



การศึกษาเชิงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัตด้วยความถี่เรโซแนนซ์

ภริดา จีบกล้า

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

วัยอาจ สายคง และ ชัยยุทธ สัมภาวะคุปต์*

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก และภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 8559 2351 อีเมล: chaiyut.s@cit.kmutnb.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.025

รับเมื่อ 19 กรกฎาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 30 กันยายน 2563 ตอบรับเมื่อ 7 ตุลาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 25 พฤษภาคม 2564

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัตด้วยวิธีความถี่เรโซแนนซ์ โดยใช้ภาคส่งพลังงานไฟฟ้าหลายชุดขนานกับวงจรอินเวอร์เตอร์ชุดเดียวสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อหาประสิทธิภาพในการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัตระหว่างภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและภาครับพลังงานไฟฟ้า ทำการจำลองการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัตรูปแบบวงจรเรโซแนนซ์ทั้ง 4 แบบ คือ แบบขนาน-ขนาน แบบขนาน-อนุกรม แบบอนุกรม-ขนาน และแบบอนุกรม-อนุกรม โดยปรับระยะห่างระหว่างวงจรถูกส่งพลังงานไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับพลังงานไฟฟ้าที่ความถี่เรโซแนนซ์ จากการจำลองผลพบว่า รูปแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-อนุกรมให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบพลวัตสูงสุด 18.56 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับแบบอื่น โดยระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างวงจรถูกส่งพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 0.04 เมตร และระหว่างวงจรถูกส่งพลังงานไฟฟ้าและภาครับพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 0.15 เมตร

คำสำคัญ: การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัต ความถี่เรโซแนนซ์ วงจรเรโซแนนซ์



A Comparative Study of the Efficiency of Dynamic Wireless Power Transfer with Resonant Frequency

Pharida Jeebklum

Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Waiard Saikong and Chaiyut Sumpavakup*

Research Centre for Combustion Technology and Alternative Energy and Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

*Corresponding Author, Tel. 08 8559 2351 E-mail: chaiyut.s@cit.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.025

Received 19 July 2020; Revised 30 September 2020; Accepted 7 October 2020; Published online: 25 May 2021

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This article presents the design of a dynamic wireless power transfer system using a resonant frequency method using multiple power transmitter in parallel with a single inverter circuit for the light duty vehicle to find the efficiency of the dynamic wireless power transfer between the power transmitter and the power receiver. Simulates a dynamic wireless power transfer with four resonant circuit schemes: parallel-parallel, parallel-series, series-parallel and series-series. By adjusting the distance between the circuits of the power transmitter, and the power transmitter and the power receiver at a resonance frequency. From the simulation, the series-series resonance circuit model has the highest power transfer efficiency of 18.56% compared to other with an optimum distance between the power transmitter is 0.04 m and the distance between the power transmitter and the power receiver is 0.15 m.

Keywords: Dynamic Wireless Power Transfer, Resonant Frequency, Resonant Circuit

Please cite this article as: P. Jeebklum, W. Saikong, and C.t Sumpavakup, "A comparative study of the efficiency of dynamic wireless power transfer with resonant frequency," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 4, pp. 651–660, Oct.–Dec. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

ในปัจจุบันการอัดประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า มี 2 แบบ คือ การอัดประจุไฟฟ้าแบบใช้สายและการอัดประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย วิธีการอัดประจุแบตเตอรี่ที่นิยมจะใช้สายไฟฟ้าเป็นตัวนำในการถ่ายโอนพลังงานมาเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ แต่การอัดประจุแบตเตอรี่แบบใช้สายไฟฟ้าต้องใช้เวลานาน และจะต้องจอดอยู่กับที่ตลอดการอัดประจุไฟฟ้า [1] อีกทั้งการใช้สายไฟฟ้าอาจทำให้กระแสไฟฟ้ารั่วไหลและเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานได้ จึงเกิดแนวคิดพัฒนาเทคโนโลยีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายขึ้น

การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัตเป็นวิธีการอัดประจุแบตเตอรี่ในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้ากำลังเคลื่อนที่ ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้ามีหลายปัจจัย Panchal และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาเทคโนโลยีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย พบว่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายดีที่สุด เมื่อใช้วิธีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบเรโซแนนซ์ ซึ่งวงจรเรโซแนนซ์จะประกอบด้วยการนำขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า มาต่อกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบอนุกรม โดยการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้ในภาคส่งกำลังไฟฟ้าจะเป็นแบบวงกลม และมีหลายชุด Zhang และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาและออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าพบว่า เมื่อขดลวดภาคส่งกำลังไฟฟ้าที่มีพื้นที่มากกว่าภาครับกำลังไฟฟ้ามากๆ ทำให้มีประสิทธิภาพการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไร้สาย 50 เปอร์เซ็นต์ และระยะห่างระหว่างขดส่งและขดรับกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า 25 มิลลิเมตร โดยสามารถควบคุมการเปิดปิดของขดส่งกำลังไฟฟ้าได้ ซึ่งเป็นวิธีการลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าโดยเปล่าประโยชน์ Shuguang และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาวิธีการกำหนดพื้นที่การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าและการขนานขดลวดภาคส่งกำลังไฟฟ้าพบว่า เมื่อขดลวดภาคส่งกำลังไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่กว่าภาครับกำลังไฟฟ้า ประสิทธิภาพการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไร้สายจะลดลง เพราะฟลักซ์แม่เหล็กเกิดการรั่วไหลมาก แต่การขนานขดลวดขดส่งกำลังไฟฟ้าสามารถลดการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงๆ ให้กับวงจรเรโซแนนซ์ได้ Anyapo และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาวิธีการกำหนดพื้นที่

การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าพบว่า เมื่อขดลวดภาคส่งกำลังไฟฟ้ามีขนาดเท่ากับภาครับกำลังไฟฟ้า ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไร้สายลดลง เมื่อระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และ Dai และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาวิธีการกำหนดพื้นที่การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าพบว่า เมื่อใช้ภาคส่งกำลังไฟฟ้าสองชุดต่อภาครับกำลังไฟฟ้าหนึ่งชุด ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไร้สายเพิ่มขึ้นเกือบ 4 เท่าของชุดส่งกำลังไฟฟ้าแบบเดี่ยว ความกังวลเกี่ยวกับอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ เมื่อมีการประจุแบตเตอรี่ไร้สายแบบพลวัตหรือการอัดประจุแบตเตอรี่บ่อยครั้ง จากการศึกษาพบว่า Jeong และคณะ [6] ได้ทำการวิเคราะห์การอัดประจุแบตเตอรี่แบบบ่อยครั้งพบว่า การประจุแบตเตอรี่ไร้สายแบบพลวัตไม่ทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลงเร็วกว่าปกติ อีกทั้งยังสามารถลดขนาดของแบตเตอรี่ให้เล็กลงกว่าปกติได้ แต่แบตเตอรี่ที่เล็กเกินไปอาจจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติ Bi และคณะ [7] ได้ทำการศึกษากการอัดประจุแบตเตอรี่ไร้สายแบบพลวัตพบว่า การอัดประจุแบตเตอรี่ไร้สายแบบพลวัตสามารถลดความจุของแบตเตอรี่ลงได้ 21-48 เปอร์เซ็นต์ หรือ 1 ใน 3-5 ของขนาดแบตเตอรี่ปกติ ซึ่งทำให้น้ำหนักและราคาของยานยนต์ลดลง การประเมินอายุการใช้งานของแบตเตอรี่คาดว่าจะเกินกว่าอายุการใช้งานของยานยนต์ถึง 11 ปี ซึ่งประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความต้านทานและตำแหน่งของภาคส่งและภาครับพลังงานไฟฟ้า [5], [8]

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัตด้วยวิธีความถี่เรโซแนนซ์ โดยใช้วิธีจำลองผลด้วยโปรแกรม PSIM ด้วยการออกแบบภาคส่งพลังงานไฟฟ้าหลายชุดขนานกับวงจรอินเวอร์เตอร์ชุดเดียวสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัต เมื่อปรับระยะห่างระหว่างวงจรภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับพลังงานไฟฟ้าที่ความถี่เรโซแนนซ์ รายละเอียดที่นำเสนอแบ่งเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย วิธีการวิจัย ผลการทดสอบและสรุป

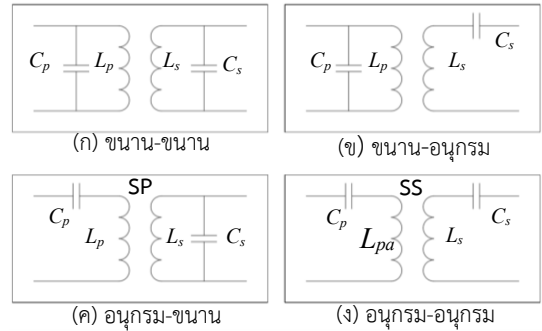
2. การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย อาศัยหลักการเหนี่ยวนำระหว่างขดส่งพลังงานไฟฟ้าและขดรับพลังงานไฟฟ้าคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า แต่ใช้อากาศเป็นตัวกลางในการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและขดลวดภาครับพลังงานไฟฟ้าแทนแกนเหล็ก [9] จึงมีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าการอัดประจุไฟฟ้าแบบใช้สาย แต่การอัดประจุไฟฟ้าแบบไร้สายนั้นมีความน่าสนใจ เนื่องจากสามารถลดความเสี่ยงของอันตรายที่เกิดจากการใช้สายไฟฟ้าได้และมีการใช้งานที่สะดวกกว่า [8] วิธีที่ใช้ในการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย มี 4 วิธี [2] คือ การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้า การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบแมกเนติกเคิลียร์ การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า และการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบเรโซแนนซ์ ทั้ง 4 วิธี ใช้ขดส่งพลังงานไฟฟ้าและขดรับพลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน

การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบเรโซแนนซ์สามารถให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้ามากกว่าวิธีอื่น และง่ายต่อการออกแบบ โดยใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าและขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า เรียกว่า วงจรเรโซแนนซ์ เมื่อค่าความถี่สูงคาร์แอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะมากและค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะต่ำ ซึ่งจะพบว่า ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าและตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะมีค่าสวนทางกัน ดังนั้นหากมีค่าความถี่ที่ทำให้คาร์แอคแตนซ์ทั้งสองมีค่าเท่ากันจะทำให้คาร์แอคแตนซ์หักล้างกันหมด จึงเหลือเฉพาะค่าความต้านทาน ซึ่งค่าความถี่ที่ทำให้เกิดผลดังกล่าวเรียกว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (1)$$

เมื่อ L_p คือ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้า
 L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับพลังงานไฟฟ้า
 C_p คือ ค่าความจุไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้า
 C_s คือ ค่าความจุไฟฟ้าภาครับพลังงานไฟฟ้า

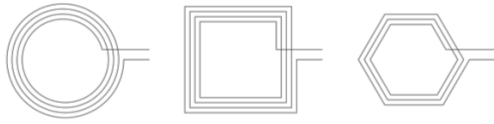


รูปที่ 1 รูปแบบวงจรเรโซแนนซ์

2.1 รูปแบบวงจรเรโซแนนซ์

ลักษณะการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าและขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าที่ต่างกัน ดังรูปที่ 1

การต่อแบบขนาน-ขนาน (Parallel-Parallel; PP) แสดงดังรูปที่ 1 (ก) ภาคส่งและภาครับพลังงานไฟฟ้าเป็นการนำตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาต่อขนานกับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า ใช้สำหรับการปกป้องเพื่อไม่ให้ขดลวดภาคส่งพลังงานไฟฟ้าทำงานในกรณีที่ไม่มีขดลวดภาครับพลังงานไฟฟ้า ทำให้มีความปลอดภัยต่อระบบ แต่ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจะต่ำ การต่อแบบขนาน-อนุกรม (Parallel-Series; PS) แสดงดังรูปที่ 1 (ข) ภาคส่งพลังงานไฟฟ้าเป็นการนำตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาต่อขนานกับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า และภาครับพลังงานไฟฟ้าเป็นการนำตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาต่ออนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า ใช้สำหรับการปกป้องเพื่อไม่ให้ขดลวดภาคส่งพลังงานไฟฟ้าทำงานในกรณีที่ไม่มีขดลวดภาครับพลังงานไฟฟ้า ทำให้มีความปลอดภัยต่อระบบ แต่ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจะต่ำ การต่อแบบอนุกรม-ขนาน (Series-Parallel; SP) แสดงดังรูปที่ 1 (ค) ภาคส่งพลังงานไฟฟ้าเป็นการนำตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาต่ออนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า และภาครับพลังงานไฟฟ้าเป็นการนำตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาต่อขนานกับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าแบบ PP และแบบ PS ส่วนการต่อแบบอนุกรม-อนุกรม (Series-

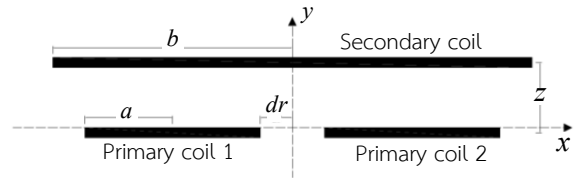


รูปที่ 2 รูปทรงของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า

Series; SS) แสดงดังรูปที่ 1 (ง) ภาคส่งและภาครับพลังงานไฟฟ้าเป็นการนำตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาต่ออนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า ซึ่งรูปแบบนี้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด และเหมาะกับการใช้ในยานยนต์ไฟฟ้ามากที่สุด เพราะค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นอิสระจากเงื่อนไขการต่อโหลดและการเหนี่ยวนำร่วมกัน สามารถให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าคงที่ในการอัดประจุแบตเตอรี่ ค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงไปซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย จึงมีวิธีการปรับปรุงวงจรเรโซแนนซ์เพื่อสามารถถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด โดยการชดเชยวงจรเรโซแนนซ์แบบ LCC ซึ่งสามารถลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าได้ [8]

2.2 รูปทรงของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า

รูปทรงของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าส่งผลต่อฟลักซ์แม่เหล็กที่ใช้ในการเหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งรูปแบบสี่เหลี่ยมจะเกิดกระแสไหลวนทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นและมีความร้อน ไม่เหมาะกับการใช้กำลังไฟฟ้าสูง [10] ที่ตำแหน่งตรงกลางของภาคส่งและภาครับพลังงานไฟฟ้าของรูปแบบหกเหลี่ยมให้ประสิทธิภาพสูง แต่จะลดลงที่บริเวณเหลี่ยมของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า รูปแบบวงรีมีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าในขณะที่ตำแหน่งเยื้องศูนย์กลางได้ดี แต่ไม่เหมาะกับการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง และรูปแบบวงกลมมีกระแสไหลวนน้อยทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าต่ำจึงเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการวิจัย โดยขนาดของภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและภาครับพลังงานไฟฟ้าอาจมีขนาดเท่ากันหรือต่างกันก็ได้ [2] ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้รูปแบบวงกลมที่มีภาคส่งพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กกว่าภาครับพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 3 ตำแหน่งของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า

2.3 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วม

การส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายจำเป็นต้องอาศัยการเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและภาครับพลังงานไฟฟ้า ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมสามารถคำนวณได้จากสมการของ Maxwell และสมการของ Neumann [11] ซึ่งได้ทำการศึกษามาแล้ว เมื่อพันขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบวงกลม ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) [5] ตำแหน่งของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3

$$M = \sum_{i=1}^{i=n_p} \sum_{j=1}^{j=n_s} M_{ij} \quad (2)$$

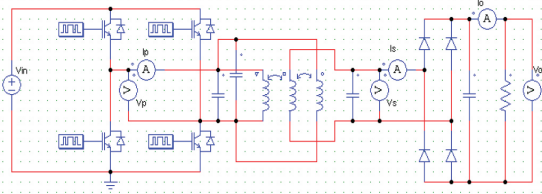
$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad M_{ij} &= \frac{\mu_0 \pi a^2 b^2}{2(a^2 + b^2 + z^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \left[1 - \frac{3}{2} \delta + \dots \right. \\ &\left. \frac{15}{32} \xi^2 \left(1 - \frac{21}{2} \delta \right) + \frac{15}{16} (\lambda^2 + \phi^2) \left(1 - \frac{7}{4} \delta \right) \right] \\ \delta &= \frac{x^2}{a^2 + b^2 + z^2 + x^2} \\ \xi &= \frac{2ab}{a^2 + b^2 + z^2 + x^2} \\ \lambda &= \frac{2xa}{a^2 + b^2 + z^2 + x^2} \\ \phi &= \frac{2xb}{a^2 + b^2 + z^2 + x^2} \end{aligned}$$

เมื่อ a คือ รัศมีของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้า

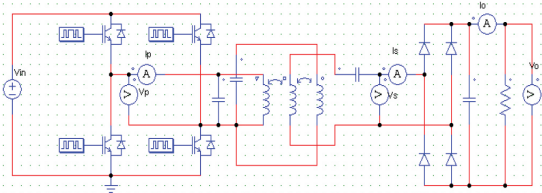
b คือ รัศมีของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับพลังงานไฟฟ้า

z คือ ระยะห่างระหว่างภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและภาครับพลังงานไฟฟ้า

x คือ ตำแหน่งของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 4 วงจรจำลองผลการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย
รูปแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน-ขนาน



รูปที่ 5 วงจรจำลองผลการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย
รูปแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน-อนุกรม

โดยที่

$$\begin{aligned} x_1 &= -(a+dr) - x_0 & ; & \quad x_0 < -(a+dr) \\ x_1 &= a+dr + x_0 & ; & \quad x_0 > -(a+dr) \\ x_2 &= a+dr - x_0 & ; & \quad x_0 < a+dr \\ x_2 &= x_0 - a - dr & ; & \quad x_0 > a+dr \end{aligned}$$

เมื่อ x_1 คือ ตำแหน่งของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับพลังงานไฟฟ้าต่อขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับพลังงานไฟฟ้าชุดที่ 1

x_2 คือ ตำแหน่งของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับพลังงานไฟฟ้าต่อขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับพลังงานไฟฟ้าชุดที่ 2

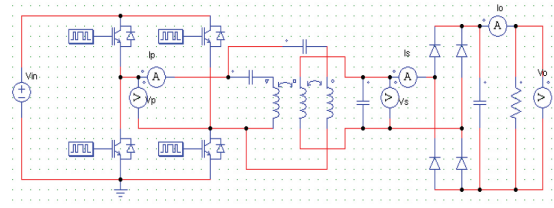
x_0 คือ ตำแหน่งของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับพลังงานไฟฟ้าที่ตำแหน่ง $x = 0$

dr คือ ระยะห่างระหว่างภาคส่งพลังงานไฟฟ้า

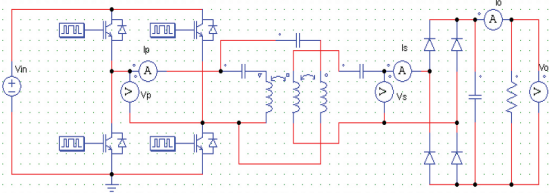
3. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 การจำลองผลด้วยโปรแกรม

การจำลองผลถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยโปรแกรม PSIM ที่ความถี่เรโซแนนซ์ และใช้ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้า 2 ชุด ต่อภาครับพลังงานไฟฟ้า 1 ชุด โดยทำการจำลองผลทั้ง 4 รูปแบบวงจรจำลองผลแสดงดังรูปที่ 4-7



รูปที่ 6 วงจรจำลองผลการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย
รูปแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนาน

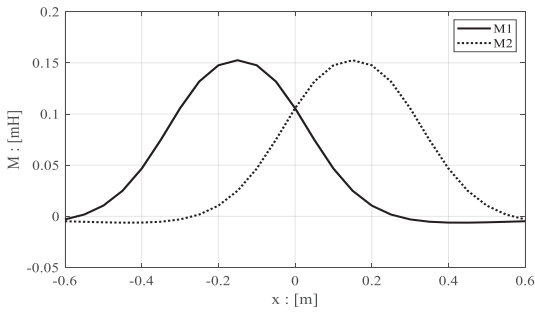


รูปที่ 7 วงจรจำลองผลการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย
รูปแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-อนุกรม

3.2 การคำนวณความถี่เรโซแนนซ์

ตามมาตรฐานของสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ ความถี่เรโซแนนซ์ที่ใช้ในการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายอยู่ระหว่าง 81.9-90 กิโลเฮิร์ตซ์ [8] สำหรับภาคส่งพลังงานไฟฟ้าใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด 10 นาโนฟารัด ซึ่งมีจำหน่ายทั่วไปจำนวน 4 ตัว นำมาต่อขนานค่าความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า 40 นาโนฟารัด และใช้ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีรูปร่างเป็นวงกลมแบบกันหอย ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า 80 ไมโครเฮนรี สำหรับภาครับพลังงานไฟฟ้าใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด 10 นาโนฟารัด จำนวน 5 ตัว นำมาต่ออนุกรมค่าความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า 2 นาโนฟารัด ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า 1600 ไมโครเฮนรี ค่าพารามิเตอร์สรุปได้ดังตารางที่ 1 จากสมการที่ (1) สามารถคำนวณความถี่เรโซแนนซ์ได้เท่ากับ 88.97 กิโลเฮิร์ตซ์

การจำลองผลใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง $V_{in} = 311$ โวลต์ และโหลดความต้านทาน 10.92 โอห์ม ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้า (V_p และ I_p) และทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ภาครับพลังงานไฟฟ้า (V_s และ I_s) ซึ่งสามารถคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่งการวัด โดยที่ P_p หรือ P_{in} คือ กำลังไฟฟ้าของภาคส่งพลังงานไฟฟ้า ค่าวนได้จากค่าแรงดัน



รูปที่ 8 ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วม

ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้า และ P_s หรือ P_{out} คือ กำลังไฟฟ้าของภาครับพลังงานไฟฟ้า คำนวณได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าภาครับพลังงานไฟฟ้า ค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (3)$$

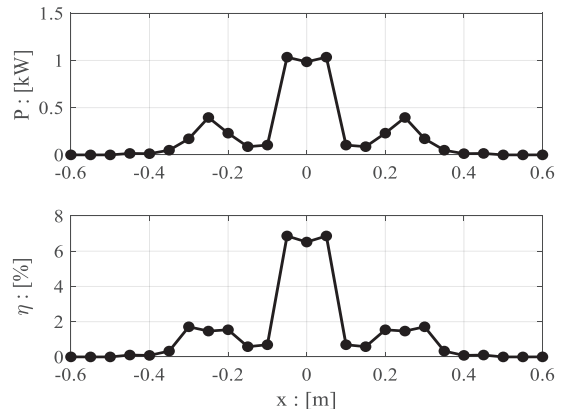
เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย
 P_{in} คือ กำลังไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้า
 P_{out} คือ กำลังไฟฟ้าภาครับพลังงานไฟฟ้า

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล

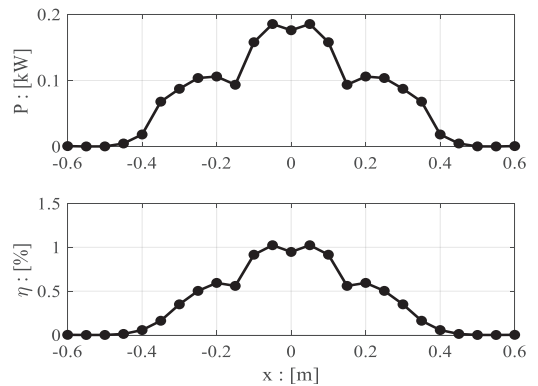
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
f_R	88.97 kHz
L_s	1600 μ H
C_s	2 nF
L_p	80 μ H
C_p	40 nF
a	0.11 m
b	0.30 m

3.3 ผลการจำลองค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วม

กรณีขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้า 2 ชุด ทำให้มีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วม 2 ชุด จากขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าแต่ละชุด เมื่อ $z = 0.15$ เมตร $dr = 0.04$ เมตร ทำการปรับตำแหน่งของภาครับพลังงานไฟฟ้า $x = -0.60$ ถึง 0.60 เมตร สามารถแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย รูปแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน-ขนาน

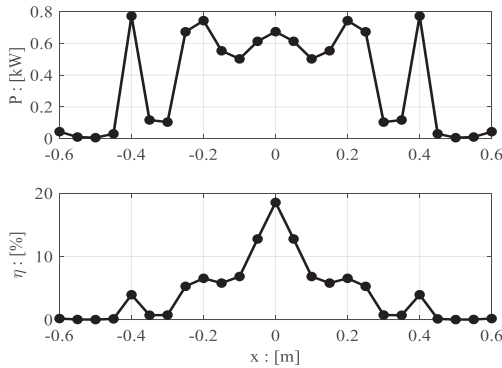


รูปที่ 10 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย รูปแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน-อนุกรม

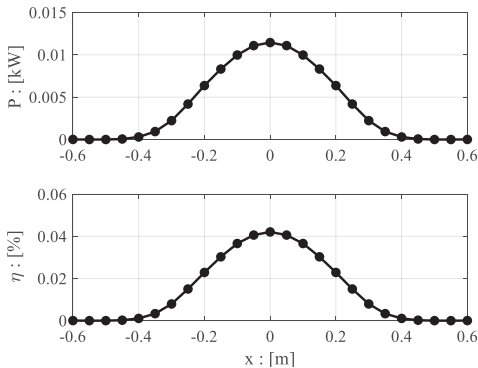
4. ผลการทดลอง

4.1 เปรียบเทียบรูปแบบวงจรเรโซแนนซ์

ผลการทดสอบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย รูปแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน-ขนาน แบบขนาน-อนุกรม แบบอนุกรม-ขนาน และแบบอนุกรม-อนุกรม โดยระยะห่างระหว่างวงจรถูกส่งพลังงานไฟฟ้า 0.04 เมตร และระยะห่างระหว่างวงจรถูกส่งพลังงานไฟฟ้าและภาครับพลังงานไฟฟ้า 0.15 เมตร แสดงดังรูปที่ 9-12 ตามลำดับ

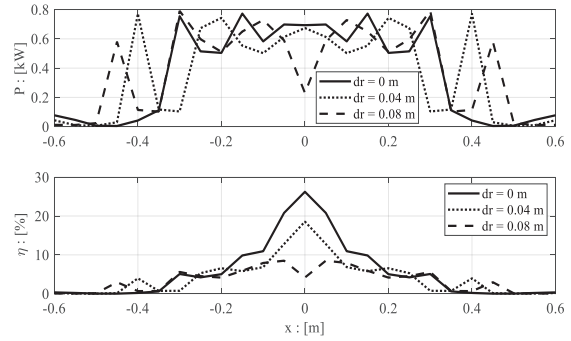


รูปที่ 11 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย รูปแบบวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนาน



รูปที่ 12 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย รูปแบบวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม-อนุกรม

จากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าเมื่อพิจารณารูปแบบวงจรรีโซแนนซ์จะพบว่า รูปแบบวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม-อนุกรมให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบพลวัตสูงสุดเมื่อเทียบกับแบบอื่น คือ 18.56 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร ลำดับถัดไปเป็นรูปแบบวงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน-อนุกรมให้ประสิทธิภาพสูงสุด 6.86 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่ง $x = -0.05$ และ 0.05 เมตร รูปแบบวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนานให้ประสิทธิภาพสูงสุด 1.02 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่ง $x = -0.05$ และ 0.05 เมตร และรูปแบบวงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน-ขนานให้ประสิทธิภาพสูงสุด 0.04 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่ง



รูปที่ 13 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย กรณีปรับระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้า

$x=0$ เมตร ถึงแม้ว่ารูปแบบวงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน-อนุกรมจะให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ตำแหน่ง 0 เมตร สูงกว่าแบบอนุกรม-อนุกรม แต่การหาค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบพลวัตพิจารณาทั้งค่าและช่วงของการมีประสิทธิภาพคงที่ ดังนั้นรูปแบบวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม-อนุกรม จึงเหมาะสมกับการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบพลวัต

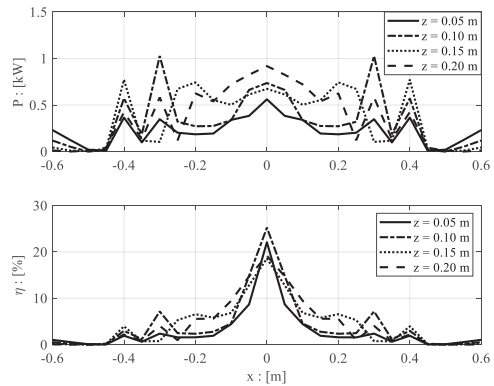
4.2 เปรียบเทียบการปรับระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้า

ผลการทดสอบกรณีปรับระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้า โดยใช้รูปแบบวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม-อนุกรม และระยะห่างระหว่างวงจรรีโซแนนซ์ภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและภาครับพลังงานไฟฟ้า 0.15 เมตร ซึ่งเป็นความสูงจากพื้นถนนถึงช่วงล่างของยานยนต์ไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 13 พบว่า ระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้า 0 เมตร ให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบพลวัตสูงสุด 26.23 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร ระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้า 0.04 เมตร ให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบพลวัตสูงสุด 18.56 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร ระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้า 0.08 เมตร ให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบพลวัตสูงสุด 8.49 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่ง $x = -0.05$ และ 0.05 เมตร

จากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าเมื่อการปรับระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้า จะพบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้าอยู่ใกล้กัน ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และช่วงของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้ากว้างกว่าแบบที่อยู่ห่างกัน ซึ่งขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้าที่อยู่ห่างกันมากจะให้อประสิทธิภาพที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร ต่ำ ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า ดังนั้น การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัต ควรทำให้ระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้าอยู่ใกล้กันและใช้วิธีการสวิตช์เลือกขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้าจึงจะเหมาะสม

4.3 เปรียบเทียบการปรับระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและภาครับพลังงานไฟฟ้า

ผลการทดสอบกรณีปรับระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและภาครับพลังงานไฟฟ้า โดยใช้รูปแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-อนุกรม และระยะห่างระหว่างวงจรภาคส่งพลังงานไฟฟ้า 0.04 เมตร ซึ่งเป็นระยะที่ให้ช่วงของประสิทธิภาพต่อเนื่อง ดังรูปที่ 14 พบว่า ระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและภาครับพลังงานไฟฟ้า 0.05 เมตร ให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบพลวัตสูงสุด 22.06 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร ระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและภาครับพลังงานไฟฟ้า 0.10 เมตร ให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบพลวัตสูงสุดที่ 25.21 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร ระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและภาครับพลังงานไฟฟ้า 0.15 เมตร ให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบพลวัตสูงสุด 18.56 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร ระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและภาครับพลังงานไฟฟ้า 0.20 เมตร ให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบพลวัตสูงสุด 19.18 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร



รูปที่ 14 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย กรณีปรับระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและภาครับพลังงานไฟฟ้า

5. สรุป

การออกแบบระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัตด้วยวิธีความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดต้องคำนึงถึงรูปแบบของวงจรเรโซแนนซ์ ระยะห่างระหว่างวงจรภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับพลังงานไฟฟ้าที่ความถี่เรโซแนนซ์ ผลจากการทดสอบเชิงเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า รูปแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-อนุกรมให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบพลวัตสูงที่สุดที่ 18.56 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับแบบอื่น โดยระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างวงจรภาคส่งพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 0.04 เมตร และระหว่างวงจรภาคส่งพลังงานไฟฟ้าและภาครับพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 0.15 เมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของวงจรเรโซแนนซ์ด้วย อีกทั้งยังจำเป็นต้องพิจารณาถึงความต่อเนื่องของการส่งพลังงานไฟฟ้าด้วย เพื่อให้ได้ทั้งประสิทธิภาพและความต่อเนื่องของการส่งพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสม

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ CIT-2020-GRAD-02



เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Shuguang, Y. Zhenxing, and L. Wenbin, "Electric vehicle dynamic wireless charging technology based on multi-parallel primary coils," presented at the IEEE International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE), Xi'an, China, Dec. 10–12, 2018.
- [2] C. Panchal, S. Stegen, and J. Lu, "Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 21, no. 5, pp. 922–937, 2018.
- [3] X. Zhang, Z. Yuan, Q. Yang, Y. Li, J. Zhu, and Y. Li, "Coil design and efficiency analysis for dynamic wireless charging system for electric vehicles," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 7, 2016.
- [4] C. Anyapo, N. Teerakawanich, and C. Mitsantisuk, "Development of multi-coils full-bridge resonant inverter for dynamic wireless power transfer," presented at the 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Phuket, Thailand, June 27–30, 2017 (in Thai).
- [5] X. Dai, J. C. Jiang, and J. Q. Wu, "Charging area determining and power enhancement method for multiexcitation unit configuration of wirelessly dynamic charging EV system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 5, pp. 4086–4096, May 2019.
- [6] S. Jeong, Y. J. Jang, D. Kum, and M. S. Lee, "Charging automation for electric vehicles : Is a smaller battery good for the wireless charging electric vehicles?," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 486–497, 2019.
- [7] Z. Bi, G. A. Keoleian, Z. Lin, M. R. Moore, K. Chen, L. Song, and Z. Zhao, "Life cycle assessment and tempo-spatial optimization of deploying dynamic wireless charging technology for electric cars," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 100, pp. 53–67, Mar. 2019.
- [8] L. Sun, D. Ma, and H. Tang, "A review of recent trends in wireless power transfer technology and its applications in electric vehicle wireless charging," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, no. C, pp. 490–503, Aug. 2018.
- [9] M. Debbou and F. Colet, "Inductive wireless power transfer for electric vehicle dynamic charging," presented at the IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), Knoxville, TN, USA, October 4–6, 2016.
- [10] A. Poorfakhraei, G. Movaghar, and F. Tahami, "Optimum design of coils in a dynamic wireless electric vehicle charger with misalignment compensation capability," presented at the 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), Mashhad, Iran, February 14–16, 2017.
- [11] S. Raju, R. Wu, M. Chan, and C. P. Yue, "Modeling of mutual coupling between planar inductors in wireless power applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 1, pp. 481–490, January 2014.