

SO SÁNH, ĐÁNH GIÁ VÀ ỨNG DỤNG CÁC CẤU TRÚC BÙ CƠ BẢN TRONG HỆ THỐNG TRUYỀN ĐIỆN KHÔNG DÂY

COMPARISON, EVALUATION AND APPLICATION OF BASIC COMPENSATION TOPOLOGIES IN WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEMS

Nguyễn Thị Diệp

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 12/4/2025, Ngày chấp nhận đăng: 12/5/2025

Tóm tắt:

Truyền điện không dây là giải pháp hiệu quả cho các ứng dụng mà kết nối vật lý không thuận tiện hoặc không khả thi, như sạc xe điện, cấy ghép y sinh và tự động hóa công nghiệp. Tuy nhiên, hiệu suất của hệ thống thường bị hạn chế do hệ số kết nối điện từ thấp và điện cảm rò cao giữa các cuộn dây. Ngoài ra, việc duy trì hiệu suất cao và đầu ra ổn định trước sự thay đổi của tải và vị trí của cuộn dây cũng là một thách thức lớn. Ngoài việc can thiệp bằng điều khiển thì việc lựa chọn các cấu trúc bù phù hợp đóng vai trò quan trọng. Các cấu trúc bù cơ bản (Series Series – SS, Series Parallel – SP, Parallel Series – PS và Parallel Parallel – PP) thường được lựa chọn cho các hệ thống yêu cầu kích thước gọn nhẹ, dễ triển khai và chi phí thấp. Bài báo này đề xuất phân tích và so sánh các cấu trúc bù cơ bản để đánh giá khả năng ứng dụng của từng cấu trúc, giúp cải thiện hiệu suất, đảm bảo đầu ra ổn định cũng như tính đơn giản của hệ thống.

Từ khóa: Truyền điện không dây; cấu trúc bù nối tiếp-nối tiếp; nối tiếp-song song; song song-nối tiếp; song song-song song.

Abstract:

Wireless power transfer (WPT) is an effective solution for applications where the use of physical connections is inconvenient or impractical, such as electric vehicle charging, biomedical implants, and industrial automation. However, the efficiency of systems is often limited by the low coupling coefficient and high leakage inductance between the transmitting and receiving coils. Moreover, maintaining high efficiency and stable output despite load and coil position variations is also a significant challenge. In addition to control interventions, choosing the appropriate compensation topologies is crucial. Basic compensation topologies (Series Series – SS, Series Parallel – SP, Parallel Series – PS, and Parallel Parallel – PP) are often chosen for systems that require compact size, easy deployment, and low cost. This paper analyzes and compares basic compensation topologies to evaluate the applicability of each structure, helping to improve efficiency, ensure stable output, and maintain system simplicity.

Keywords: Wireless power transfer; series-series; series-parallel; parallel-series; parallel-parallel compensation topologies.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Truyền điện không dây (Wireless Power Transfer – WPT) là công nghệ truyền điện từ nguồn phát đến thiết bị nhận mà không cần dây dẫn vật lý. Hệ thống WPT ngày càng được ứng

dụng trong nhiều lĩnh vực nhờ sự tiện lợi, an toàn và khả năng tự động hóa cao. WPT được ứng dụng trong các thiết bị điện tử tiêu dùng như điện thoại thông minh, laptop, các thiết bị văn phòng, trong y tế như các thiết bị cấy ghép y tế, các robot y tế, các AGV (Automated

Guided Vehicles) trong công nghiệp, thiết bị bay không người lái UAV (Unmanned Aerial Vehicle), các hệ thống sạc cho xe điện (Electric Vehicle)...[1], [2], [3].

WPT truyền điện không tiếp xúc qua khe hở không khí dựa trên nguyên lý cảm ứng điện từ. Do khe hở không khí lớn giữa các cuộn dây khiến WPT có điện cảm rò lớn, điện cảm hồ cảm nhỏ (hệ số kết nối điện từ nhỏ), dẫn đến hiệu suất truyền điện thấp [4]. Để nâng cao hiệu suất của hệ thống có nhiều giải pháp được đề xuất bao gồm thiết kế tối ưu cuộn dây, tăng tần số làm việc, căn chỉnh chính xác vị trí cuộn dây và đặc biệt là lựa chọn cấu trúc mạch bù phù hợp [5]. Trong trường hợp thiết kế cuộn dây và tần số hoạt động đã được xác định trước, mạch bù trở thành yếu tố quan trọng để bù công suất phản kháng, cải thiện hiệu hệ thống và xác định các đặc tính đầu ra (dòng hoặc điện áp).

Trong thực tế, WPT phải đối mặt với nhiều thông số biến thiên như sự thay đổi khoảng cách giữa các cuộn dây hoặc lệch tâm giữa các cuộn dây và sự thay đổi của trở kháng tải. Do đó, mạch bù cần thích ứng tốt với các thay đổi để đảm bảo hệ thống hoạt động ổn định và hiệu quả. Đặc biệt, với các ứng dụng sạc pin Li-ion, việc duy trì đặc tính đầu ra ổn định như dòng không đổi CC (Constant Current), điện áp không đổi CV (Constant Voltage) hoặc kết hợp (CC/CV) là rất quan trọng [6], [7]. Việc lựa chọn và tính toán mạch bù phù hợp giúp hệ thống đạt được các đặc tính này mà không cần thêm mạch điều khiển phức tạp.

Về nguyên lý, trong dải tần số kHz, mạch bù được tạo ra bằng cách nối thêm tụ điện để cộng hưởng với cuộn dây cả ở phía sơ cấp và thứ

cấp, nhằm cung cấp công suất phản kháng và tạo ra từ trường đủ mạnh cho quá trình truyền điện. Ở phía sơ cấp, mạch bù giúp giảm công suất phản kháng và đạt được điều kiện góc pha không ZPA (Zero Phase Angle). Ở phía thứ cấp, mạch bù giúp tối đa hóa khả năng truyền công suất đến tải.

Tùy thuộc vào cách ghép nối tụ bù với cuộn dây truyền và nhận, bốn cấu trúc bù cơ bản được tạo thành, bao gồm: cấu trúc bù nối tiếp – nối tiếp (SS), nối tiếp – song song (SP), song song – nối tiếp (PS) và song song – song song (PP). Các cấu trúc này có ưu điểm là đơn giản, dễ thi công, chi phí thấp và phù hợp cho các hệ thống yêu cầu kích thước nhỏ gọn. Mặc dù đã có một số nghiên cứu đề cập đến các cấu trúc bù này [8], [9], hiện vẫn chưa có các phân tích chi tiết, phương pháp tính toán cụ thể và so sánh đề xuất ứng dụng cụ thể cho từng cấu trúc.

Trước nhu cầu ngày càng tăng về việc thiết kế hệ thống WPT đơn giản, hiệu quả và linh hoạt, bài báo này đề xuất thực hiện phân tích và so sánh bốn cấu trúc bù cơ bản. Trên cơ sở đó, các khuyến nghị về lựa chọn cấu trúc phù hợp cho từng ứng dụng cụ thể được đề xuất, nhằm đảm bảo các tiêu chí về công suất, hiệu suất, độ ổn định và mức độ đơn giản hóa của hệ thống.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Cấu trúc chung của hệ thống WPT

Cấu trúc chung của hệ thống WPT được minh họa như trên Hình 1, bao gồm hai phía tách biệt: phía sơ cấp (truyền) và phía thứ cấp (nhận). Ở phía sơ cấp, nguồn điện xoay chiều

từ lưới được chỉnh lưu thành nguồn một chiều, sau đó cấp cho bộ nghịch lưu cầu tần số cao gồm bốn MOSFET ($S1 \div S4$). Dòng điện xoay chiều tần số cao từ bộ nghịch lưu đi qua mạch bù sơ cấp rồi đến cuộn dây truyền ($L1$), tạo ra từ trường biến thiên để thực hiện quá trình truyền điện không dây. Ở phía thứ cấp, cuộn dây nhận ($L2$) thu năng lượng từ trường và cảm ứng ra điện áp xoay chiều. Điện áp này được đưa qua mạch bù thứ cấp, sau đó được chỉnh lưu thành điện áp một chiều để cấp cho tải hoặc sạc cho pin/ắc quy.

2.2. Phân tích cơ sở lý thuyết

Các cấu trúc mạch bù cơ bản của hệ thống WPT được trình bày trên Hình 2 [4]. Các mạch bù này được tạo ra bằng cách thêm các tụ cộng hưởng với các cuộn dây truyền và nhận. Tùy theo cách ghép nối (nối tiếp hoặc song song), bốn cấu trúc bù được tạo ra, bao gồm: SS, SP, PS và PP. Trong đó, $L1$, $L2$ là điện cảm của cuộn dây truyền và nhận; $R1$, $R2$ là điện trở tương ứng của chúng; $C1$, $C2$ là các tụ bù ở phía sơ cấp và thứ cấp; RL là điện trở tải tương

đương. Sơ đồ mạch tương đương của các cấu trúc bù này được trình bày trên Hình 3.

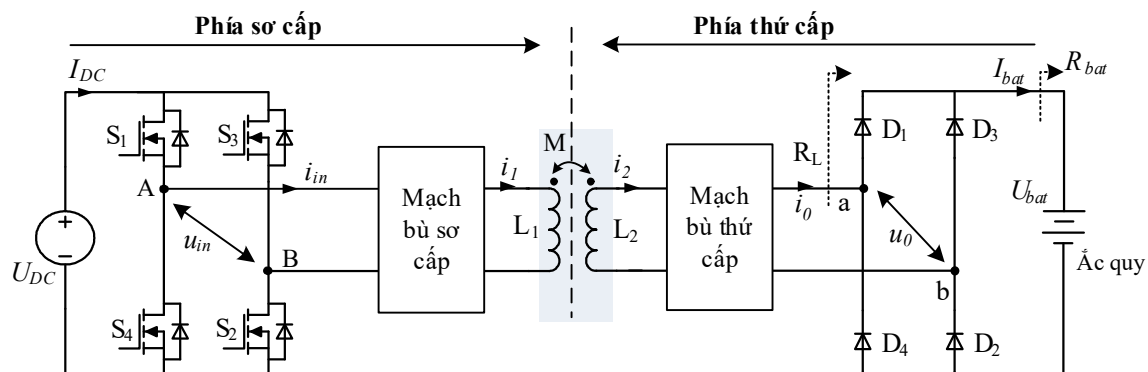
Mối quan hệ điện từ giữa cuộn dây sơ cấp và thứ cấp được mô hình hóa thông qua các điện áp cảm ứng, phụ thuộc vào điện cảm hỗ cảm giữa hai cuộn dây và dòng điện chạy qua cuộn dây còn lại. Phương pháp phân tích sóng hài cơ bản (First Harmonic Approximation - FHA) được sử dụng để phân tích nguyên lý hoạt động của mạch. Để đơn giản hóa mô hình, các tổn hao do điện trở của cuộn dây và mạch bù được bỏ qua.

Trong hệ thống WPT, phía thứ cấp ảnh hưởng tới phía sơ cấp thông qua trở kháng phản xạ. Trở kháng phản xạ từ phía thứ cấp đến phía sơ cấp được ký hiệu là Z_{refl} và được xác định theo biểu thức:

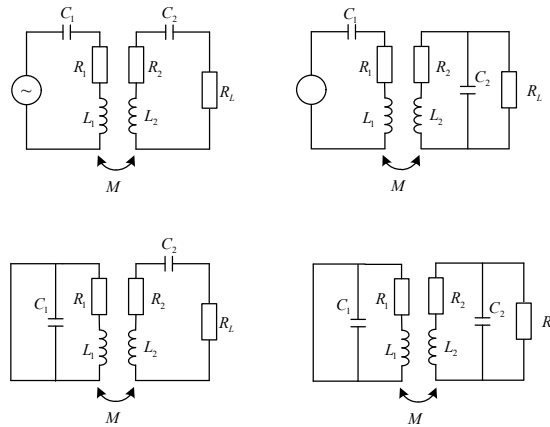
$$Z_{refl} = \frac{-j\omega MI_2}{I_1} \quad (1)$$

Trong đó, M là điện cảm hỗ cảm giữa hai cuộn dây.

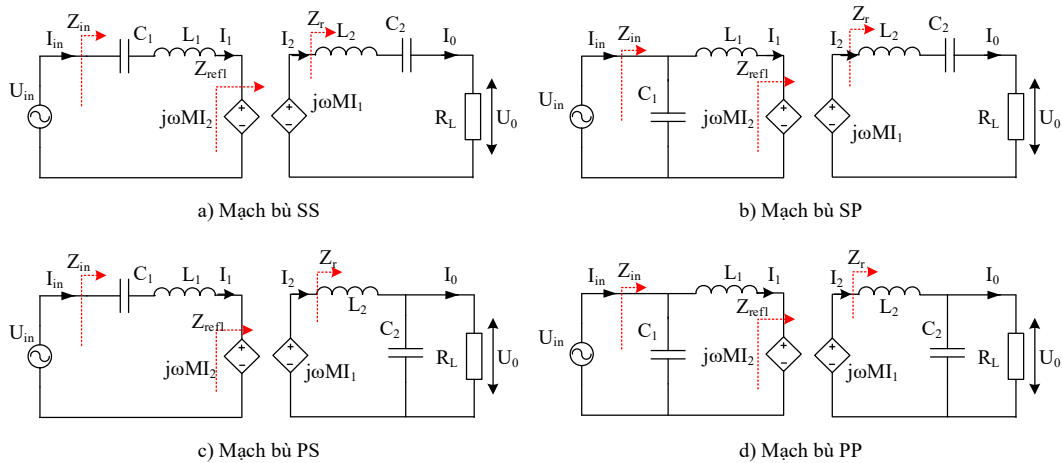
Mối quan hệ giữa hệ số kết nối điện từ k với M được cho bởi [4]:



Hình 1. Cấu trúc hệ thống



Hình 2. Các cấu trúc mạch bù cơ bản [4].



Hình 3. Sơ đồ thay thế các cấu trúc bù cơ bản

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2)$$

Z_r là trở kháng phía thứ cấp, được xác định bằng thương của điện áp cảm ứng ở phía thứ cấp ($j\omega M I_1$) và dòng điện thứ cấp I_2 như sau:

$$Z_r = \frac{j\omega M I_1}{I_2} \quad (3)$$

Kết hợp (1) và (3), biểu thức trở kháng phản xạ có thể được viết lại như sau:

$$Z_{refl} = \frac{\omega^2 M^2}{Z_r} \quad (4)$$

Ngoài ra, Z_r phụ thuộc vào cấu trúc bù phía thứ cấp. Cụ thể, với hai loại cấu trúc bù phía thứ cấp là nối tiếp (S) và song song (P), trở kháng phía thứ cấp được xác định theo cấu trúc bù như sau:

$$\begin{cases} Z_r = j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R_L \text{ (thứ cấp bù S)} \\ Z_r = j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2 + 1/R_L} \text{ (thứ cấp bù P)} \end{cases} \quad (5)$$

Ở phía thứ cấp, tụ bù C_2 thường được thiết kế để cộng hưởng với L_2 , nhằm giảm công suất phản kháng và tổn hao trong cuộn dây. Tần số cộng hưởng được xác định bởi:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (6)$$

Từ (4), (5) và (6), trở kháng phản xạ từ phía thứ cấp về phía sơ cấp được xác định như sau:

$$\begin{cases} Z_{refl} = \frac{\omega_0 M^2}{R_L} \text{ (thứ cấp bù S)} \\ Z_{refl} = \frac{R_L M^2}{L_2^2} - j \frac{\omega_0 M^2}{L_2} \text{ (thứ cấp bù P)} \end{cases} \quad (7)$$

Trở kháng đầu vào nhìn từ nguồn cung cấp của hệ thống WPT phụ thuộc vào cấu trúc mạch bù phía sơ cấp và được tính theo:

$$\begin{cases} Z_{in} = j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + Z_{refl} \text{ (sơ cấp bù S)} \\ Z_{in} = \frac{1}{j\omega C_1 + \frac{1}{j\omega L_1 + Z_{refl}}} \text{ (sơ cấp bù P)} \end{cases} \quad (8)$$

Để tối ưu hóa công suất truyền và giảm công suất phản kháng từ phía nguồn, mạch sơ cấp cần được thiết kế sao cho điện áp và dòng điện đầu vào cùng pha tại điều kiện làm việc mong muốn. Đây là điều kiện ZPA, được thiết lập bằng cách làm cho phần ảo của trở kháng đầu vào bằng 0:

$$Im(Z_{in}) = 0 \quad (9)$$

Với cấu trúc mạch bù SS, từ điều kiện (9) giá trị của tụ bù C1 được tính theo:

$$C_1 = \frac{1}{L_1 \omega_0^2} \quad (10)$$

Và trở kháng đầu vào của mạch bù SS được tính như sau:

$$Z_{in} = \frac{\omega_0 M^2}{R_L} \quad (11)$$

Tương tự như vậy, các giá trị của tụ bù phía sơ cấp, trở kháng đầu vào cho các cấu trúc bù SP, PS, và PP được đưa ra trên Bảng 1.

Ở các điều kiện cộng hưởng được mô tả trong (6), (9), dòng điện qua cuộn dây thứ cấp và sơ cấp trong cấu trúc bù SS lần lượt được tính theo:

$$I_2 = I_0 = \frac{j\omega_0 M I_1}{Z_r} = \frac{j\omega_0 M I_1}{R_L} \quad (12)$$

$$I_1 = \frac{U_{in}}{Z_{in}} = \frac{U_{in}}{\frac{\omega_0 M^2}{R_L}} \quad (13)$$

Bảng 1. Các thông số của các cấu trúc bù cơ bản

Cấu trúc bù	Giá trị tụ bù sơ cấp (C_1)	Đặc tính ngoài
SS	$\frac{1}{L_1 \omega_0^2}$	$\frac{I_0}{U_{in}} = j \frac{1}{\omega_0 M}$
SP	$\frac{1}{\left(L_1 - \frac{M^2}{L_2}\right) \omega_0^2}$	$\frac{U_0}{U_{in}} = \frac{L_2}{M}$
PS	$\frac{1}{\omega_0^2 L_1 + \frac{(\omega_0^2 M^2 / R_L)^2}{L_1}}$	$\frac{I_0}{I_{in}} = \frac{1}{\omega_0^2 M C_1}$
PP	$\frac{1}{\omega_0^2 \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2}\right) + \frac{(M^2 R_L / L_2^2)^2}{L_1}}$	$\frac{U_0}{I_{in}} = \frac{L_2}{j \omega_0 M C_1}$

Bảng 2. Thông số thiết kế của hệ thống và mạch bù

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Thông số	Ký hiệu	Giá trị
Tần số cộng hưởng	f_0	85kHz	Tụ bù của cấu trúc SP	C_1	36,32 nF
				C_2	31,87 nF
Điện cảm cuộn dây truyền, nhận	L_1, L_2	110 μ H	Tụ bù của cấu trúc PS	C_1	31,23 nF
		110 μ H		C_2	31,87 nF
Điện trở cuộn dây truyền, nhận	R_1, R_2	0.1 Ω	Tụ bù của cấu trúc PP	C_1	35,82 nF
		0.1 Ω		C_2	31,87 nF
Các tụ bù của cấu trúc SS	C_1	31,87 nF	Trở kháng tải tương đương	R_L	10 ÷ 90 Ω
	C_2	31,87 nF			

Từ (12) và (13) có thể rút ra đặc tính ngoài của cấu trúc bù SS như sau :

$$\frac{I_0}{U_{in}} = j \frac{1}{\omega_0 M} \quad (14)$$

Các đặc tính ngoài của các mạch bù SP, PS và PP được rút ra bằng cùng phương pháp và được trình bày trong Bảng 1.

Từ Bảng 1, có thể thấy rằng với cấu trúc bù SS, giá trị tụ bù C_1 phụ thuộc vào tần số cộng hưởng và điện cảm của cuộn dây truyền L_1 , nhưng không phụ thuộc vào hồ cảm (M) và trở kháng tải RL . Trong khi đó, với cấu trúc bù SP, giá trị của tụ C_1 phụ thuộc vào M . Với cấu trúc bù PS và PP, công thức tính giá trị tụ bù phức tạp hơn, C_1 phụ thuộc vào cả M và RL . Với các cấu trúc bù P ở phía sơ cấp, vì trở kháng đầu vào rất lớn, cần sử dụng nguồn dòng ở phía đầu vào.

Trong hệ thống WPT, trở kháng tải RL và hồ cảm M có thể thay đổi trong quá trình hoạt động (do trạng thái sạc của pin hoặc vị trí tương đối giữa bộ truyền và bộ nhận thay đổi). Nếu tụ bù phía sơ cấp đã được thiết kế theo

Bảng 1, tần số cộng hưởng của cấu trúc bù SS sẽ không thay đổi trong suốt quá trình hoạt động. Ngược lại, các cấu trúc bù SP, PS, và PP có tần số cộng hưởng thay đổi theo RL , M , tần số cộng hưởng thay đổi có thể làm giảm hiệu suất và đầu ra không ổn định.

Nếu điện áp đầu vào phía sơ cấp được giữ cố định, cấu trúc bù SS có thể hoạt động như một nguồn dòng ở đầu ra, giúp hệ thống sạc ở chế độ sạc ổn dòng (CC). Cấu trúc bù SP có thể hoạt động như một nguồn áp ở đầu ra, phù hợp với chế độ sạc ổn áp (CV). Nếu dòng vào phía sơ cấp cố định, cấu trúc bù PS hoạt động như một nguồn dòng ở đầu ra, còn cấu trúc bù PP có thể hoạt động như một nguồn áp ở đầu ra.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

3.1. Tính toán, thiết lập mô hình mô phỏng

Để có cơ sở đánh giá so sánh các cấu trúc bù, thông số của các tụ bù được tính toán cho cùng một hệ thống cuộn dây và cùng tần số cộng hưởng như trên Bảng 1. Dựa vào biểu thức cộng hưởng (6) và các biểu thức tính C_1 như trong Bảng 1, các thông số của các tụ bù được tính toán và trình bày trong Bảng 2.

3.2. Kích bản mô phỏng

Để xác minh tính chính xác của các phân tích trên, mô hình mô phỏng được thiết lập trên phần mềm Ansys Electronics và PSIM, theo sơ đồ cấu trúc tổng thể được trình bày trong Hình 1. Mô hình bao gồm toàn bộ quá trình từ nguồn một chiều đầu vào đến đầu ra là tải tương đương (RL).

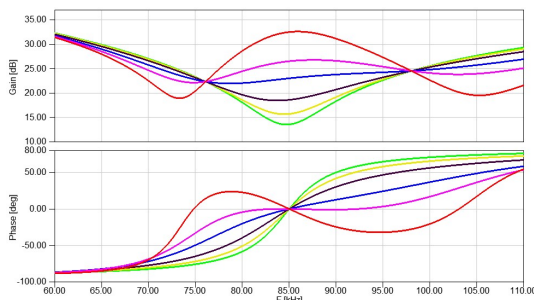
Trong hệ thống WPT, khe hở không khí lớn làm cho điện cảm tương hỗ (M) hay hệ số kết nối điện từ (k) rất nhạy với sự thay đổi vị trí tương đối giữa cuộn dây truyền và nhận. Hiện tượng lệch tâm sẽ dẫn đến sự biến thiên đáng kể của M hay k, làm suy giảm độ ổn định của thông số đầu ra cũng như hiệu suất của hệ thống. Bên cạnh đó, các yêu cầu về chế độ sạc dòng không đổi (CC), điện áp không đổi (CV) hoặc kết hợp cả hai mà không phụ thuộc vào tải là rất quan trọng đối với các ứng dụng sạc pin. Do đó, việc thiết kế và triển khai hệ thống WPT hiệu suất cao cần phải tính đến sự biến thiên của cả M và RL.

Trong các mô hình mô phỏng, đối với cấu trúc bù SS và SP, điện áp một chiều đầu vào được chọn là $UDC = 310V$. Đối với cấu trúc bù PS

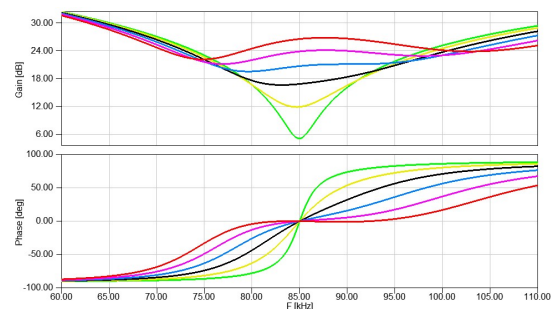
và PP, dòng điện một chiều đầu vào được chọn là $IDC = 5A$. Trở kháng tương đương (RL) đại diện cho sự thay đổi trạng thái sạc của pin, được khảo sát trong khoảng từ 10Ω đến 90Ω . Hệ số kết nối điện từ (k) phản ánh mức độ lệch tâm giữa cuộn truyền và cuộn nhận được thay đổi trong khoảng từ 0,35 đến 0,1 để mô phỏng các mức độ lệch khác nhau. Với mỗi cấu trúc bù, các đặc tính như trở kháng đầu vào Z_{in} , hiệu suất, công suất, điện áp/dòng điện trên tải, tụ bù và cuộn dây sẽ được thu thập và phân tích để đánh giá hiệu năng hệ thống và rút ra kết luận phù hợp.

3.3. Phân tích kết quả mô phỏng

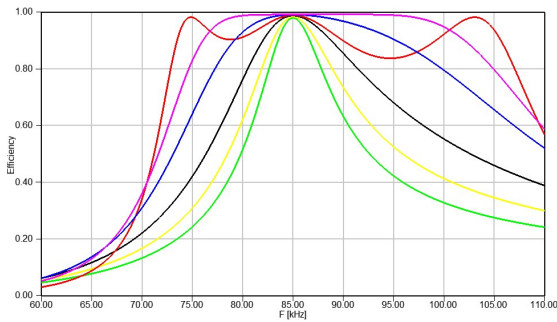
Kết quả mô phỏng đặc tính trở kháng đầu vào và hiệu suất truyền theo tần số khi thay đổi RL và k của bốn cấu trúc bù được thể hiện trên các Hình 4, 5, 6 và 7. Cụ thể, các Hình 4a, 5a, 6a, 7a thể hiện kết quả mô phỏng khi các cuộn dây truyền và nhận được căn chỉnh đồng tâm ($k = 0,35$), trong khi giá trị tải tương đương RL thay đổi từ 10Ω đến 90Ω . Hình 4b, 5b, 6b, 7b trình bày kết quả khi giá trị của tải cố định ở $RL = 50\Omega$ và hệ số kết nối điện từ thay đổi từ 0,35 đến 0,1.



Đặc tính trở kháng vào Z_{in}



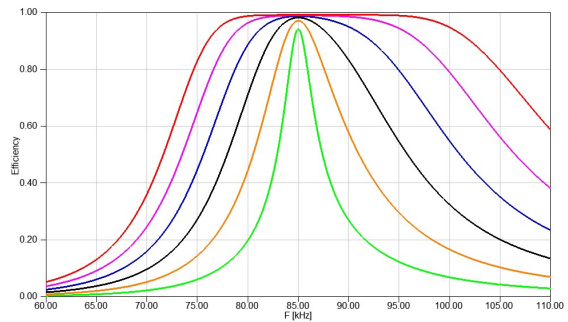
Đặc tính trở kháng vào Z_{in}



Đặc tính hiệu suất ($H = P_0/P_{in}$)

— $R_L = 10\Omega$ — $R_L = 30\Omega$ — $R_L = 70\Omega$
— $R_L = 20\Omega$ — $R_L = 50\Omega$ — $R_L = 90\Omega$

a) Thay đổi R_L

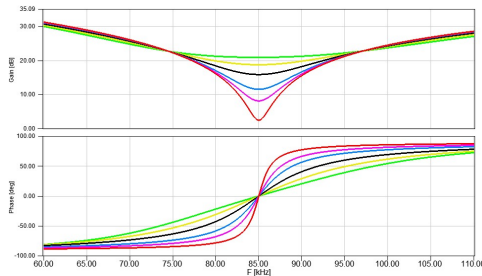


Đặc tính hiệu suất ($H = P_0/P_{in}$)

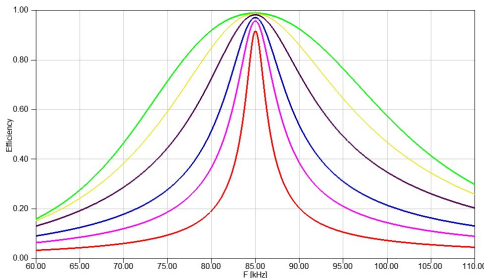
— $k = 0,35$ — $k = 0,25$ — $k = 0,15$
— $k = 0,30$ — $k = 0,20$ — $k = 0,10$

b) Thay đổi k

Hình 4. Cấu trúc bù SS: Đặc tính trở kháng vào và hiệu suất truyền theo tần số khi R_L và k thay đổi



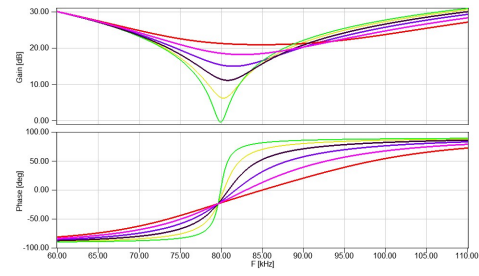
Đặc tính trở kháng vào Z_{in}



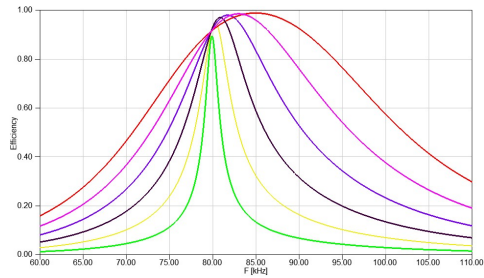
Đặc tính hiệu suất ($H = P_0/P_{in}$)

— $R_L = 10\Omega$ — $R_L = 30\Omega$ — $R_L = 70\Omega$
— $R_L = 20\Omega$ — $R_L = 50\Omega$ — $R_L = 90\Omega$

a) Thay đổi R_L



Đặc tính trở kháng vào Z_{in}

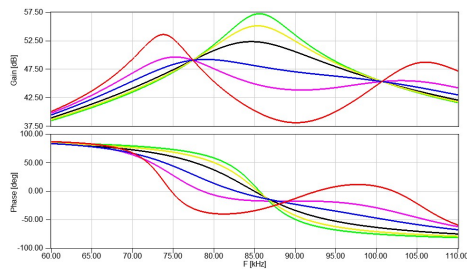


Đặc tính hiệu suất ($H = P_0/P_{in}$)

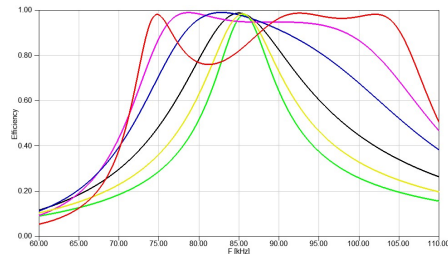
— $k = 0,35$ — $k = 0,25$ — $k = 0,15$
— $k = 0,30$ — $k = 0,20$ — $k = 0,10$

b) Thay đổi k

Hình 5. Cấu trúc bù SP: Đặc tính trở kháng vào và hiệu suất truyền theo tần số khi R_L và k thay đổi



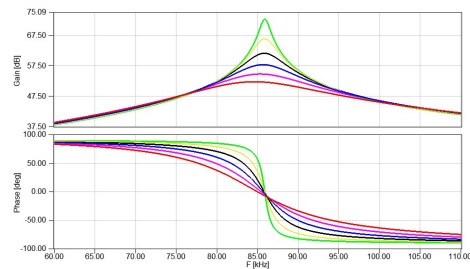
Đặc tính trở kháng vào Z_{in}



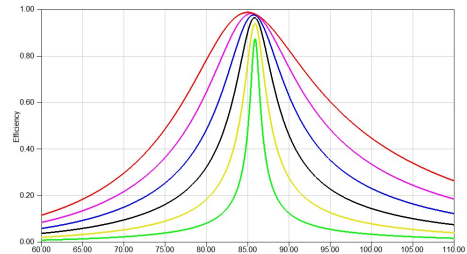
Đặc tính hiệu suất ($H = P_o/P_{in}$)

— $R_L = 10\Omega$ — $R_L = 30\Omega$ — $R_L = 70\Omega$
— $R_L = 20\Omega$ — $R_L = 50\Omega$ — $R_L = 90\Omega$

a) Thay đổi R_L



Đặc tính trở kháng vào Z_{in}

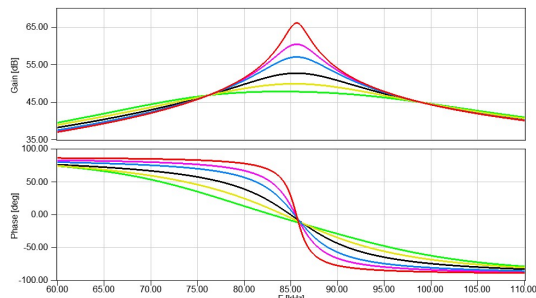


Đặc tính hiệu suất ($H = P_o/P_{in}$)

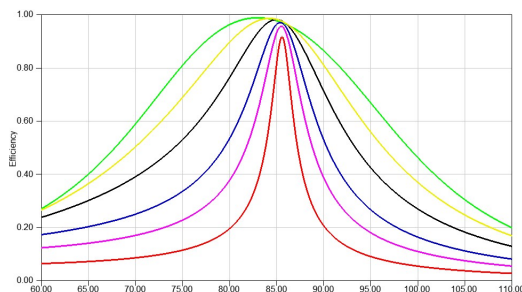
— $k = 0,35$ — $k = 0,25$ — $k = 0,15$
— $k = 0,30$ — $k = 0,20$ — $k = 0,10$

b) Thay đổi k

Hình 6. Cấu trúc bù PS: Đặc tính trở kháng vào và hiệu suất truyền theo tần số khi R_L và k thay đổi



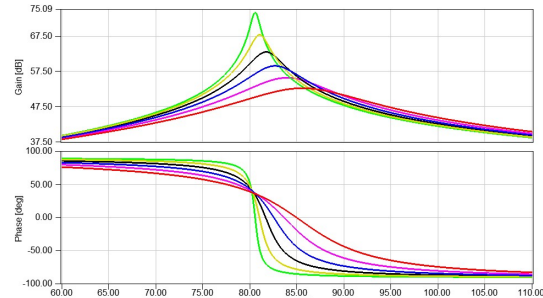
Đặc tính trở kháng vào Z_{in}



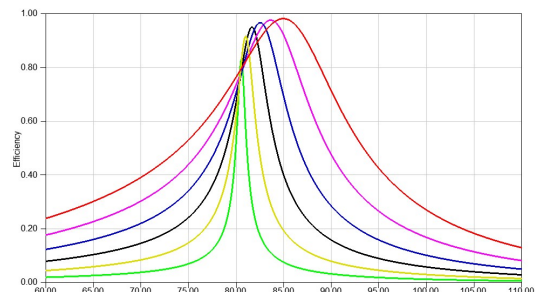
Đặc tính hiệu suất ($H = P_o/P_{in}$)

— $R_L = 10\Omega$ — $R_L = 30\Omega$ — $R_L = 70\Omega$
— $R_L = 20\Omega$ — $R_L = 50\Omega$ — $R_L = 90\Omega$

a) Thay đổi R_L



Đặc tính trở kháng vào Z_{in}



Đặc tính hiệu suất ($H = P_o/P_{in}$)

— $k = 0,35$ — $k = 0,25$ — $k = 0,15$
— $k = 0,30$ — $k = 0,20$ — $k = 0,10$

b) Thay đổi k

Hình 7. Cấu trúc bù PP: Đặc tính trở kháng vào và hiệu suất truyền theo tần số khi R_L và k thay đổi

Kết quả mô phỏng cho thấy, với cấu trúc bù SS, trong cả hai trường hợp khảo sát trở kháng đầu vào $Z_{in} = 0$ tại tần số 85 kHz, tức là tần số cộng hưởng bằng tần số thiết kế mà không phụ thuộc vào sự thay đổi của R_L và k . Hiệu suất truyền tại tần số thiết kế luôn cao, dao động từ 0,978 đến 0,99 khi thay đổi R_L . Tuy nhiên, khi k giảm, hiệu suất của hệ thống giảm theo, với $k = 0,1$ chỉ còn khoảng 0,94.

Với cấu trúc bù SP, khi R_L thay đổi, tần số cộng hưởng vẫn giữ nguyên tại 85 kHz và hiệu suất truyền dao động từ 0,9157 đến 0,9873. Tuy nhiên, khi k thay đổi, tần số cộng hưởng lệch khỏi tần số thiết kế, làm hiệu suất giảm mạnh. Đặc biệt khi k nhỏ ($k = 0,1$) hiệu suất giảm chỉ còn 0,134.

Cả hai cấu trúc SS và SP đều cho thấy trở kháng đầu vào có tính cảm trong vùng tần số thấp hơn 85 kHz. Vùng tần số này thuận lợi cho hoạt động chuyển mạch mềm (ZVS – Zero Voltage Switching) của các van bán dẫn trong hệ thống.

Với hai cấu trúc bù PS và PP, hệ thống đạt hiệu suất cao khi làm việc ở đúng tham số thiết kế ($R_L = 50\Omega$ và $k = 0,35$), hiệu suất đạt được trên 0,98. Tuy nhiên, khi R_L hoặc k thay đổi, tần số cộng hưởng lệch khỏi tần số thiết kế, làm hiệu suất giảm. Khi R_L thay đổi, hiệu suất giảm nhưng ít hơn so với khi k giảm. Cụ thể, khi $k = 0,1$, hiệu suất của cấu trúc PS giảm xuống còn 0,481, trong khi hiệu suất của cấu trúc PP chỉ còn 0,08 ở tần số 85 kHz. Ngoài ra, ở tần số lớn hơn 85 kHz, trở kháng đầu vào của cả hai cấu trúc đều có tính cảm. Nghĩa là ở vùng tần số lớn hơn 85 kHz các van bán dẫn của bộ nghịch lưu phía sơ cấp có thể đạt điều kiện chuyển mạch mềm ZVS.

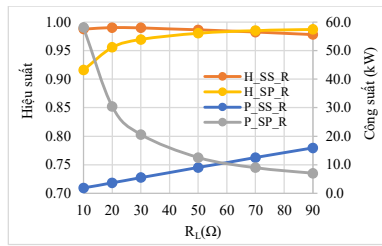
Để đánh giá hiệu suất và công suất của các cấu trúc bù, hai kịch bản mô phỏng được thực hiện: thay đổi R_L và thay đổi k . Kết quả mô phỏng được trình bày trên Hình 8. Cụ thể, Hình 8a) và Hình 8b) thể hiện các đặc tính hiệu suất và công suất của các cấu trúc bù SS và SP.

Với cấu trúc bù SS khi RL thay đổi hiệu suất vẫn ở mức cao ($0,978 \div 0,99$), công suất tăng tuyến tính theo R_L . Khi k giảm, hiệu suất giảm nhưng cũng ở mức khá cao ($0,94 \div 0,99$), còn công suất đầu ra tăng mạnh, đặc biệt khi k giảm đáng kể. Cấu trúc này phù hợp với tải công suất cao và biến động lớn, có thể truyền năng lượng xa hoặc liên kết điện từ yếu.

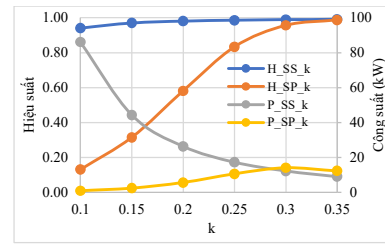
Với cấu trúc bù SP, công suất giảm khi R_L tăng nhưng hiệu suất vẫn duy trì ở mức khá cao ($0,92 \div 0,99$). Cấu trúc này phù hợp với các ứng dụng tải nhỏ đến trung bình. Tuy nhiên, hiệu suất và công suất giảm nhanh khi k giảm, khiến cấu trúc này không phù hợp cho truyền năng lượng xa.

Hình 8c) và Hình 8d) thể hiện các đặc tính hiệu suất và công suất của các cấu trúc bù PS và PP. Với cấu trúc bù PS, công suất tăng khi RL tăng và hiệu suất khá nhạy với sự thay đổi của R_L (từ 0,82 đến 0,99). Hiệu suất giảm khi k giảm (từ 0,99 xuống 0,48), còn công suất lại tăng. Cấu trúc này phù hợp với tải trung bình đến lớn.

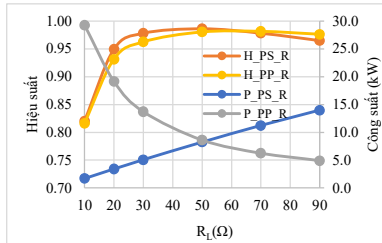
Với cấu trúc bù PP, khi R_L tăng thì công suất giảm và hiệu suất tăng. Còn khi k giảm thì hiệu suất giảm từ 0,98 xuống 0,08 và công suất giảm mạnh khi $k = 0,1$. Cấu trúc này không phù hợp với ứng dụng có k nhỏ.



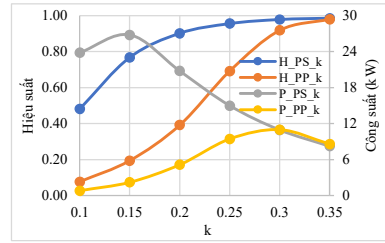
a) Cấu trúc bù SS, SP khi R_L thay đổi



b) Cấu trúc bù SS, SP khi k thay đổi

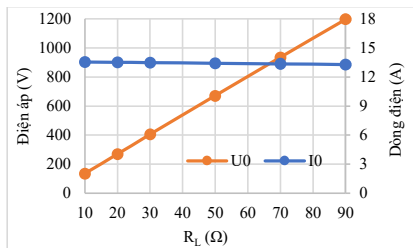


c) Cấu trúc bù PS, PP khi R_L thay đổi

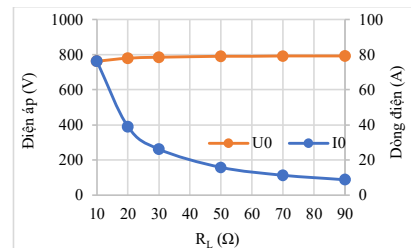


d) Cấu trúc bù PS, PP khi k thay đổi

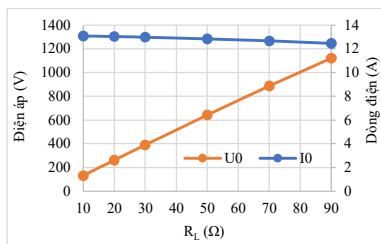
Hình 8. Đặc tính công suất và hiệu suất của các cấu trúc bù



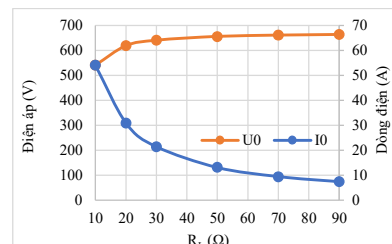
a) Đặc tính ngoài của cấu trúc bù SS



b) Đặc tính ngoài của cấu trúc bù SP



c) Đặc tính ngoài của cấu trúc bù PS



d) Đặc tính ngoài của cấu trúc bù PP

Hình 9. Đặc tính ngoài của các cấu trúc bù

Bảng 3. Thông số điện áp/dòng điện trên các phần tử mạch

Cấu trúc bù	Nguồn vào	VC1 (V)	IC1 (A)	VL1 (V)	IL1 (A)	VL2 (V)	IL2 (A)	VC2 (V)	IC2 (A)	P_0 (kW)
SS	$U_{DC} = 310V$	788,00	32,69	1920,38	32,69	1035,88	13,41	1920,00	13,41	9,0
SP	$U_{DC} = 310V$	2163,00	44,29	2228,60	44,29	771,76	20,55	770,00	12,41	12,4
PS	$I_{DC} = 5A$	1858,33	31,07	1857,88	31,30	991,78	12,85	754,64	12,85	8,2
PP	$I_{DC} = 5A$	1950,58	37,38	1950,13	37,54	657,39	17,23	656,07	11,17	8,6

Bảng 4. Thông số điện áp/dòng điện đầu vào khi $M = 0$

Cấu trúc bù	Nguồn vào	V _{in} (V)	I _{in} (A)
SS	$U_{DC} = 310V$	310	2695,05
SP	$U_{DC} = 310V$	310	39,74
PS	$I_{DC} = 5A$	2402,7	5
PP	$I_{DC} = 5A$	2209,1	5

Đặc tính ngoài của các cấu trúc bù được khảo sát khi trở kháng tải thay đổi, kết quả được đưa ra trên Hình 9. Với cấu trúc bù SS, dòng điện tải I_0 gần như không đổi, với giá trị trung bình bằng 13,43A và dao động trong khoảng 0,81%. Giá trị này phù hợp với thông số thiết kế và mối liên hệ trong (14). Điện áp tải U_0 tăng gần như tuyến tính theo R_L . Đặc tính này tương tự như nguồn dòng lý tưởng, phù hợp với các tải yêu cầu ổn định dòng điện bất kể sự biến thiên của trở kháng tải. Với cấu trúc bù SP, điện áp tải U_0 gần như không đổi, với giá trị trung bình bằng 784V và dao động 1,20%, trong khi I_0 giảm nhanh khi R_L tăng. Giá trị này phù hợp với thông số thiết kế và mối liên hệ của đặc tính ngoài trong Bảng 1. Đặc tính này có đầu ra gần giống với nguồn áp lý tưởng, phù hợp với các tải yêu cầu điện áp ổn định. Với cấu trúc bù PS, I_0 giảm nhẹ khi RL tăng, còn U_0 tăng rõ rệt theo RL . Cấu trúc này có đặc tính thiên về nguồn dòng như cấu trúc SS nhưng không lý tưởng bằng, thích hợp cho tải biến thiên cần dòng khá ổn định. Với cấu trúc bù PP, khi RL tăng I_0 (từ 54,14 A xuống còn 7,38 A) còn điện áp tăng nhẹ (từ 541V đến 664V). Đặc tính này có đầu ra trung gian giữa nguồn áp và nguồn dòng.

Để có cơ sở trong việc tính chọn thiết bị, các thông số dòng điện và điện áp trên các phần tử mạch được đo và trình bày trên Bảng 3. Với

cấu trúc bù SS, tụ C2 phải chịu điện áp khá cao (1920V) và dòng điện qua tụ C1 và L1 lớn (32,69A) trong khi dòng tải thiết kế là 13,4A. Với cấu trúc bù SP, tụ C1 cũng cần chịu điện áp lớn (2163V) và dòng điện lớn 44,29A, cuộn dây L1 cũng chịu điện áp cao và dòng lớn. Với cấu trúc bù PS, tụ C1 và cuộn dây L1 cũng phải chịu điện áp và dòng điện tương đối cao (1858,33V và 31,07A). Cấu trúc PP, tụ C1 và cuộn dây L1 cũng phải chịu mức điện áp cao và dòng lớn (1950,58V, 37,38A). Tuy nhiên, với mức công suất đầu ra như trên, áp lực lên các phần tử mạch không quá cao.

Dựa trên các phân tích trên, kết quả đánh giá của các cấu trúc bù cơ bản được tổng hợp và trình bày trong Bảng 5. Tần số cộng hưởng của các cấu trúc bù có đặc điểm như sau: cấu trúc SS không phụ thuộc vào k và RL , cấu trúc SP phụ thuộc vào k nhưng không phụ thuộc vào RL , các cấu trúc PS và PP đều phụ thuộc vào cả k và RL .

Xét khả năng hoạt động khi không có ghép nối từ ($M = 0$). Với cấu trúc SS do cộng hưởng nối tiếp (điện kháng đầu vào rất thấp) trong khi không có tải tiêu tán năng lượng làm dòng sơ cấp tăng đột biến, dễ gây hư hỏng thiết bị. Do đó, cấu trúc SS không cho phép mất ghép từ và cần có cơ chế bảo vệ khi mất tải. Với cấu trúc SP, khi $M = 0$ hệ thống vẫn cộng hưởng nhờ mạch bù song song phía thứ cấp, nhưng

năng lượng phía sơ cấp không được truyền đi, dòng phía sơ cấp có thể bị tăng nhẹ, hệ thống nên được trang bị mạch phát hiện tải để đảm bảo an toàn. Với cấu trúc bù PS, phía sơ cấp là cộng hưởng song song có khả năng tự giới hạn dòng, còn phía thứ cấp là cộng hưởng nối tiếp nhưng không dẫn dòng khi mất ghép từ. Do đó, cấu trúc này có độ an toàn cao hơn trong điều kiện $M = 0$. Với cấu trúc bù PP, cả hai phía là cộng hưởng song song, khi không có ghép từ, mạch hoạt động như một bộ dao động riêng biệt ở phía sơ cấp. Hệ thống làm việc tương đối an toàn. Các phân tích này cũng phù hợp với kết quả mô phỏng dòng điện và điện

áp đầu vào của các cấu trúc bù khi $M = 0$ trên Bảng 4.

Xét về mức độ ảnh hưởng do lệch vị trí cuộn dây (M giảm), cấu trúc bù SS bị ảnh hưởng ít nhất so với các cấu trúc còn lại, hiệu suất giảm ít nhất khi k giảm, dòng thứ cấp vẫn ổn định khi lệch vị trí nhỏ. Cấu trúc SP chịu ảnh hưởng lớn hơn, thể hiện qua sự suy giảm đáng kể của hiệu suất khi k giảm. Với cấu trúc bù PS, mức độ ảnh hưởng cao, công suất và hiệu suất truyền giảm mạnh khi lệch vị trí. Với cấu trúc bù PP, dễ mất cộng hưởng khi có lệch vị trí nhỏ, hiệu suất truyền giảm mạnh.

Bảng 5. So sánh các cấu trúc bù và ứng dụng đề xuất

Cấu trúc bù	SS	SP	PS	PP
Tần số cộng hưởng phụ thuộc vào hệ số kết nối k	Không	Có	Có	Có
Tần số cộng hưởng phụ thuộc vào tải (RL)	Không	Không	Có	Có
Khả năng hoạt động khi không có ghép nối từ	Không cho phép	Cho phép	Cho phép	Cho phép
Mức độ ảnh hưởng do lệch vị trí cuộn dây	Ít	Cao hơn so với SS	Cao	Rất cao
Khả năng cung cấp dòng điện ổn định đầu ra	Có	Không	Kém hơn SS	Không
Khả năng cung cấp điện áp ổn định đầu ra	Không	Có	Không	Kém hơn SP
Hiệu suất	Rất cao	Thấp	Thấp	Cao
Hạn chế	-	-	Yêu cầu nguồn cấp là nguồn dòng	Yêu cầu nguồn cấp là nguồn dòng
Mức công suất đề xuất	Cao	Thấp hoặc trung bình	Cao	Cao
Các ứng dụng đề xuất	Hệ thống WPT sạc cho xe điện (sạc tĩnh, sạc động), sạc nhanh, tải công suất thay đổi, thiết bị cần ổn định dòng	Ứng dụng trong y sinh và ứng dụng công suất thấp, thiết bị cần ổn định điện áp	Ứng dụng công suất cao như xe điện, xe buýt (sạc tĩnh)	Ứng dụng công suất cao như xe điện, xe buýt (sạc tĩnh)

Từ các phân tích trên, có thể đề xuất mức công suất và ứng dụng phù hợp cho từng cấu trúc như sau: Cấu trúc SS phù hợp với các hệ thống yêu cầu ổn định dòng và hiệu suất cao, đặc biệt trong các ứng dụng WPT công suất trung bình đến cao như sạc cho xe điện, bao gồm cả sạc tĩnh và sạc động. Cấu trúc SP thích hợp với các ứng dụng công suất thấp, yêu cầu ổn định điện áp như các ứng dụng trong thiết bị y sinh. Cấu trúc PS và PP phù hợp với các ứng dụng công suất cao như sạc cho xe buýt, xe điện, tuy nhiên đòi hỏi nguồn cấp là nguồn dòng.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã tiến hành phân tích đầy đủ các cấu trúc bù cơ bản trong hệ thống WPT, bao

gồm đánh giá về hiệu suất, công suất, đặc tính điện áp/dòng điện, và khả năng ứng dụng của từng cấu trúc. Kết quả cho thấy mỗi cấu trúc bù đều có những ưu điểm và hạn chế riêng, phù hợp với các yêu cầu khác nhau về công suất, hiệu suất và tính ổn định của hệ thống. Bài báo cũng nhấn mạnh rằng việc lựa chọn cấu trúc bù phù hợp đòi hỏi phải xem xét các yếu tố như hiệu suất, công suất, ổn định đầu ra, và khả năng hoạt động trong các hệ thống không có ghép nối từ hoặc khi sai lệch vị trí, từ đó giúp tối ưu hóa hiệu quả và giảm chi phí thiết bị.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 18, no. 2, pp. 1413–1452, Secondquarter 2016, doi: 10.1109/COMST.2015.2499783.
- [2]. M. Haerinia and R. Shadid, "Wireless Power Transfer Approaches for Medical Implants: A Review," *Signals*, vol. 1, no. 2, pp. 209–229, Dec. 2020, doi: 10.3390/signals1020012.
- [3]. S. Benanti et al., "Wireless Power Transmission for house appliances: A small-scale resonant coupling prototype," in 2016 AEIT International Annual Conference (AEIT), Capri, Italy: IEEE, 2016, pp. 1–6. doi: 10.23919/AEIT.2016.7892812.
- [4]. Siqi Li and C. C. Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 4–17, Mar. 2015, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2319453.
- [5]. Y. Yang, J. Cui, and X. Cui, "Design and Analysis of Magnetic Coils for Optimizing the Coupling Coefficient in an Electric Vehicle Wireless Power Transfer System," *Energies*, vol. 13, p. 4143, Aug. 2020, doi: 10.3390/en13164143.
- [6]. G.-J. Chen and W.-H. Chung, "Evaluation of Charging Methods for Lithium-Ion Batteries," *Electronics*, vol. 12, no. 19, p. 4095, Sep. 2023, doi: 10.3390/electronics12194095.
- [7]. V. Müller, R. Kaiser, S. Poller, and D. Sauerteig, "Importance of the constant voltage charging step during lithium-ion cell formation," *J. Energy Storage*, vol. 15, pp. 256–265, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.est.2017.11.020.
- [8]. C. Duan, C. Jiang, A. Taylor, and K. (Hua) Bai, "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, Nov. 2013, doi: 10.1049/iet-pel.2012.0615.

[9]. W. Zhang, S.-C. Wong, C. K. Tse, and Q. Chen, "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, Jun. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2273364.

Giới thiệu tác giả:



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.