trên làn đường sạc, góp phần mở rộng phạm vi di chuyển mà không cần gia tăng số lượng cell pin, từ đó tối ưu hóa thiết kế và giảm chi phí hệ thống lưu trữ năng lượng [4].

Cấu trúc hệ thống DWC gồm 2 phần: bộ nhận ở trên xe và bộ truyền được tích hợp vào các làn đường bộ tạo thành làn sạc. Do EV di chuyển với tốc độ cao trên đường, quá trình trao đổi năng lượng giữa một điểm trên làn sạc và xe chỉ diễn ra trong thời gian rất ngắn. Để tối ưu hóa khả năng sạc, các hệ thống sạc động không dây thường được thiết kế với chiến lược sạc dòng không đổi (CC - Constant Current) thay vì điện áp không đổi (CV - Constant Voltage).

Một số nghiên cứu thực hiện ổn dòng sạc bằng cách điều khiển bộ biến đổi công suất phía truyền [5], điều khiển bộ biến đổi công suất phía nhận [6]–[9] hoặc kết hợp điều khiển cả hai phía [10]–[12]. Tuy nhiên, các phương pháp này còn tồn tại nhược điểm như cấu trúc điều khiển phức tạp, hiệu suất thấp trong chế độ điều khiển vòng hở, và yêu cầu truyền thông giữa phía truyền và phía nhận khi áp dụng điều khiển vòng kín.

Hiện nay, làn đường truyền kiểu đoạn được đề xuất sử dụng trong hệ thống DWC cho xe điện nhờ vào nhiều lợi ích, chẳng hạn như khả năng điều khiển bật/tắt linh hoạt, giúp nâng cao hiệu suất và hạn chế sự khuếch tán từ trường ra môi trường xung quanh [13]–[16]. Mặc dù vậy, một nhược điểm đáng kể của cấu hình này là hiện tượng đập mạch trong dòng điện [17], [18]. Để khắc phục vấn đề này, nhiều nghiên cứu đã được tiến hành. Trong [19], một mạch bù tự thích nghi ở phía truyền được đề xuất cải thiện độ ổn định, giảm đập mạch công suất sạc của hệ thống cung cấp cho xe, cũng như hỗ trợ điều khiển

chuyển mạch mềm cho các van công suất. Dẫu vậy, giải pháp này đạt hiệu quả tốt chỉ khi ít có sự biến động của hệ số hồ cảm của các cuộn dây trên xe và trên làn sạc. Thêm vào đó, các nghiên cứu trong [20], [21] đã giới thiệu cấu trúc cuộn dây DDQ, có khả năng làm giảm đáng kể mức độ đập mạch dòng điện. Dù mang lại hiệu quả tích cực, phương pháp này lại làm tăng chi phí tổng thể của hệ thống do số lượng và cách bố trí phức tạp của các cuộn dây.

Bài báo này giới thiệu một phương pháp mới nhằm thiết kế hệ thống sạc ổn định dòng điện, sử dụng cấu trúc bộ nhận hai pha kết hợp với mạch bù LCC cải tiến trong hệ thống sạc không dây động dành cho EVs. Đề xuất này cho phép duy trì dòng sạc đầu ra không đổi theo điều kiện tải mà không cần đến hệ thống điều khiển phức tạp, đồng thời giảm thiểu dao động dòng điện bằng cách điều chỉnh pha giữa hai cuộn nhận sao cho phù hợp với vị trí lắp đặt và đặc điểm tải. Cụ thể, phía truyền sử dụng làn sạc kiểu đoạn, trong khi phía nhận áp dụng thiết kế bộ nhận hai pha nhằm làm giảm sự biến thiên của hồ cảm giữa cuộn dây trên làn sạc và trên xe, qua đó góp phần hạn chế dao động dòng sạc. Bên cạnh đó, mạch bù LCC được triển khai ở cả hai phía để đạt được chế độ sạc ổn định cho xe điện. Tính hiệu quả của nghiên cứu này được xác minh bằng phương pháp mô phỏng trên Matlab và trên mô hình thực nghiệm.

2. Cấu trúc hệ thống và cơ sở lý thuyết

2.1. Cấu trúc hệ thống DWC cho EV

Cấu trúc hệ thống sạc động không dây cho xe điện đề xuất trong nghiên cứu này được mô tả như trên Hình 1, hệ thống gồm 2 phía phía truyền và phía nhận. Ở phía truyền, các cuộn dây truyền có kích thước và thông số giống nhau được đặt cạnh nhau dọc theo làn đường di chuyển của xe. Các cuộn dây này được cung cấp nguồn điện xoay chiều có tần số cao tạo ra từ các bộ nghịch lưu cầu một H thông qua mạch bù LCC. Để giảm số lượng bộ biến đổi công suất sử dụng trong hệ thống, ba cuộn dây truyền sử dụng chung một bộ nghịch lưu tạo thành một module truyền. Ở phía nhận, cấu trúc hai cuộn nhận được đề xuất tạo thành bộ nhận hai pha, mỗi pha bao gồm cuộn nhận, mạch bù, và mạch chỉnh lưu. Hai pha này được nối song song để cấp điện cho hệ thống pin trên xe. Mạch bù LCC hai phía được sử dụng cho thiết kế này để tạo ra dòng điện không đổi ở phía nhận.

2.2. Thiết kế làn sạc kiểu đoạn

Trong nghiên cứu này, làn đường sạc kiểu đoạn được đề xuất thiết kế bằng cách sắp xếp các cuộn dây truyền nối tiếp nhau để tạo thành tuyến sạc cho xe điện (EV). Mỗi cuộn dây truyền bao gồm ba lớp cấu tạo: lớp thứ nhất là các cuộn dây đơn cực hình chữ nhật, sử dụng dây Litz nhằm giảm tổn hao do hiệu ứng bề mặt khi hoạt động ở dải tần cao; lớp thứ hai là lớp Ferrite đặt phía dưới cuộn truyền, trên cuộn nhận để định hướng từ trường và tăng cường hệ số hồ cảm; lớp thứ ba là tấm nhôm có chức năng hạn chế sự từ thông tản. Cấu trúc tổng thể của hệ thống cuộn dây truyền được minh họa trong Hình 2a. Ở phía nhận, ba cuộn dây được bố trí liên kế tạo thành một mô-đun như thể hiện trong Hình 2b, đồng thời hai cuộn dây giống nhau được sắp xếp song song và cách nhau một khoảng d mm, như mô tả ở Hình 2c.

Xét hệ thống bao gồm một module truyền và một cuộn nhận. Vì không gian giới hạn của gầm xe, các cuộn dây có kích thước

giống nhau có chiều dài l_t bằng 400mm, chiều rộng w_t bằng 400mm, độ dày l_{wt} bằng 4.8mm, mỗi cuộn dây được quấn 10 vòng. Giả sử cuộn dây nhận có N_r vòng dây, theo [22] hồ cảm truyền nhận được tính như công thức dưới đây.

$$M = \frac{\Psi}{I} = \frac{\sum_{i=1}^{N_r} \left(\int_{S_i} B_z \cdot dS_i \right)}{I} \quad (1)$$

$$B_{zj}(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot \left[\frac{(a+x)(b-y)}{\sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + z^2}} \left(\frac{1}{(a+x)^2 + z^2} + \frac{1}{(b-y)^2 + z^2} \right) + \frac{(a-x)(b-y)}{\sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + z^2}} \left(\frac{1}{(a-x)^2 + z^2} + \frac{1}{(b-y)^2 + z^2} \right) + \frac{(a-x)(b+y)}{\sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2 + z^2}} \left(\frac{1}{(a-x)^2 + z^2} + \frac{1}{(b+y)^2 + z^2} \right) + \frac{(a+x)(b+y)}{\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2 + z^2}} \left(\frac{1}{(a+x)^2 + z^2} + \frac{1}{(b+y)^2 + z^2} \right) \right] \quad (2)$$

$$B_z = \sum_{j=1}^{N_t} B_{zj} \quad (3)$$

Trong đó:

M	Hệ số hồ cảm
N_t	Số vòng dây cuộn truyền
N_r	Số vòng dây cuộn nhận
B_{zj}	Từ trường gây ra theo phương Z
$2a, 2b$	Kích thước vòng dây thứ j của cuộn truyền
I	Cường độ dòng điện trên cuộn truyền
dS_i	Vì phân diện tích vòng dây thứ i của cuộn nhận
(x, y, z)	Tọa độ của điểm đang tính từ trường

Xét 2 điểm **P** và **Q** cách nhau d mm theo chiều dọc của làn sạc được biểu diễn như trên Hình 3. Từ trường do cuộn dây thứ i gây ra tại **P**(x, y, z) là.

$$B_{Pi}(x, y, z) = \sum_{j=1}^{j=N_t} B_{zj}(x, y, z) \quad (4)$$

Xét điểm **Q**($x+d, y, z$). Do cấu trúc làn sạc gồm các cuộn truyền có kích thước giống nhau và xếp cạnh nhau do đó vị trí tương đối của **Q** so với cuộn truyền thứ $i+1$ là (x, y, z) . Do đó từ trường theo phương Z do cuộn dây thứ $i+1$ gây ra tại điểm **Q** được viết như sau.

$$B_{Q_{i+1}}(x+d, y, z) = \sum_{j=1}^{j=N_t} B_{zj}(x, y, z) \quad (5)$$

Từ công thức (4) và (5) cho thấy cảm ứng từ do cuộn truyền i gây ra tại điểm **P** và cuộn truyền $i+1$ gây ra tại **Q** là bằng nhau.

$$B_{Pi}(x, y, z) = B_{Q_{i+1}}(x+d, y, z) \quad (6)$$

Giả sử làn sạc có n cuộn truyền, tổng từ trường theo phương Z tại điểm **P** và **Q** lần lượt là:

$$B_P = \sum_{i=1}^n B_{Pi} \quad (7)$$

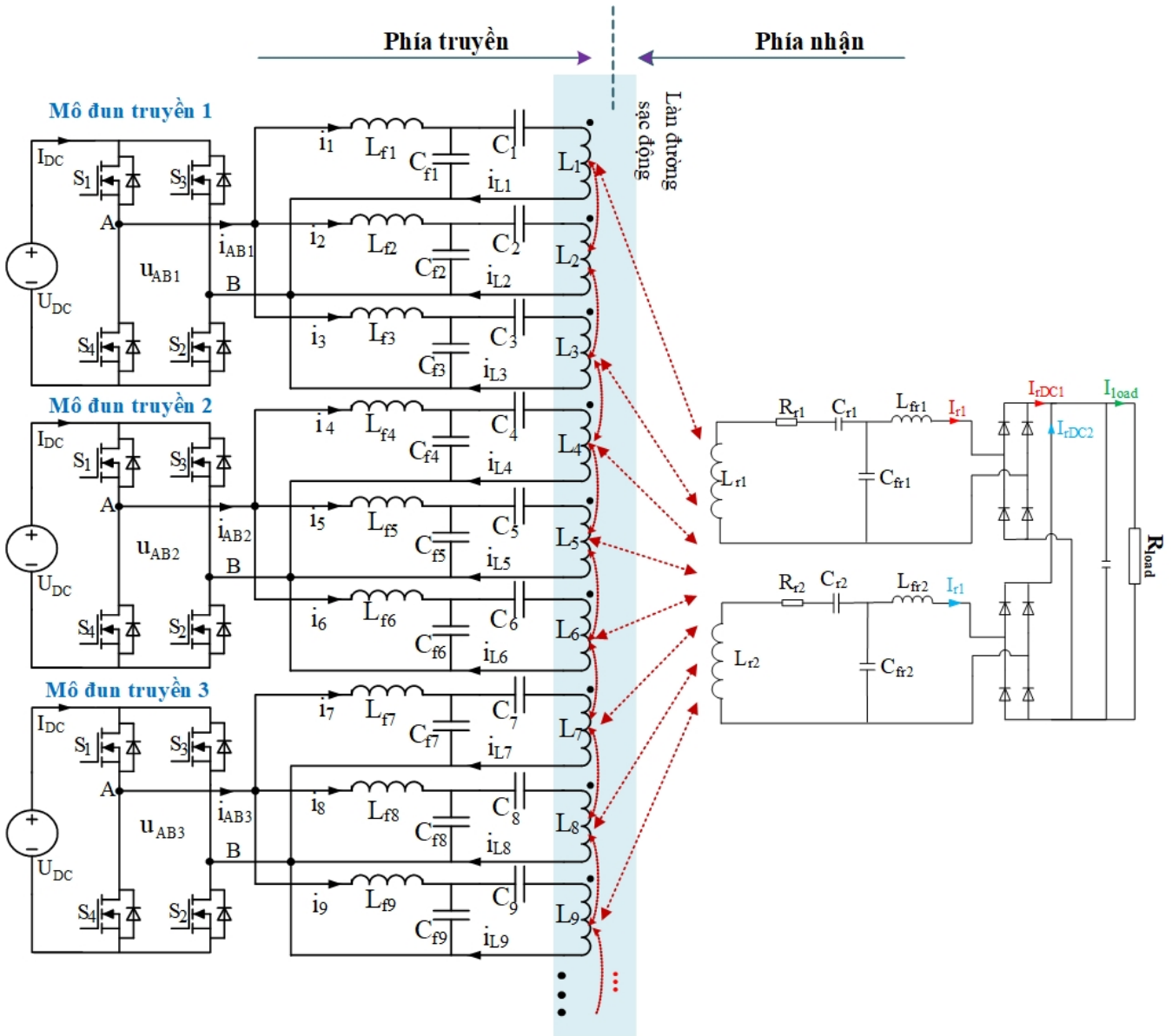


Figure 1: Cấu trúc hệ thống sạc động không dây cho xe điện đề xuất

$$B_Q = \sum_{i=1}^n B_{Q_i} \quad (8)$$

Từ các biểu thức (6), (7), (8) rút ra được:

$$B_P = B_Q \quad (9)$$

Như vậy, cường độ từ trường tại hai điểm bất kỳ trên làn sạc cách nhau một khoảng d mm là tương đương nhau. Điều này dẫn đến hiện tượng từ trường lặp lại theo chu kỳ với bước lặp bằng chiều dài một cuộn dây truyền, tức d mm, do đó tổng hồ cảm mà các cuộn dây truyền gây ra trên một cuộn nhận cũng biến thiên tuần hoàn theo chu kỳ này, được gọi là chu kỳ hồ cảm. Dựa trên cơ sở lý thuyết đã nêu, mô phỏng phần tử hữu hạn được thực hiện bằng phần mềm Ansys Maxwell nhằm xác định hệ số kết nối giữa cuộn dây truyền và cuộn dây nhận trong quá trình xe di chuyển trên làn sạc. Trong quá trình mô phỏng, chiều dài của cuộn dây nhận được thay đổi từ 200 mm đến 700 mm, trong khi chiều rộng được giữ cố định ở mức 400 mm. Kết quả mô phỏng được thể hiện trong Hình 4 cho thấy rằng

tổng hệ số kết nối giữa cuộn dây truyền và các cuộn dây nhận phụ thuộc rõ rệt vào vị trí của cuộn nhận trên làn sạc. Hình dạng của hệ số kết nối có dạng gần giống sóng sin và chu kỳ biến thiên của nó không bị ảnh hưởng bởi kích thước của cuộn dây nhận. Quy luật thay đổi của tổng hệ số kết nối giữa các cuộn dây trên làn sạc này với các cuộn dây trên xe sẽ được mô hình hóa bằng công cụ nội suy Curve fitting trong phần mềm Matlab, từ đó làm căn cứ để thiết kế các thông số bộ nhận. Phương pháp thiết kế bộ nhận sẽ được trình bày ở phần tiếp theo của nghiên cứu này.

2.3. Thiết kế bộ nhận nhiều pha

Với mục tiêu giảm đập mạch dòng điện tải, cấu trúc bộ nhận hai pha được đề xuất thiết kế trong nghiên cứu này. Mỗi pha bao gồm một cuộn dây nhận, mạch bù LCC và cầu chỉnh lưu diode. Hai pha được mắc song song với nhau để cấp nguồn sạc cho pin như trong Hình 1.

Coi hồ cảm giữa hai cuộn dây nhận là không đáng kể và bằng 0, khi đó dòng điện cảm ứng nhận được trên các cuộn nhận khi xe di chuyển trên làn đường sạc chỉ phụ thuộc vào tổng hồ cảm

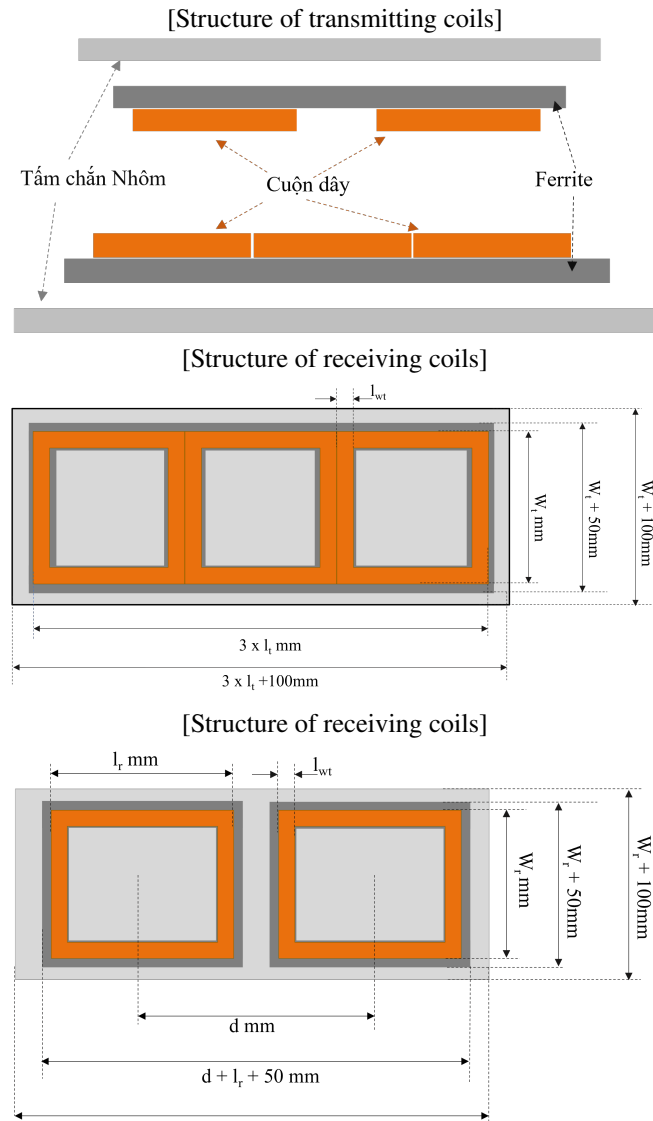


Figure 2: Thiết kế hệ thống cuộn dây

mà làn sặc gây nên như phân tích ở phần trước. Mỗi quan hệ giữa hệ số hồ cảm và hệ số kết nối được thể hiện qua công thức (10), (11), trong đó các cuộn truyền có độ tự cảm giống nhau $L_1 = L_2 = \dots = L_i$; các cuộn nhận có độ tự cảm giống nhau $L_{r1} = L_{r2} = L_r$; M_{r1} là tổng hồ cảm của các cuộn truyền đến cuộn nhận 1; M_{r2} là tổng hồ cảm các cuộn truyền đến cuộn nhận 2.

$$M_{r1} = k_{r1} \sqrt{L_r L_i} \quad (10)$$

$$M_{r2} = k_{r2} \sqrt{L_r L_i} \quad (11)$$

Bộ nhận có hai cuộn dây được thiết kế như Hình 5, chiều dài của cuộn nhận là l_r khoảng cách của hai cuộn nhận là d . Tổng kết nối của các cuộn truyền đến mỗi cuộn dây nhận được xác định theo các công thức dưới đây.

$$k_{r1} = k_{1r1} + k_{2r1} + \dots + k_{9r1} \quad (12)$$

$$k_{r2} = k_{1r2} + k_{2r2} + \dots + k_{9r2} \quad (13)$$

Như đã phân tích ở trên, hệ số giữa các cuộn dây phía nhận và làn sặc phụ thuộc vào vị trí của xe. Đối với bộ nhận có 2 cuộn

dây, hệ số kết nối k_{r1} và k_{r2} trong quá trình xe di chuyển sẽ lệch pha nhau, sự lệch pha này gây ra bởi khoảng cách d giữa các cuộn dây nhận. Gọi hàm hệ số kết nối là một hàm theo biến x :

$$k_{r1} = f(x) \quad (14)$$

$$k_{r2} = f(x + d) \quad (15)$$

Do giới hạn về không gian dưới gầm xe, chiều dài của cuộn dây truyền được khảo sát trong dải giá trị từ $200\text{mm} \div 700\text{mm}$. Từ kết quả mô phỏng FEA trên Hình 4, thực hiện phép nội suy trong phần mềm Matlab tìm được hàm của hệ số kết nối $f(x)$ có dạng là hàm fourier bậc 2 như dưới đây:

$$f(x) \approx a_0 + a_1 \cos x \frac{2\pi}{2l_t} + b_1 \sin x \frac{2\pi}{2l_t} + a_2 \cos x \frac{2\pi}{l_t} + b_2 \sin x \frac{2\pi}{l_t} \quad (16)$$

x Vị trí cuộn nhận trên làn sặc

a, b Hằng số hàm hệ số kết nối: $a_0 = 0.14, a_1 = 0.0006, a_2 = 0.0014, b_1 = 0, b_2 = 0.0055$

l_t Chiều dài của cuộn truyền, $l_t = 0.4\text{mm}$

Độ đập mạch hệ số công suất được tính theo công thức.

$$\Delta(k_{r1} + k_{r2}) = \frac{\text{Max}(k_{r1} + k_{r2}) - \text{Min}(k_{r1} + k_{r2})}{\text{Max}(k_{r1} + k_{r2}) + \text{Min}(k_{r1} + k_{r2})} \quad (17)$$

Hàm đập mạch $\Delta(k_{r1} + k_{r2})$ được khảo sát bằng phần mềm Matlab - Simulink trong trường hợp thay đổi chiều dài cuộn dây nhận l_r cũng như tỷ lệ giữa khoảng cách giữa hai cuộn dây nhận và chiều dài cuộn nhận (d/l_r). Kết quả mô phỏng thu được được trình bày trong Hình 7. Xét đường đặc tính tổng hệ số kết nối, theo đó độ đập mạch đạt giá trị nhỏ nhất khi tỷ lệ $d/l_r = 1.5$, tức là khoảng cách giữa hai cuộn dây nhận bằng 1.5 lần chiều dài của một cuộn nhận. Đặc biệt, khi chiều dài cuộn nhận $l_r = 500\text{mm}$, tổng hệ số kết nối dao động ít nhất, cho thấy đây là kích thước tối ưu trong thiết kế. Dựa trên những phân tích và kết quả mô phỏng trên, các thông số thiết kế của hệ thống cuộn dây được lựa chọn như trình bày trong Bảng 1.

Table 1: Thông số thiết kế bộ ghép từ

Đại lượng	Giá trị	Đại lượng	Giá trị
l_t	400 mm	l_r	500 mm
w_t	400 mm	w_r	400 mm
l_{wt}	48 mm	l_{wr}	48 mm
h_{AL}	2 mm	h	150 mm
h_F	5 mm	n	10 vòng
$L_i (i = 1 \div 9)$	102 μH	$L_{rj} (j = 1 \div 2)$	120 μH
r_i	0.13 Ω	r_r	0.13 Ω
		d	600 mm

2.4. Thiết kế mạch bù LCC ở chế độ sạc ổn dòng

Mạch bù LCC được sử dụng cho cả phía truyền và nhận nhằm đảm bảo chế độ sạc ổn dòng. Điện áp xoay chiều tạo ra bởi bộ nghịch lưu phía truyền mô hình hóa thành nguồn hình sin bằng phương pháp xấp xỉ sóng hài cơ bản. Để đơn giản hóa phân

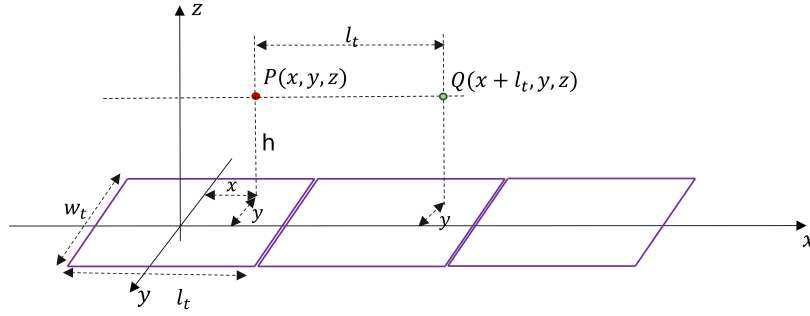


Figure 3: Tương quan vị trí các cuộn dây trên trục tọa độ xyz

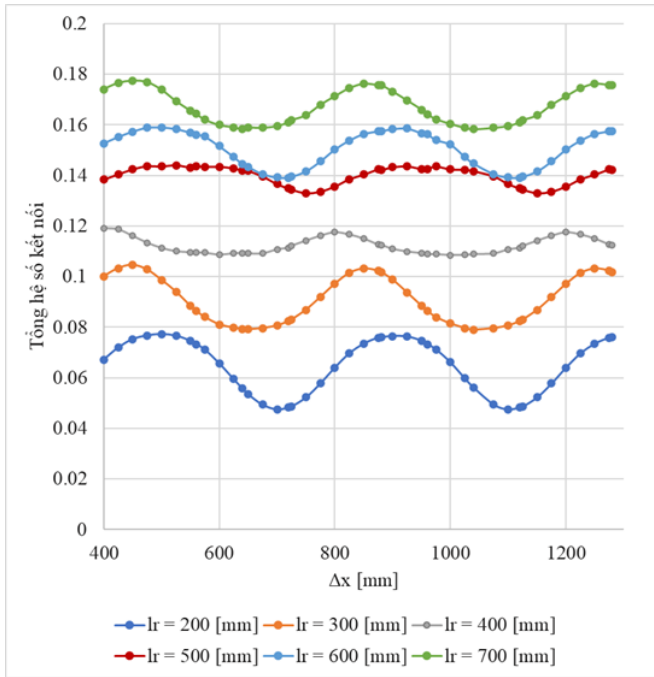


Figure 4: Đặc tính hệ số kết nối khi chiều dài cuộn nhận thay đổi

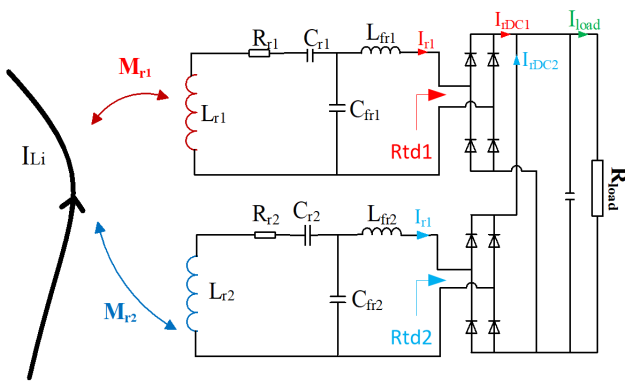


Figure 5: Cấu trúc mạch điện từ bộ nhận hai pha

tích, mạch chỉnh lưu diode phía nhận cùng với tải được quy đổi thành các tải tương đương R_{td1} và R_{td2} , như minh họa trong Hình 5. Sơ đồ mạch tương đương cho một mô-đun truyền và hai pha nhận được trình bày trong Hình 8. Quan hệ điện từ giữa các cuộn dây được mô tả thông qua một hàm hồ cảm với biến là điện cảm hồ cảm và dòng điện trên các cuộn dây còn lại. Cụ thể, mỗi cuộn dây truyền có liên kết điện từ với các cuộn truyền

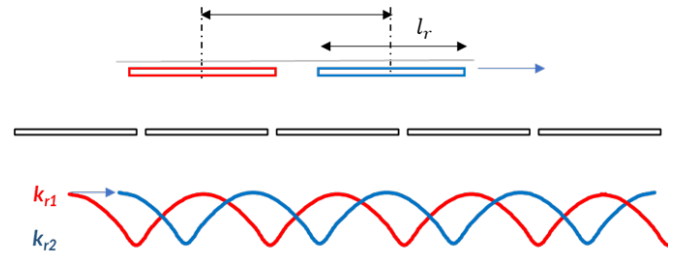


Figure 6: Độ lệch pha hệ số kết nối của hai pha cuộn nhận

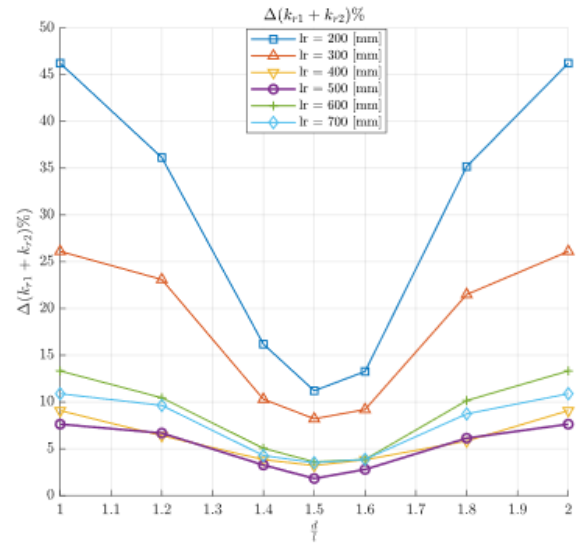


Figure 7: Độ đập mạch của tổng hệ số kết nối $\Delta(k_{r1} + k_{r2})$ theo tỷ lệ d/l_r

lân cận và hai cuộn nhận, trong khi các cuộn nhận chỉ kết nối các cuộn dây trên lân cận mà không có sự kết nối với nhau do khoảng cách lớn giữa các cuộn nhận nên điện áp cảm ứng giữa chúng không đáng kể và có thể bỏ qua trong phân tích.

Áp dụng định luật Kichoff cho từng vòng như dưới đây.

Vòng V_{pf_i} :

$$u_{AB} = \left(j\omega L_{f_i} + \frac{1}{j\omega C_{f_i}} \right) I_i - \frac{1}{j\omega C_{f_i}} \cdot I_{L_i} \quad (18)$$

Vòng V_{pi} :

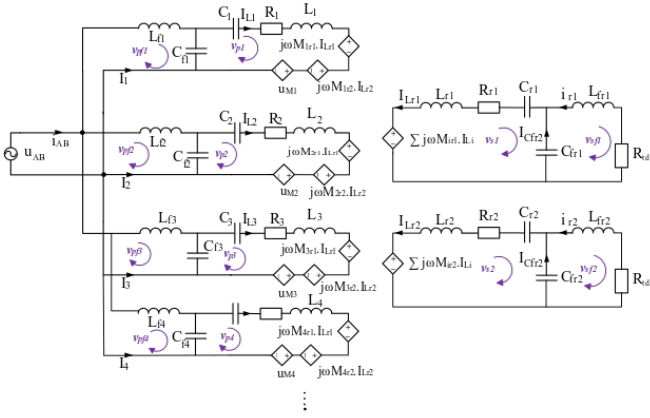


Figure 8: Sơ đồ tương đương 1 module truyền 2 cuộn nhận

$$j\omega M_{ir} I_{L_{r_i}} = \left(\frac{1}{j\omega C_{f_i}} + \frac{1}{j\omega C_i} + j\omega L_i \right) I_{L_i} + u_{M_i} - \frac{1}{j\omega C_{f_i}} \cdot I_i \quad (19)$$

Vòng V_{s_i} :

$$j\omega \sum_{i=1}^N M_{ir} \cdot I_{L_i} = \left(\frac{1}{j\omega C_{f_{r_i}}} + \frac{1}{j\omega C_{r_i}} + j\omega L_{r_i} \right) I_{L_{r_i}} - \frac{1}{j\omega C_{f_{r_i}}} \quad (20)$$

Vòng $V_{s_{f_i}}$:

$$u_{rd} = \frac{1}{j\omega C_{f_{r_i}}} \cdot I_{L_{r_i}} - \left(j\omega L_{r_i} + \frac{1}{j\omega C_{r_i}} \right) I_{L_{r_i}} \quad (21)$$

u_{M_i} là điện áp cảm ứng do các cuộn truyền khác gây lên cuộn truyền thứ i , điện áp này được tính theo công thức (22).

$$u_{M_i} = \sum_{k=1, k \neq i}^N j\omega M_{ik} I_{L_k} \quad (22)$$

Trong đó, M_{ik} đại diện cho hệ cảm giữa cuộn truyền thứ i và cuộn truyền thứ k , còn I_{L_i} là dòng điện chạy qua cuộn truyền thứ k . Các thông số của mạch bù được thiết kế sao cho thỏa mãn điều kiện cộng hưởng tại các vòng V_p và V_s .

$$j\omega L_{f_i} + \frac{1}{j\omega C_{f_i}} = 0 \quad (23)$$

$$j\omega L_{r_i} + \frac{1}{j\omega C_{r_i}} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{1}{j\omega C_{f_i}} + \frac{1}{j\omega C_i} + j\omega L_i = 0 \quad (25)$$

$$\frac{1}{j\omega C_{f_{r_i}}} + \frac{1}{j\omega C_{r_i}} + j\omega L_{r_i} = 0 \quad (26)$$

Dòng điện truyền từ lần sạc sang bộ nhận chính bằng dòng trên cuộn bù và được tính theo công thức.

$$I_{r_i} = -\frac{u_{AB}}{\omega L_{f_{r_i}} \cdot L_{f_i}} \sum_{i=1}^3 M_{ir} \quad (27)$$

Từ công thức (27) ta thấy dòng điện sạc không phụ thuộc vào điều kiện tải, hệ thống thiết kế đạt điều kiện sạc ổn dòng. Với hệ thống sạc động đã thiết kế có hai cuộn nhận dòng điện sạc thu được trên tải được tính theo công thức.

$$I_{load} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{AB}}{\omega L_{f_r} L_{f_i}} \cdot (M_{r1} + M_{r2}) \quad (28)$$

Từ công thức (10), (11), (28) có thể xác định dòng điện sạc bằng công thức sau, trong đó $k_{r1} = k_{r2} = k$.

$$I_{load} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{AB}}{\omega L_{f_r} L_{f_i}} \cdot k \cdot \sqrt{L_r L_i} \quad (29)$$

Mạch bù được thiết kế để đạt chế độ dòng điện ra không đổi. Dựa vào các mối quan hệ cộng hưởng từ các phương trình (23) đến (26), biểu thức dòng điện tải yêu cầu (29) và thông số hệ thống thiết kế như trên Bảng 1, 2.

Table 2: Thông số hệ thống mạch bù

Đại lượng	Giá trị	Đại lượng	Giá trị
L_{f_i}	100 μ H	L_{f_r}	114 μ H
C_{f_i}	0.035 μ F	C_{f_r}	0.307 μ F
C_i	0.25 μ F	C_r	0.323 μ F
I_{load}	13A	k_r	0.14
U_{DC}	310 V	f	85 kHz

3. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm

3.1. Kết quả mô phỏng

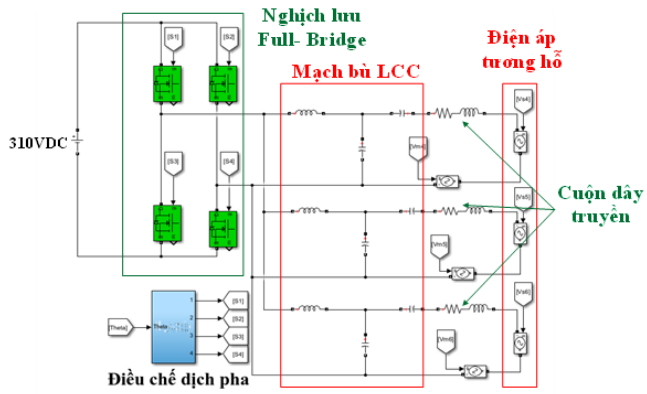
Mô hình mô phỏng hệ thống sạc động không dây cho xe điện được xây dựng trên phần mềm Matlab – Simulink, như minh họa trong Hình 9a và 9b. Các thông số hệ thống được thiết kế theo các giá trị trong Bảng 1 và 2. Hàm hệ số kết nối điện từ giữa các cuộn dây truyền và cuộn dây nhận được thể hiện trong phương trình (16). Lần sạc bao gồm chín cuộn dây truyền, được chia thành các mô-đun đặt liên kế nhau, mỗi mô-đun gồm ba cuộn dây, với mỗi cuộn dây có chiều dài 400mm, tổng chiều dài của lần sạc là 3600 mm. Tốc độ di chuyển của xe được cài đặt là 72 km/h, do đó thời gian xe di chuyển qua một lần sạc có chiều dài 2.6 m xấp xỉ là 0.13 giây. Tải pin của xe điện được mô phỏng bằng một điện trở tương đương R_L , giá trị của điện trở này thay đổi trong suốt quá trình sạc và xả của xe.

Kết quả mô phỏng dạng sóng điện áp và dòng điện trên van S_1 được trình bày trong Hình 10. Kết quả này cho thấy điều kiện chuyển mạch mềm ZVS (Zero Voltage Switching) đã đạt được. Tần số làm việc của hệ thống là 85 kHz, trùng khớp với tần số thiết kế.

Trong quá trình sạc, trở kháng tải tương đương R_L thay đổi. Để kiểm tra khả năng sạc ổn định dòng của hệ thống đề xuất, kết quả mô phỏng đặc tính dòng sạc khi thay đổi giá trị trở kháng tải được trình bày trong Hình 11. Ba trường hợp khảo sát với giá trị trở kháng tải tương đương R_L lần lượt là 6 Ω , 9 Ω và 12 Ω . Kết quả cho thấy dòng điện sạc duy trì theo giá trị thiết kế (13A) với sai lệch không đáng kể. Điều này khẳng định tính ổn định của dòng điện đầu ra do mạch bù LCC hai phía đã thiết kế. Hơn nữa, độ dao động của dòng điện rất nhỏ, dưới 2%.

Ngoài ra, để xác minh tính ưu việt của cấu trúc bộ nhận hai pha đề xuất, đặc tính dòng điện sạc của cấu trúc này được so sánh

[Mô hình một module truyền trên Matlab]



[Mô hình cấu trúc 2 bộ nhận trên Matlab]

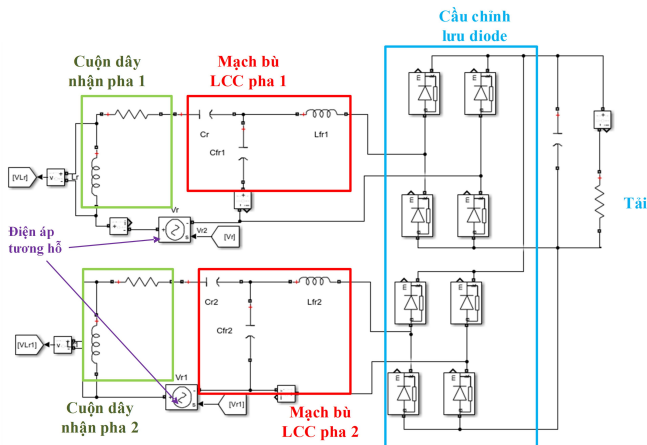


Figure 9: Mô hình hệ thống sạc động không dây trên Matlab

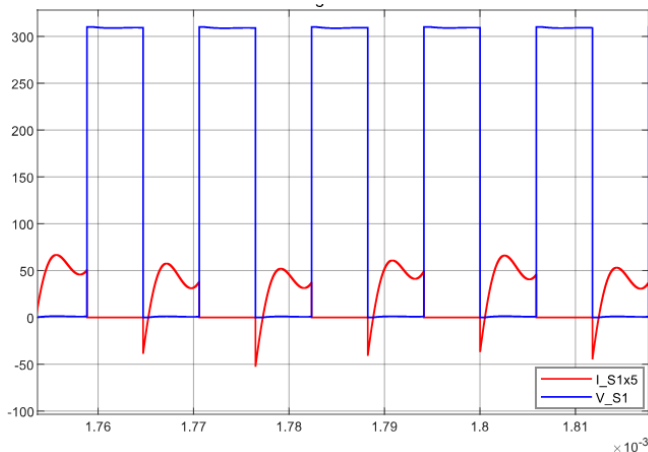


Figure 10: Dòng điện, điện áp trên van S1

với cấu trúc một bộ nhận. Kết quả mô phỏng đặc tính dòng điện sạc được thể hiện trên Hình 12, kết quả cho thấy, với cấu trúc một bộ nhận độ dao động của dòng điện tải xấp xỉ bằng 16%, với cấu trúc hai bộ nhận độ dao động xấp xỉ bằng 1,9%. Có thể thấy rằng, độ đập mạch với cấu trúc hai pha nhỏ hơn rất nhiều so với cấu trúc một pha.

3.2. Kết quả thực nghiệm

Một mô hình hệ thống sạc động không dây cho xe điện với công suất 2 kW đã được xây dựng trong phòng thí nghiệm,

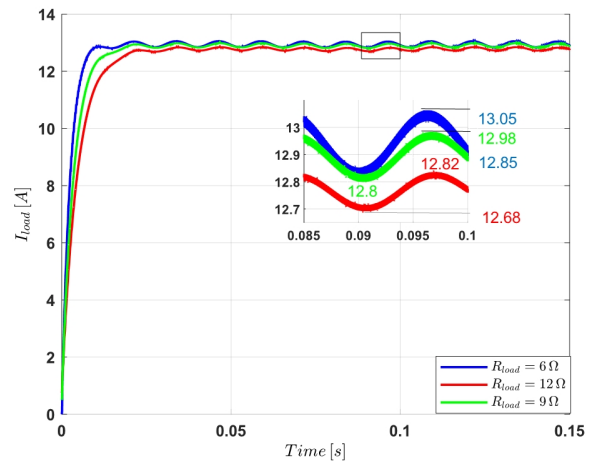
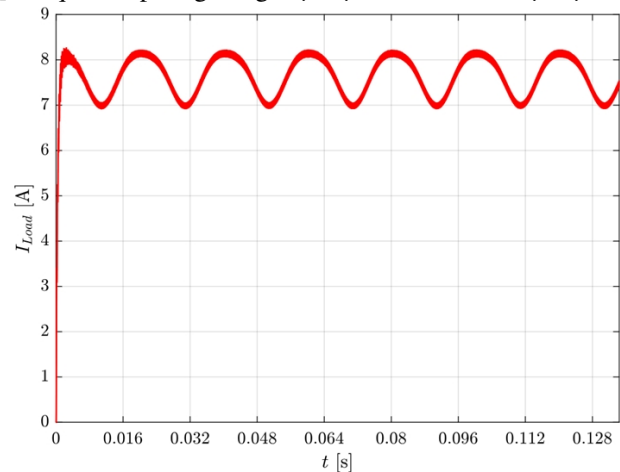


Figure 11: Dòng điện sạc với cấu trúc đề xuất khi thay đổi tải

[Kết quả mô phỏng dòng điện sạc với cấu trúc một bộ nhận]



[Kết quả mô phỏng dòng điện sạc với cấu trúc hai bộ nhận]

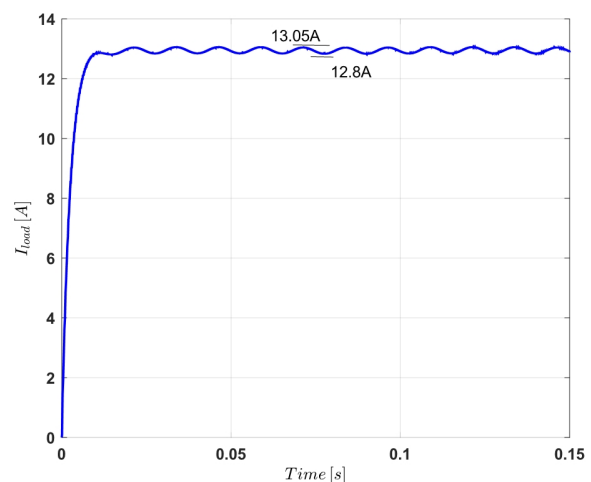


Figure 12: Kết quả mô phỏng dòng điện sạc với các cấu trúc bộ nhận khác nhau

như thể hiện trong Hình 13. Làn đường sạc bao gồm chín cuộn dây truyền, được chia thành ba nhóm, mỗi nhóm gồm ba cuộn dây truyền. Mỗi cuộn dây truyền được kết nối với một mạch bù LCC và sử dụng chung một bộ nghịch lưu, tạo thành một mô-đun truyền. Mô hình phía xe gồm hai pha, mỗi pha bao

gồm một cuộn dây nhận, một mạch bù LCC và một bộ chỉnh lưu. Hai pha này được nối song song với nhau và kết nối tới tải. Mô hình xe được gắn trên một cơ cấu di động, cho phép di chuyển dọc theo làn sọc.

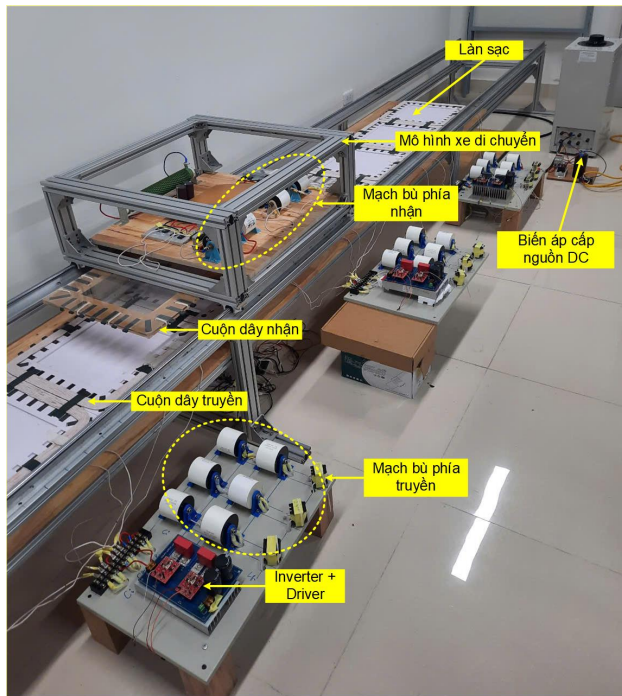


Figure 13: Mô hình thực nghiệm

Hình 14 biểu diễn dạng dòng điện điện áp trên Inverter, có thể thấy các van công suất đã đạt điều kiện chuyển mạch mềm. Kết quả thực nghiệm dạng sóng điện áp trên cuộn dây nhận và điện áp đầu vào của bộ chỉnh lưu phía nhận được thể hiện trên Hình 15 và Hình 16. Các kết quả cho thấy, điện áp nhận được trên cuộn dây truyền là xoay chiều hình sin, tần số bằng với tần số thiết kế là 85kHz. Điện áp xoay chiều đầu vào của bộ chỉnh lưu có dạng xung vuông tần số 85kHz là phù hợp với các phân tích lý thuyết đã nêu.

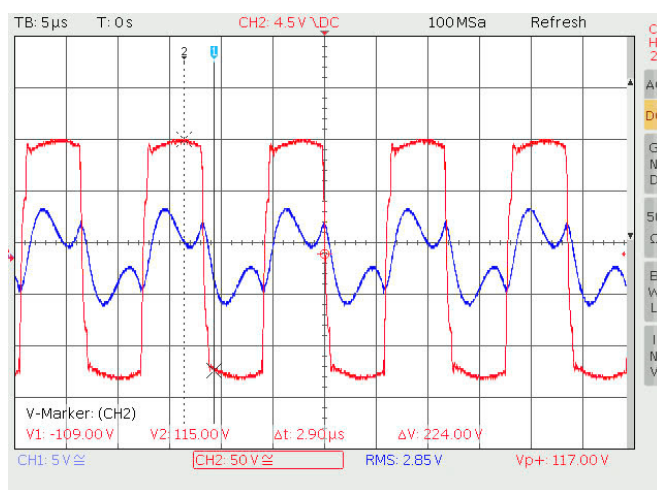


Figure 14: Dạng dòng điện, điện áp trên Inverter

Để kiểm chứng khả năng sạc ổn dòng của hệ thống, thực hiện đo dòng điện gián tiếp qua phép đo điện áp trên trở kháng tải tương đương ở các vị trí khác nhau trên làn đường sạc. Kết quả đo thể hiện như trên Hình 17 cho thấy dòng điện sạc trên tải ổn

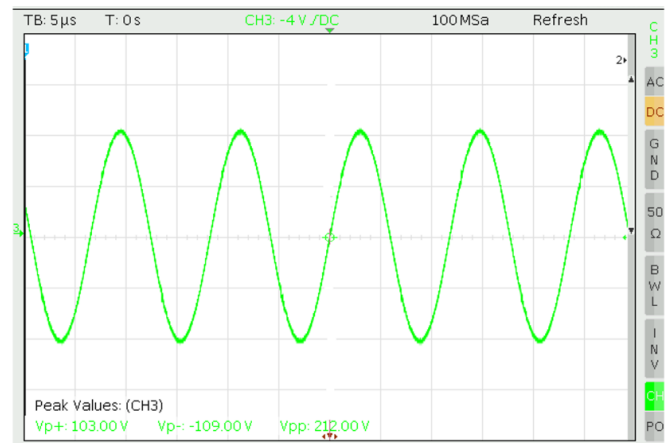


Figure 15: Điện áp trên cuộn dây nhận

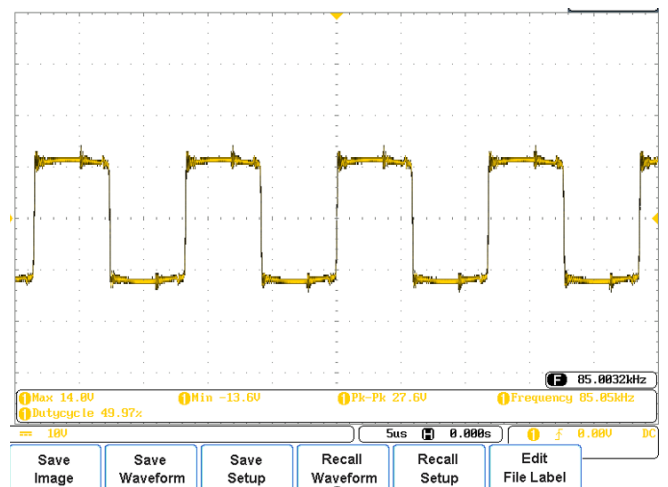


Figure 16: Điện áp đầu vào của bộ chỉnh lưu phía nhận

định, độ dao động khoảng 3.1%. Kết quả ngày được so sánh trong Bảng 3 cho thấy những ưu điểm của hệ thống đề xuất.

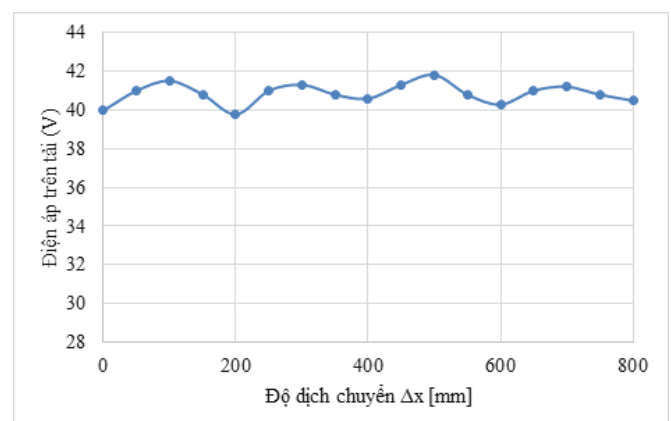


Figure 17: Điện áp đo trên tải

4. Kết luận

Bài báo này đề xuất một phương pháp mới để thiết kế sạc ổn dòng với bộ nhận hai pha trong hệ thống sạc không dây động cho xe điện. Ở phía truyền, làn đường sạc được thiết kế theo kiểu đoạn, trong khi phía nhận, cấu trúc bộ nhận hai pha được

Table 3: So sánh các phương pháp thiết kế hệ thống DWC sạc ổn dòng

Hướng nghiên cứu	Phương pháp điều khiển	Chế độ sạc	Độ lệch dòng điện sạc
Điều khiển phía truyền	[5]: PWM, có thể làm mất điều kiện cộng hưởng	CC	Không xét đến
Điều khiển phía nhận	[6]: Xác định vị trí EV sạc tốt nhất [7]: PI, thiết kế sạc 25kW cho xe Bus điện [8]: Điều khiển dịch pha phía nhận	Không xét đến Ổ định công suất CC	5% không xét đến 3%
Điều khiển hai phía	[10]: Điều khiển làn sạc bằng truyền thông [11]: Phát hiện lệch làn, truyền thông về xe [12]: Điều khiển dịch pha phía truyền	CC Không xét đến Không xét đến	Không xét đến Không xét đến Không xét đến
Đề xuất	Không cần điều khiển	CC	3.1%

tối ưu để giảm độ dao động dòng điện tải bằng cách điều chỉnh hai yếu tố: kích thước và khoảng cách giữa các cuộn dây nhận. Sử dụng phương pháp mô phỏng phân tích phần tử hữu hạn (FEA) trên phần mềm Ansys Maxwell, cuộn dây truyền đã được thiết kế và cuộn dây của bộ nhận hai pha được tối ưu với chiều dài $l_r = 500$ mm và khoảng cách giữa hai cuộn nhận bằng 1.5 lần chiều dài cuộn truyền, tức $d = 600$ mm. Mạch bù LCC được thiết kế hoạt động ở tần số $f = 85$ kHz nhằm đảm bảo chế độ sạc ổn dòng cho xe điện. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy chế độ sạc ổn dòng đạt được với độ dao động dòng điện chỉ khoảng 3.1%.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách Khoa Hà Nội trong đề tài mã số T2023-PC-026.

Tài liệu tham khảo

- [1] A. C. Bagchi, A. Kamineni, R. A. Zane, and R. Carlson, "Review and comparative analysis of topologies and control methods in dynamic wireless charging of electric vehicles," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 4, pp. 4947–4962, 2021. DOI: [10.1109/JESTPE.2021.3058968](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3058968).
- [2] D. Patil, M. K. McDonough, J. M. Miller, B. Fahimi, and P. T. Balsara, "Wireless power transfer for vehicular applications: Overview and challenges," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, pp. 3–37, 2018. DOI: [10.1109/TTE.2017.2780627](https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2780627).
- [3] S. Li and C. C. Mi, "Wireless power transfer for electric vehicle applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 4–17, 2015. DOI: [10.1109/JESTPE.2014.2319453](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2319453).
- [4] S. Chopra and P. Bauer, "Driving range extension of ev with on-road contactless power transfer—a case study," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 1, pp. 329–338, 2013. DOI: [10.1109/TIE.2011.2182015](https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2182015).
- [5] G. de Freitas Lima and R. B. Godoy, "Modeling and prototype of a dynamic wireless charging system using lpps compensation topology," in *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, 2017, pp. 1–6. DOI: [10.1109/COBEP.2017.8257301](https://doi.org/10.1109/COBEP.2017.8257301).
- [6] A. Kamineni, G. A. Covic, and J. T. Boys, "A mistuning-tolerant and controllable power supply for roadway wireless power systems," in *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2016, pp. 1–7. DOI: [10.1109/ECCE.2016.7854705](https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7854705).
- [7] R. Tavakoli and Z. Pantic, "Analysis, design, and demonstration of a 25-kw dynamic wireless charging system for roadway electric vehicles," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 6, no. 3, pp. 1378–1393, 2018. DOI: [10.1109/JESTPE.2017.2761763](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2017.2761763).
- [8] A. Babaki, S. Vaez-Zadeh, and A. Zakerian, "Performance optimization of dynamic wireless ev charger under varying driving conditions without resonant information," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 11, pp. 10429–10438, 2019. DOI: [10.1109/TVT.2019.2944153](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2944153).
- [9] T. D. H. N. T. Diep and N. K. Trung, "Constant current charging and transfer efficiency improvements for a dynamic wireless charging system," *Eng. Technol. Appl.*, vol. 13, pp. 12320–12326, 6 2023.
- [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 Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 5, pp. 4086–4096, 2019. DOI: [10.1109/TIE.2018.2860537](https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2860537).
- [11] A. N. Azad, A. Echols, V. A. Kulyukin, R. Zane, and Z. Pantic, "Analysis, optimization, and demonstration of a vehicular detection system intended for dynamic wireless charging applications," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 1, pp. 147–161, 2019. DOI: [10.1109/TTE.2018.2870339](https://doi.org/10.1109/TTE.2018.2870339).
- [12] 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 Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 4, pp. 988–1003, 2019. DOI: [10.1109/TTE.2019.2905981](https://doi.org/10.1109/TTE.2019.2905981).
- [13] 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 Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5832–5841, 2013. DOI: [10.1109/TPEL.2013.2247634](https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2247634).

- [14] M. Budhia, G. A. Covic, and J. T. Boys, "Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 11, pp. 3096–3108, 2011. DOI: [10.1109/TPEL.2011.2143730](https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2143730).
- [15] 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 Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 2, pp. 370–379, 2017. DOI: [10.1109/TTE.2016.2631607](https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2631607).
- [16] 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 Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 7, pp. 1–4, 2016. DOI: [10.1109/TMAG.2016.2529682](https://doi.org/10.1109/TMAG.2016.2529682).
- [17] T. D. Hiep, N. H. Minh, N. T. Diep, T. T. Minh, and N. K. Trung, "Output current pulsation reduction with multi-coil receiver in the dynamic wireless charging systems for electric vehicles," in *2023 12th International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, 2023, pp. 133–138. DOI: [10.1109/ICCAIS59597.2023.10382395](https://doi.org/10.1109/ICCAIS59597.2023.10382395).
- [18] V.-B. Vu, M. Dahidah, V. Pickert, and V.-T. Phan, "A high-power multiphase wireless dynamic charging system with low output power pulsation for electric vehicles," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 4, pp. 3592–3608, 2020. DOI: [10.1109/JESTPE.2019.2932302](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2932302).
- [19] Y. Zhang, L. Wang, Y. Guo, and Y. Zhang, "Optimization of planar rectangular coil achieving uniform magnetic field distribution for ev wireless charging based on genetic algorithm," *IET Power Electronics*, vol. 12, Aug. 2019. DOI: [10.1049/iet-pel.2018.6202](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.6202).
- [20] G. A. Covic, M. L. G. Kissin, D. Kacprzak, N. Clausen, and H. Hao, "A bipolar primary pad topology for ev stationary charging and highway power by inductive coupling," in *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2011, pp. 1832–1838. DOI: [10.1109/ECCE.2011.6064008](https://doi.org/10.1109/ECCE.2011.6064008).
- [21] F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann, and C. C. Mi, "A dynamic charging system with reduced output power pulsation for electric vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6580–6590, 2016. DOI: [10.1109/TIE.2016.2563380](https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2563380).
- [22] L. Wang, Y. Guo, and Y. Zhang, "Optimisation of planar rectangular coil achieving uniform magnetic field distribution for ev wireless charging based on genetic algorithm," *IET Power Electronics*, vol. 12, pp. 2706–2712, 10 2019. DOI: [10.1049/iet-pel.2018.6202](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.6202).