

TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG SẠC ĐỘNG KHÔNG DÂY CHO XE ĐIỆN

OVERVIEW OF DYNAMIC WIRELESS CHARGING SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES

Nguyễn Thị Điệp^{1,*}, Trần Đức Hiệp^{2,4},
Phạm Duy Học³, Nguyễn Kiên Trung⁴, Trần Trọng Minh⁴

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.83>

TÓM TẮT

Hệ thống sạc động không dây hứa hẹn mang lại triển vọng mới cho xe điện để mở rộng phạm vi di chuyển. Bài báo này trình bày tổng quan các nghiên cứu về hệ thống sạc động không dây cho xe điện. Các tiến bộ kỹ thuật và các thách thức trong việc nghiên cứu về hệ thống được trình bày. Các nghiên cứu về thiết kế cuộn dây, cấu trúc mạch bù, bộ biến đổi công suất và phương pháp điều khiển được tập trung xem xét với trọng tâm là hiệu suất của hệ thống. Ngoài ra, vấn đề an toàn cũng được xem xét. Bằng cách giới thiệu những thành tựu mới trong lĩnh vực sạc động không dây cho xe điện, chúng tôi hy vọng hệ thống được quan tâm nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi.

Từ khóa: Sạc không dây động; truyền điện không dây; xe điện; thiết kế cuộn dây; mạch bù.

ABSTRACT

The dynamic wireless charging system promises to bring new prospects for electric vehicles to extend the range of travel. This paper presents an overview of studies on dynamic wireless charging systems for electric vehicles. Technical advances and challenges in the study of systems are presented. Studies on coil design, compensation circuit, power converter, and control method are focused on consideration with a focus on system efficiency. In addition, the issue of magnetic field safety is also considered. By introducing new achievements in the dynamic wireless charging system for electric vehicles, we hope that the system will be interested in the study and wide application.

Keywords: Dynamic wireless charging; wireless power transfer; electric vehicle; coil design; compensation circuit.

¹Khoa Điều khiển và Tự động hóa, Trường Đại học Điện Lực

²Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

³Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam - Hàn Quốc

⁴Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: diepnt@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/01/2022

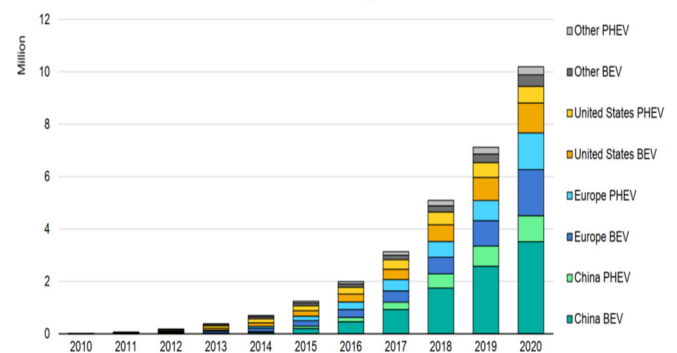
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 18/6/2022

Ngày chấp nhận đăng: 23/12/2022

1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, vấn đề ô nhiễm môi trường ngày càng nghiêm trọng, tài nguyên hóa thạch ngày càng cạn kiệt thúc đẩy việc sử dụng năng lượng xanh. Xe điện (EV - Electric Vehicle) là phương tiện sử dụng năng lượng xanh hiệu quả và ngày

càng phổ biến trên thế giới. Theo báo cáo của cơ quan năng lượng quốc tế IEA (International Energy Agency), EV được phát triển nhanh chóng trong khoảng hơn mười năm trở lại đây. Hình 1 là thống kê của IEA về thị trường xe điện giai đoạn 2010-2020. Sau một thập kỷ tăng trưởng nhanh chóng, vào cuối năm 2020 đã có hơn 10 triệu xe điện được đưa vào sử dụng. Số lượng đăng ký ô tô điện tăng 41% trong năm 2020, ước tính nhu cầu sử dụng xe điện sẽ tăng lên khoảng 145 triệu xe/năm vào năm 2030 [1].



Hình 1. Thị trường xe điện giai đoạn 2010 - 2020 [1]

Ngoài vấn đề chi phí thì hạn chế lớn nhất của xe điện là quãng đường di chuyển ngắn do công nghệ lưu trữ năng lượng. Mặc dù, công nghệ sản xuất ắc quy đã và đang phát triển nhưng vẫn còn nhiều hạn chế như chi phí lớn, kích thước lớn, trọng lượng lớn và mật độ lưu trữ năng lượng thấp [2]. Với công nghệ ắc quy hiện tại thì EV không thể đạt được phạm vi di chuyển như xe xăng. Hơn nữa, các bộ sạc cho EV hiện nay chủ yếu là sạc cắm dây, các bộ sạc này thường được đặt tại nhà, nơi làm việc hoặc tại các trạm sạc tập trung. EV sử dụng sạc cắm dây có nhược điểm là bất tiện, có nguy cơ rò điện trong môi trường ẩm ướt, làm nguy hiểm cho người sử dụng. Gần đây, các bộ sạc không dây cho EV đã và đang được nghiên cứu, phát triển mạnh mẽ.

Sạc điện không dây là một trong những ứng dụng nổi bật của công nghệ truyền điện không dây (WPT - Wireless Power Transfer). Hệ thống WPT cho phép truyền điện qua không khí với khoảng cách từ vài mm đến vài trăm mm, hiệu suất có thể đạt được trên 90% [3]. Hệ thống sạc không dây cho xe điện được chia thành hai loại là sạc không dây tĩnh và sạc không dây động. Sạc không dây tĩnh là bộ sạc

mà khi sạc xe điện cần phải đồ đúng vị trí của bộ truyền để nhận điện năng từ bộ truyền. Hiện nay, các bộ sạc không dây tính đã được thương phẩm bởi một số tập đoàn sản xuất xe điện lớn trên thế giới như WiTricity, Qualcomm...[4]. Một số nhà sản xuất xe điện cung cấp bộ sạc không dây như một tùy chọn khi mua xe điện. Tuy nhiên, nhược điểm của các bộ sạc này là thời gian sạc dài, khoảng cách di chuyển sau mỗi lần sạc ngắn, dung lượng và trọng lượng của ắc quy lớn [5]m.

Sạc không dây động là giải pháp có thể khắc phục được các nhược điểm trên của sạc không dây tĩnh. Trong hệ thống sạc không dây động, xe điện có thể vừa đi vừa sạc. Hệ thống này không những mở rộng phạm vi di chuyển của xe điện mà còn giúp giảm đáng kể dung lượng và kích thước của ắc quy. Nếu 20% quãng đường di chuyển được trang bị hệ thống sạc 40kW, khoảng cách di chuyển của xe điện có thể mở rộng thêm ít nhất 80% [6].

Làn đường truyền năng lượng trong hệ thống động không dây có thể được tạo thành bằng cách sắp xếp nhiều bộ truyền giống như các bộ truyền của sạc không dây tĩnh dưới lòng đường. Như vậy, thay vì mỗi EV sở hữu riêng một bộ sạc tĩnh thì các bộ sạc tĩnh này có thể được sắp xếp, điều khiển tạo thành làn đường sạc động cho xe. Hệ thống sạc không dây động có thể cùng một lúc sạc cho nhiều EV, có thể thích hợp với nhiều loại EV khác nhau như xe bus điện, ô tô điện... Vì vậy, hiệu quả sử dụng cao hơn nhiều so với các hệ thống sạc khác.

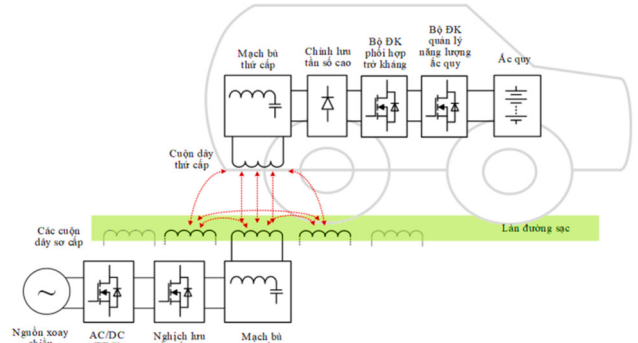
Bảng 1. Một số thành tựu của hệ thống sạc động không dây cho xe điện

Học viện/tập đoàn	Công suất	Tần số	Khoảng cách truyền	Hiệu suất
UC Berkeley [8]	60kW	0,4kHz	76mm	60%
KAIST University, Korea (OLEV) [7]	3kW	20kHz	10mm	80%
	15kW		170mm	83%
	60kW		170mm	71%
Oak Ridge National Laboratory (ORNL) [8, 9]	20kW	22kHz	125 - 175mm	90%
EV System Lab & Nissan Research Centre [10]	0,3kW	100kHz	170mm	77 - 90%
North Carolina State University, USA [11, 12]	1kW	90kHz	100mm	> 84%
University of Auckland, New Zealand [13, 14]	20 - 30kW	12,9kHz	500mm	85%

Bảng 1 liệt kê một số thành tựu nổi bật của hệ thống sạc không dây động cho xe điện đã và đang được thử nghiệm trong thời gian gần đây. UC Berkeley đã tiến hành một thử nghiệm về hệ thống sạc động cho xe điện dựa trên công nghệ WPT vào cuối thập niên 90. Hệ thống này được thử nghiệm cho xe bus, có công suất truyền 60kW, khoảng cách truyền 76mm, đường truyền dài 213m. Do công nghệ bán dẫn hạn chế, tần số làm việc chỉ đạt 400Hz, hiệu suất đạt được là 60% [15]. Kết quả của nghiên cứu này đã mở ra các hướng nghiên cứu nhằm cải thiện hiệu suất của hệ thống sạc không dây động. Viện Khoa học và Công nghệ

tiên tiến Hàn Quốc (KAIST) đã có nhiều đóng góp cho các nghiên cứu về hệ thống sạc động. KAIST đã xây dựng một số hệ thống sạc động OLEV (On-Line Electric Vehicles) thử nghiệm cho xe bus và xe SUV. Hệ thống sạc động cho xe bus với công suất truyền bằng 60kW, khoảng cách truyền là 170mm, hiệu suất đạt được trên 71%, hệ thống sạc động cho xe SUV cũng được thử nghiệm với công suất truyền bằng 15kW, khoảng cách truyền là 170mm, hiệu suất lớn nhất đạt được là 83% [7]. Phòng thí nghiệm quốc gia ORNL (Oak Ridge National Laboratory) của Mỹ, nghiên cứu phát triển hệ thống sạc động sử dụng các bộ truyền kiểu đoạn. Hệ thống truyền công suất 20kW, khoảng cách truyền từ 125 - 175mm, hiệu suất đạt được lên tới 90% [8, 9]. Ngoài ra, còn nhiều các viện nghiên cứu, các tập đoàn đã và đang nghiên cứu thử nghiệm các hệ thống sạc động không dây cho xe điện như liệt kê trong bảng 1.

Như vậy có thể thấy rằng, các hệ thống sạc động không dây cho xe điện đã và đang được nghiên cứu, phát triển, hứa hẹn làm cho việc sử dụng xe điện tiện lợi hơn và an toàn hơn. Các công trình nghiên cứu đã chỉ ra rằng hệ thống sạc động không dây cho xe điện có thể được đưa vào cấp độ thương mại với chi phí hợp lý. Tuy nhiên, sự chuyển động của xe trên làn đường sạc tạo ra nhiều thách thức trong việc thiết kế. Thách thức lớn của hệ thống là làm sao để cải thiện hiệu suất của hệ thống, hiện đang thấp hơn hệ thống sạc tĩnh. Ngoài ra còn rất nhiều vấn đề, giải pháp trong hệ thống sạc không dây động cần tiếp tục nghiên cứu và phát triển.



Hình 2. Cấu trúc chung của hệ thống sạc động không dây cho xe điện

Để nghiên cứu tổng quan về hệ thống sạc động không dây cho xe điện, xem xét một cấu trúc điển hình của hệ thống như trên hình 2. Hệ thống bao gồm hai phía cách điện với nhau, được gọi là phía sơ cấp và phía thứ cấp. Ở phía sơ cấp, các cuộn dây sơ cấp được đặt cố định dưới lòng đường tạo thành làn đường sạc động cho xe. Nguồn điện lưới xoay chiều được chuyển thành nguồn một chiều nhờ bộ chỉnh lưu PFC. Sau đó, nguồn một chiều được biến đổi thành nguồn xoay chiều tần số cao nhờ bộ nghịch lưu tần số cao để đưa tới các cuộn dây sơ cấp thông qua mạch bù sơ cấp. Dòng điện tần số cao trong các cuộn dây sơ cấp phát ra từ trường xoay chiều. Ở phía thứ cấp, cuộn dây nhận được đặt dưới gầm xe điện cảm ứng được một điện áp xoay chiều tần số cao. Bằng cách cộng hưởng với mạch bù phía thứ cấp, công suất và hiệu suất truyền được cải

thiện đáng kể. Nguồn xoay chiều tần số cao này được chỉnh lưu và đưa đến bộ điều khiển phối hợp trở kháng, bộ điều khiển quản lý năng lượng ắc quy để sạc cho ắc quy. Như vậy có thể thấy, nghiên cứu về hệ thống sạc động không dây cho xe điện có thể được chia thành ba phần chính như sau: nghiên cứu về cuộn dây, nghiên cứu về mạch bù, nghiên cứu về cấu trúc và phương pháp điều khiển các bộ biến đổi điện tử công suất. Bài báo này trình bày tóm tắt các tiến bộ kỹ thuật của hệ thống, những đặc điểm nổi bật, thách thức và cơ hội.

2. HỆ THỐNG CUỘN DÂY

Hệ thống cuộn dây là một trong những bộ phận quan trọng nhất của hệ thống sạc không dây, nó chuyển đổi giữa dạng điện thành dạng từ để truyền năng lượng không dây. Ngoài ra, nó còn xác định lượng điện năng được truyền và hiệu suất của hệ thống. Các cuộn dây đặt ở phía sơ cấp và thứ cấp để truyền và nhận năng lượng. Các cuộn dây phía sơ cấp được sắp đặt cố định dưới lòng đường tạo thành làn đường truyền hay làn đường sạc cho EV, cuộn dây thứ cấp thường được đặt dưới gầm EV. Khoảng cách truyền hay khe hở không khí trong hệ thống sạc cho EV thường nằm trong khoảng 100mm đến 300mm với các xe nhỏ và có thể tăng lên với các loại xe lớn [16]. Khi xe điện di chuyển dọc theo làn đường sạc, điện năng được truyền từ phía sơ cấp sang phía thứ cấp qua khe hở không khí nhờ các cuộn dây này.

Để hiệu suất của hệ thống sạc không dây cao thì cả hai thông số của hệ thống cuộn dây là hệ số kết nối điện từ và hệ số phẩm chất phải lớn [3]. Hệ thống sạc không dây với hai cuộn dây sơ cấp và thứ cấp lần lượt là L_1, L_2 thì hệ số kết nối điện từ k và hệ số phẩm chất Q_1, Q_2 được định nghĩa như sau:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \tag{1}$$

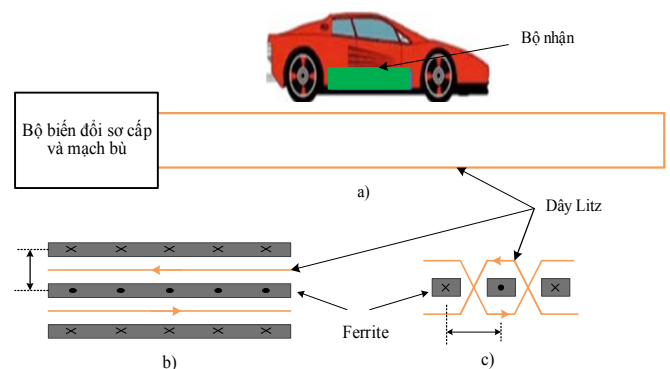
$$Q_1 = \frac{\omega L_1}{R_1}; Q_2 = \frac{\omega L_2}{R_2} \tag{2}$$

Trong đó, L_1, L_2 là điện cảm tự cảm của cuộn dây truyền, nhận; M là điện cảm hỗ cảm giữa hai cuộn dây truyền nhận; R_1, R_2 là nội trở của cuộn dây truyền, nhận; $\omega = 2\pi f$, với f là tần số.

Thông thường, với một cấu trúc nhất định, tỷ lệ giữa kích thước của cuộn dây và khoảng cách truyền càng lớn thì hệ số kết nối điện từ (k) càng lớn; cuộn dây càng dày và diện tích vùng ferrite càng lớn thì hệ số phẩm chất (Q) càng cao. Bằng cách tăng kích thước và vật liệu của cuộn dây thì hiệu suất truyền của hệ thống có thể cao hơn, nhưng đây không phải là giải pháp kỹ thuật tốt. Hệ thống cần phải có hệ số kết nối điện từ (k) và hệ số phẩm chất (Q) cao hơn với kích thước và giá thành của các cuộn dây nhỏ nhất. Ngoài ra, hệ số phẩm chất của cuộn dây tỷ lệ thuận với tần số, nên hệ thống làm việc ở tần số cao là giải pháp tốt để tăng giá trị của hệ số phẩm chất. Trong hệ thống sạc không dây, giải pháp tăng tần số được lựa chọn để tăng hiệu suất truyền [17, 19]. Tuy nhiên, tần số làm việc được quy định bởi tiêu chuẩn J2954 của hiệp hội ô tô điện thế giới SAE. Tiêu chuẩn

J2954 quy định tần số làm việc định mức áp dụng cho các loại xe hạng nhẹ là 85kHz (trong dải tần từ 81,38 kHz ÷ 90kHz) [19]. Bên cạnh tần số, hệ số kết nối điện từ là một trong những thông số quan trọng trong hệ thống sạc không dây. Với cùng vật liệu và kích thước, cấu trúc hình học của bộ ghép từ cũng tạo ra sự khác biệt của hệ số kết nối điện từ [20].

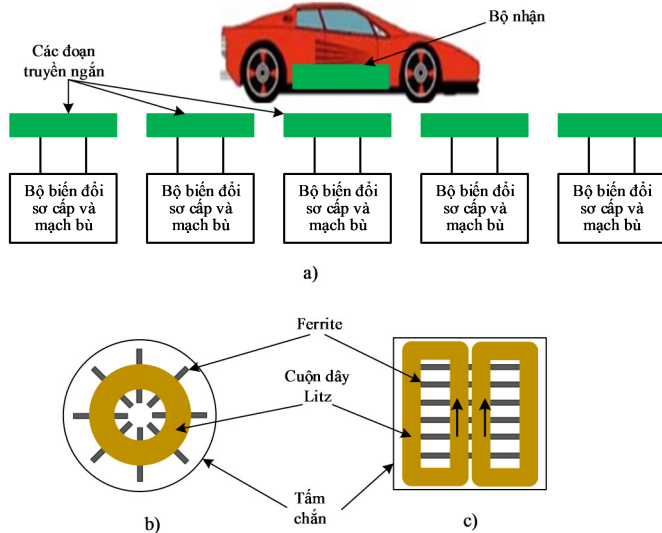
Đường truyền trong hệ thống sạc động không dây cho xe điện được chia thành hai loại chính, loại thứ nhất là đường truyền kiểu đường dài, loại thứ hai là đường truyền kiểu đoạn. Đường truyền kiểu đường dài có thể đơn giản chỉ là hai đường dây như trên hình 3a [21, 22] hoặc sử dụng thêm lõi ferrite có dạng hình U hoặc hình W, hình I nhằm tăng hệ số kết nối điện từ và khoảng cách truyền như như trên hình 3b, c [23, 24]. Cấu trúc đường truyền lõi ferrite hình I có ưu điểm so với cấu trúc lõi ferrite hình W là khoảng cách truyền không phụ thuộc vào chiều rộng của đường truyền. Do đó, đường truyền có thể được xây dựng với chiều rộng rất hẹp. Với cùng công suất và khoảng cách truyền, chiều rộng của đường truyền kiểu đường dài với cấu trúc có lõi ferrite loại U, W, I tương ứng là 140cm, 80cm và 10cm [25]. Tuy nhiên, với cấu trúc đường truyền kiểu đường dài thì 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) lớn, hiệu suất thấp. Hiệu suất lớn nhất của hệ thống OLEV đạt được chỉ cỡ 74% ở công suất 24kW, thấp hơn hệ thống sạc không dây tĩnh rất nhiều.



Hình 3. a) Cấu trúc đường truyền kiểu đường dài; b) Cấu trúc có lõi ferrite hình W; c) Cấu trúc có lõi ferrite hình I

Để giảm bức xạ điện từ, tăng hiệu suất truyền đường truyền được chia thành các đoạn ngắn như trên hình 4a [26, 27]. Khi các đoạn đủ ngắn thì cấu trúc các cuộn dây truyền giống như cuộn dây trong hệ thống sạc không dây tĩnh. Hiện nay, dây đồng được sử dụng rộng rãi làm cuộn dây, các sợi dây đồng mỏng được xoắn và đan lại để tạo thành dây Litz để giảm hiệu ứng bề mặt và cung cấp đủ mật độ dòng điện. Ngoài ra, các thanh hoặc tấm ferrite được sử dụng trong hệ thống các cuộn dây để dẫn hướng từ trường, tăng cường kết nối từ trường giữa cuộn dây truyền và nhận. Các tấm chắn nhôm được sử dụng để che chắn từ trường rò ra môi trường xung quanh. Hệ thống cuộn dây thường có cấu trúc 3 lớp, lớp thứ nhất là dây Litz, lớp thứ hai là các tấm hoặc thanh ferrite, lớp thứ ba là tấm

chấn nhôm. Cấu trúc cuộn dây cơ bản trong hệ thống sạc tĩnh là cấu trúc hình tròn và hình DD như trên hình 4b, 4c [28]. Cấu trúc cuộn dây DD có chiều cao đường sức từ lớn gấp đôi cấu trúc hình tròn. Ngoài ra, để tăng vùng sạc các cấu trúc khác được nghiên cứu phát triển như cấu trúc DDQ [29, 30], cấu trúc BPP [20].



Hình 4. a) Cấu trúc đường truyền kiểu đoạn; b) Cuộn dây đơn cực hình tròn; c) Cuộn dây đơn cực hình DD

Với cấu trúc đường truyền kiểu đoạn, mỗi bộ biến đổi công suất cấp nguồn cho một cuộn dây truyền, nhiều cuộn dây truyền được bố trí trong một khu vực tạo thành làn đường sạc cho EV. Các bộ truyền được cấp nguồn theo vị trí EV, hiệu suất truyền và bức xạ từ trường có thể tốt như trong hệ thống sạc tĩnh. Tuy nhiên, cấu trúc đường truyền kiểu đoạn yêu cầu số lượng lớn các mạch bù, các bộ biến đổi công suất, yêu cầu mạch xác định vị trí xe và yêu cầu các điều khiển khác làm cho hệ thống phức tạp hơn [31-33]. Ngoài ra, giá thành của hệ thống cao hơn hệ thống có cấu trúc đường truyền kiểu đường dài. Một nhược điểm khác của cấu trúc đường truyền kiểu đoạn là khi xe điện di chuyển giữa hai cuộn truyền liền kề, công suất đầu ra đập mạch và giảm đáng kể khi bộ nhận lệch bên. Khi khoảng cách giữa các cuộn dây truyền bằng khoảng 30% chiều dài cuộn dây truyền, công suất đầu ra đập mạch 50% [8] và công suất đầu ra giảm xuống gần bằng không khi bộ nhận ở vị trí giữa hai bộ truyền trong [11]. Đập mạch công suất có thể làm giảm tuổi thọ ắc quy.

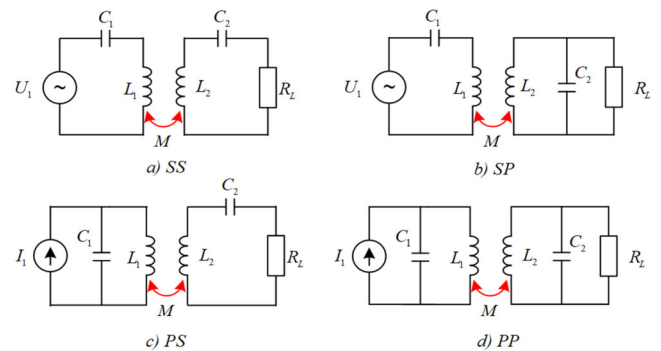
Như vậy, để ứng dụng hệ thống vào thực tế còn rất nhiều thách thức liên quan đến thiết kế cuộn dây cần được nghiên cứu phát triển như thiết kế cấu trúc hình học, nghiên cứu phát triển vật liệu làm cuộn dây để đảm bảo hệ số kết nối điện từ cao cả trong trường hợp EV di chuyển lệch bên, tăng khoảng cách truyền, giảm đập mạch công suất, vấn đề nhận biết vị trí xe và điều khiển chuyển mạch giữa các đoạn của đường truyền...

3. MẠCH BÙ

Hệ thống sạc không dây truyền năng lượng qua khe hở không khí làm cho hệ số kết nối điện từ nhỏ và điện cảm rò

lớn, dẫn đến hiệu suất thấp. Cộng hưởng là chìa khóa để hệ thống có thể truyền năng lượng với công suất lớn và hiệu suất cao. Mạch bù được sử dụng để tạo thành mạch cộng hưởng trong hệ thống sạc không dây [3]. Ở phía sơ cấp, mạch bù được sử dụng để giảm công suất định mức của nguồn và đạt được điều kiện góc pha không (ZPA - Zero Phase Angle), nghĩa là không có công suất phản kháng. Ở phía thứ cấp, mạch bù được sử dụng để giảm công suất cuộn dây, tối đa công suất, hiệu suất truyền. Ngoài ra, mạch bù còn tạo điều kiện chuyển mạch mềm cho thiết bị bán dẫn công suất, giảm tổn thất khi chuyển mạch [34, 35]. Một lợi ích khác của mạch bù là đạt được điều kiện sạc dòng điện hoặc sạc điện áp không đổi.

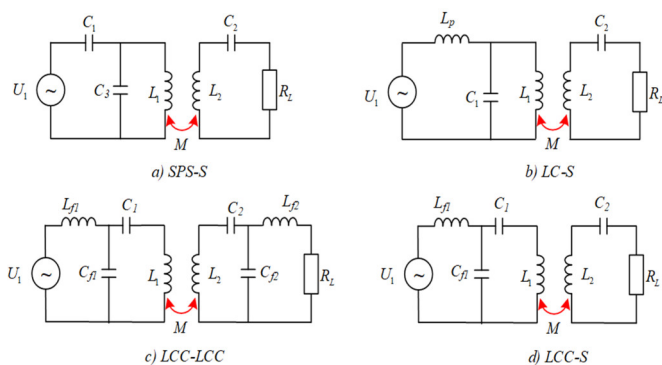
Ở dải tần số kHz, mạch cộng hưởng được tạo ra bằng cách đưa thêm vào mạch các tụ bù. Có bốn mạch bù cơ bản là mạch bù nối tiếp - nối tiếp (SS), mạch bù nối tiếp - song song (SP), mạch bù song song - song song (PP) và mạch bù song song - nối tiếp (PS), các cấu trúc mạch bù này được trình bày trên hình 5 [36-38]. Ở đây, S (Series) và P (Parallel) cho biết cách tụ bù được nối với các cuộn dây. Các mạch bù cơ bản này có đặc điểm là đơn giản, dễ thiết kế [39]. Mạch bù SS và SP phù hợp cho các hệ thống truyền công suất lớn [40]. Với mạch bù SP giá trị của tụ bù thay đổi khi hệ số kết nối thay đổi. Với mạch bù PS và PP giá trị của tụ bù phụ thuộc cả vào hệ số kết nối và điều kiện tải. Do đó, các mạch bù SP, PS, PP không phù hợp với hệ thống sạc động có hệ số kết nối thay đổi trong quá trình sạc. Cấu trúc mạch bù SS vượt trội so với ba cấu trúc còn lại vì tần số cộng hưởng không phụ thuộc vào hệ số kết nối và điều kiện tải. Tuy nhiên, các mạch bù này nhạy cảm với sự thay đổi của các thông số, đặc tính hiệu suất và công suất bị phân tách khi hệ số kết nối và tải nhỏ [41].



Hình 5. Cấu trúc các mạch bù cơ bản: a) Nối tiếp - Nối tiếp (SS). b) Nối tiếp - Song song (SP). c) Song song - Nối tiếp (PS). d) Song song - Song song (PP)

Phía sơ cấp của cấu trúc mạch bù SS, SP nối với một nguồn áp, cấu trúc mạch bù PS, PP nối với một nguồn dòng. Nên khi hệ số kết nối điện từ giảm, công suất đầu ra trong cấu trúc mạch bù SS, SP sẽ tăng và công suất đầu ra trong cấu trúc mạch bù PS, PP sẽ giảm. Để giữ công suất đầu ra không đổi khi hệ số kết nối điện từ thay đổi, cấu trúc mạch bù SPS được đề xuất trong [42, 43] và được biểu diễn trên hình 6a. Cấu trúc mạch bù SPS có thể coi là sự kết hợp giữa mạch bù SS và mạch bù PS. Bằng cách thiết kế các tụ điện phía sơ cấp với một tỷ lệ nhất định, đặc tính của mạch bù SS

và PS được trộn lẫn. Do đó, công suất đầu ra không đổi đạt được khi hệ số kết nối thay đổi mà không cần điều chỉnh công suất nguồn cấp. Tuy nhiên, phương pháp thiết kế điều chỉnh giá trị của tụ bù C_1 , phức tạp. Hình 6b là cấu trúc mạch bù LC, đã được đề xuất trong [44, 45]. Ở tần số cộng hưởng mạch bù LC hoạt động như một nguồn dòng. Dòng điện trong cuộn dây sơ cấp không phụ thuộc vào hệ số kết nối và điều kiện tải. Nên dòng điện phía sơ cấp có thể được điều khiển dễ dàng hơn. Hơn nữa, bằng cách điều chỉnh các thông số LC, công suất phản kháng có thể được bù hoàn toàn, công suất thiết kế của bộ biến đổi công suất có thể được giảm thiểu. Nhưng mạch bù LC có nhược điểm là giá trị của điện cảm bù lớn, gần bằng giá trị điện cảm tự cảm của cuộn dây truyền, nhận. Để giảm kích thước của các phần tử mạch trong mạch bù LC, một tụ bù C được thêm vào mạch bù LC tạo thành mạch bù LCC, cấu trúc bù LCC được biểu diễn trên hình 6c, d. Mạch bù LCC đã được ứng dụng khá thành công trong sạc tĩnh, với nhiều ưu điểm như đạt được hiệu suất cao đối với cả tải nặng và tải nhẹ; tần số cộng hưởng không phụ thuộc vào hệ số kết nối điện từ và điều kiện tải; đạt được điều kiện chuyển mạch mềm ZVS (Zero Voltage Switching) cho thiết bị điện tử công suất [46-48].



Hình 6. Cấu trúc các mạch bù a) SPS-S; b) LC-S; c) LCC-LCC; d) LCC-S

Mặc dù các mạch bù đã đạt được những thành quả nhất định, tuy nhiên vẫn cần thiết phát triển các cấu trúc mạch bù để đạt được các mục tiêu như tối đa hóa hiệu suất, triệt tiêu kết nối điện từ giữa các cuộn dây truyền với nhau, tăng vùng tần số đạt điều kiện chuyển mạch mềm cho thiết bị công suất, tăng vùng tần số đạt hiệu suất cao,...

4. BỘ BIẾN ĐỔI ĐIỆN TỬ CÔNG SUẤT VÀ CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN

Trong hệ thống sạc không dây, chức năng chính của các bộ biến đổi công suất phía sơ cấp là tạo ra dòng điện tần số cao đưa đến các cuộn dây truyền. Các bộ biến đổi phía sơ cấp có thể có bao gồm bộ chỉnh lưu PFC, bộ DC/DC điều chỉnh điện áp một chiều đầu vào của bộ nghịch lưu, bộ nghịch lưu tần số cao. Tần số cộng hưởng được thiết lập bởi các mạch bù và được thực hiện bởi các bộ nghịch lưu tần số cao phía sơ cấp. Phía thứ cấp, thông thường sử dụng một bộ chỉnh lưu tần số cao để biến đổi dòng xoay chiều tần số cao thành dòng một chiều. Sau đó, các bộ biến đổi DC/DC được sử dụng để điều phối hợp trở kháng, điều khiển và quản lý năng lượng sạc quy.

Phụ thuộc vào nơi thực hiện điều khiển hệ thống sạc động được phân loại thành điều khiển phía sơ cấp, điều khiển phía thứ cấp, điều khiển phối hợp hai phía.

Phương pháp điều khiển phía sơ cấp được chia thành ba nhóm gồm điều khiển bộ biến đổi DC/DC, điều khiển tần số hoặc dịch pha bộ nghịch lưu tần số cao và phối hợp trở kháng. Điều khiển bộ biến đổi DC/DC trước bộ nghịch lưu sử dụng bộ Buck/Boost. Nhược điểm của cấu trúc này là có thêm bộ DC/DC là làm giảm hiệu suất của hệ thống, tăng trọng lượng và chi phí [49]; Điều khiển tần số được sử dụng ở trong các thiết kế [50]. Tuy nhiên, khi điều chỉnh tần số có thể làm mất điều kiện cộng hưởng của mạch nên hiệu suất truyền và công suất truyền có thể thấp. Ngoài ra, phương pháp điều khiển tần số chiếm một dải tần số vô tuyến lớn, có thể làm tăng nhiễu điện từ. Điều khiển dịch pha nghịch lưu tránh được các nhược điểm của điều khiển tần số nhưng lại yêu cầu truyền thông không dây giữa hai phía sơ cấp và thứ cấp [51]. Phối hợp trở kháng yêu cầu tụ điện hoặc điện cảm công kênh làm tăng trọng lượng, kích thước và độ phức tạp khi điều khiển hệ thống [52].

Phương pháp điều khiển bên phía thứ cấp yêu cầu bổ sung thêm các bộ biến đổi công suất như bộ Buck/Boost, các bộ chỉnh lưu tích cực [53]. Điều khiển hai phía là sự kết hợp của cả điều khiển phía sơ cấp và thứ cấp [54,55]. Trong hệ thống WPT ứng dụng trong sạc động không dây cho xe điện, xe điện di chuyển liên tục trên đường nên rất khó để điều khiển kết hợp hai phía. Do đó, phương pháp điều khiển độc lập ở mỗi phía được ưa thích.

Trong hệ thống sạc động không dây nhiều xe điện cùng di chuyển trên làn đường sạc và nhận điện năng từ làn đường sạc. Do đó, hệ thống yêu cầu có công suất lớn, mức công suất yêu cầu cho hệ thống xe bus điện có thể lên đến hàng trăm kW [56]. Các bộ biến đổi công suất nhiều pha là giải pháp để đáp ứng yêu cầu công suất truyền lớn như trong [57]. Ngoài ra, trong hệ thống sạc động tần số làm việc cao gây khó khăn trong việc thiết kế, điều khiển vòng kín. Vì vậy, các cấu trúc và phương pháp điều khiển các bộ biến đổi nhằm đáp ứng yêu cầu của hệ thống cần được nghiên cứu và phát triển.

5. TÍNH AN TOÀN

Hệ thống sạc động không dây cho xe điện tăng được tính an toàn khi vận hành hệ thống (vì không có ổ cắm điện tiếp xúc như sạc cắm dây). Tuy nhiên, trong quá trình sạc không dây có một từ trường tần số cao tồn tại giữa các cuộn dây truyền và nhận. Khoảng cách không khí lớn giữa bộ truyền và nhận gây ra từ trường rò. Biên độ và tần số của từ trường rò cần được kiểm soát để đáp ứng giới hạn phơi nhiễm điện từ của con người. Các hướng dẫn về an toàn được Ủy ban quốc tế về bảo vệ bức xạ không ion hóa (ICNIRP - International Commission Non-Ionizing Radiation Protection) công bố. Tiêu chuẩn ICNIRP đặt ra các giới hạn về điện trường và từ trường. Theo ICNIRP 1998, giới hạn mức độ tiếp xúc điện trường là 83V/m, giới hạn an toàn cho tiếp xúc với từ trường nơi công cộng ở dải tần 0,8 ÷ 150kHz là 6,25μT, ở dải tần 0,82 ÷ 65kHz là 30,7μT, ở dải tần 0.065 ÷ 1MHz là 2/f, f là tần số làm việc với đơn vị đo là MHz [58].

Một số đánh giá an toàn cho cả hệ thống sạc tĩnh và sạc động đã được thực hiện. Hệ thống sạc tĩnh công suất 5kW, từ trường trung bình tiếp xúc với người có chiều cao 1500mm là 4,36 μ T, đạt an toàn theo tiêu chuẩn ICNIRP 1998 [59]. Với hệ thống sạc động công suất 35kW, mật độ từ trường tại tâm đường 1m là 2,8 μ T, đạt tiêu chuẩn an toàn theo tiêu chuẩn ICNIRP 1998 [24].

Dựa trên cơ sở an toàn cho phép, hệ thống sạc không dây công suất cao hơn được phát triển theo tiêu chuẩn ICNIRP 2010. Bên cạnh vấn đề an toàn, giới hạn phát thải cho thiết bị công nghiệp, khoa học và y tế cũng được quy định bởi CFR 47 (Code of Federal Regulations). Hiệp hội SAE (Society of Automotive Engineers) đã thành lập ủy ban J2954 để xem xét các vấn đề liên quan đến hệ thống sạc không dây cho xe điện. Một trong những mục tiêu của họ là các tiêu chuẩn về an toàn.

Tuy nhiên, vẫn còn phải nghiên cứu thêm để đảm bảo sức khỏe và an toàn của hệ thống sạc động có nhiều điều kiện không lường trước được, chẳng hạn như mức công suất cần thiết thay đổi cho xe hạng nặng và hạng nhẹ dưới các tốc độ khác nhau, sự rò rỉ tình cờ tiếp xúc với người đi bộ, người đi xe đạp.

6. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày tổng quan về hệ thống sạc động không dây cho xe điện. Trên cơ sở phân tích tình hình nghiên cứu về hệ thống sạc không dây cho xe điện trên thế giới, thấy rằng điện khí hóa phương tiện giao thông rất cần thiết vì các vấn đề năng lượng và môi trường. Sạc động không dây cung cấp nền tảng cho sự thâm nhập thị trường của xe điện mà không phụ thuộc vào công nghệ ắc quy. Các thành tựu nghiên cứu về từng phần trong hệ thống như thiết kế cuộn, mạch bù, bộ biến đổi điện tử công suất và phương pháp điều khiển đã được phân tích, chỉ ra những thách thức và cơ hội.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. *Global EV Outlook 2021 - Analysis*. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021> (accessed Apr. 07, 2022).
- [2]. S. J. Gerssen-Gondelach, A. P. C. Faaij, 2012. *Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term*. J. Power Sources, vol. 212, pp. 111–129, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.03.085.
- [3]. S. Li, C. C. Mi, 2015. *Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications*. IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron., vol. 3, no. 1, pp. 4–17, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2319453.
- [4]. *Automotive Solutions*. WiTricity. <https://witricity.com/products/automotive/> (accessed Jul. 02, 2020).
- [5]. L. Maglaras, F. Topalis, A. Maglaras, 2014. *Cooperative approaches for dynamic wireless charging of Electric Vehicles in a smart city*. presented at the ENERGYCON 2014 - IEEE International Energy Conference, May 2014. doi: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850600.
- [6]. S. Chopra, P. Bauer, 2013. *Driving Range Extension of EV With On-Road Contactless Power Transfer - A Case Study*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 1, pp. 329–338, doi: 10.1109/TIE.2011.2182015.
- [7]. S. Lee, J. Huh, C. Park, N.S. Choi, G.H. Cho, C.T. Rim, 2010. *On-Line Electric Vehicle using inductive power transfer system*. in 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, GA, pp. 1598–1601. doi: 10.1109/ECCE.2010.5618092.
- [8]. J. M. Miller, P. T. Jones, J.M. Li, O. C. Onar, 2015. *ORNL Experience and Challenges Facing Dynamic Wireless Power Charging of EV's*. IEEE Circuits Syst. Mag., vol. 15, no. 2, pp. 40–53, doi: 10.1109/MCAS.2015.2419012.
- [9]. *ORNL surges forward with 20-kilowatt wireless charging for vehicles | ORNL*. <https://www.ornl.gov/news/ornl-surges-forward-20-kilowatt-wireless-charging-vehicles> (accessed Feb. 08, 2020).
- [10]. K. Throngnumchai, A. Hanamura, Y. Naruse, K. Takeda, 2013. *Design and evaluation of a wireless power transfer system with road embedded transmitter coils for dynamic charging of electric vehicles*. in 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), pp. 1–10. doi: 10.1109/EVS.2013.6914937.
- [11]. K. Lee, Z. Pantic, S. M. Lukic, 2014. *Reflexive Field Containment in Dynamic Inductive Power Transfer Systems*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 9, pp. 4592–4602, doi: 10.1109/TPEL.2013.2287262.
- [12]. S. Lukic, Z. Pantic, 2013. *Cutting the Cord: Static and Dynamic Inductive Wireless Charging of Electric Vehicles*. IEEE Electrification Mag., vol. 1, no. 1, pp. 57–64, doi: 10.1109/MELE.2013.2273228.
- [13]. G. A. Covic, J. T. Boys, 2013. *Inductive Power Transfer*. Proc. IEEE, vol. 101, no. 6, pp. 1276–1289, doi: 10.1109/JPROC.2013.2244536.
- [14]. G. A. Covic, J. T. Boys, 2013. *Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications*. IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron., vol. 1, no. 1, pp. 28–41, doi: 10.1109/JESTPE.2013.2264473.
- [15]. M. Eghtesadi, 1990. *Inductive power transfer to an electric vehicle-analytical model*. in 40th IEEE Conference on Vehicular Technology, pp. 100–104. doi: 10.1109/VETEC.1990.110303.
- [16]. G. A. Covic, J. T. Boys, 2013. *Inductive Power Transfer*. Proc. IEEE, vol. 101, no. 6, pp. 1276–1289, doi: 10.1109/JPROC.2013.2244536.
- [17]. R. Mecke, C. Rathge, 2004. *High frequency resonant inverter for contactless energy transmission over large air gap*. in 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551), Aachen, Germany, pp. 1737–1743. doi: 10.1109/PESC.2004.1355378.
- [18]. A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljacic, 2007. *Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances*. Science, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, Jul. 2007, doi: 10.1126/science.1143254.
- [19]. M. Masquelier. *Jesse Schneider (BMW)*. SAE J, p. 12.
- [20]. M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, C.Y. Huang, 2013. *Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 1, pp. 318–328, doi: 10.1109/TIE.2011.2179274.
- [21]. G. A. J. Elliott, J. T. Boys, G. A. Covic, 2006. *A Design Methodology for Flat Pick-up ICPT Systems*. in 2006 1ST IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICIEA.2006.257165.
- [22]. G. A. J. Elliott, G. A. Covic, D. Kacprzak, J. T. Boys, 2006. *A New Concept: Asymmetrical Pick-Ups for Inductively Coupled Power Transfer Monorail Systems*. IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 10, pp. 3389–3391, doi: 10.1109/TMAG.2006.879619.
- [23]. Byeong-Mun Song, R. Kratz, S. Gurol, 2002. *Contactless inductive power pickup system for Maglev applications*. in Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344), vol. 3, pp. 1586–1591 vol.3. doi: 10.1109/IAS.2002.1043746.

- [24]. J. Huh, S. Lee, C. Park, G.H. Cho, C.T. Rim, 2010. *High performance inductive power transfer system with narrow rail width for On-Line Electric Vehicles*. in 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, GA, pp. 647–651. doi: 10.1109/ECCE.2010.5617948.
- [25]. J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, C. T. Rim, 2011. *Narrow-Width Inductive Power Transfer System for Online Electrical Vehicles*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 12, pp. 3666–3679, doi: 10.1109/TPEL.2011.2160972.
- [26]. S. Choi, J. Huh, W. Y. Lee, S. W. Lee, C. T. Rim, 2013. *New Cross-Segmented Power Supply Rails for Roadway-Powered Electric Vehicles*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 12, pp. 5832–5841, doi: 10.1109/TPEL.2013.2247634.
- [27]. Y. J. Jang, Y. D. Ko, S. Jeong, 2012. *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.
- [28]. M. Budhia, G. A. Covic, J. T. Boys, 2011. *Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 11, pp. 3096–3108, doi: 10.1109/TPEL.2011.2143730.
- [29]. M. Chigira, Y. Nagatsuka, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda, A. Suzuki, 2011. *Small-size light-weight transformer with new core structure for contactless electric vehicle power transfer system*. in 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 260–266. doi: 10.1109/ECCE.2011.6063778.
- [30]. G. A. Covic, M. L. G. Kissin, D. Kacprzak, N. Clausen, H. Hao, 2011. *A bipolar primary pad topology for EV stationary charging and highway power by inductive coupling*. in 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 1832–1838. doi: 10.1109/ECCE.2011.6064008.
- [31]. A. Kamineni, M. J. Neath, A. Zaheer, G. A. Covic, J. T. Boys, 2017. *Interoperable EV Detection for Dynamic Wireless Charging With Existing Hardware and Free Resonance*. IEEE Trans. Transp. Electrification, vol. 3, no. 2, pp. 370–379, doi: 10.1109/TTE.2016.2631607.
- [32]. X. Zhang, Z. Yuan, Q. Yang, Y. Li, J. Zhu, Y. Li, 2016. *Coil Design and Efficiency Analysis for Dynamic Wireless Charging System for Electric Vehicles*. IEEE Trans. Magn., vol. 52, no. 7, pp. 1–4, doi: 10.1109/TMAG.2016.2529682.
- [33]. Liang Chen, G. R. Nagendra, J. T. Boys, G. A. Covic, 2015. *Double-Coupled Systems for IPT Roadway Applications*. IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron., vol. 3, no. 1, pp. 37–49, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2325943.
- [34]. Z. Pantic, S. Bai, S. M. Lukic, 2011. *ZCS δ LCSS-Compensated Resonant Inverter for Inductive-Power-Transfer Application*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 8, pp. 3500–3510, doi: 10.1109/TIE.2010.2081954.
- [35]. A. P. Hu, J. T. Boys, G. A. Covic, 2000. *ZVS frequency analysis of a current-fed resonant converter*. in 7th IEEE International Power Electronics Congress. Technical Proceedings. CIEP 2000 (Cat. No.00TH8529), Acapulco, Mexico, pp. 217–221. doi: 10.1109/CIEP.2000.891417.
- [36]. C. Duan, C. Jiang, A. Taylor, K. (Hua) Bai, 2013. *Design of a zero-voltage-switching large-air-gap wireless charger with low electric stress for electric vehicles*. IET Power Electron., vol. 6, no. 9, pp. 1742–1750, doi: 10.1049/iet-pel.2012.0615.
- [37]. W. Zhang, S.C. Wong, C. K. Tse, Q. Chen, 2014. *Analysis and Comparison of Secondary Series- and Parallel-Compensated Inductive Power Transfer Systems Operating for Optimal Efficiency and Load-Independent Voltage-Transfer Ratio*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 6, pp. 2979–2990, doi: 10.1109/TPEL.2013.2273364.
- [38]. C.S. Wang, O. H. Stielau, G. A. Covic, 2005. *Design Considerations for a Contactless Electric Vehicle Battery Charger*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 5, pp. 1308–1314, doi: 10.1109/TIE.2005.855672.
- [39]. C.S. Wang, G. A. Covic, O. H. Stielau, 2004. *Power Transfer Capability and Bifurcation Phenomena of Loosely Coupled Inductive Power Transfer Systems*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 51, no. 1, pp. 148–157, Feb. 2004, doi: 10.1109/TIE.2003.822038.
- [40]. Alireza Khaligh; Serkan Dusmez, 2012. *Comprehensive Topological Analysis of Conductive and Inductive Charging Solutions for Plug-In Electric Vehicles*. IEEE Transactions on Vehicular Technology (Volume 61, Issue 8).
- [41]. T. C. Beh, M. Kato, T. Imura, S. Oh, Y. Hori, 2013. *Automated Impedance Matching System for Robust Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 9, pp. 3689–3698, doi: 10.1109/TIE.2012.2206337.
- [42]. J. L. Villa, J. Sallan, J. F. Sanz Osorio, A. Llombart, 2012. *High-Misalignment Tolerant Compensation Topology For ICPT Systems*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 2, pp. 945–951, doi: 10.1109/TIE.2011.2161055.
- [43]. C. Cheng, Z. Zhou, W. Li, C. Zhu, Z. Deng, C. C. Mi, 2019. *A Multi-Load Wireless Power Transfer System With Series-Parallel-Series Compensation*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 8, pp. 7126–7130, doi: 10.1109/TPEL.2019.2895598.
- [44]. C. S. Tang, Y. Sun, Y. G. Su, S. K. Nguang, A. P. Hu, 2009. *Determining Multiple Steady-State ZCS Operating Points of a Switch-Mode Contactless Power Transfer System*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, no. 2, pp. 416–425, doi: 10.1109/TPEL.2008.2007642.
- [45]. U. K. Madawala, D. J. Thrimawithana, 2011. *A Bidirectional Inductive Power Interface for Electric Vehicles in V2G Systems*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 10, pp. 4789–4796, doi: 10.1109/TIE.2011.2114312.
- [46]. S. Li, W. Li, J. Deng, T. D. Nguyen, C. C. Mi, 2015. *A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer*. IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 64, no. 6, pp. 2261–2273, doi: 10.1109/TVT.2014.2347006.
- [47]. Q. Zhu, L. Wang, Y. Guo, C. Liao, F. Li, 2016. *Applying LCC Compensation Network to Dynamic Wireless EV Charging System*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 10, pp. 6557–6567, doi: 10.1109/TIE.2016.2529561.
- [48]. F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann, C. C. Mi, 2016. *A Dynamic Charging System With Reduced Output Power Pulsation for Electric Vehicles*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 10, pp. 6580–6590, doi: 10.1109/TIE.2016.2563380.
- [49]. J. Tritschler, S. Reichert, B. Goeldi, 2014. *A practical investigation of a high power, bidirectional charging system for electric vehicles*. in 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1–7. doi: 10.1109/EPE.2014.6910809.
- [50]. S. Krishnan, S. Bhuyan, V. P. Kumar, W. Wang, J. A. Affif, K. S. Lim, 2012. *Frequency agile resonance-based wireless charging system for Electric Vehicles*. in 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, pp. 1–4. doi: 10.1109/IEVC.2012.6183212.
- [51]. M. Borage, S. Tiwari, S. Kotaiah, 2005. *Analysis and Design of an LCL-T Resonant Converter as a Constant-Current Power Supply*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 6, pp. 1547–1554, Dec. 2005, doi: 10.1109/TIE.2005.858729.
- [52]. P. Si, A. P. Hu, S. Malpas, D. Budgett, 2008. *A Frequency Control Method for Regulating Wireless Power to Implantable Devices*. IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst., vol. 2, no. 1, pp. 22–29, Mar. 2008, doi: 10.1109/TBCAS.2008.918284.
- [53]. J.U. W. Hsu, A. P. Hu, A. Swain, 2009. *A Wireless Power Pickup Based on Directional Tuning Control of Magnetic Amplifier*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 7, pp. 2771–2781, doi: 10.1109/TIE.2009.2020081.
- [54]. M. Kim, D. Joo, B. K. Lee, 2019. *Design and Control of Inductive Power Transfer System for Electric Vehicles Considering Wide Variation of Output Voltage*

and Coupling Coefficient. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 2, pp. 1197–1208, doi: 10.1109/TPEL.2018.2835161.

[55]. T. Diekhans, R. W. De Doncker, 2015. *A Dual-Side Controlled Inductive Power Transfer System Optimized for Large Coupling Factor Variations and Partial Load*. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6320–6328, doi: 10.1109/TPEL.2015.2393912.

[56]. J. H. Kim, et al., 2015. *Development of 1-MW Inductive Power Transfer System for a High-Speed Train*. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 10, pp. 6242–6250, Oct. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2417122.

[57]. Y. Li, R. Mai, L. Lu, Z. He, 2017. *Active and Reactive Currents Decomposition-Based Control of Angle and Magnitude of Current for a Parallel Multiinverter IPT System*. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 2, pp. 1602–1614, doi: 10.1109/TPEL.2016.2550622.

[58]. R. Matthes, J. H. Bernhardt (Eds.), 1999. *Guidelines on limiting exposure to non-ionizing radiation: a reference book based on the guidelines on limiting exposure to non-ionizing radiation and statements on special applications*. Oberschleißheim: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.

[59]. H. H. Wu, A. Gilchrist, K. D. Sealy, D. Bronson, 2012. *A High Efficiency 5 kW Inductive Charger for EVs Using Dual Side Control*. *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 8, no. 3, pp. 585–595, doi: 10.1109/TII.2012.2192283.

AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Thi Diep¹, Tran Duc Hiep^{2,4}, Pham Duy Hoc³,
Nguyen Kien Trung⁴, Tran Trong Minh⁴**

¹Faculty of Control and Automation Engineering, Electric Power University

²Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry

³Vietnam - Korea Institute of Science and Technology

⁴School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology