

SẠC ỔN DÒNG VỚI CẤU TRÚC MẠCH BÙ LCC-P VÀ PHƯƠNG PHÁP ƯỚC LƯỢNG HỖ CẢM TRONG HỆ THỐNG SẠC ĐỘNG KHÔNG DÂY CHO XE ĐIỆN

CONSTANT CURRENT CHARGING WITH LCC-P COMPENSATION AND MUTUAL COUPLING ESTIMATION IN DYNAMIC WIRELESS CHARGING FOR EVS

Bùi Trọng Đạt¹, Dương Anh Minh¹, Trần Đức Hiệp^{1,2}, Nguyễn Thị Diệp³, Nguyễn Kiên Trung^{1*}
¹Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, ²Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, ³Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 07/5/2025, Ngày chấp nhận đăng: 30/5/2025

Tóm tắt:

Bài báo đề xuất phương pháp sạc ổn dòng trong hệ thống sạc động không dây với cấu trúc mạch bù LCC-P và phương pháp ước lượng hồ cảm giữa cuộn dây nhận với cuộn truyền để điều khiển dòng sạc thông qua điều khiển bộ biến đổi DC/AC phía truyền, hiệu suất trên toàn dải tải cũng được xem xét trong nghiên cứu này. Một hệ thống sạc động không dây đã được thiết kế gồm 2 phía: phía truyền và phía nhận. Phía truyền là làn sạc gồm các cuộn dây truyền xếp liền kề nhau tích hợp dưới mặt đường được kết nối với hệ thống biến tần tần số cao thông qua mạch bù phía truyền, phía nhận gồm cuộn nhận, mạch bù phía nhận, bộ chỉnh lưu được tích hợp trên xe. Kết quả cho thấy thuật toán ước lượng và điều khiển chính xác với sai số nhỏ hơn 2%, hiệu suất hệ thống đạt trên 90% trên toàn dải tải.

Từ khóa: Hệ thống sạc động không dây; sạc ổn dòng; ước lượng hồ cảm; mạch bù LCC-P.

Abstract:

This study presents a constant current charging method for dynamic wireless charging (DWC) systems, incorporating an LCC-P compensation topology and a mutual coupling estimation technique between the transmitting and receiving coils. The charging current is precisely regulated through the control of the DC/AC converter on the transmitting side, while system efficiency across the entire load range is systematically analyzed. A DWC system has been designed, consisting of two main parts: the transmitting side and the receiving side. The transmitting side comprises a charging lane with adjacent transmitting coils integrated beneath the road surface, connected to a high-frequency inverter system via a transmitting-side compensation circuit. The receiving side includes a receiving coil, a receiving-side compensation circuit, and a rectifier, all of which are integrated into the vehicle. Simulation results indicate that the proposed estimation and control method achieves high accuracy, with an estimation error of less than 2%, while maintaining an efficiency exceeding 90% across the entire load range.

Keywords: Dynamic wireless charging system; constant current charging; mutual coupling estimation; LCC-P compensation circuit.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Trong những năm gần đây xe điện ngày càng phổ biến trên thế giới [1], [2] do ưu điểm không phát khí thải khi vận hành. Tuy nhiên,

vấn đề về quãng đường di chuyển sau một lần sạc và thời gian sạc lại pin là một thách thức lớn ngăn cản xe điện thay thế hoàn toàn xe chạy bằng nhiên liệu hóa thạch. Gần đây, hệ

thông sạc động không dây (Dynamic wireless charging-DWC) cho xe điện [3] đã được đề xuất như một giải pháp để khắc phục những hạn chế này. Khi vận hành, hệ thống cho phép xe vừa di chuyển vừa nhận năng lượng trên làn sạc mà không cần dừng lại. Điều này cho phép xe di chuyển xa hơn mà không cần tăng số lượng cell pin [4].

Trong hệ thống DWC, mỗi loại xe có yêu cầu công suất sạc khác nhau, đặt ra bài toán điều khiển dòng điện, điện áp sạc phù hợp để truyền năng lượng tối đa lên hệ thống lưu trữ năng lượng trên xe. Các phương pháp điều khiển công suất sạc chia làm ba nhóm: điều khiển phía truyền, điều khiển phía nhận, và điều khiển hai phía. Nhóm điều khiển phía truyền sử dụng phương pháp điều khiển bộ nghịch lưu phía truyền để điều chỉnh dòng đầu ra tăng hiệu suất như trong [5], [6] nhược điểm là chỉ phù hợp với thiết kế đường truyền kiểu dài và thiết bị công suất lớn như tàu điện. Bằng cách thiết kế cuộn dây truyền để tạo ra từ trường ổn định để dòng sạc ít thay đổi trong [7] hoặc điều khiển bộ biến đổi DC/DC đầu vào, với cách tiếp cận này đòi hỏi thiết kế phần cứng phức tạp và khó triển khai trong thực tế. Ngược lại nhóm điều khiển phía nhận dễ dàng điều khiển dòng điện, điện áp sạc tuy nhiên hiệu suất hệ thống bị suy giảm. Trong [8], [9] điều khiển bộ chỉnh lưu tích cực phía nhận để tạo ra dòng điện thay đổi được, phù hợp cho xe di chuyển tốc độ thấp. Lắp thêm phần cứng bổ sung như cảm biến hoặc bộ biến đổi DC/DC ở phía nhận được sử dụng trong [10]-[12], nhược điểm là hệ thống cồng kềnh hơn. Điều khiển cả phía truyền và phía nhận là phương án cho chất lượng điều khiển tốt

nhất tuy nhiên cần truyền thông giữa phía truyền và phía nhận – khó thực hiện trong môi trường từ trường mạnh như hệ thống DWC [13]-[16].

Bài báo này đề xuất một phương pháp mới thiết kế hệ thống DWC sạc dòng không đổi bằng cách sử dụng mạch bù LCC-P tính toán ước lượng hệ số hở cảm hai phía truyền nhận chỉ từ các đại lượng phía truyền. Giá trị hở cảm tính ước lượng được sử dụng để điều khiển chính xác nguồn dòng đầu ra phù hợp với từng loại tải và không phụ thuộc vào giá trị của tải phía nhận. Thuật toán ước lượng và điều khiển đạt được độ chính xác cao với cấu trúc mạch bù phía nhận đơn giản. Nghiên cứu này bao gồm 5 phần: phần đầu tiên giới thiệu tính cấp thiết của vấn đề nghiên cứu, phần thứ hai trình bày cách thiết kế hệ thống sạc không dây động sử dụng cấu trúc mạch bù LCC-P, phần thứ ba đề xuất phương pháp ước lượng hệ số hở cảm để điều khiển dòng đầu ra chỉ từ các đại lượng đo được phía truyền, phần tiếp theo trình bày kết quả mô phỏng kiểm chứng độ chính xác của thuật toán ước lượng và điều khiển và kết luận định hướng phát triển được trình bày ở phần cuối.

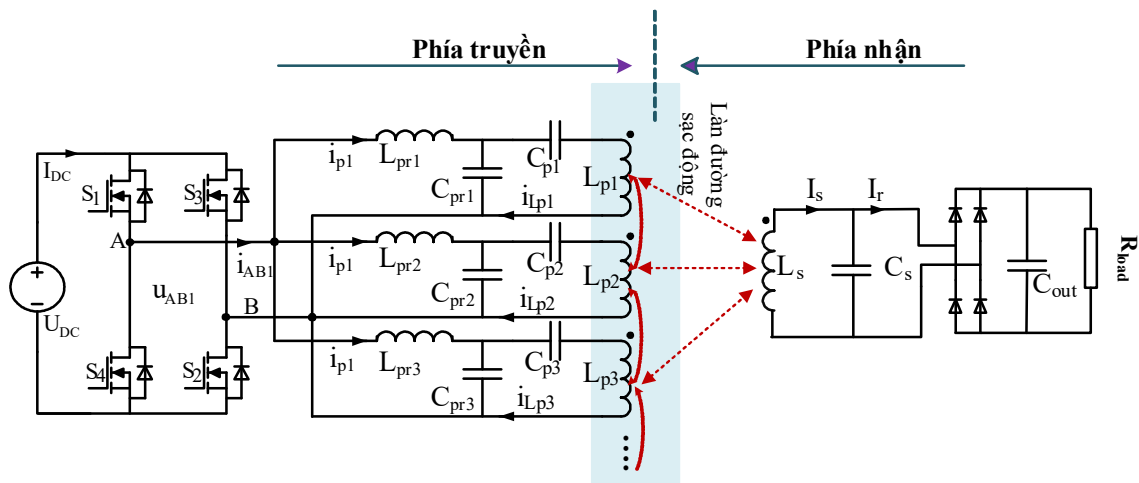
2. CẤU TRÚC HỆ THỐNG VÀ PHÂN TÍCH LÝ THUYẾT

2.1. Cấu trúc hệ thống đề xuất

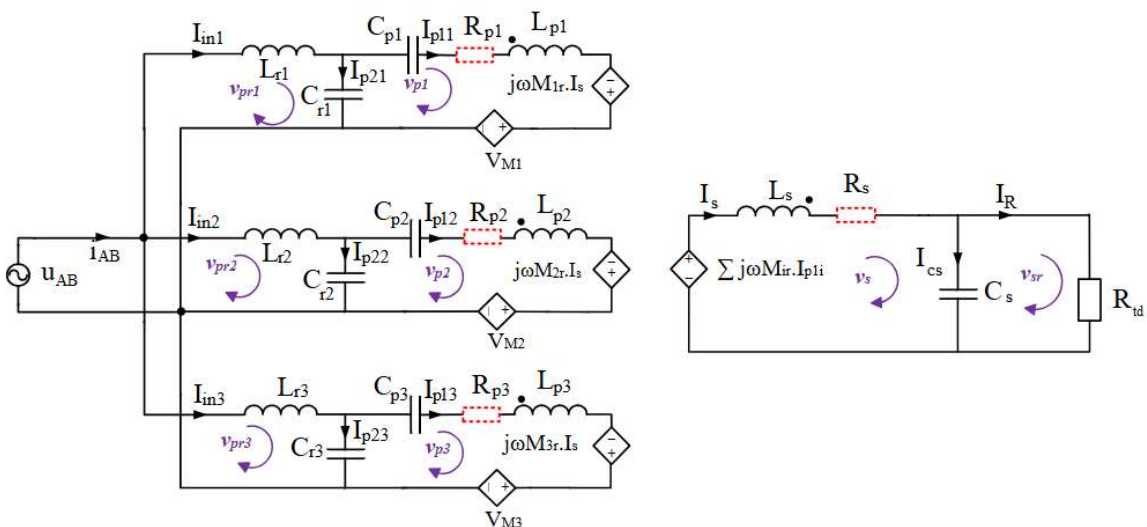
Hệ thống đề xuất gồm hai phía tách rời nhau: phía truyền (sử dụng mạch bù LCC) và phía nhận (sử dụng mạch bù P), tạo thành cấu trúc LCC-P như Hình 1. Ở phía truyền, mỗi cuộn dây được nối với một mạch bù LCC độc lập, và tổ hợp ba cuộn dây - mạch bù này được mắc song song vào cùng một bộ nghịch lưu.

Sự kết hợp này tạo thành một mô-đun truyền, cho phép mở rộng phạm vi truyền và cải thiện hiệu suất liên kết từ. Nguồn điện một chiều đầu vào UDC được chuyển thành điện áp xoay chiều tần số cao nhờ bộ nghịch lưu cầu gồm bốn MOSFET (S1, S2, S3, S4), sau đó thông qua mạch bù LCC phía truyền (L_{pri} , C_{pri} , C_{pi}) đưa đến cuộn dây truyền L_i . Dòng điện xoay chiều tần số cao trong cuộn dây truyền sinh ra từ trường biến thiên trong không gian truyền. Ở phía nhận, cuộn dây nhận (L_s) cảm

ứng được một điện áp xoay chiều. Điện áp cảm ứng sau đó đi qua mạch bù P (Parallel) và được chỉnh lưu tạo ra điện áp một chiều sạc cho hệ thống lưu trữ năng lượng trên xe điện. Để mô hình hóa đặc tính của hệ thống lưu trữ năng lượng (pin) trên xe điện, nghiên cứu sử dụng một nội trở có thể điều chỉnh được. Cách tiếp cận này phổ biến trong các nghiên cứu về truyền năng lượng không dây cho xe điện [10]-[12], [17].



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc mạch điện-từ hệ thống sạc động không dây



Hình 2. Sơ đồ quy đổi tương đương 3 cuộn dây truyền và 1 cuộn dây nhận

2.2. Phân tích nguyên lý mạch

Mạch bù LCC-P được đề xuất để thiết kế cho hệ thống này như được biểu diễn trên Hình 1. Sơ đồ tương đương được trình bày trên Hình 2. Phương pháp phân tích sóng hài cơ bản (First Harmonic Approximation - FHA) được sử dụng để phân tích nguyên lý hoạt động của mạch, điện áp đầu ra của bộ nghịch lưu được xấp xỉ thành các nguồn sin. Để đơn giản hóa mô hình, các tổn hao do điện trở của cuộn dây và mạch bù được bỏ qua và độ chính xác của phương pháp này được xác minh bằng các kết quả mô phỏng. Tương tác từ giữa các cuộn dây truyền và cuộn dây nhận được mô hình hóa dưới dạng các nguồn áp phụ thuộc dòng, thể hiện mối liên hệ hồ cảm giữa các phần tử. Ở phía tải, bộ chỉnh lưu, tụ lọc và tải tiêu thụ được quy đổi thành một trở kháng tương đương nhằm thuận tiện cho việc phân tích mạch ở miền tần số cơ bản.

Ký hiệu I_{pli} là dòng điện hiệu dụng chảy trong cuộn truyền thứ i ; I_{p2i} là dòng điện hiệu dụng chảy qua tụ bù song song C_{ri} và I_{ini} là dòng điện hiệu dụng đầu ra của bộ nghịch lưu hay chính là dòng chảy qua cuộn cảm bù L_{ri} . Áp dụng định luật Kirchhoff II cho mỗi mạch vòng dòng điện ở phía truyền:

$$u_{AB} = j\omega L_{ri} I_{p1i} + \left(j\omega L_{ri} + \frac{1}{j\omega C_{ri}} \right) I_{p2i} \quad (1)$$

$$\frac{1}{j\omega C_{ri}} I_{p2i} = \left(j\omega L_{pi} + \frac{1}{j\omega C_{pi}} \right) I_{p1i} - j\omega M_{ir} I_s + V_{Mi} \quad (2)$$

Ở phía nhận:

$$j\omega \sum_{i=1}^N M_{ir} I_{p1i} = j\omega L_s I_s + \frac{1}{j\omega C_s} I_{cs} \quad (3)$$

$$\frac{1}{j\omega C_s} I_{cs} = R_{td} I_R \quad (4)$$

Trong đó, ω là tần số góc, M_{ir} là hồ cảm giữa cuộn truyền thứ i và cuộn nhận. V_{Mi} là nguồn áp phụ thuộc do các cuộn dây truyền còn lại gây nên cuộn truyền thứ i ; M_{ik} là hồ cảm giữa cuộn truyền i và cuộn truyền k và I_{pli} là dòng chảy trên cuộn truyền i :

$$V_{Mi} = j\omega \sum_{k=1; k \neq i}^N M_{ik} I_{p1k} \quad (5)$$

Các thông số tụ điện và cuộn cảm trong mạch bù được thiết kế để thỏa mãn điều kiện cộng hưởng ở phía truyền:

$$\frac{1}{j\omega C_{ri}} + j\omega L_{ri} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{1}{j\omega C_{pi}} + \frac{1}{j\omega C_{ri}} + j\omega L_{pi} + \omega \sum_{k=1; k \neq i}^N M_{ik} = 0 \quad (7)$$

Điều kiện cộng hưởng ở phía nhận:

$$\frac{1}{j\omega C_s} + j\omega L_s = 0 \quad (8)$$

Dòng điện trên cuộn dây truyền và dòng trên cuộn nhận được rút ra như sau:

$$I_{p1i} = \frac{U_{AB}}{j\omega L_{ri}} \quad (9)$$

$$I_s = \frac{u_{AB}}{j\omega L_{ri} L_s} \left(1 + j \frac{R_{td}}{\omega L_s} \right) M_r \quad (10)$$

Với: $M_r = \sum_{i=1}^N M_{ir}$

Dòng điện qua tụ bù C_{ri} được biểu diễn như sau:

$$I_{p2i} = \frac{U_{AB}}{\omega L_s^2 L_{ri}^2} \left[\frac{R_{td} M_{ir} M_r}{\omega} + j(L_s^2 L_{ri} - L_s M_{ir} M_r) \right] \quad (11)$$

Dòng trên tải được thể hiện như sau:

$$I_R = \frac{U_{AB}}{j\omega L_{ri} L_s} M_r \quad (12)$$

Từ (12) nhận thấy, cường độ dòng điện đầu ra phụ thuộc vào điện áp đầu vào. Như vậy, mạch bù LCC-P đảm bảo đầu ra hệ thống là một nguồn dòng không phụ thuộc vào tải.

2.3. Tính toán thông số mạch bù

Mục tiêu của việc thiết kế hệ thống sạc không dây động sử dụng cấu trúc mạch bù LCC-P là đảm bảo hiệu suất truyền năng lượng cao trên toàn dải tải, trong điều kiện nội trở của pin thay đổi liên tục trong suốt quá trình sạc. Đồng thời, hệ thống cần đáp ứng yêu cầu về dòng điện đầu ra ổn định để đảm bảo quá trình sạc hiệu quả và an toàn cho hệ thống lưu trữ năng lượng. Trong nghiên cứu này, cuộn dây nhận L_s được thiết kế dựa trên các thông số kỹ thuật của làn sạc cố định đã được trình bày trong [18]. Các cuộn truyền giống nhau và đặt sát nhau. Vì vậy, giá trị điện cảm, hồ cảm của các cuộn dây truyền là giống nhau:

$$\begin{cases} L_{p1} = L_{p2} = L_{p3} = L_p \\ M_{ik} = M_{ki} (i, k = 1, 2, 3; i \neq k) \end{cases} \quad (13)$$

Tương tự, thông số các phần tử mạch bù phía truyền được chọn như sau:

$$\begin{cases} L_{r1} = L_{r2} = L_{r3} = L_r \\ C_{r1} = C_{r2} = C_{r3} = C_r \end{cases} \quad (14)$$

Để tính hiệu suất truyền năng lượng, xem xét đến nội trở của các cuộn dây truyền và nhận như trên Hình 2. Trong đó, lần lượt là nội trở của các cuộn dây truyền và nhận. Các cuộn dây truyền được thiết kế giống hệt nhau, nên

$R_{pi} = R_{p1} = R_{p2} = R_{p3} = R_p$. Hiệu suất truyền năng lượng của hệ thống được tính như sau:

$$H = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \frac{R_{td} |I_R|^2}{R_{td} |I_R|^2 + 6R_p |I_{p1}|^2 + R_s |I_s|^2} \quad (15)$$

Mặt khác, từ các phương trình (9), (10), (12) rút ra được:

$$\left(\frac{|I_{p1}|}{|I_R|} \right)^2 = \left(\frac{L_s}{\sum_{i=1}^N M_{ir}} \right)^2 \quad (16)$$

$$\left(\frac{|I_s|}{|I_R|} \right)^2 = \left(1 + \left(\frac{R_{td}}{\omega L_s} \right)^2 \right) \quad (17)$$

Trong đó tổng hồ cảm truyền nhận:

$$M_r = \sum_{i=1}^N M_{ir} = k \sqrt{L_p L_s} \text{ với } k \approx 0.14$$

Nội trở cuộn dây nhận được biểu diễn theo các thông số truyền nhận, với thông số cuộn dây truyền được đề cập trong [18]:

$$R_s = R_p \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} \quad (18)$$

Kết hợp các phương trình (15)-(18) thu được biểu thức tính hiệu suất:

$$R_s = R_p \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} \quad (19)$$

Bảng 1. Thông số của hệ thống và mạch bù

Thông số	Ký hiệu	Giá trị
Điện áp vào	U_{DC}	310V
Tần số cộng hưởng	f	85kHz
Dòng điện sạc	I_R	11A

Thông số	Ký hiệu	Giá trị
Điện cảm cuộn truyền	L_{pi}	$120\mu H$
Điện cảm cuộn nhận	L_s	$19\mu H$
Nội trở cuộn truyền	R_{pi}	0.05Ω
Nội trở cuộn nhận	R_s	0.02Ω
Điện cảm bù phía truyền	L_{ri}	$17.3\mu H$
Tụ bù song song phía truyền	C_{ri}	$0.2\mu F$
Tụ bù nối tiếp cuộn 1, 3	C_{p1}, C_{p3}	$0.04\mu F$
Tụ bù nối tiếp cuộn 2	C_{p2}	$0.047\mu F$
Tụ bù phía nhận	C_s	$0.185\mu F$
Dải tải tương đương	R_{td}	$12.1 - 20.3\Omega$

Nghiên cứu đề xuất thiết kế hệ thống sạc với $H \geq 90\%$ trên toàn dải tải làm việc $R_{load} = 15 - 25\Omega$, ứng với giá trị tải quy đổi tương đương:

$$R_{td} = \frac{8}{\pi^2} R_{load} = 12.1 - 20.3\Omega \quad (20)$$

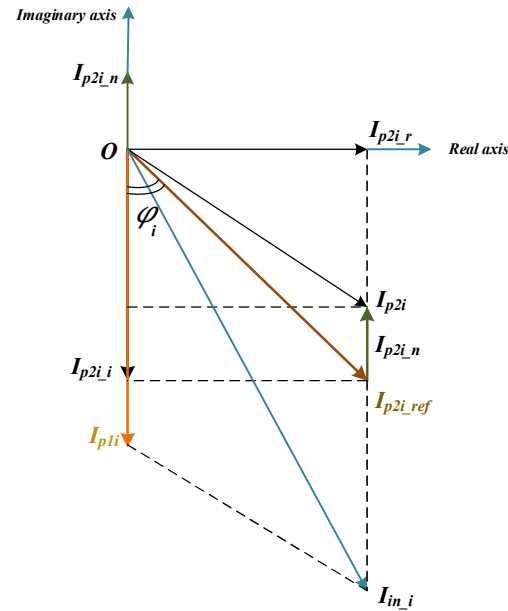
Với thông số của cuộn dây truyền nhận đã được thiết kế, chọn tần số cộng hưởng $f = 85\text{kHz}$ (theo tiêu chuẩn SAE J2954). Từ mục tiêu hiệu suất (19), kết hợp với các phương trình cộng hưởng (6), (7), (8), dòng sạc (12), các thông số mạch bù được tính toán và đưa ra trên Bảng 1.

3. THUẬT TOÁN ƯỚC LƯỢNG VÀ ĐIỀU KHIỂN DÒNG ĐẦU RA

3.1. Ước lượng hồ cảm

Theo phương trình (12) để ước lượng được dòng điện đầu ra I_R cần ước lượng được tổng hồ cảm $\sum_{i=1}^N M_{ir}$. Bài báo này đề xuất một

thuật toán ước lượng hồ cảm chỉ dựa vào thông tin thu được từ phía truyền, cụ thể là dòng điện trong các cuộn dây truyền, mà không yêu cầu bất kỳ truyền thông nào giữa hai phía truyền và nhận.



Hình 3. Các thành phần dòng điện truyền biểu diễn dưới dạng véc-tơ

Dựa trên phương trình (9) và (11), I_{p2i} được phân tích thành các thành phần theo trục thực và ảo:

$$I_{p2i_r} = \frac{U_{AB}}{\omega L_s^2 L_{ri}^2} \left(\frac{R_L M_{ir} M_r}{\omega} \right) \quad (21)$$

$$I_{p2i_n} = \frac{U_{AB}}{\omega L_s^2 L_{ri}^2} L_s^2 L_{ri} \quad (22)$$

$$I_{p2i_i} = \frac{U_{AB}}{\omega L_s^2 L_{ri}^2} L_s M_{ir} M_r \quad (23)$$

Các thành phần trên được biểu diễn dưới dạng véc-tơ như trên Hình 3. Trong đó:

$$I_{p2i_ref} = \sqrt{I_{p2i_n}^2 + I_{p2i}^2 - I_{p2i_n} \frac{I_{in_i}^2 - I_{p1i}^2 - I_{p2i}^2}{I_{p1i}}} \quad (24)$$

$$\varphi_i = \arccos\left(\frac{I_{in_i}^2 - I_{p1i}^2 - I_{p2i}^2}{2I_{p1i}I_{p2i}}\right) + \arccos\left(\frac{I_{p2i_ref}^2 + I_{p2i}^2 - I_{p2_n}^2}{2I_{p2i_ref}I_{p2i}}\right) \quad (25)$$

$$M_{ir}M_r = \sqrt{\frac{|I_{p2i_ref}\cos(\varphi_i)|}{|I_{p1i}|}} L_{ri}L_s \quad (26)$$

Dựa trên mối quan hệ của dòng điện cuộn truyền I_{pli} và dòng điện trên tụ bù I_{p2i} , tổng hệ số hở cảm được biểu diễn như sau:

$$M_r = \sqrt{\sum_1^N \sqrt{\frac{|I_{p2i_ref}\cos(\varphi_i)|}{|I_{p1i}|}} L_{ri}L_s} \quad (27)$$

Với những tham số hệ thống thiết kế đã biết, điện cảm hở cảm có thể được ước lượng dựa trên (27). Trong đó, các đại lượng cần biết là giá trị hiệu dụng các dòng điện phía truyền bao gồm dòng qua cuộn cảm bù I_{in_i} , dòng qua tụ bù song song I_{p2i} , dòng trên các cuộn truyền I_{pli} .

3.2. Điều khiển dòng sạc

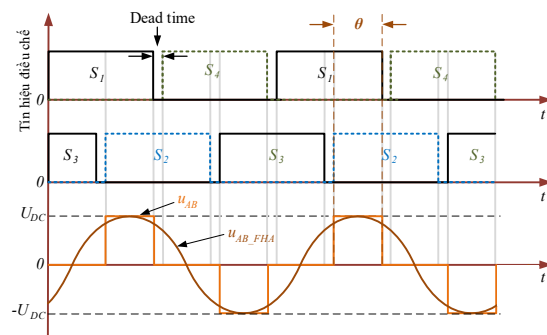
Từ phương trình (12) thấy rằng: nếu ước lượng được M_r theo (27) thì có thể điều khiển dòng điện sạc thông qua điều chỉnh giá trị của U_{AB} . Trong hệ thống WPT, phương pháp điều chế dịch pha bộ nghịch lưu phía truyền thường được sử dụng để điều chỉnh giá trị của U_{AB} . Tín hiệu điều chế dịch pha và điện áp đầu ra được thể hiện trên Hình 4. Xung điều chế cho hai van trên cùng một nhánh cần có một khoảng thời gian dead time để tránh khi hai van trên một nhánh cùng dẫn (chưa mở/khóa hoàn toàn) sẽ gây hiện tượng ngắn mạch nguồn áp,

gây mất an toàn cho hoạt động của mạch điện.

Dựa vào phương pháp xấp xỉ sóng hài bậc nhất, điện áp đầu ra nghịch lưu U_{AB} được biểu diễn như sau:

$$U_{AB} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{DC} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (28)$$

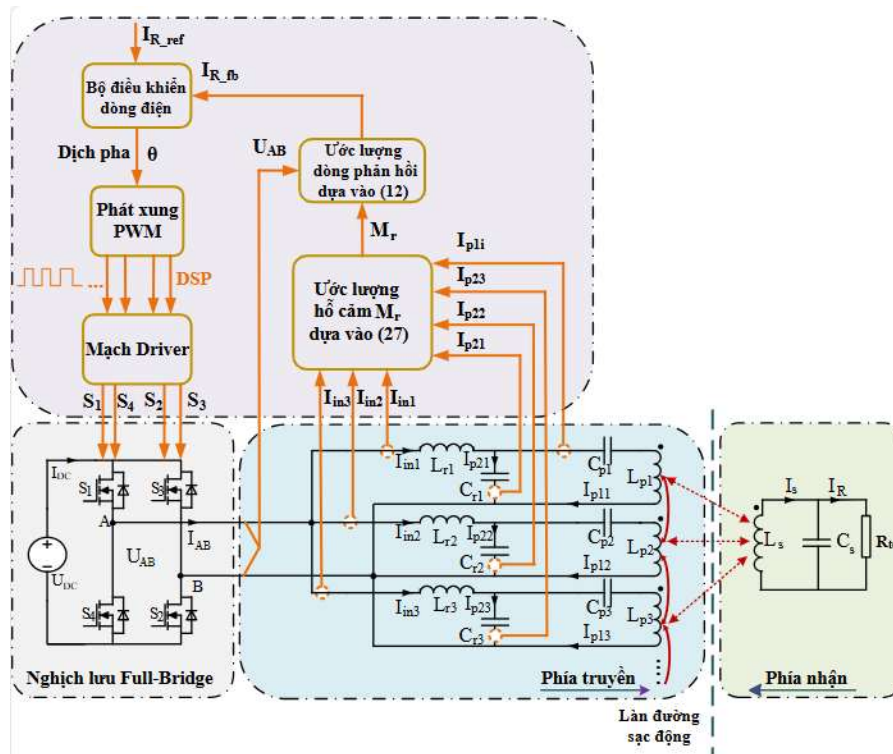
Trong đó, Góc θ là góc dịch pha giữa hai nhánh van S1, S4 và S2, S3 với giá trị thay đổi trong khoảng từ 0 đến 180°. Bằng cách thay đổi góc θ điện áp đầu ra nghịch lưu có thể điều chỉnh được.



Hình 4. Tín hiệu điều chế và điện áp đầu ra sau nghịch lưu sử dụng điều chế dịch pha

Như vậy, từ công thức (12), (27) và (28) thấy rằng, bằng cách điều chỉnh góc dịch pha θ có thể điều chỉnh được dòng điện sạc.

Sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển dòng sạc đầu ra dựa vào ước lượng hở cảm được trình bày trên Hình 5. Trong cấu trúc này, các đại lượng gồm dòng qua cuộn cảm bù I_{in_i} , dòng qua cuộn dây truyền I_{pli} , dòng qua tụ bù I_{p2i} được đo bằng cảm biến dòng đặt tại phía truyền. Từ các giá trị đo được, hệ số hở cảm M_r được ước lượng theo công thức (27). Đồng thời,



Hình 5. Sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển dòng đầu ra dựa vào ước lượng hồi cảm

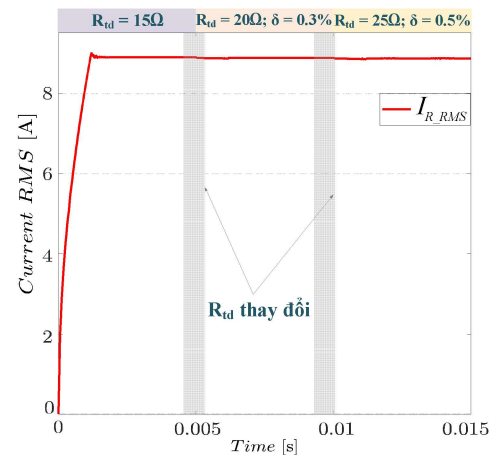
điện áp sau nghịch lưu U_{AB} cũng được đo để ước lượng dòng đầu ra I_{R_fb} theo phương trình (12). Sai lệch giữa giá trị đặt I_{R_ref} và dòng ước lượng I_{R_fb} được đưa vào bộ điều khiển dòng, bộ điều khiển này phát tín hiệu dịch pha để điều khiển dòng điện đầu ra.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

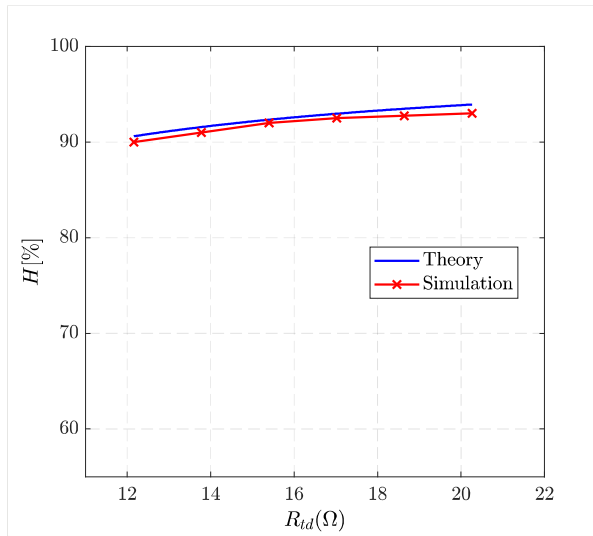
Để kiểm chứng tính xác thực của phương án đề xuất, mô hình mô phỏng được thực hiện trên phần mềm MATLAB/Simulink với các thông số trên Bảng 1.

Trong kịch bản mô phỏng đầu tiên, khả năng duy trì đặc tính nguồn dòng của hệ thống được đánh giá. Cụ thể, hệ thống được kiểm tra với ba giá trị tải khác nhau: $15\ \Omega$, $20\ \Omega$ và $25\ \Omega$. Kết quả được trình bày trong Hình 6 cho thấy dòng điện đầu ra vẫn được duy trì ở mức gần

như không đổi, với sai số nhỏ hơn 0.5%. Điều này chứng minh rằng hệ thống điều khiển đề xuất có khả năng tạo ra dòng sạc ổn định, gần như không phụ thuộc vào sự thay đổi của tải - một yêu cầu quan trọng đối với các ứng dụng sạc không dây động.

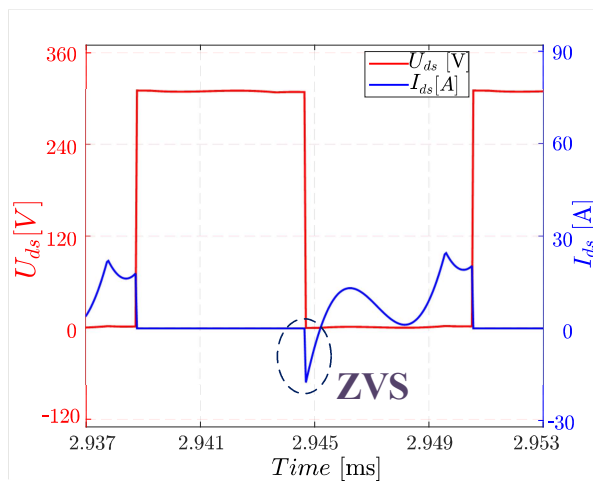


Hình 6. Đáp ứng nguồn dòng đầu ra với sự thay đổi của tải

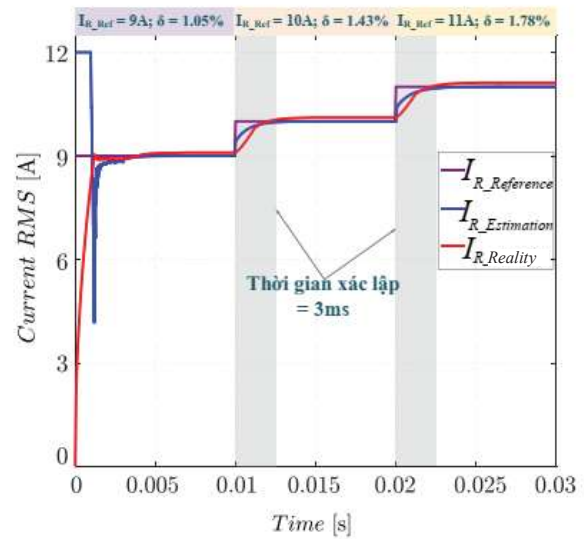


Hình 7. Hiệu suất hệ thống lý thuyết và mô phỏng

Hình 7 biểu diễn hiệu suất của hệ thống với các thông số thiết kế ở phần 2. Nhiều giá trị tải khác nhau trong toàn dải hoạt động đã được khảo sát. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu suất của hệ thống luôn duy trì trên 90%, và gần tương đồng với giá trị hiệu suất lý thuyết, chứng tỏ thiết kế đề xuất có hiệu quả cao trong truyền năng lượng.



Hình 8. Dòng điện và điện áp trên MOSFET



Hình 9. Đáp ứng dòng điện đầu ra ước lượng và thực tế

Đồ thị điện áp (U_{ds}) và dòng điện (I_{ds}) trên các van MOSFET được biểu diễn trên Hình 8. Kết quả cho thấy các van MOSFET đã đạt chuyển mạch mềm (ZVS), góp phần giảm tổn thất đóng cắt.

Sau khi xác minh hiệu suất truyền năng lượng và đặc tính nguồn dòng đầu ra, kịch bản mô phỏng tiếp theo được thực hiện nhằm đánh giá tính chính xác của thuật toán ước lượng hệ số hồ cảm, cũng như khả năng đáp ứng của cấu trúc điều khiển dòng điện.

Các giá trị đặt dòng điện ($I_{R_Reference}$) được thay đổi từ 9A đến 11A, với bước nhảy 1A sau mỗi 0.01s. Kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 9 cho thấy dòng điện thực tế ($I_{R_Reality}$) có thời gian đáp ứng nhanh, đạt trạng thái ổn định trong vòng 3 ms sau mỗi lần thay đổi giá trị đặt, và không xuất hiện hiện tượng quá điều chỉnh. Đồng thời, dòng điện thực tế bám rất sát dòng điện ước lượng ($I_{R_Estimation}$) và giá trị đặt, với sai số tối đa

chỉ 1.78%. Sai số này chủ yếu đến từ các thành phần kí sinh trong hệ thống, đã được bỏ qua khi phân tích nguyên lý mạch ở phần 2. Tuy nhiên sai số vẫn nằm trong sai lệch cho phép, đảm bảo yêu cầu về độ chính xác của dòng sạc trong cấu trúc điều khiển.

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, một phương pháp điều khiển ổn dòng dựa trên ước lượng hồ cảm được đề xuất nhằm điều khiển dòng sạc trong hệ thống sạc động không dây cho xe điện mà không cần phản hồi từ phía nhận. Đối với hệ thống sạc động không dây, thành phần hồ cảm luôn liên

tục thay đổi khi xe di chuyển. Bài báo lần đầu đưa ra phương pháp lý thuyết để ước lượng hồ cảm chỉ dựa trên dòng điện truyền, với cấu trúc LCC-P sử dụng nhiều cuộn truyền. Đồng thời phương pháp điều khiển truyền không cần truyền thông hai phía giúp giảm độ phức tạp của điều khiển, giảm độ trễ và tăng tính tin cậy với sai số cho phép. Bên cạnh đó, điều khiển dòng sạc đầu ra dựa trên việc ước lượng hồ cảm vẫn cần phải phát triển thêm trong những nghiên cứu xa hơn có thể kể đến như điều khiển điện áp đầu ra hay đảm bảo vận hành an toàn cho pin khi sạc.

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 J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 9, no. 4, pp. 4947–4962, Aug. 2021, doi: 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, 2017, doi: 10.1109/TTE.2017.2780627.
- [3]. S. Li and C. C. Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," vol. 6777, no. c, 2014, doi: 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.
- [5]. J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, and C. T. Rim, "Narrow-width inductive power transfer system for online electrical vehicles," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 26, no. 12, pp. 3666–3679, 2011, doi: 10.1109/TPEL.2011.2160972.
- [6]. S. Y. Choi, S. Y. Jeong, B. W. Gu, G. C. Lim, and C. T. Rim, "Ultraslim S-Type Power Supply Rails for Roadway-Powered Electric Vehicles," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 30, no. 11, pp. 6456–6468, 2015, doi: 10.1109/tpel.2015.2444894.
- [7]. J. M. Miller, O. C. Onar, and M. Chinthavali, "Primary-side power flow control of wireless power transfer for electric vehicle charging," *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 3, no. 1, pp. 147–162, 2015, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2382569.

- [8]. A. Zaheer, M. Neath, H. Z. Beh, and G. A. Covic, "A dynamic EV charging system for slow moving traffic applications," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 2, pp. 354–369, 2017, doi: 10.1109/TTE.2016.2628796.
- [9]. G. R. Nagendra, G. A. Covic, and J. T. Boys, "Sizing of inductive power pads for dynamic charging of EVs on IPT highways," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 2, pp. 405–417, 2017, doi: 10.1109/TTE.2017.2666554.
- [10]. 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.
- [11]. S. Wang, J. Chen, Z. Hu, C. C. Rong, and M. Liu, "Optimisation design for series-series dynamic WPT system maintaining stable transfer power," *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 9, pp. 987–995, 2017, doi: 10.1049/iet-pel.2016.0839.
- [12]. 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.
- [13]. R. Tavakoli and Z. Pantic, "Analysis, Design, and Demonstration of a 25-kW Dynamic Wireless Charging System for Roadway Electric Vehicles," *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 6, no. 3, pp. 1379–1393, 2018, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2761763.
- [14]. 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 J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 8, no. 4, pp. 3592–3608, 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2932302.
- [15]. 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.
- [16]. A. Babaki, S. Vaez-Zadeh, and A. Zakerian, "Performance Optimization of Dynamic Wireless EV Charger under Varying Driving Conditions without Resonant Information," *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 68, no. 11, pp. 10429–10438, 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2944153.
- [17]. 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.
- [18]. 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," *Proceedings - 12th IEEE International Conference on Control, Automation and Information Sciences, ICCAIS 2023*, pp. 133–138, 2023, doi: 10.1109/ICCAIS59597.2023.10382395.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả **Bùi Trọng Đạt** tốt nghiệp cử nhân chuyên ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa tại Trường Điện – Điện tử, Đại học Bách Khoa Hà Nội năm 2025.

Hướng nghiên cứu chính bao gồm: điện tử công suất, hệ thống truyền điện không dây.



Tác giả **Dương Anh Minh** tốt nghiệp cử nhân chuyên ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa tại Trường Điện – Điện tử, Đại học Bách Khoa Hà Nội năm 2025.

Hướng nghiên cứu chính bao gồm: điện tử công suất, hệ thống truyền điện không dây.



Tác giả **Trần Đức Hiệp** sinh năm 1988, nhận bằng kỹ sư Công nghệ kỹ thuật Điện-Điện tử của trường Đại học công nghiệp Hà Nội năm 2011, bằng Thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa tại Học viện Kỹ thuật Quân sự năm 2016.

Hiện tại là giảng viên khoa Tự động hóa, trường Điện-Điện tử, Đại học Công nghiệp Hà Nội. Hướng nghiên cứu chính là điện tử công suất, truyền năng lượng không dây, sạc không dây cho xe điện.



Tác giả **Nguyễn Thị Diệp** tốt nghiệp Đại học, Thạc sĩ, Tiến sĩ chuyên ngành Tự động hóa tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2004; 2008; 2021. Hiện nay là giảng viên Khoa Điều khiển và tự động hóa, Trường Đại học Điện lực.

Hướng nghiên cứu chính bao gồm: điện tử công suất, truyền điện không dây, sạc không dây, quản lý năng lượng pin.



Tác giả **Nguyễn Kiên Trung** sinh ra tại Hà Nội. Anh nhận bằng đại học và Thạc sĩ khoa học cùng chuyên ngành điều khiển và tự động hóa tại Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội lần lượt vào các năm 2008 và 2011. Năm 2016, anh nhận bằng Tiến sĩ tại viện công nghệ Shibaura Tokyo, Nhật Bản. Sau thời gian làm nghiên cứu sau tiến sĩ, anh về nước tiếp tục công việc giảng dạy tại Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội từ cuối năm 2017.

Lĩnh vực nghiên cứu: các bộ biến đổi điện tử công suất làm việc ở tần số cao, hệ thống sạc và quản lý năng lượng cho xe điện, và hệ thống truyền điện không dây.