



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>



Mô hình khảo sát quan hệ hồ cảm giữa hai cuộn dây trong hệ thống truyền tải năng lượng điện không dây sử dụng phần mềm ANSYS

Nguyễn Tiến Sỹ *, Tống Ngọc Anh

Khoa Cơ điện, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

TÓM TẮT

Quá trình:

Nhận bài 15/6/2017
 Chấp nhận 20/7/2017
 Đăng online 28/2/2018

Từ khóa:

Wireless Power Transfer
 Truyền điện không dây
 Điện cảm L
 Hồ cảm M

Truyền điện không dây (WPT) là truyền dẫn năng lượng điện từ nguồn đến tải không qua kết nối dây dẫn. Vấn đề tồn tại hiện nay với phương pháp truyền tải điện năng không dây là hiệu suất hệ thống chưa cao, khoảng cách truyền tải ngắn, cấu tạo hệ thống phức tạp, chi phí thấp. Bài báo đề cập đến vấn đề mô phỏng hệ thống WPT và nhằm khảo sát mối quan hệ phụ thuộc của hồ cảm giữa hai cuộn dây RX và TX theo khoảng cách và góc quay của chúng với các giá trị cụ thể, từ đó xác định hiệu suất truyền tải năng lượng của hệ, và tìm điểm làm việc đạt hiệu suất truyền tải lớn nhất. Từ cơ sở lập luận lý thuyết và tiến hành thực hiện mô phỏng hệ thống WPT với phần mềm ANSYS, kết quả đạt được cho thấy quan hệ hồ cảm giữa hai cuộn dây trong các trường hợp đặt lệch trục và lệch góc. Từ đó làm tiền đề giúp cho người thiết kế hệ thống WPT có thể điều chỉnh các thông số về cuộn dây, tần số cộng hưởng, ... để hệ thống đạt hiệu quả cao, hoạt động tin cậy, đồng thời giảm chi phí giá thành sản xuất.

© 2018 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

Ngày nay, với sự phát triển không ngừng của các thiết bị thông minh như điện thoại di động, đồng hồ theo dõi sức khỏe, ô tô tự hành, ... và xu hướng kết nối vạn vật (Internet of Things) thì nhu cầu về năng lượng cung cấp cho các thiết bị hoạt động trong thời gian dài, ổn định và thuận tiện là rất lớn. Các thiết bị điện tử ngày càng nhỏ gọn và phân tán, do đó giải pháp lý tưởng để cung cấp năng lượng cho chúng là sử dụng hệ thống truyền

năng lượng điện không dây (WPT). Công nghệ này cho phép truyền tải năng lượng điện từ nguồn đến tải qua không khí mà không cần kết nối dây dẫn. Với những ưu điểm vượt trội của công nghệ này, truyền điện không dây đang trở thành một xu hướng phát triển tất yếu. Từ khi nhà khoa học Nicola Tesla công bố nghiên cứu của mình về WPT vào năm 1890 (Nicola Tesla, 1905), tầm quan trọng của WPT đã dần tăng lên và trở thành một lĩnh vực đa ngành, có liên quan đến nhiều lĩnh vực khoa học khác nhau như trong viễn thông, y học, nhiệt học, ... WPT sử dụng kỹ thuật trường gần và kỹ thuật trường xa (Gozalvez, 2007; Kurs, 2010; Massa, 2013).

*Tác giả liên hệ

E-mail: nguyentiamsi@humg.edu.vn

Các kỹ thuật áp dụng trong WPT đã được nghiên cứu theo hai hướng gồm nâng cao hiệu suất truyền năng lượng và tăng khoảng cách truyền. Năm 2012, Zhao và nhóm nghiên cứu thuộc học viện công nghệ Massachusetts (MIT) phát minh ra “WiTricity” sử dụng hiện tượng cộng hưởng có khả năng truyền tải 60W trong khoảng cách 2m với hiệu suất nhỏ hơn 40% (Zhao et al, 2012). Đến năm 2014, viện KAIST (Hàn Quốc) đề xuất một cấu trúc cuộn dây và lõi từ dạng cộng hưởng lưỡng cực điện (Dipole Coil Resonant System) giúp truyền tải công suất tối đa đến 209W tại tần số 20kHz trong khoảng cách lên tới 5m, tương đương với việc có thể sạc được đến 40 chiếc điện thoại di động đồng thời (Chun et al., 2014). Hiện nay tồn tại ba tiêu chuẩn công nghệ WPT là Qi, PMA và A4WP. Qi sử dụng cuộn dây nhỏ để truyền năng lượng ở tần số cao, hỗ trợ sạc không dây ở khoảng cách ngắn vài cm, công nghệ này có đặc điểm cần các cuộn dây cần đặt thẳng hàng (Waffenschmidt, 2011), phát nhiệt cho thiết bị và khó sạc được nhiều thiết bị cùng lúc. Công nghệ A4WP (Alliance for Wireless Power) cho phép nâng cao hiệu suất truyền tải, nhiều thiết bị có thể sạc cùng lúc từ một nguồn phát duy nhất. Do sử dụng trường điện từ lớn hơn công nghệ Qi nên A4WP không yêu cầu các cuộn dây cần đặt thẳng hàng với nhau (Tseng et al., 2013). Tiêu chuẩn PMA tương tự như Qi được phát minh năm 2012 bởi Procter và Gamble được phát triển mạnh trong nhiều lĩnh vực khoa học ngày nay giúp truyền điện không dây đến mọi nơi với công suất truyền tải từ 5-10W (Chandrasekar and Geetha, 2016). Trong phạm vi của bài viết này, tác giả đưa ra một mô hình hệ thống truyền tải năng lượng không dây gồm hai cuộn dây Tx (phát) và Rx (thu) với các số liệu ban đầu cho trước và phân tích các trường hợp: 1- thay đổi khoảng cách giữa hai cuộn dây; 2- thay đổi độ lệch trục hai cuộn dây đồng phẳng và thay đổi góc hợp bởi mặt phẳng hai cuộn dây trên môi trường phần mềm ANSYS Maxwell 3D và ANSYS Simplerer. Các kết quả thu được về hồ cảm, đồ thị độ lớn cảm ứng từ B, và hiệu suất của hệ thống được chỉ ra trên Hình 6, 7, 8, 9,10 và các Bảng 2, 3, 4, 5.

2. Xây dựng mô hình mô phỏng hệ thống WPT

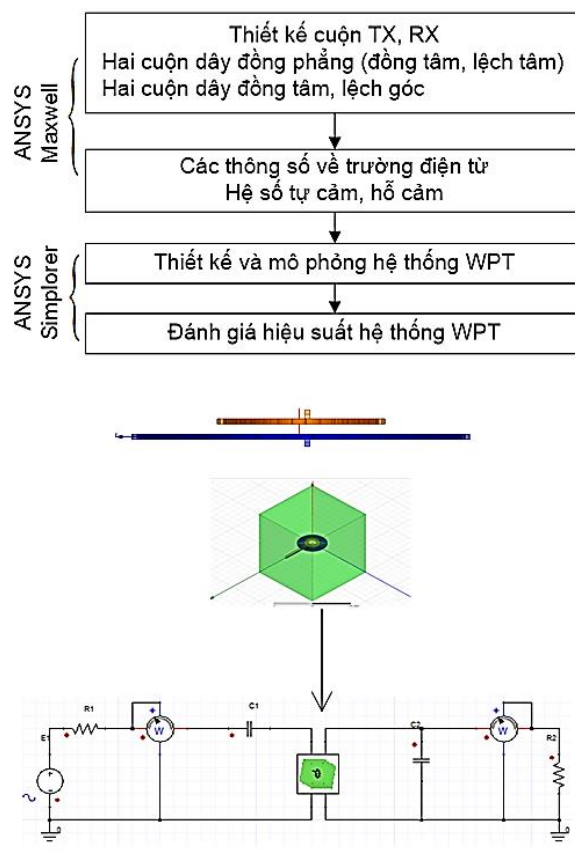
Hệ thống WPT hoạt động dựa trên nguyên lý cảm ứng điện từ. Thông số hồ cảm M giữa hai cuộn

dây là yếu tố quan trọng quyết định hiệu suất của hệ thống. Trong mô hình hệ thống WPT, hệ số k là hàm phụ thuộc vào khoảng cách d của hai cuộn dây và góc quay α giữa chúng. Mỗi liên hệ này có thể được mô tả bởi biểu thức $k = f(d, \alpha)$. Thực tế cho thấy, để tăng hệ số hồ cảm k giữa TX và RX, nhà thiết kế có thể tăng số vòng dây hoặc thêm vật liệu dẫn từ. Trong nội dung bài viết này, hệ số hồ cảm k giữa hai cuộn dây TX và RX được tính toán trong các trường hợp bao gồm:

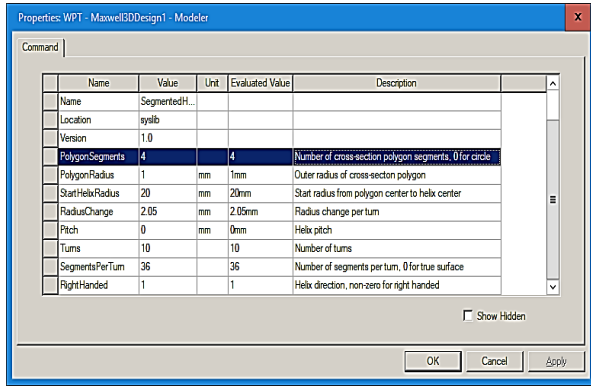
- TX, RX đặt đồng phẳng cách nhau khoảng cách được tham số hóa bằng biến distance (mm), đồng trục và lệch trục một khoảng sliding (mm).
- TX, RX đặt lệch nhau một góc được tham số hóa bằng biến rotating (độ), đồng trục và lệch trục một khoảng được tham số hóa bằng biến sliding (mm).

2.1. Thiết lập mô hình hai cuộn cảm ứng

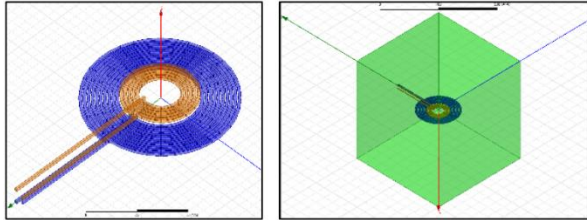
Các cuộn dây là thành phần chính trong hệ thống WPT. năng lượng TX, cuộn dây bên phía tải là cuộn thu năng lượng RX. năng lượng TX, cuộn dây bên phía tải là cuộn thu năng lượng RX.



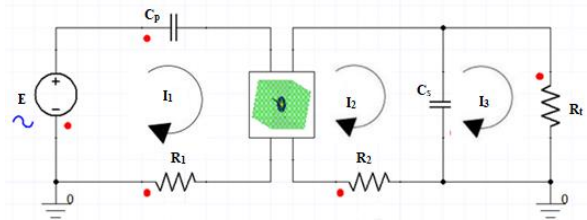
Hình 1. Lưu đồ mô phỏng hệ thống WPT.



Hình 2. Các thông số thiết kế cuộn TX và RX.



Hình 3. Mô hình cuộn dây TX và RX.



Hình 4. Sơ đồ mạch tương đương hệ thống WPT.

Bảng 1. Các thông số của mạch.

L_1	Điện cảm cuộn dây TX
L_2	Điện cảm cuộn dây RX
M	Hỗ cảm
k	Hệ số ghép đôi giữa hai cuộn TX, RX
C_p, C_s	Điện dung của tụ ở mạch sơ và thứ cấp
R_t	Điện trở tải
R_1, R_2	Nội trở của cuộn dây TX và RX
η	Hiệu suất

Cuộn dây thường có dạng cuộn xoắn với các vòng dây đồng trục dạng phẳng. Hai cuộn dây được thiết kế với các tham số có thể điều chỉnh được. Trong ANSYS Maxwell có tích hợp chức năng giải các phương trình về trường điện từ theo phương pháp phần tử hữu hạn, nên để thuận tiện cho việc mô phỏng và tính các thông số cuộn dây, hai cuộn dây được thiết kế có tiết diện hình lục giác có cạnh 1mm (Hình 3), cuộn TX có 10 số vòng

dây và số vòng cuộn RX là 5 vòng dây, được chia làm 36 đoạn.

2.2. Tính toán điện cảm và hỗ cảm theo sơ đồ mạch tương đương

Để tính toán các tham số như điện cảm L_1, L_2 hỗ cảm M , hiệu suất η một sơ đồ tương đương hệ thống WPT được đưa ra để phân tích.

Trước tiên, sử dụng phương pháp dòng điện vòng để tính toán các thông số của mạch.

$$\dot{E} = \dot{I}_1 \left(\frac{1}{j\omega C_p} + R_1 + j\omega L_1 \right) - \dot{I}_2 (j\omega M) \quad (1)$$

$$0 = \dot{I}_2 \left(j\omega L_2 + R_2 + \frac{R_0}{1 + j\omega C_s R_t} \right) - \dot{I}_1 j\omega M \quad (2)$$

$$0 = (\dot{I}_3 - \dot{I}_2) \frac{1}{1 + j\omega C_s} + \dot{I}_3 R_t \quad (3)$$

Từ (2); (3) tương ứng có mối liên hệ giữa phức các dòng điện \dot{I}_2 và \dot{I}_1 ; \dot{I}_3 và \dot{I}_2 .

$$\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{j\omega M}{j\omega L_2 + R_2 + \frac{R_t}{1 + j\omega C_s R_t}} \quad (4)$$

$$\frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_2} = \frac{1}{\frac{R_t}{1 + j\omega C_s R_t} + R_t} = \frac{1}{1 + j\omega C_s R_t} \quad (5)$$

Thay (4) vào phương trình (1) ta có phương trình tính trở kháng vào của mạch.

$$Z_{in} = \frac{1}{j\omega C_p} + R_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{j\omega L_2 + R_2 + \frac{R_t}{1 + j\omega C_s R_t}} \quad (6)$$

Hiệu suất của hệ thống được tính như sau:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \left(\frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_2} \right)^2 \frac{R_t}{Z_{in}} = \left(\frac{\dot{I}_3 \dot{I}_2}{\dot{I}_2 \dot{I}_1} \right)^2 \frac{R_t}{Z_{in}} \quad (7)$$

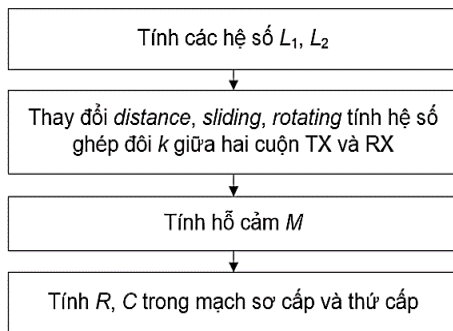
$$\eta = \left(\frac{1}{1 + j\omega C_s R_t} \frac{j\omega M}{j\omega L_2 + R_2 + \frac{R_0}{1 + j\omega C_s R_t}} \right)^2 \left(\frac{R_t}{\frac{1}{j\omega C_p} + R_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{j\omega L_2 + R_2 + \frac{R_t}{1 + j\omega C_s R_t}}} \right)$$

Có thể thấy, khi hỗ cảm giữa hai cuộn dây thay đổi thì hiệu suất của hệ thống cũng thay đổi theo. Trong ANSYS Maxwell, một biến *distance* (d) là

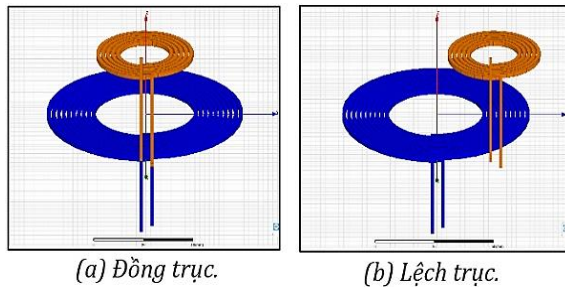
khoảng cách giữa TX và RX được lựa chọn trong phạm vi từ 2mm đến 50mm để khảo sát quan hệ giữa hệ cảm M và khoảng cách giữa hai cuộn dây. Tương tự như vậy, trong nội dung bài này, tác giả cũng khảo sát thêm các trường hợp giữ nguyên khoảng cách d (*distance*), dịch chuyển cuộn dây RX lệch trục so với trục của cuộn dây TX một khoảng 25mm tương ứng biến *sliding* (*trượt*) được chọn ở hai giá trị là 0mm và 25mm. Trường hợp cuối là thay đổi góc hợp bởi mặt phẳng hai cuộn dây từ 0° đến 30° tương ứng biến góc quay α (*rotating*) được lấy trong khoảng từ 0° đến 30° . Các kết quả tính toán được từ phần mềm và công thức giải tích được thống kê thành dạng bảng dưới.

Từ các thông số điện cảm L_1, L_2 đã có (Rahul Bhujade, Dec 2016), hệ cảm M có thể tính được tính như sau:

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (8)$$



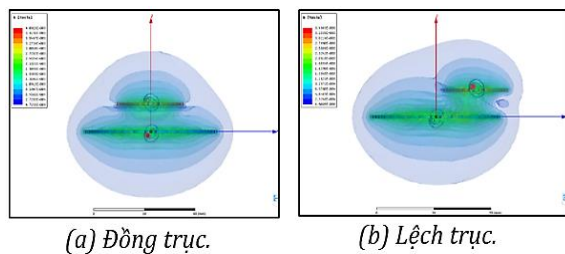
Hình 5. Lưu đồ tính toán các thông số mạch.



(a) Đồng trục.

(b) Lệch trục.

Hình 6. Mô hình TX, RX đồng phẳng.



(a) Đồng trục.

(b) Lệch trục.

Hình 7. Phân bố từ trường B.

Điện dung của tụ điện và điện trở sơ cấp và thứ cấp trong sơ đồ tương đương được tính theo công thức (9,10, 11).

$$C_p = \frac{1}{\omega^2 L_2} \quad (9)$$

$$C_s = \frac{1}{\omega^2 (1 - K^2) L_1} \quad (10)$$

$$R = \frac{l}{\sigma S} = \frac{2\pi r}{\sigma \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} \frac{N}{10^{-3} 384} \quad (11)$$

Trong đó: D - đường kính của dây (mm); σ - điện trở suất của vật liệu chế tạo cuộn dây (S/m); r - bán kính trung bình của cuộn dây (mm); N - số vòng mỗi cuộn.

2.3. Khảo sát hai cuộn dây đồng phẳng trong trường hợp đồng trục và lệch trục

Hình 6 là mô hình hai cuộn dây TX và RX đặt đồng phẳng với khoảng cách *distance* thay đổi từ $2 \div 50$ mm. Các thông số mạch được tính theo lưu đồ Hình 5 được kết quả ở Bảng 2 và 3. Ngoài ra, với mỗi biến *distance* thay đổi, có thể quan sát sự thay đổi của hiệu suất hệ thống WPT bằng đồ thị.

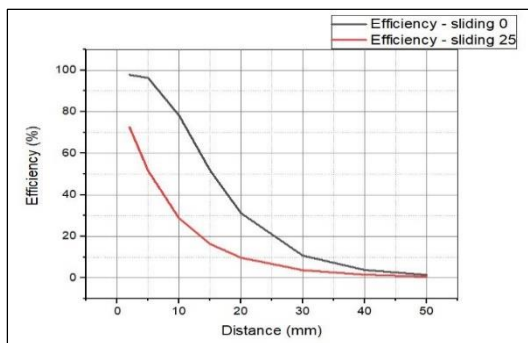
Từ các kết quả đạt được có thể nhận xét được như Bảng 2, Bảng 3 sau:

Bảng 2. Hệ cảm M với trường hợp đồng phẳng và đồng trục.

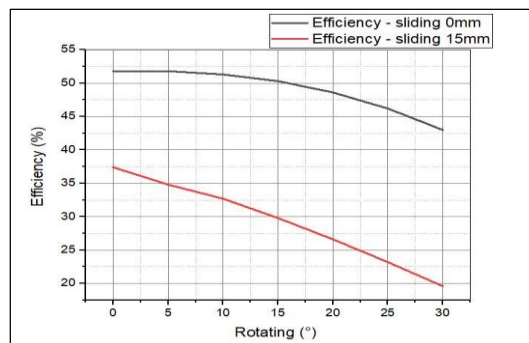
Distance	k	L_1 (μH)	L_2 (μH)	M (μH)
2mm	0.35	7.32	0.975	0.939
5mm	0.31	7.32	0.975	0.840
10mm	0.25	7.32	0.975	0.664
15mm	0.19	7.32	0.975	0.511
20mm	0.15	7.32	0.975	0.039
30mm	0.09	7.32	0.975	0.228
40mm	0.05	7.32	0.974	0.136
50mm	0.03	7.32	0.974	0.083

Bảng 3. Hệ cảm M với trường hợp đồng phẳng và dịch trục.

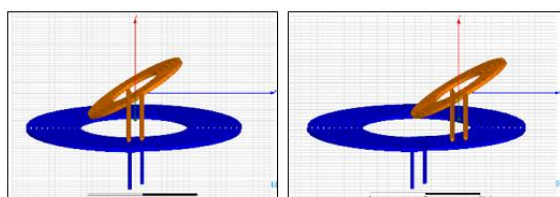
Distance	k	L_1 (μH)	L_2 (μH)	M (μH)
2mm	0.24	7.32	0.975	0.628
5mm	0.19	7.32	0.975	0.510
10mm	0.14	7.32	0.975	0.373
15mm	0.11	7.32	0.975	0.282
20mm	0.08	7.32	0.975	0.217
30mm	0.05	7.32	0.975	0.134
40mm	0.03	7.32	0.975	0.086
50mm	0.02	7.32	0.973	0.056



Hình 8. Biểu đồ hiệu suất thay đổi theo khoảng cách và độ lệch trục.



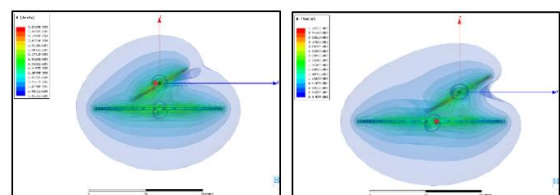
Hình 11. Biểu đồ hiệu suất thay đổi theo góc lệch và độ lệch trục.



(a) Đồng trục.

(b) Lệch trục.

Hình 9. Mô hình TX, RX không đồng phẳng.



(a) Đồng trục

(b) Lệch trục

Hình 10. Phân bố từ trường B.

Bảng 4. Hồ cảm M với trường hợp đồng trục, không đồng phẳng.

Rotate	k	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)
0°	0.192	7.317	0.975	0.511
5°	0.192	7.317	0.975	0.511
10°	0.190	7.317	0.975	0.509
15°	0.188	7.317	0.975	0.503
20°	0.185	7.317	0.975	0.494
25°	0.180	7.317	0.975	0.480
30°	0.173	7.317	0.975	0.462

Bảng 5. Hồ cảm M với trường hợp lệch trục 15mm, không đồng phẳng.

Rotate	k	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)
0°	0.161	7.318	0.975	0.430
5°	0.156	7.317	0.975	0.416
10°	0.150	7.317	0.975	0.399
15°	0.143	7.318	0.975	0.381
20°	0.135	7.317	0.975	0.360
25°	0.126	7.318	0.975	0.336
30°	0.116	7.318	0.975	0.309

- Đối với trường hợp hai cuộn dây TX, RX đồng phẳng, khi tiến hành thay đổi khoảng cách giữa hai cuộn dây từ 2 ÷ 50mm thì hiệu suất truyền tải năng lượng giảm nhanh từ 70% ÷ 95% xuống còn dưới 5%;

- Hiệu suất lớn nhất đạt được ở khoảng cách 2mm. Khi hai cuộn dây đặt thẳng hàng thì hiệu suất cao hơn trường hợp đặt lệch trục khoảng 25.3%. Tần số cộng hưởng trung bình tại 54kHz.

2.4. Khảo sát hai cuộn dây không đồng phẳng trong trường hợp đồng trục và lệch trục

Hình 9 là mô hình hai cuộn dây TX và RX đặt lệch góc *rotating* thay đổi từ 0 ÷ 30°. Các thông số mạch tính theo lưu đồ Hình 5 được Bảng 4, 5. Ngoài ra, với mỗi biến *rotating* thay đổi, có thể quan sát sự thay đổi của hiệu suất hệ thống WPT bằng đồ thị.

Trường hợp hai cuộn dây không đồng phẳng, hiệu suất giảm từ 51.8% xuống 43%; 37.4% xuống 19.6% tương ứng khi đặt đồng trục và lệch góc. Hiệu suất truyền tải năng lượng điện giảm nhẹ khi ta tăng góc lệch giữa hai cuộn dây. Hiệu suất tối đa giảm khi ta dịch chuyển cuộn RX so với cuộn TX.

3. Kết luận

Bài báo giới thiệu phương pháp sử dụng công cụ phần mềm ANSYS mô phỏng trường điện từ và phương pháp số để tính toán điện cảm, hồ cảm của hai cuộn dây hệ thống WPT trong các trường hợp các cuộn dây đặt đồng phẳng và không đồng phẳng, có xét đến độ dịch chuyển. Việc xác định các thông số tối ưu cho các cuộn dây vẫn là vấn đề khó khăn và thách thức khi thiết kế hệ thống WPT. Qua kết quả mô phỏng với các số liệu từ các bảng và đồ thị đối với từng trường hợp có thể rút ra

một số kết luận như sau:

- Điện cảm là không đổi với cùng một điều kiện kích thích (dòng điện trong các cuộn dây), hệ số hồ cảm thay đổi theo khoảng cách, độ lệch trục, độ lệch góc. Hiệu suất truyền tải năng lượng điện phụ thuộc rõ rệt vào khoảng cách giữa hai cuộn TX và RX. Khoảng cách càng xa thì hiệu suất càng thấp và ngược lại. Ở cùng một khoảng cách, góc lệch giữa hai cuộn dây không ảnh hưởng quá nhiều đến hiệu suất truyền tải năng lượng.

- Bài báo thực hiện mô phỏng với các mô đun của ANSYS là ANSYS Maxwell và ANSYS Simplorer, giúp mô phỏng và đánh giá được các thông số về trường điện từ 3D, các thông số mạch ở quá trình quá độ và xác lập.

Lời cảm ơn

Tác giả trân trọng cảm ơn bộ môn Kỹ thuật điện - Điện tử, Khoa Cơ - Điện, Trường Đại học Mỏ - Địa chất; viện ICSE Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội đã giúp đỡ về cơ sở vật chất, chuyên môn trong quá trình hoàn thiện bài báo.

Tài liệu tham khảo

- Chandrasekar Rao, T. S., Geetha, K., 2016. Categories, Standards and Recent Trends in Wireless Power Transfer: A Survey.
- Chun, T. Rim, Park Changbyung, Lee Sungwoo, and Cho Gyu-Heoyung, 2014. Innovative 5m-off distance Inductive Power Transfer Systems with Optimally Shaped Dipole Coils. *IEEE Transactions on Power Electronics*. DOI: 10.1109/PEDES. 2016. 7914502 DOI: 10.1109/TPEL. 2014. 2310232.

Gozalvez, J., 2007. WiTricity-The Wireless Power Transfer [Mobile Radio]. *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, vol.2, no.2, pp.38,44.

Kurs, Moffatt, Martin, 2010. Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices. *Applied Physics Letters*, vol.96, no.4, pp.044102, 044102-3.

Massa, A., Oliveri, G., Viani, F., and Rocca, P., 2013. Array Designs for Long-Distance Wireless Power Transmisstion: State-of-the-Art and Innovative Solutions.

Nicola Tesla, 1905. The Transmission Of Electrical Energy Without Wires. *Electrical World and Engineering*.

Power Matter Alliance: www.powermatters.org

Rahul, Rasul, Paramjit, Bhakti and Ramesh 2016. Modeling and Analysis of Coupled Coils for Wireless Power Transfer. *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drivers, and Energy System (PEDES)*.

Tseng, R., von Novak, B., Shevde, S., Grajski, K.A., 2013. Introduction to the alliance for wireless power loosely-coupled wireless power transfer system specification version 1.0. *Wireless Power Transfer (WPT), 2013 IEEE*, vol., no., pp.79,83, 15-16.

Waffenschmidt, E., 2011. Wirelss Power for Mobile Devices. *Telecommunications Energy Conference (INTELEC), IEEE 33rd International*, vol., no., pp.1,9, 9-13.

Zhao, J., 2012. Electromagnetic Field Problems and Applications, *ICEF*.

ABSTRACT

Modeling and calculation of self and mutual inductance between a pair of coils for wireless resonant transfer system using numerical method

Sy Tien Nguyen, Anh Ngoc Tong

Faculty of Electro-Mechanics, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam.

Wireless Power Transfer (WPT) is the transmission of electrical energy from a power source to an electrical load. WPT applied a wide range of subjects in various fields such as mobile devices, medical applications and electrical vehicles. There are two techniques in wireless power transfer including near-field technique and far-field techniques. The main problem for WPT techniques is how to improve efficiency of system in long distance with low cost and simple structure. In this paper, the transmitter and receiver coils of WPT systems are modelling using ANSYS Maxwell simulation tool. Then, with the use of numerical method in ANSYS Simplorer software, the self and mutual inductance of the coils is computed by assigning distance and rotation between the two coils as variables. The efficiency of the system was estimated through the calculation of input and output power. The results also revealed that the efficiency of system follows distance and rotation between TX and RX coils with different cases. Finally, some remarks and recommendations regarding future studies are proposed.