

การพัฒนางจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลาย เป็นขดส่งและขดรับกำลังงาน

อนุพงศ์ ชายทน¹ ธนาวุฒิ ปัญญาวงศ์ และเอกชัย ชัยดี^{2*}

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

รับเมื่อ 8 กุมภาพันธ์ 2560 ตอบรับเมื่อ 29 มิถุนายน 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 1 กรกฎาคม 2560

© 2017 Rajamangala University of Technology Lanna. All Rights Reserved.

บทความวิจัย

บทคัดย่อ

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดลวดทองแดงต่อกับคาปาซิเตอร์ภายนอกทำให้คาปาซิเตอร์รับแรงดันพิกัดสูงมีโอกาสเสียหายได้ง่าย การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนางจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายเป็นขดส่งและรับกำลังงาน มีข้อดีด้านความบางและน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับขดลวดทองแดง ได้ทำการออกแบบลวดขดตัวนำพื้นฐานสี่รูปแบบ คือ สี่เหลี่ยม วงกลม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม นำไปทดสอบกับเครื่องเน็ตเวิร์คออนไลน์เซอร์พบว่ารูปแบบแปดเหลี่ยมให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) ดีที่สุดจึงได้เลือกรูปแบบแปดเหลี่ยมนำไปพัฒนาเป็นขดส่งและรับกำลังงานโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบสองด้าน จากนั้นจึงทำการทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายในแต่ละกรณีผลการศึกษาพบว่า 1. การปรับค่าความถี่สามารถทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีความถี่คงที่ 2. ผลการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำโดยการเพิ่มแผ่นวงจรพิมพ์ลายพบว่ากรณีปรับค่าความถี่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีใช้ความถี่คงที่ อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าขาออกที่ได้น้อยกว่าแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายสองด้าน เนื่องจากการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้กระแสไหลผ่านขดตัวนำด้านส่งได้น้อยลง ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางการพัฒนางจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายเป็นขดส่งและรับกำลังงานได้ต่อไป

คำสำคัญ : แผ่นวงจรพิมพ์ลาย ความเหนี่ยวนำ ความถี่เรโซแนนซ์ การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

*Corresponding author : ekkachai@rmutl.ac.th, ekkachai.ch799@gmail.com Tel. 043 -723979

¹ นักศึกษา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

The Development of Wireless Power Transfer using PCB Resonators

Anupong Chayton¹ Tanawut Panyawong¹ and Ekkachai Chaidee^{2*}

Faculty of engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai

Received 8 February 2017; accepted 29 June 2017; published online 1 July 2017

© 2017 Rajamangala University of Technology Lanna. All Rights Reserved.

Research Article

Abstract

Conventional wireless power transfer using coil series with external capacitance during transfer power the capacitance is stress high voltage so the capacitance can be damage. The objective of this study is the development of wireless power transfer using PCB as transmitter and receiver. Advantage of using PCB are thin and light weight comparison with the copper coils. Square, Circle, Hexagonal and Octagonal trace are designed. They were tested to identify scattering parameter (S_{21}) by using Network Analyzer that show the octagonal trace obtained the best S_{21} . So, the octagonal trace is chosen to design as transmitter and receiver on double side board of PCB. Power transfer experiments were performed. From study results found that 1. Adjustment of frequency can increase output power comparison with constant frequency 2. Increasing inductance by increasing amount of PCB, adjustment frequency can increase output power comparison with constant frequency however, the power output less than case using double layer PCB due to increasing inductance is cause increasing of impedance so input current flow in transmitter side is decreased. The study results can be used in development of wireless power transfer using PCB as transmitter and receiver.

Keywords : PCB, inductance, resonance frequency, wireless power transfer

*Corresponding author : ekkachai@rmutl.ac.th, ekkachai.ch799@gmail.com Tel. 043 723979

¹ Student, Department of electrical engineering

² Assistant Professor, Department of electrical engineering

1. บทนำ

เทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องใช้สายตัวนำเป็นที่รู้จักครั้งแรกจากการทดลองของ นิโคลาร์ เทสเลอร์ [1] ใช้ขดตัวนำพันบนแกนอากาศทำหน้าที่เป็นขดส่งและขดรับกำลังงาน เรียกว่า ขดรีโซเนเตอร์ (Resonators) กลไกการส่งกำลังงานใช้สนามแม่เหล็ก ความถี่สูงคล่องระหว่างขดตัวนำ ซึ่งต่อมาหลักการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายจากการริเริ่มของ นิโคลาร์ เทสเลอร์ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในงานด้านพัฒนาเครื่องจักรกลไฟฟ้าในการส่งผ่านสนามแม่เหล็กจากฝั่งสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ ภายหลังจากยุคของ นิโคลาร์ เทสเลอร์ เป็นต้นมา เทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายไม่ได้รับความสนใจในการพัฒนาเท่าที่ควรอาจเนื่องมาจากความก้าวหน้าด้านอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ไม่มีความก้าวหน้าเหมือนกับในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม พบว่าเทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายได้กลับมาได้รับความสนใจอีกครั้งพิจารณาได้จากบทความงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ในการประจุแบตเตอรี่ไร้สายให้กับรถยนต์ไฟฟ้า อุปกรณ์ขนาดเล็ก งานทางการแพทย์ เป็นต้น [2 – 4]

รูปแบบการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดตัวนำพันบนแกนอากาศทำหน้าที่เป็นขดส่งและรับกำลังงานโดยใช้คาปาซิเตอร์ภายนอกต่อเข้ากับวงจรเพื่อทำให้เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ในการทำงานนั้น คาปาซิเตอร์ดังกล่าวต้องทนต่อพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้นเนื่องจากวงจรส่งกำลังงาน โดยใช้ความถี่สูงทำให้แรงดันเหนี่ยวนำจึงมีค่าสูงตาม ทำให้คาปาซิเตอร์มีโอกาสเสียหายได้ง่ายนอกจากนี้แล้วยังพบว่าการใช้ขดตัวนำเป็นขดส่งและรับกำลังงานในการประยุกต์ใช้งานบางอย่างยังมีข้อจำกัดด้านขนาดรูปร่าง

การแก้ปัญหาจากการรับพิกัดแรงดันสูงของคาปาซิเตอร์ดังกล่าว และการลดขนาดรูปร่างของ

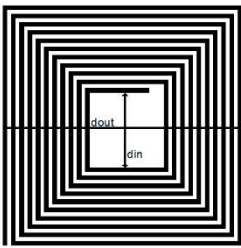
ขดตัวนำด้านส่ง และรับกำลังงานแนวทางหนึ่งสามารถทำได้โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์หลายเนื่องมาจากลักษณะขดลวดตัวนำมีค่าคาปาซิแตนซ์เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ (Parasitic capacitance) ทำให้ไม่ต้องต่อคาปาซิเตอร์ภายนอกเข้ากับวงจร และยังสามารถลดขนาดขดตัวนำได้โดยการใช้ความถี่สูง ประกอบกับแผ่นวงจรพิมพ์หลายมีลักษณะเบาบางเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานเนื่องจากขดรับกำลังงานจำเป็นต้องยึดติดกับอุปกรณ์ เช่น โทรศัพท์มือถือขนาดเล็ก นอกจากนี้แล้วปัจจุบันลักษณะของแผ่นวงจรพิมพ์หลายยังมีแบบ 2 ด้านให้เลือกใช้งานทำให้สามารถเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำของขดตัวนำได้โดยที่พื้นที่ขดตัวนำยังเท่าเดิม นอกจากนี้แล้วการใช้บนแผ่นวงจรพิมพ์หลายยังสามารถลดปรากฏการณ์ทางผิวเมื่อเทียบกับการใช้ขดลวดทองแดงที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แผ่นวงจรพิมพ์หลายมีการพัฒนาหลายด้าน เช่น การพัฒนาจอร์อินเวอร์เตอร์ความถี่สูงในระดับ MHz [5] การออกแบบขดลวดตัวนำบนแผ่นวงจร พิมพ์หลาย [5 - 6] และการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำบนแผ่นวงจรพิมพ์หลาย [7] พัฒนาสมการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำรวม [8] เป็นต้น

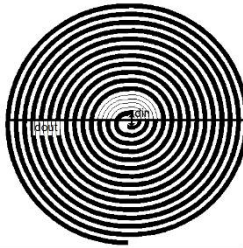
จากที่กล่าวมางานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์หลายมุ่งให้ความสำคัญไปที่การลดขนาดขดตัวนำ โดยใช้ความถี่สูงในระดับ MHz ในการวิจัยในครั้งนี้จึงพัฒนาบนแผ่นวงจรพิมพ์หลายให้สามารถทดแทนการใช้ขดลวดทองแดงโดยใช้ความถี่ระดับ kHz และเปรียบเทียบรูปแบบแผ่นวงจรพิมพ์หลายในลักษณะต่างๆ เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมได้เลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์หลาย 2 ด้านเนื่องจากสามารถเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำโดยที่ขนาดพื้นที่เท่าเดิม

2. วัตถุประสงค์

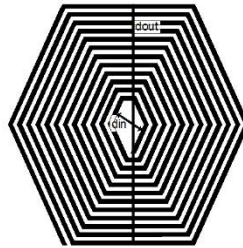
เพื่อออกแบบและสร้างวงจรส่งกำลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์หลายเป็นขดส่งและรับกำลังงาน



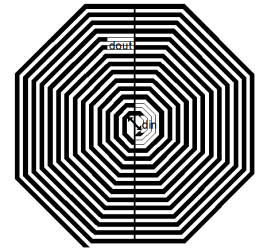
ก) แบบสี่เหลี่ยม



ข) แบบวงกลม



ค) แบบหกเหลี่ยม



ง) แบบแปดเหลี่ยม

รูปที่ 1 ลักษณะตัวนำบนแผ่นวงจรพิมพ์ลาย

เพื่อศึกษาลักษณะขดลวดตัวนำที่มีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลาย

3. แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 วงจรไฟฟ้าในสถานะรีโซแนนซ์

เมื่อวงจรอยู่ในสถานะรีโซแนนซ์ อิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าต่ำกระแสไหลผ่านวงจรได้มาก ความถี่รีโซแนนซ์สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ นำมาใช้เป็นวงจรขับให้กับวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย โดยทำงานที่ความถี่ในสถานะรีโซแนนซ์

3.2 แผ่นวงจรพิมพ์ลาย

การประยุกต์ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายเป็นขดลวดและรับกำลังงาน มีข้อดีดังนี้ เนื่องจากรูปร่างบางและน้ำหนักเบาสามารถนำไปประกอบร่วมกับอุปกรณ์ต่างๆ ได้ง่าย สามารถลดผลของปรากฏการณ์ทางผิวเมื่อเทียบกับการใช้ขดทองแดงที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

ลายแผ่นวงจรพิมพ์ลายมีค่าคาปาซิแตนซ์ภายในเกิดขึ้น ทำให้ไม่จำเป็นต้องต่อคาปาซิเตอร์ภายนอกเข้าไปในวงจรได้ การใช้วงจรพิมพ์ลาย 2 ด้าน สามารถเพิ่มความเหนียวนำได้โดยที่ขนาดเท่าเดิม

4. วิธีการวิจัย

4.1 การศึกษาลักษณะขดลวดตัวนำบนแผ่นบนแผ่นวงจรพิมพ์ลาย

รูปแบบพื้นฐานของขดตัวนำบนวงจรพิมพ์ลายมี 4 รูปแบบ คือ แบบสี่เหลี่ยม แบบวงกลม แบบหกเหลี่ยม และแบบแปดเหลี่ยม ลักษณะขดตัวนำแต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 1 การหาค่าความเหนียวนำของขดตัวนำแต่ละแบบสามารถใช้สมการที่ (2) ดังนี้ [7]

$$L = \frac{\mu_0^2 d_{avg} c_l}{2} (\ln(c_2 / \rho) + c_3 \rho + c_4 \rho^2) \quad (2)$$

$$d_{avg} = 0.5(d_{out} + d_{in}) \quad (3)$$

$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} \quad (4)$$

เมื่อ d_{out} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก d_{in} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ส่วนค่า C แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของขดตัวนำ

และแบบ รายละเอียดเพิ่มเติมสามารถศึกษาได้จาก เอกสารอ้างอิง [7] ทำการออกแบบลายขดลวดตัวนำ ดังรูปที่ 1 โดยกำหนดให้ขนาดของขดลวดตัวนำเท่ากัน คำนวณค่าความเหนี่ยวนำตามสมการที่ (2) ได้ค่าความเหนี่ยวนำ และจำนวนรอบแสดงตามตารางที่ 2

4.2 ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) ของขดลวดตัวนำ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถใน

การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าตามที่ได้ถูกอธิบายไว้ใน เอกสารอ้างอิง [9] โดยใช้ Net Work Analyzer E5063A ใช้ความถี่ทดสอบ 100 kHz – 1MHz ที่ระยะ 0-10 cm ผลการทดสอบของขดลวดตัวนำแต่ละแบบที่ระยะ 1 cm แสดงดังรูปที่ 2-5

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้จากการทดสอบ ตามรูปที่ 2 – 5 ได้ค่าที่ดีที่สุดแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของขดลวดตัวนำ

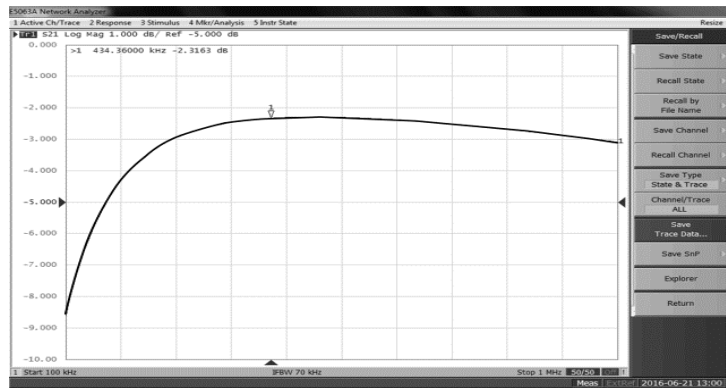
ลักษณะ	C1	C2	C3	C4
สี่เหลี่ยม	1.27	2.07	0.18	0.13
หกเหลี่ยม	1.09	2.23	0.00	0.17
แปดเหลี่ยม	1.07	2.29	0.00	0.17
วงกลม	1.00	2.46	0.00	0.20

ตารางที่ 2 แสดงค่าความเหนี่ยวนำและจำนวนรอบ

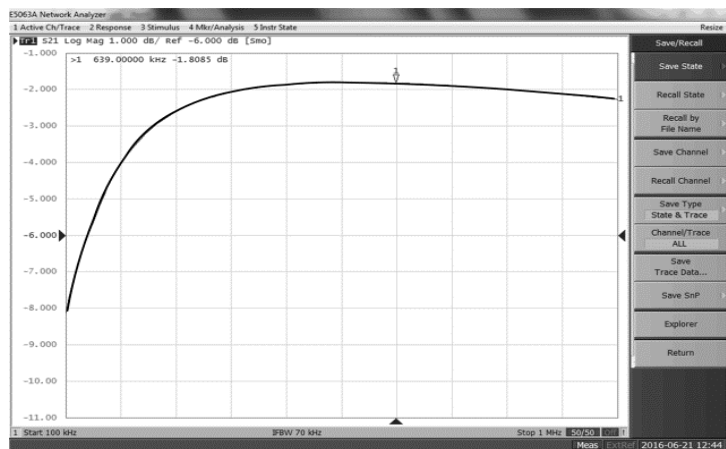
ลักษณะ	L(μH)	N(รอบ)	d_{out} (m)	d_{in} (m)
สี่เหลี่ยม	22.57	11	0.277	0.077
หกเหลี่ยม	21.65	13	0.277	0.032
แปดเหลี่ยม	22.78	14	0.277	0.019
วงกลม	22.34	14	0.277	0.012

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของขดลวดแต่ละแบบ

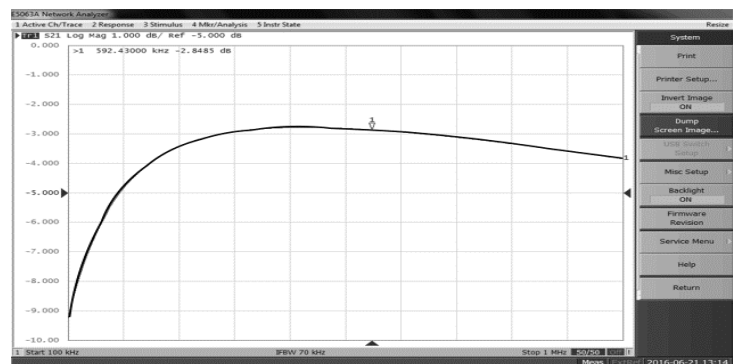
ลักษณะขดตัวนำ	S21 (dB)
สี่เหลี่ยม	-2.316
หกเหลี่ยม	-2.840
แปดเหลี่ยม	-1.805
วงกลม	-3.320



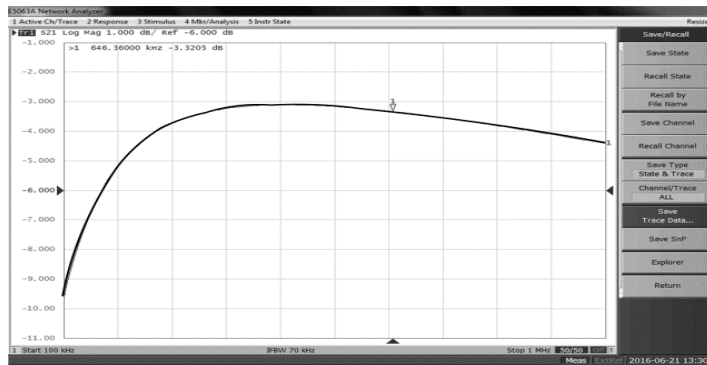
รูปที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านขดลวดตัวนำสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) ขดลวดตัวนำแปดเหลี่ยม



รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านขดลวดตัวนำหกเหลี่ยม



รูปที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านขดลวดตัวนำวงกลม

4.2.1 การออกแบบขดลวดตัวนำโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบ 2 ด้าน

จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) แสดงตามตารางที่ 2 พบว่า ตัวนำแบบแปดเหลี่ยมให้ค่าดีที่สุด คือ -1.805 ดังนั้นจึงเลือกรูปแบบแปดเหลี่ยมนำมาพัฒนาเป็นขดส่งและขดรับกำลังงานการออกแบบใช้ค่าพารามิเตอร์ตามตาราง 2 โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบ 2 ด้าน แต่ละด้านมีค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4 ลักษณะตัวนำแปดเหลี่ยมที่ได้ออกแบบตามรูปที่ 6 และ 7 ทำการวัดค่าโดยใช้ R-L-C ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ส่วนคาปาซิแตนซ์

คำนวณให้สัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ และความเหนี่ยวนำ ตามสมการที่ 5

$$C = \frac{1}{(4\pi^2 \times f_r \times L)} \quad (5)$$

4.2.2 อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

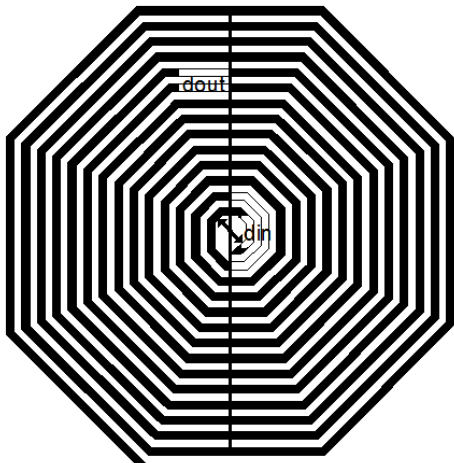
ทำหน้าที่จ่ายกำลังให้กับขดส่งกำลังงานในย่านความถี่ระดับกิโลเฮิร์ต (KHz) พัฒนามาจากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริดจ์แสดงดังรูปที่ 8 ลักษณะสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านขดส่งกำลังไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลด 25 W ที่ความถี่ 238.4 kHz แสดงดังรูปที่ 9

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ขดลวดตัวนำแปดเหลี่ยม 2 ด้าน

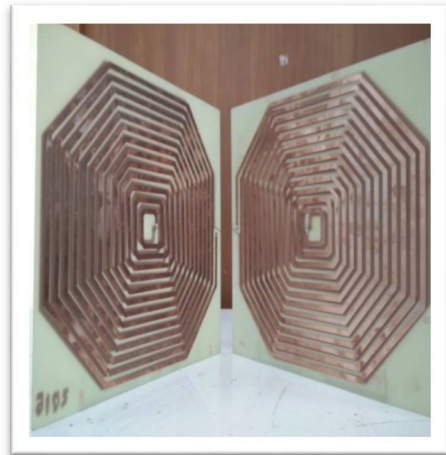
ขนาด	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2
ค่าความต้านทาน (R)	1.63Ω	1.66Ω
ค่าความเหนี่ยวนำ (L)	89.68 μH	89.90 μH
จำนวนรอบ (N)	28 รอบ	28 รอบ
ความกว้างขดตัวนำ (W)	5 mm.	5 mm.
ระยะห่างขดตัวนำ (g)	5 mm.	5 mm.

ตารางที่ 5 อุปกรณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น

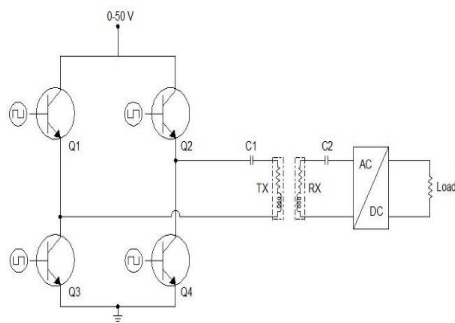
ส่วนประกอบของวงจร	อุปกรณ์
MOSFET N-Channel	IRFP 460
IC Drive	IR 2110
IC Splitter	CD 4017 BE



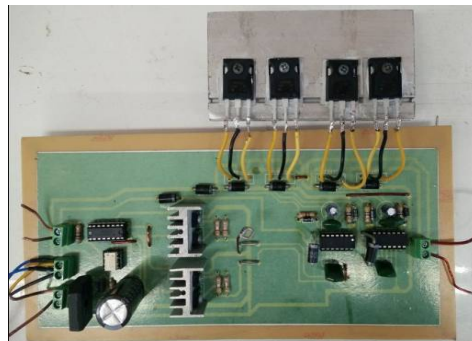
รูปที่ 6 การออกแบบขดลวดตัวนำลักษณะแปดเหลี่ยมแบบ 2 ด้าน



รูปที่ 7 ขดลวดตัวนำลักษณะแปดเหลี่ยมแบบ 2 ด้าน

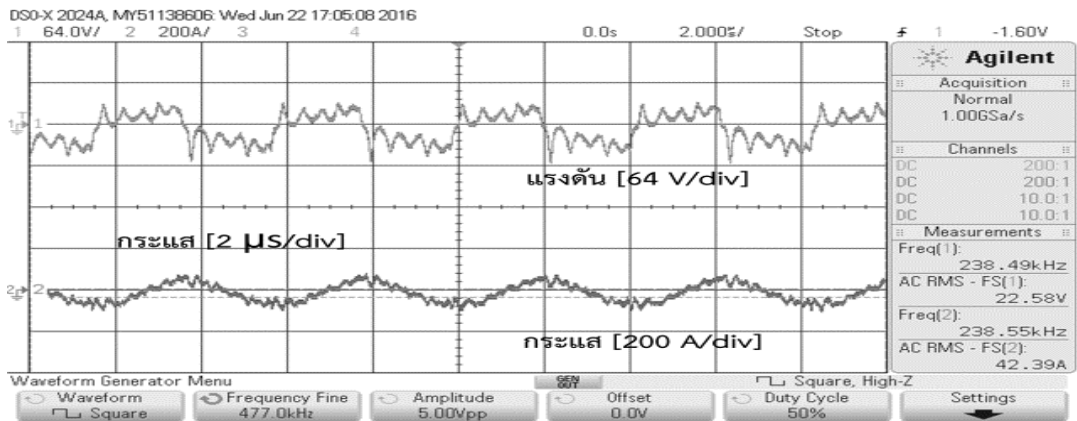


ก) ไดอะแกรมวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย



ข) วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

รูปที่ 8 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ใช้วงจรขั้วแบบเต็มคลื่น

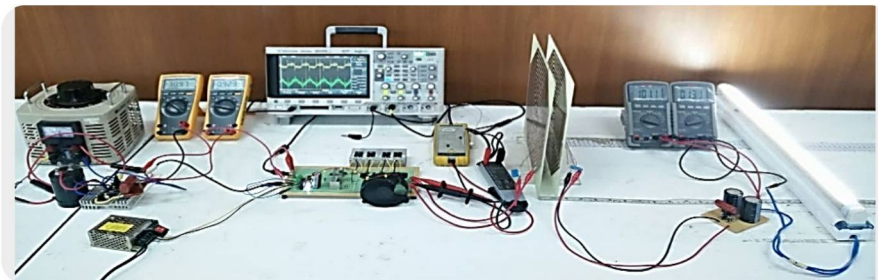


รูปที่ 9 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์

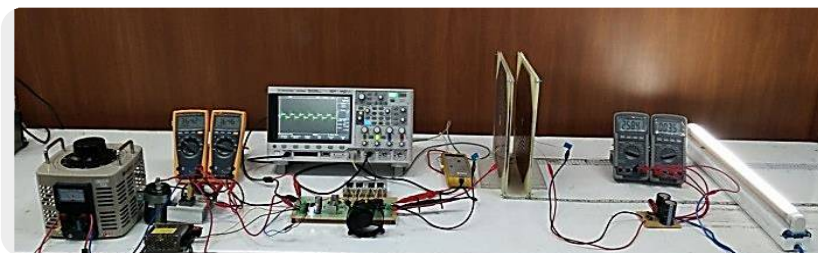
4.3 ออกแบบการทดลอง

ขดตัวนำแบบแปดเหลี่ยมบนแผ่นวงจรพิมพ์ลาย 2 ด้านที่ได้ออกแบบ ถูกนำมาทดสอบส่งกำลังไฟฟ้า ไร้สายให้กับโหลดขนาด 1.2 k Ω (25W) ป้อนแรงดัน กระแสตรงขาเข้า 25 V คงที่ตลอดการทดลองใช้

ความถี่รีโซแนนซ์ 245 kHz ปรับระยะห่างระหว่าง ขดตัวนำตั้งแต่ 0 – 10 cm และทำการทดสอบปรับ ค่าความถี่ตามการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่าง ขดตัวนำ แสดงการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายให้กับโหลด ดังรูปที่ 10 และ 11



รูปที่ 10 การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้าน ขดตัวแบบแปดเหลี่ยม



รูปที่ 11 การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้าน ด้านละ 2 แผ่น ต่อแบบอนุกรม

5. ผลการวิจัย

การทดลองทั้งหมดมี 2 กรณีใช้แรงดันกระแสตรงขาเข้า 25 V คงที่ตลอดการทดลองใช้ความถี่รีโซแนนซ์ 245 kHz จ่ายกำลังงานให้กับโหลดหลอดไส้ขนาด 1.2 k Ω (25W) โดยต่อค่าปาสเตอร์ 4.7 nF ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบ 2 ด้าน จัดวางแสดงดังรูปที่ 10 และใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบ 2 ด้าน ด้านละ 2 แผ่น ต่อแบบอนุกรม จัดวางแสดงดังรูปที่ 11 ทำการวัดค่าสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าภาคกระแตรง ด้านขาเข้า และขาออกนาค่าที่ได้นำมาคำนวณหา กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพการส่งกำลังงาน

กรณีที่ 1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้าน แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้

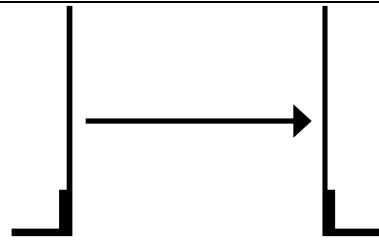
การทดลองที่ 1.1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยคงที่ความถี่ การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพในแต่ละระยะตั้งแต่ 0 - 10 cm โดยใช้ความถี่ที่ได้จากการคำนวณแสดงดังสมการที่ 1 แสดงการจัดวางตัวนำดังรูปที่ 12

ได้ลักษณะ กำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพแสดงดังรูปที่ 13 และ 14 จากรูปที่ 13 และ 14 วงจรสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 15 W ที่ระยะ 3 cm โดยที่ระยะเดียวกันได้ค่าประสิทธิภาพร้อยละ 25 ในขณะที่ประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้นร้อยละ 33 เมื่อตัวนำวางห่างกันน้อยที่สุด

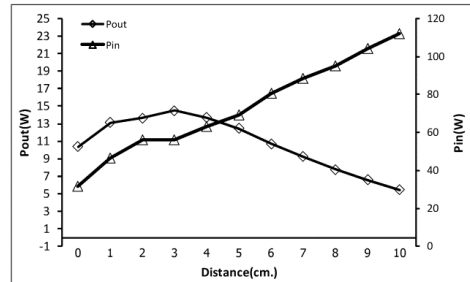
การทดลองที่ 1.2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยปรับความถี่

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความถี่ที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ โดยปรับความถี่ในแต่ละระยะตั้งแต่ 0 - 10 cm. แสดงดังรูปที่ 15 ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 16 – 19

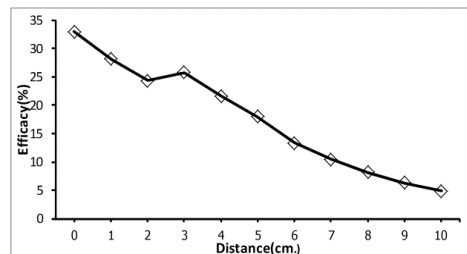
จากรูปที่ 16 และ 17 พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 18.49W ที่ระยะ 4 cm ใช้ความถี่รีโซแนนซ์ 238.5 kHz



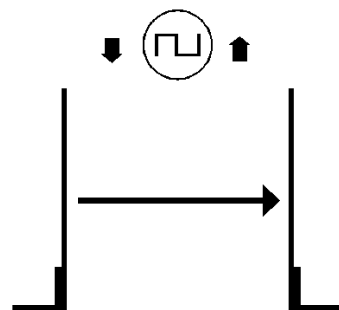
รูปที่ 12 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ความถี่คงที่



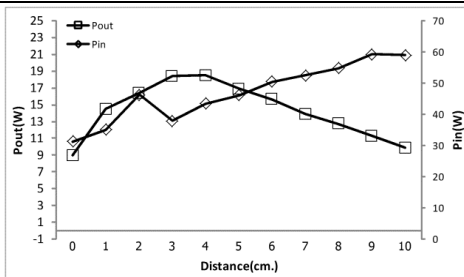
รูปที่ 13 กำลังไฟฟ้าขาออก และขาเข้า กรณีใช้ค่าความถี่คงที่ตลอดการทดลอง



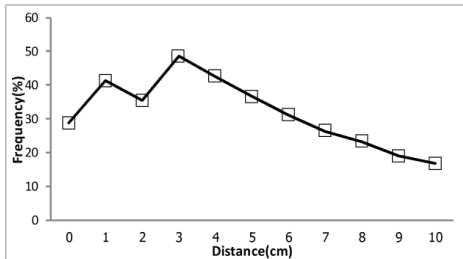
รูปที่ 14 ประสิทธิภาพกรณีใช้ค่าความถี่คงที่



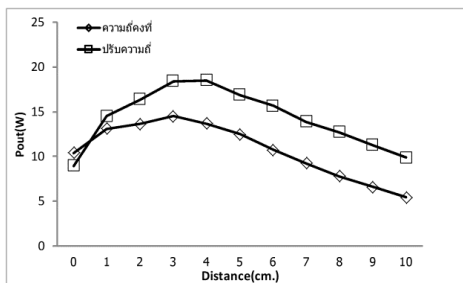
รูปที่ 15 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยปรับความถี่แต่ละระยะห่าง



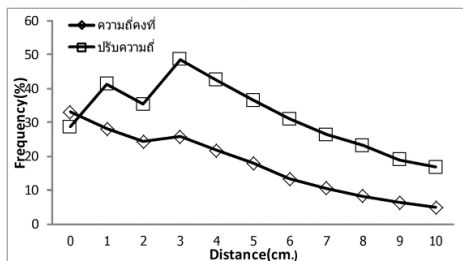
รูปที่ 16 กำลังไฟฟ้าขาเข้าและขาออก กรณีปรับความถี่แต่ละระยะห่าง



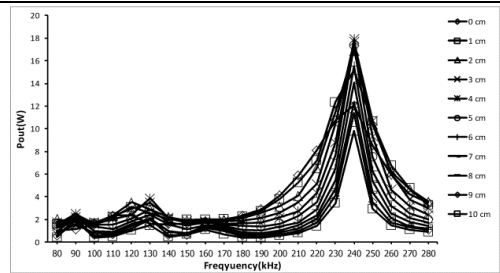
รูปที่ 17 ประสิทธิภาพ กรณีปรับความถี่แต่ละระยะห่าง



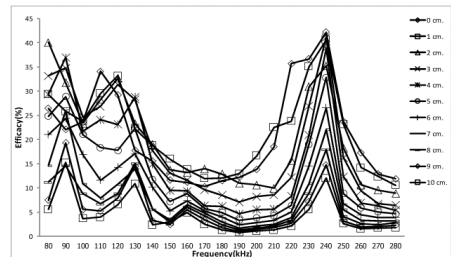
รูปที่ 18 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าขาออก กรณีใช้ความถี่คงที่และปรับความถี่ แต่ละระยะห่าง



รูปที่ 19 เปรียบเทียบประสิทธิภาพ กรณีความถี่คงที่และปรับความถี่ แต่ละระยะห่าง



รูปที่ 20 กำลังไฟฟ้าขาออกแต่ละระยะจากการปรับค่าความถี่



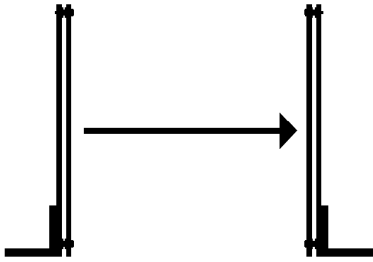
รูปที่ 21 ประสิทธิภาพแต่ละระยะจากการปรับค่าความถี่

ในขณะที่ระยะเดียวกันได้ประสิทธิภาพ ร้อยละ 41 โดยที่ประสิทธิภาพสูงสุด ร้อยละ 48.55 เกิดขึ้นที่ระยะ 3 cm

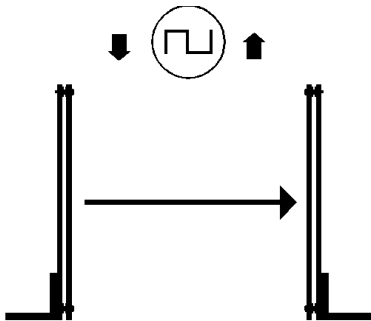
เมื่อนำผลการทดลอง กรณีใช้ความถี่คงที่เปรียบเทียบกับกรณีปรับความถี่แต่ละระยะห่าง พบว่ากำลังไฟฟ้าขาออกของการปรับความถี่เพิ่มขึ้น ร้อยละ 21.53 ที่ระยะห่าง 4 cm และมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีก ร้อยละ 32.01 ที่ระยะห่าง 3 cm

จากนั้นได้ทำการทดสอบปรับค่าความถี่แต่ละระยะโดยใช้ค่าความถี่ตั้งแต่ 80 kHz – 280 kHz ได้ลักษณะกราฟกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพแสดงดังรูปที่ 20 – 21

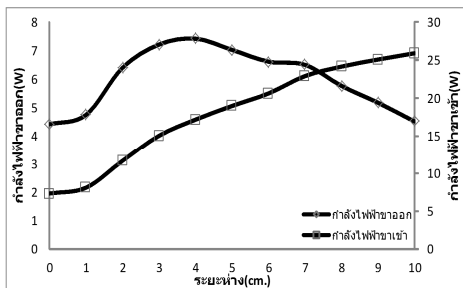
จากรูปที่ 20 และ 21 พบว่ากำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าไม่ต่างจากการใช้ความถี่รีโซแนนซ์ที่ได้จากการคำนวณมากนัก กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด 17.92 W ระยะ 4 cm ความถี่ 240 kHz ประสิทธิภาพที่ได้ ร้อยละ 42.20 ระยะ 0 cm ความถี่ 240 kHz



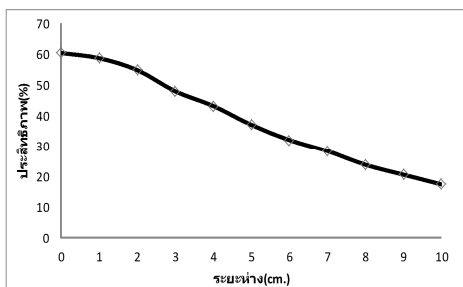
รูปที่ 22 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายคงที่ความถี่



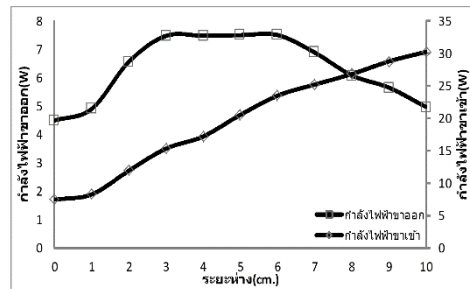
รูปที่ 23 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยปรับความถี่



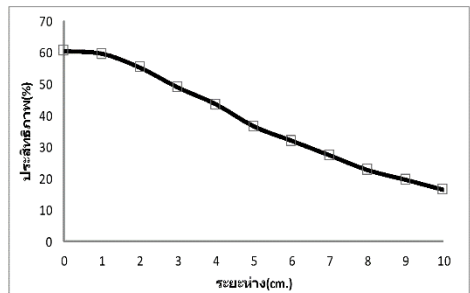
รูปที่ 24 กำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออกแบบคงที่ความถี่



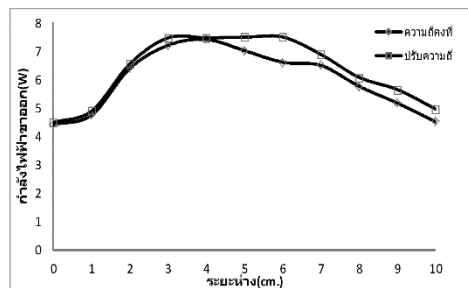
รูปที่ 25 ประสิทธิภาพแบบคงที่ความถี่



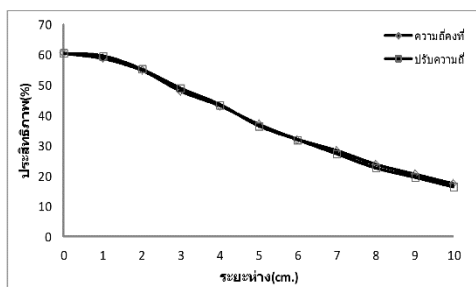
รูปที่ 26 กำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออกแบบปรับความถี่



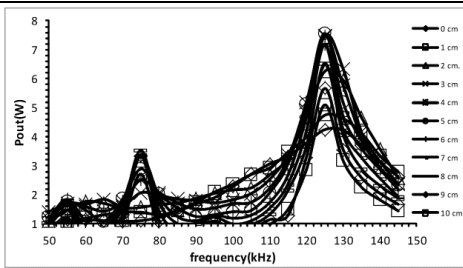
รูปที่ 27 ประสิทธิภาพแบบปรับความถี่



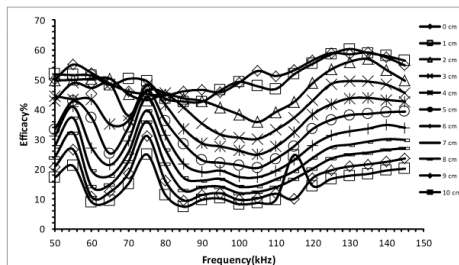
รูปที่ 28 กำลังไฟฟ้าขาออกแบบคงที่และปรับความถี่



รูปที่ 29 ประสิทธิภาพแบบคงที่และปรับความถี่



รูปที่ 30 กำลังไฟฟ้าขาออก กรณีปรับความถี่แต่ละระยะห่าง



รูปที่ 31 ประสิทธิภาพ กรณีปรับค่าความถี่แต่ละระยะห่าง

กรณีที่ 2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์แบบแปดเหลี่ยม 2 ด้าน ด้านละ 2 แผ่นต่อแบบอนุกรม

เมื่อนำแผ่นขดลวดตัวนำมาต่ออนุกรมทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ทำให้ความถี่รีโซแนนซ์ลดลง

แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง

การทดลองที่ 2.1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยคงที่ความถี่

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ เมื่อเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำให้กับขดส่งและรับกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 0-10 cm. โดยใช้ความถี่ที่ได้จากการคำนวณแสดงดังสมการที่ 1 การจัดวางตัวนำแสดงดังรูปที่ 22

การทดลองที่ 2.2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยปรับความถี่

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความถี่ที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ โดยปรับความถี่ในแต่ละระยะตั้งแต่ 0-10 cm การจัดวางตัวนำ

แสดงดังรูปที่ 23 ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 24 – 29 ดังนี้

จากรูปที่ 24 และ 25 พบว่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 7.41 W ที่ระยะ 4 cm ที่ระยะเดียวกันประสิทธิภาพ ร้อยละ 43 โดยที่ประสิทธิภาพมีค่าสูงสุดร้อยละ 60.42 เมื่อขดตัวนำวางชิดกัน

จากรูปที่ 26 และ 27 พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 7.49 W ที่ระยะ 6 cm ความถี่รีโซแนนซ์ 124.65 kHz ประสิทธิภาพที่ระยะเดียวกันร้อยละ 32.0 ประสิทธิภาพสูงสุด 60.41 เมื่อวางตัวนำชิดกัน

เมื่อนำผลการทดลอง แบบคงที่ความถี่ และปรับความถี่มาเปรียบเทียบกันพบว่า กำลังไฟฟ้าขาออกที่ได้จากการปรับความถี่เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.07 ที่ระยะ 6 cm และมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 0.56 เมื่อวางขดตัวนำชิดกันเมื่อเทียบกับการคงที่ความถี่

จากรูปที่ 30 และ 31 เมื่อทำการปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์ตั้งแต่ 50 kHz – 150 kHz ได้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ได้ 7.57 W ที่ระยะ 5 cm ใช้ความถี่ 125 kHz ประสิทธิภาพที่ได้ ร้อยละ 60.34 ระยะ 0 cm ความถี่ 130 kHz

6. อภิปรายผลการวิจัย

จากการนำลายขดลวดตัวนำแต่ละลักษณะไปทดสอบกับเครื่องเน็ตเวิร์คอนาไลเซอร์พบว่า ลักษณะที่มาค่าการส่งผ่านที่ดีที่สุดคือ ลักษณะแปดเหลี่ยม ดังนั้นจึงได้เลือกรูปแบบแปดเหลี่ยมในการทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

กรณีที่ 1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้าน

เมื่อระยะห่างระหว่างขดตัวนำเปลี่ยนแปลงทำให้อัตราส่วนการคล้องของฟลักซ์แม่เหล็กระหว่างขดส่งและขดรับกำลังงานลดลง มีผลทำให้ความเหนี่ยวนำรวมลดลง ดังนั้นจึงทำให้ความถี่รีโซแนนซ์แต่ละระยะต่างกันออกไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับ

ค่าความถี่รีโซแนนซ์เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองรูปที่ 18 เห็นได้ว่าการปรับค่าความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีใช้ความถี่คงที่

กรณีที่ 2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้าน ด้านละ 2 แผ่น ต่อแบบอนุกรม

การเพิ่มแผ่นวงจรพิมพ์หลาย ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความถี่รีโซแนนซ์มีค่าลดลงเป็นไปตามสมการความถี่รีโซแนนซ์ อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรเปลี่ยนแปลง จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปรับความถี่ทำกำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีใช้ความถี่คงที่ อย่างไรก็ตามพบว่ากำลังไฟฟ้าขาออกที่ได้ยังน้อยกว่ากรณีใช้แผ่นวงจรพิมพ์หลายแบบ 2 ด้าน ในการทดสอบกรณีที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าสูงขึ้นทำให้กระแสทางด้านขาเข้าไหลผ่านวงจรขัดส่งได้น้อย พิจารณาได้จากผลการทดลองรูปที่ 28 เปรียบเทียบกับรูปที่ 18

7. สรุป

การศึกษานี้ได้ทำการทดลองใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายเป็นขดส่งและขดรับกำลังงาน ได้ทำการออกแบบขดลวดตัวนำพื้นฐาน 4 รูปแบบ โดยออกแบบให้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากันผลการนำไปทดสอบกับเครื่องเน็ตเวิร์คโหนดไอเซอร์ พบว่ารูปแบบแปดเหลี่ยมให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) ดีที่สุด จึงได้เลือกรูปแบบแปดเหลี่ยมนำมาพัฒนาเป็นขดส่งและขดรับกำลังงานโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบ 2 ด้าน ผลการทดสอบพบว่าการปรับค่าความถี่แต่ละระยะทางให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ความถี่คงที่ จากนั้นได้ทำการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำโดยการเพิ่มจำนวนขดส่งและขดรับกำลังไฟฟ้าโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายด้านละ 2 แผ่น พบว่าการปรับ

ค่าความถี่แต่ละระยะทางสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าขาออกได้ อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเหนี่ยวนำทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรเพิ่มขึ้นทำให้กระแสไหลผ่านขดส่งได้น้อยลง

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสนับสนุนการวิจัยจากโครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์งานสร้างสรรค์ และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน (HRS) ปี 2558 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] S.Y.R. Hui, W. Zhong, and C. K. Lee. critical review of recent progress in mid- range wireless power transfer. IEEE Transection on Power Electronics, 29(9) : 4500 - 4511., 2004.
- [2] F. Muavi, M. Edington, and W. Eberle. Wireless power transfer: A survey of EV bettery charging technologies. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) : 1804 - 1810., 2012.
- [3] S. Jeong, Y. Jes Jang, and D. Kum. Economic Analysis of the Dynamic Charging Electric Vehicle. IEEE Trans. Power Electron., 30(11) : 6638 - 6377., 2015.
- [4] J.C. Lin. Wireless Power Transfer for Mobile Applications, and Health Effects. IEEE Antennas Propagat. Mag., 55(2) : 250 - 253., 2013.
- [5] P. Natthaphon et al. Wirelees Power Tranfer Based on MHz Inverter through PCB Antenna. IEEE conference on Future Energy Electronics Conference (IFEEEC) 1st International. : 126 - 130., 2013.

- [6] Claudia Pacurar et al. Inductance Calculation and Layout Optimization for Planar Spiral Inductors. Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2012 13th International Conference : 225 - 232., 2012.
- [7] S. S. Mohan et al. Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances. IEEE Journal of Solid- State Circuits, 34(10) : 1419 - 1424., 1999.
- [8] S. Raju. Wu, M. Chan and C. Patrick Yue. Modeling of Mutual Coupling Between Planar Inductors in Wireless Power Application. IEEE 29(1)., 2014.
- [9] A.P.Sample, D. A. Meyer, and J.R. Smith. Analysis, experimental results, and range adaption of magnetically coupled resonators for wireless power transfer. IEEE Trans. Ind. Electron., 55(2) : 544 - 554., 2011.