การพัฒนาวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายเป็นขดส่งและขดรับกำลังงาน

The Development of Wireless Power Transfer using PCB Resonators

อนุพงศ์ ชายทน[1], ธนาวุฒิ ปัญญาวงค์[2] และ เอกชัย ชัยดี[3*]

Anupong Chayton[1], Tanawut Panyawong[2] and Ekkachai Chaidee[3*]

[1,2,3] สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

[1,2,3] electrical engineering Faculty of engineering Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai

[*]Corresponding author: Email: ekkachai@rmutl.ac.th, ekkachai.ch799@gmail.com

บทคัดย่อ

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดลวดทองแดงต่อกับคาปาซิเตอร์ภายนอกทำให้คาปาซิเตอร์รับแรงดันพิกัดสูงมีโอกาสเสียหายได้ง่าย การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายเป็นขดส่งและรับกำลังงาน มีข้อดีด้านความบางและน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับขดลวดทองแดง ได้ทำการออกแบบลายขดตัวนำพื้นฐานสี่รูปแบบ คือ สี่เหลี่ยม วงกลม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม นำไปทดสอบกับเครื่องเน็ตเวิร์คอนาไลเซอร์พบว่ารูปแบบแปดเหลี่ยมให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) ดีที่สุด จึงได้เลือกรูปแบบแปดเหลี่ยมนำไปพัฒนาเป็นขดส่งและรับกำลังงานโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบสองด้าน จากนั้นจึงทำการทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายในแต่ละกรณีผลการศึกษาพบว่า 1) การปรับค่าความถี่สามารถทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีความถี่คงที่ 2) ผลการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำโดยการเพิ่มแผ่นวงจรพิมพ์ลาย พบว่ากรณีปรับค่าความถี่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีใช้ความถี่คงที่ อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าขาออกที่ได้น้อยกว่าแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายสองด้าน เนื่องจากการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้กระแสไหลผ่านขดตัวนำด้านส่งได้น้อยลง ผลการศึกษาสามารถใช้เป็นแนวทางการพัฒนาวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายเป็นขดส่งและรับกำลังงานได้ต่อไป

คำสำคัญ: แผ่นวงจรพิมพ์ลาย, ความเหนี่ยวนำ, ความถี่รีโซแนนซ์, การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

วารสารราชมงคลล้านนา RMUTL Journal of Rajamangala Lanna

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 lightly and low weight comparison copper coils. Square, Circle, Hexagonal and Octagonal trace are designed. They were tested to identify scattering parameter (S21) by using Network Analyzer that show the octagonal trace obtained the best S21. 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 deceased. 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

บทนำ

เทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้โดยไม่ใช้สายตัวนำ เป็นที่รู้จักครั้งแรกจากการทดลองของนิโคลาร์ เทสลาร์ (S.Y.R. Hui et al, 2014) นิโคลาร์ เทสลาร์ ใช้ขดตัวนำพันบนแกนอากาศทำหน้าที่เป็นขดส่งและขดรับกำลังงาน เรียกว่า ขดรีโซเนเตอร์ (Resonators) กลไกการส่งกำลังงานใช้สนามแม่เหล็กความถี่สูงคล้องระหว่างขดตัวนำ ซึ่งต่อมาหลักการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายจากการริเริ่มของนิโคลาร์ เทสลาร์ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในงานด้านพัฒนาเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในการส่งผ่านสนามแม่เหล็กจากฝั่งสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ ภายหลังจากยุคของนิโคลาร์ เทสลาร์ เป็นต้นมา เทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายไม่ได้รับความสนใจในการพัฒนาเท่าที่ควร อาจเนื่องมาจากความก้าวหน้าด้านอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ไม่มีความก้าวหน้าเหมือนกับในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม พบว่าเทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายได้กลับมาได้รับความสนใจอีกครั้ง พิจารณาได้จากบทความงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ในการประจุแบตเตอรี่ไร้สายให้กับ รถยนต์ไฟฟ้า อุปกรณ์ขนาดเล็ก งานทางการแพทย์ เป็นต้น (F. Muavi et al, 2012 ; S. Jeong et al, 2015 ; J.C. Lin et al, 2013)

รูปแบบการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดตัวนำพันบนแกนอากาศทำหน้าที่เป็นขดส่งและรับกำลังงานโดยใช้คาปาซิเตอร์ภายนอกต่อเข้ากับวงจรเพื่อทำให้เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ ในการทำงานนั้น คาปาซิเตอร์ดังกล่าวต้องทนต่อพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูง ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากวงจรส่งกำลังงาน โดยใช้ความถี่สูงทำให้แรงดันเหนี่ยวนำจึงมีค่าสูงตามทำให้คาปาซิเตอร์มีโอกาสเสียหายได้ง่าย นอกจากนี้แล้วยังพบว่าการใช้ขดตัวนำเป็นขดส่งและรับกำลังงาน ในการประยุกต์ใช้งานบางอย่างยังมีข้อจำกัดด้านขนาดรูปร่าง

การแก้ปัญหาจากการรับพิกัดแรงดันสูงของคาปาซิเตอร์ดังกล่าว และการลดขนาดรูปร่างของขดตัวนำด้านส่งและรับกำลังงาน แนวทางหนึ่งสามารถทำได้โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลาย เนื่องจากลักษณะขดลวดตัวนำมีค่าคาปาซิแตนซ์เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ (Parasitic capacitance) ทำให้ไม่ต้องต่อคาปาซิเตอร์ภายนอกเข้ากับวงจร และยังสามารถลดขนาดขดตัวนำได้โดยการใช้ความถี่สูงประกอบกับแผ่นวงจรพิมพ์ลายมีลักษณะเบาบาง เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานเนื่องจากขดรับกำลังงานจำเป็นต้องยึดติดกับอุปกรณ์ เช่น โทรศัพท์มือถือขนาดเล็ก นอกจากนี้แล้วปัจจุบันลักษณะของแผ่นวงจรพิมพ์ลายยังมีแบบ 2 ด้านให้เลือกใช้งานทำให้สามารถเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำของขดตัวนำได้ โดยที่พื้นที่ขดตัวนำยังเท่าเดิม นอกจากนี้แล้วการใช้บนแผ่นวงจรพิมพ์ลายยังสามารถลดปรากฏการณ์ทางผิวเมื่อเทียบกับการใช้ขดลวดทองแดงที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการกับการประยุกต์ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลาย มีการพัฒนาหลายด้าน เช่น การพัฒนาวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงในระดับ MHz (Natthaphon et al,2013) การออกแบบขดลวดตัวนำบนแผ่นวงจรพิมพ์ลาย (Claudia Pacurar et al,2012 ; Natthaphon et al,2013) และการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำบนแผ่นวงจรพิมพ์ลาย (Sunderarajan S. Mohan et al,1999) พัฒนาสมการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำร่วม (S. Raju et al, 2014) เป็นต้น

จากที่กล่าวมางานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ลายมุ่งให้ความสำคัญไปที่การลดขนาดขดตัวนำ โดยใช้ความถี่สูงในระดับ MHz ในการวิจัยในครั้งนี้จึงพัฒนาบนแผ่นวงจรพิมพ์ลายให้สามารถทดแทนการใช้ขดลวดทองแดงโดยใช้ความถี่ระดับ kHz และเปรียบเทียบรูปแบบแผ่นวงจรพิมพ์ลายในลักษณะต่างๆ เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสม ได้เลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลาย 2 ด้าน เนื่องจากสามารถเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำโดยที่ขนาดพื้นที่เท่าเดิม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างวงจรส่งกำลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายเป็นขดส่งและรับกำลังงาน

2. เพื่อศึกษาลักษณะขดลวดตัวนำที่มีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลาย

วารสารราชมงคลล้านนา Journal of Rajamangala Lanna

แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. วงจรไฟฟ้าในสภาวะรีโซแนนซ์

เมื่อวงจรอยู่ในสภาวะรีโซแนนซ์ อิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าต่ำ กระแสไหลผ่านวงจรได้มาก ความถี่รีโซแนนซ์สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

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

2. วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ นำมาใช้เป็นวงจรขับให้กับวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย โดยทำงานที่ความถี่ในสภาวะรีโซแนนซ์

3. แผ่นวงจรพิมพ์ลาย

การประยุกต์ใช้แผ่นวงพิมพ์ลายเป็นขดส่งและรับกำลังงาน มีข้อดีดังนี้ เนื่องจากรูปร่างบางและน้ำหนักเบา สามารถนำไปประกอบร่วมกับอุปกรณ์ต่างๆ ได้ง่าย สามารถลดผลของปรากฏการณ์ทางผิวเมื่อเทียบกับการใช้ขดทองแดงที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน ลายแผ่นวงจรพิมพ์ลายมีค่าคาปาซิแตนซ์ภายในเกิดขึ้น ทำให้ไม่จำเป็นต้องต่อคาปาซิเตอร์ภายนอกเข้าไปในวงจรได้ การใช้วงจรพิมพ์ลาย 2 ด้าน สามารถเพิ่มความเหนี่ยวนำได้โดยที่ขนาดเท่าเดิม

วิธีการวิจัย

1. การศึกษาลักษณะขดลวดตัวนำบนแผ่นบนแผ่นวงจรพิมพ์ลาย

รูปแบบพื้นฐานของขดตัวนำบนวงจรพิมพ์ลาย มี 4 รูปแบบ คือ แบบสี่เหลี่ยม แบบวงกลม แบบหกเหลี่ยม และแบบแปดเหลี่ยม ลักษณะขดตัวนำแต่ละแบบแสดงดังภาพที่ 1 ดังนี้

วารสารราชมงคลล้านนา
Rangala Lanna



ก) แบบสี่เหลี่ยม ข) แบบวงกลม

ค) แบบหกเหลี่ยม ง) แบบแปดเหลี่ยม

ภาพที่ 1 ลักษณะตัวนำบนแผ่นบนแผ่นวงจรพิมพ์ลาย

การหาค่าความเหนี่ยวนำของขดตัวนำแต่ละแบบสามารถใช้สมการที่ (2) ดังนี้ (S.S. Mohan, 1999)

$$L = \frac{un^2 d_{avg} c_1}{2}(ln(c_2/\rho) + c_3\rho + c_4\rho^2) \qquad (2)$$

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

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

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

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

ทำการออกแบบลายขดลวดตัวนำดังรูปที่ 1 โดยกำหนดให้ขนาดของขดลวดตัวนำเท่ากัน คำนวณค่าความเหนี่ยวนำตามสมการที่ (2) ได้ค่าความเหนี่ยวนำ และจำนวนรอบแสดงตามตารางที่ 2 ดังนี้

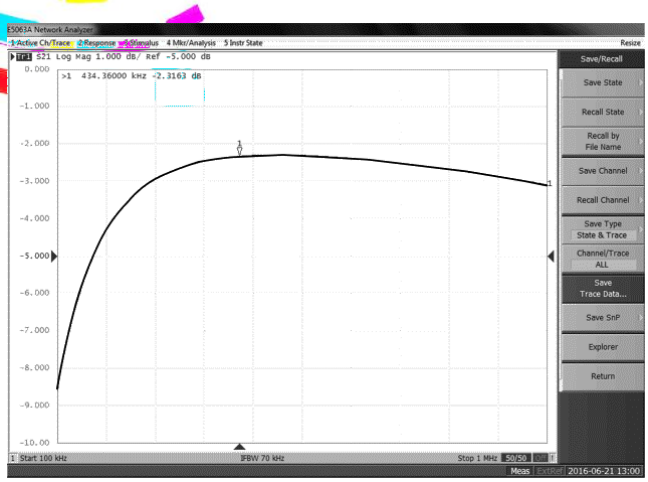
ตารางที่ 2 แสดงค่าความเหนี่ยวนำและจำนวนรอบ

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

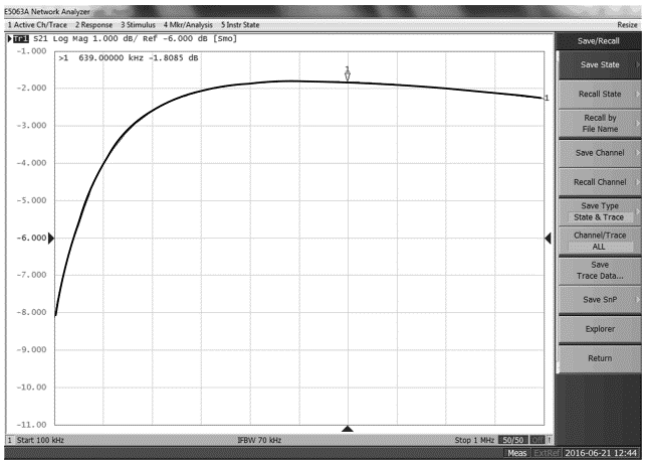
วารสารราชมงคลล้านนา
RMUTL
Journal of Rajamangala Lanna

2. ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) ของขดลวดตัวนำ

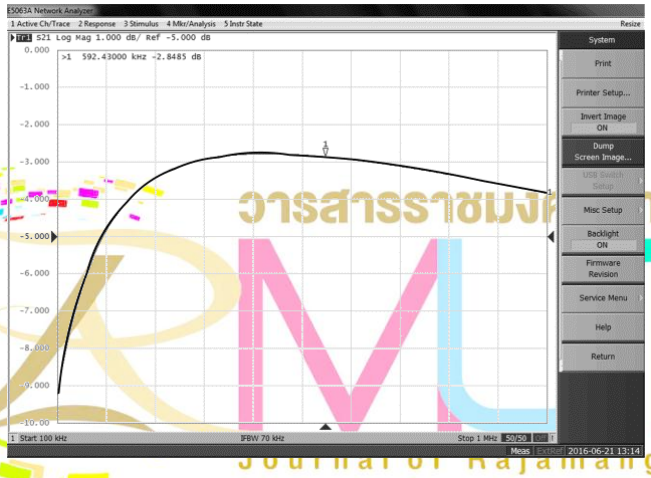
ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) โดยใช้ Net Work Analyzer E5063A ใช้ความถี่ทดสอบ 100 kHz – 1MHz ที่ระยะ 0-10 cm ผลการทดสอบของขดลวดตัวนำแต่ละแบบที่ระยะ 1 cm แสดงดังภาพที่ 2-5 ดังนี้



ภาพที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านขดลวดตัวนำสี่เหลี่ยม

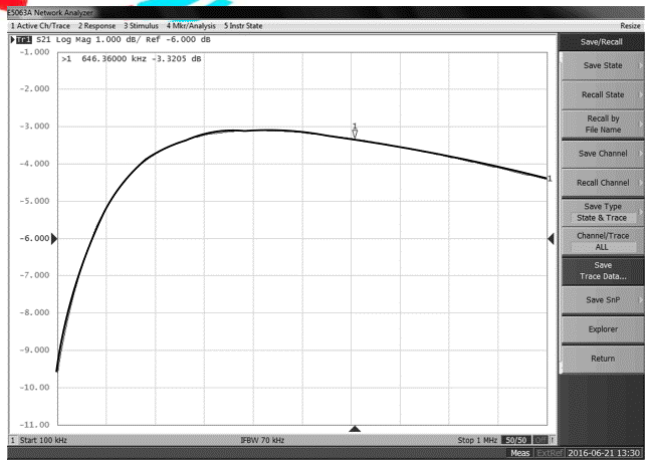


ภาพที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านขดลวดตัวนำแปดเหลี่ยม



วารสารราชมงคลล้านนา
Journal of Rajamangala Lanna

ภาพที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านขดลวดตัวนำหกเหลี่ยม



ภาพที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านขดลวดตัวนำวงกลม

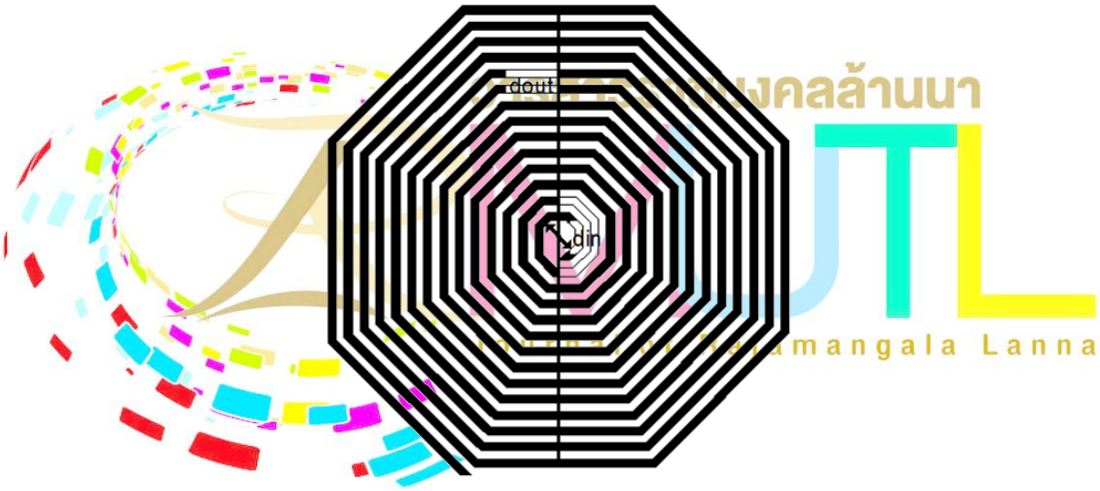
ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้จากการทดสอบตามภาพที่ 2 – 5 ได้ค่าที่ดีที่สุดแสดงดังตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของขดลวดแต่ละแบบ

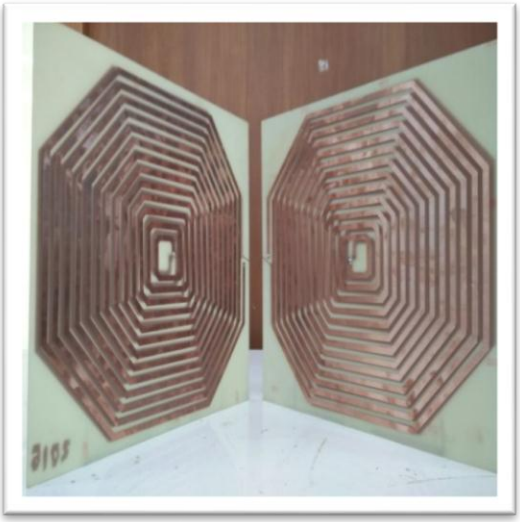
ลักษณะขดตัวนำ	S21 (dB)
สี่เหลี่ยม	-2.316
แปดเหลี่ยม	-1.805
หกเหลี่ยม	-2.840
วงกลม	-3.320

2.1 การออกแบบขดลวดตัวนำโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบ 2 ด้าน

จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) แสดงตามตารางที่ 2 พบว่า ตัวนำแบบแปดเหลี่ยมให้ค่าดีที่สุด คือ -1.805 ดังนั้นจึงเลือกรูปแบบแปดเหลี่ยมนำมาพัฒนาเป็นขดส่งและขดรับกำลังงาน การออกแบบใช้ค่าพารามิเตอร์ตามตาราง 2 โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบ 2 ด้าน แต่ละด้านมีค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4 ลักษณะตัวนำแปดเหลี่ยมที่ได้ออกแบบตามภาพที่ 6 และ 7 ดังนี้



ภาพที่ 6 การออกแบบขดลวดตัวนำลักษณะแปดเหลี่ยมแบบ 2 ด้าน



ภาพที่ 7 ขดลวดตัวนำลักษณะแปดเหลี่ยมแบบ 2 ด้าน

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ขดลวดตัวนำแปดเหลี่ยม 2 ด้าน

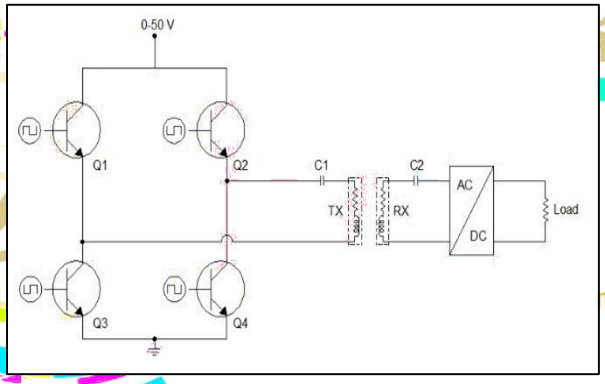
ขนาด	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2
ค่าความต้านทาน (R)	1.63Ω	1.66Ω
ค่าความเหนี่ยวนำ (L)	$89.68\mu H$	$89.90\mu H$
จำนวนรอบ (N)	28 รอบ	28 รอบ
ความกว้างขดตัวนำ (W)	5 mm.	5 mm.
ระยะห่างขดตัวนำ (g)	5 mm.	5 mm.

ทำการวัดค่าโดยใช้ R-L-C ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ส่วนคาปาซิแตนซ์คำนวณให้สัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ และความเหนี่ยวนำ ตามสมการ

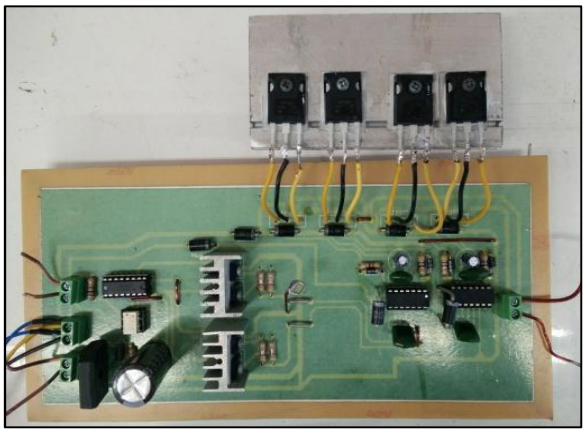
$$C = \frac{1}{\left(4\pi^2 \times f_r \times L\right)} \quad (5)$$

2.2 อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

ทำหน้าที่จ่ายกำลังให้กับขดส่งกำลังงาน ในย่านความถี่ระดับกิโลเฮิร์ต(KHz) พัฒนามาจากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริดจ์แสดงดังภาพที่ 8



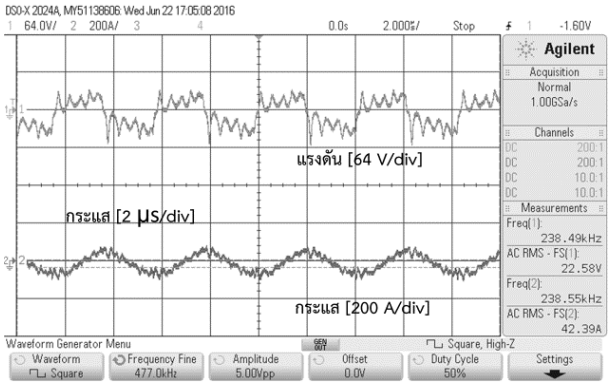
ก) ไดอะแกรมวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย



ข) วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

ภาพที่ 8 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ใช้วงจรขับแบบเต็มคลื่น

ลักษณะสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านขดส่งกำลังไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลด 25W ที่ความถี่ 238.4 kHz แสดงดังภาพที่ 9 ดังนี้



ภาพที่ 9 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 5 อุปกรณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น

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

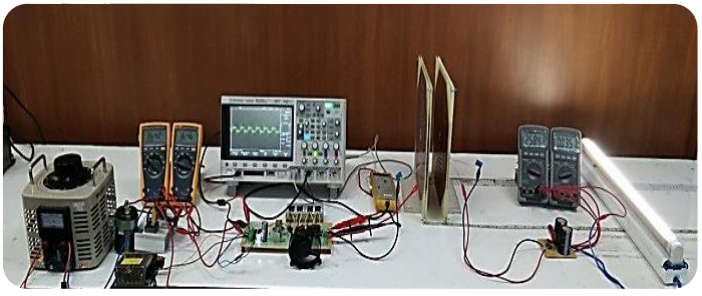
2.3 ออกแบบการทดลอง

ขดตัวนำแบบแปดเหลี่ยมบนแผ่นวงจรพิมพ์ลาย 2 ด้านที่ได้ออกแบบ ถูกนำมาทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายให้กับโหลดขนาด 1.2 kΩ (25W) ป้อนแรงดันกระแสตรงขาเข้า 25 V คงที่ตลอดการทดลอง ใช้ความถี่รีโซแนนซ์ 245 kHz ปรับระยะห่างระหว่างขดตัวนำตั้งแต่ 0 – 10 cm และทำการทดสอบปรับค่าความถี่ตามการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างขดตัวนำ แสดงการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายให้กับโหลดดังภาพที่ 10 และ 11 ดังนี้

วารสารราชมงคลล้านนา
Journal of Rajamangala Lanna



ภาพที่ 10 การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้าน ขดตัวนำแบบแปดเหลี่ยม



ภาพที่ 11 การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้าน ด้านละ 2 แผ่น ต่อแบบอนุกรม

ผลการวิจัย

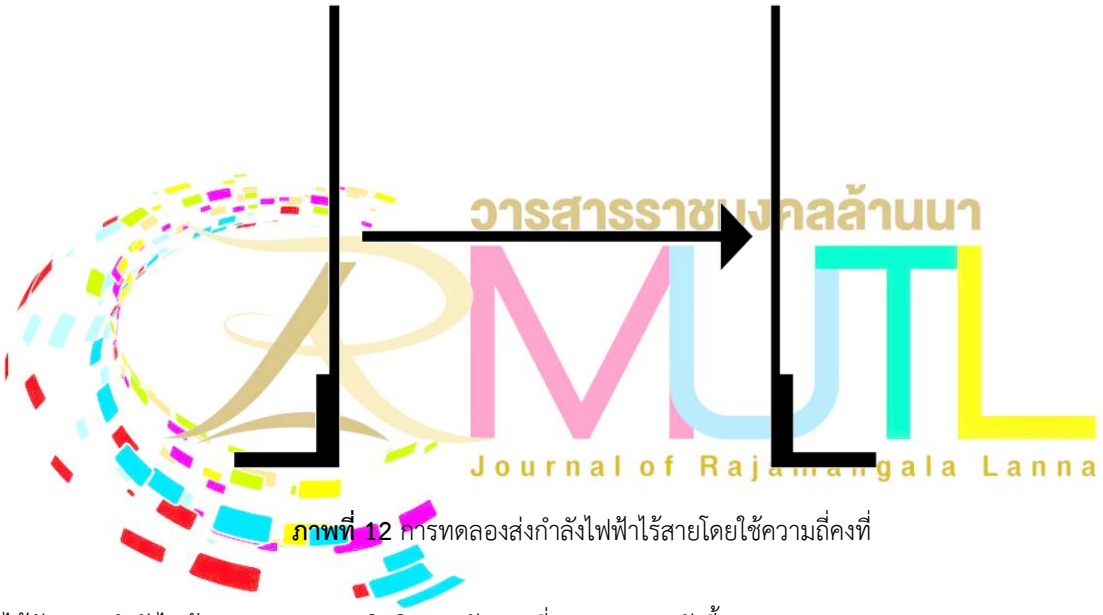
การทดลองทั้งหมดมี 2 กรณีใช้แรงดันกระแสตรงขาเข้า 25 V คงที่ตลอดการทดลอง ใช้ความถี่รีโซแนนซ์ 245 kHz จ่ายกำลังงานให้กับโหลดหลอดไส้ขนาด 1.2 kΩ (25W) โดยต่อค่าปาซิเตอร์ 4.7 nF ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบ 2 ด้าน จัดวางแสดงดังรูปที่ 10และใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบ 2 ด้าน ด้านละ 2 แผ่น ต่อแบบอนุกรม จัดวางแสดงดังรูปที่ 11 ทำการวัดค่าสัญญาณแรงดัน และกระแสไฟฟ้าภาคกระแสตรง ด้านขาเข้า และขาออก นำค่าที่ได้นำมาคำนวณหากำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพการส่งกำลังงาน

กรณีที่ 1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้าน

แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้

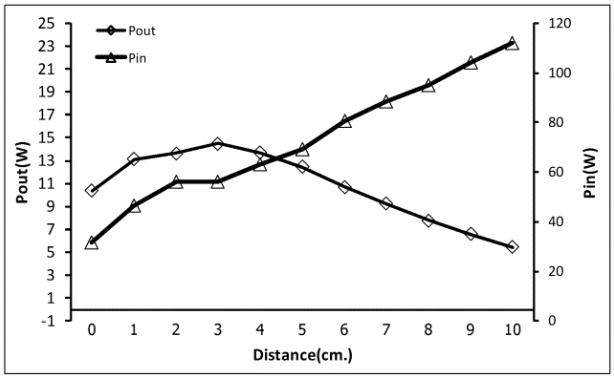
การทดลองที่ 1.1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยคงที่ความถี่

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพในแต่ละระยะตั้งแต่ 0-10 cm โดยใช้ความถี่ที่ได้จากการคำนวณแสดงดังสมการที่ 1 แสดงการจัดวางตัวนำดังภาพที่ 12 ดังนี้

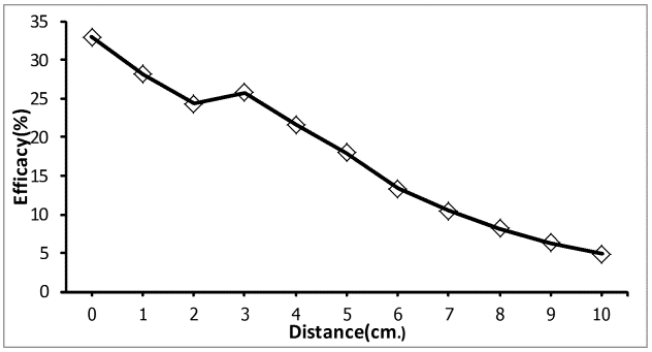


ภาพที่ 12 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ความถี่คงที่

ได้ลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิแสดงดังภาพที่ 13 และ 14 ดังนี้



ภาพที่ 13 กำลังไฟฟ้าขาออก และขาเข้า กรณีใช้ค่าความถี่คงที่ตลอดการทดลอง

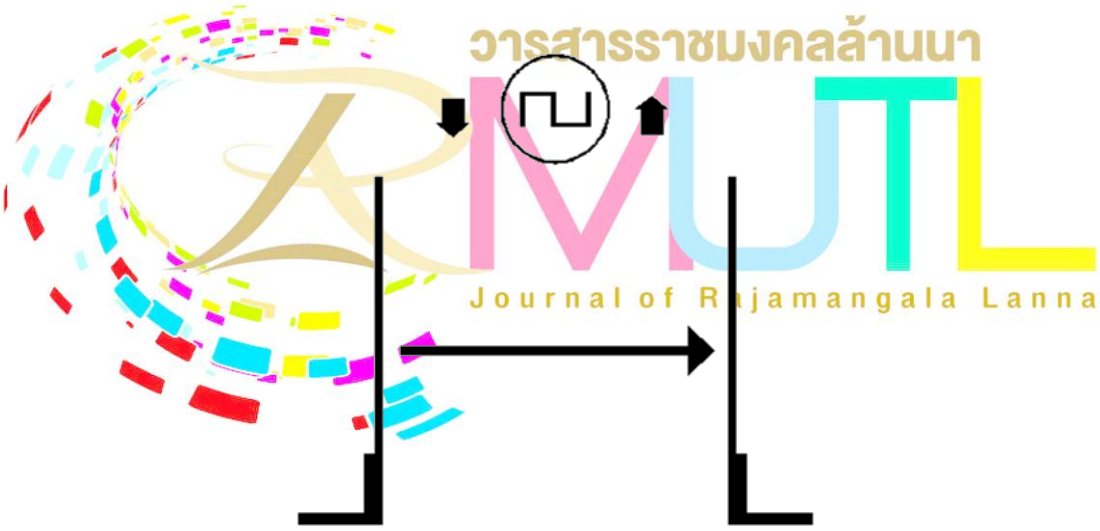


ภาพที่ 14 ประสิทธิภาพกรณีใช้ค่าความถี่คงที่

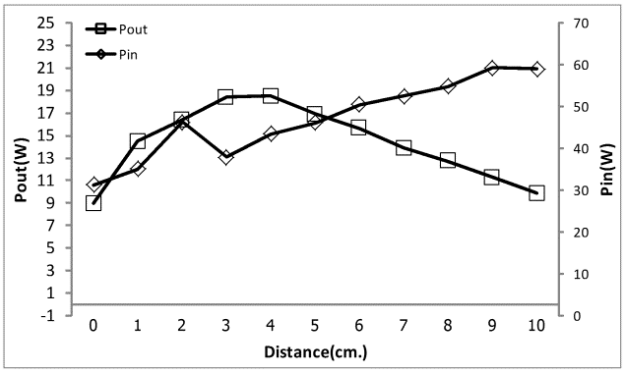
จากภาพที่ 13 และ 14 วงจรสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 15 W ที่ระยะ 3 cm โดยที่ระยะเดียวกันได้ค่าประสิทธิภาพ 25 % ในขณะที่ประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้น 33% เมื่อตัวนำวางห่างกันน้อยที่สุด

การทดลองที่ 1.2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยปรับความถี่

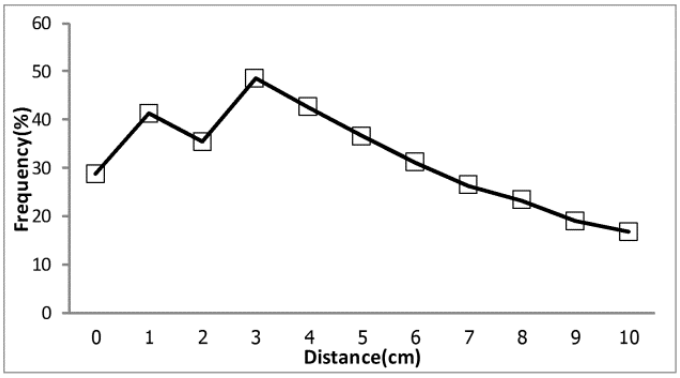
การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความถี่ที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ โดยปรับความถี่ในแต่ละระยะตั้งแต่ 0-10 cm. แสดงดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยปรับความถี่แต่ละระยะห่างได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 16–19 ดังนี้

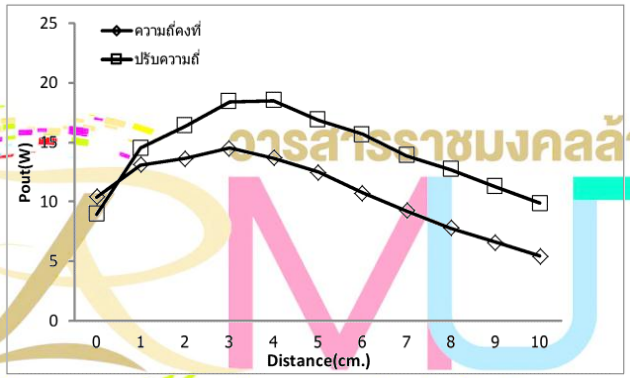


ภาพที่ 16 กำลังไฟฟ้าขาเข้าและขาออก กรณีปรับความถี่แต่ละระยะห่าง



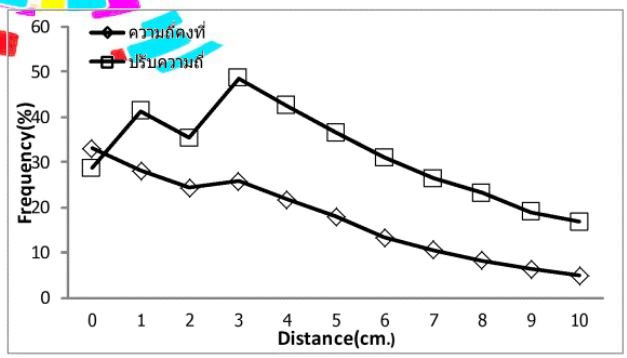
ภาพที่ 17 ประสิทธิภาพ กรณีปรับความถี่แต่ละระยะห่าง

จากภาพที่ 16 และ 17 พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 18.49W ที่ระยะ 4 cm ใช้ความถี่รีโซแนนซ์ 238.5 kHz ในขณะที่ระยะเดียวกันได้ประสิทธิภาพ 41% โดยที่ประสิทธิสูงสุด 48.55% เกิดขึ้นที่ระยะ 3 cm



วารสารราชมงคลล้านนา
RMUTL
Journal of Rajamangala Lanna

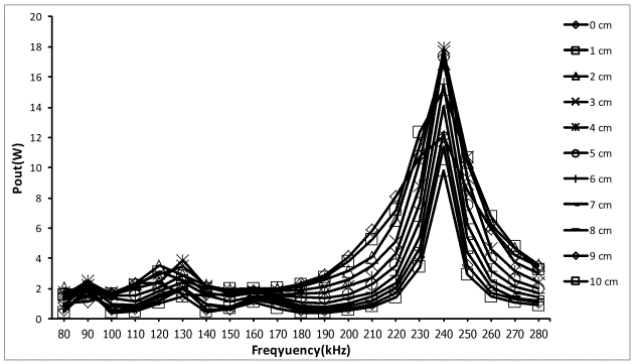
ภาพที่ 18 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าขาออก กรณีใช้ความถี่คงที่และปรับความถี่ แต่ละระยะห่าง



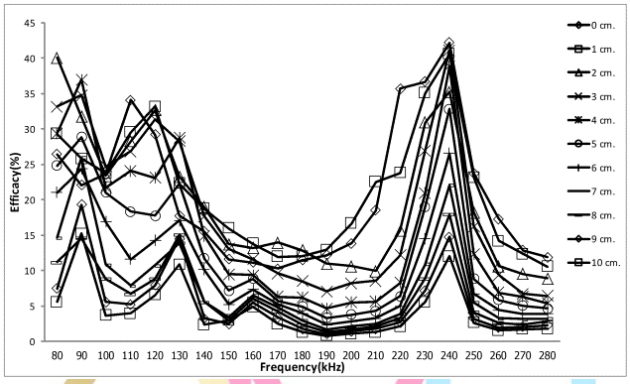
ภาพที่ 19 เปรียบเทียบประสิทธิภาพ กรณีความถี่คงที่และปรับความถี่ แต่ละระยะห่าง

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

จากนั้นได้ทำการทดสอบปรับค่าความถี่แต่ละระยะโดยใช้ค่าความถี่ตั้งแต่ 80 kHz – 280 kHz ได้ลักษณะกราฟกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ แสดงดังภาพที่ 20 – 21 ดังนี้



ภาพที่ 20 กำลังไฟฟ้าขาออกแต่ละระยะจากการปรับค่าความถี่



ภาพที่ 21 ประสิทธิภาพแต่ละระยะจากการปรับค่าความถี่

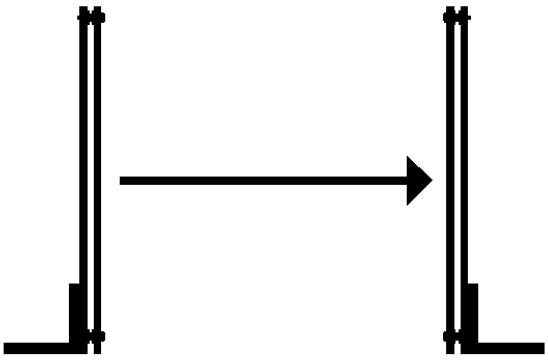
จากภาพที่ 20 และ 21 พบว่า กำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าไม่ต่างจากการใช้ความถี่รีโซแนนซ์ที่ได้จากการคำนวณมากนัก กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด 17.92 W ระยะ 4 cm. ความถี่ 240 kHz ประสิทธิภาพที่ได้ 42.20 % ระยะ 0 cm. ความถี่ 240 kHz

กรณีที่ 2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์แบบแปดเหลี่ยม 2 ด้าน ด้านละ 2 แผ่น ต่อแบบอนุกรม

เมื่อนำแผ่นขดลวดตัวนำมาต่ออนุกรมทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ทำให้ความถี่รีโซแนนซ์ลดลง แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 2.1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยคงที่ความถี่

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ เมื่อเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำให้กับขดส่งและรับกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 0-10 cm. โดยใช้ความถี่ที่ได้จากการคำนวณแสดงดังสมการที่ 1 การจัดวางตัวนำแสดงดังภาพที่ 22 ดังนี้

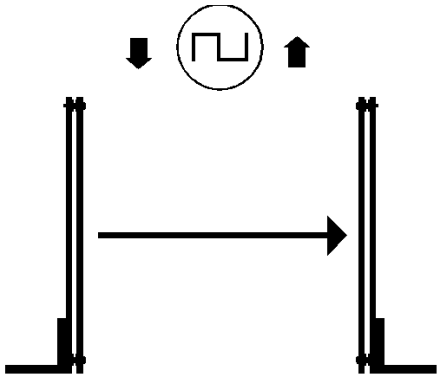


ภาพที่ 22 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายคงที่ความถี่

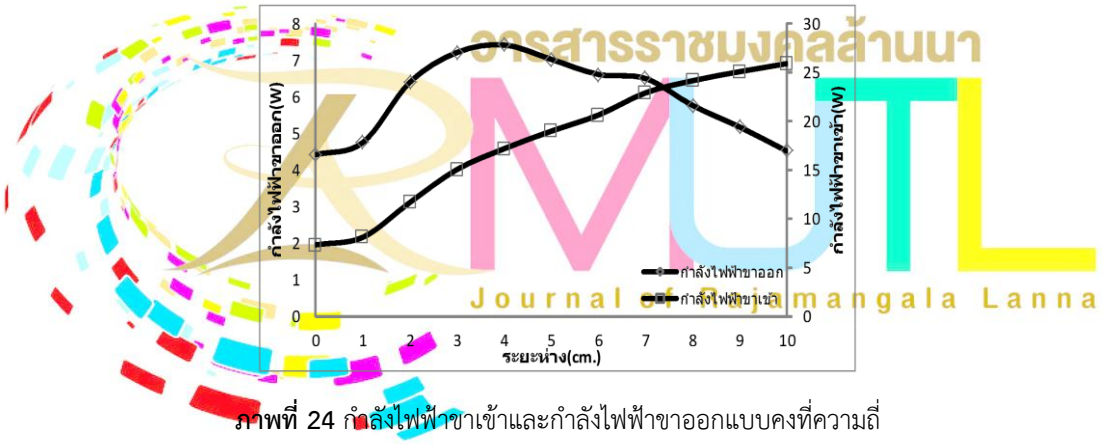
Journal of Rajamangala Lanna

การทดลองที่ 2.2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยปรับความถี่

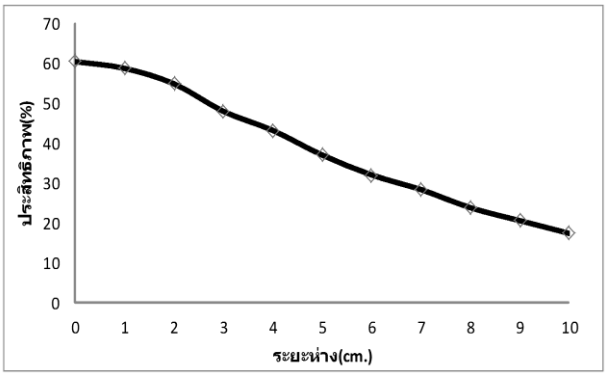
การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความถี่ที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ โดยปรับความถี่ในแต่ละระยะตั้งแต่ 0-10 cm การจัดวางตัวนำแสดงดังรูปที่ 23 ได้ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 24 – 29 ดังนี้



ภาพที่ 23 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยปรับความถี่

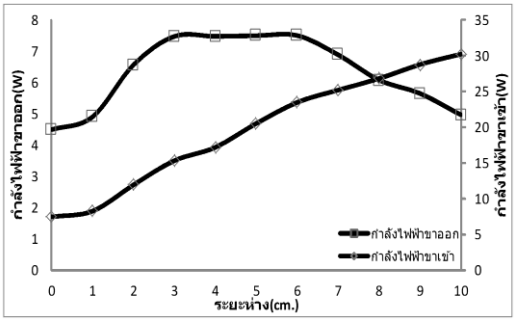


ภาพที่ 24 กำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออกแบบคงที่ความถี่

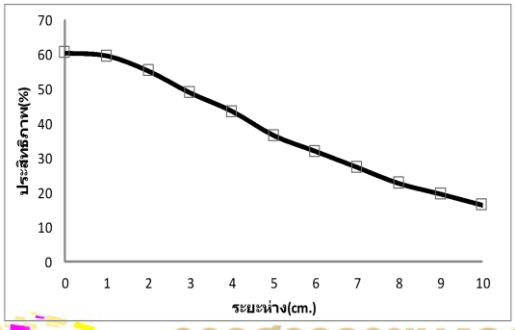


ภาพที่ 25 ประสิทธิภาพแบบคงที่ความถี่

จากภาพที่ 24 และ 25 พบว่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 7.41 W ที่ระยะ 4 cm ที่ระยะเดียวกับประสิทธิภาพ 43 % โดยที่ประสิทธิภาพมีค่าสูงสุด 60.42% เมื่อขดตัวนำวางชิดกัน

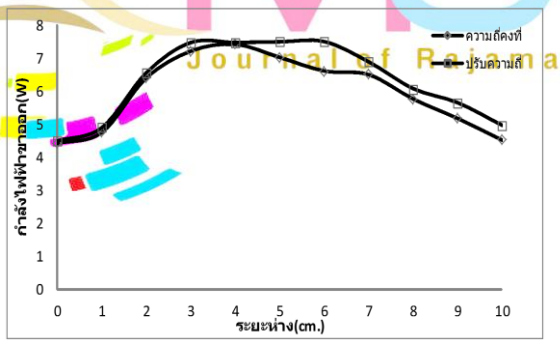


ภาพที่ 26 กำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออกแบบปรับความถี่

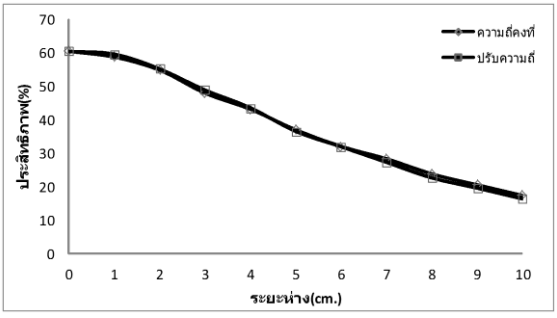


ภาพที่ 27 ประสิทธิภาพแบบปรับความถี่

จากภาพที่ 26 และ 27 พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 7.49W ที่ระยะ 6 cm ความถี่รีโซแนนซ์ 124.65 kHz ประสิทธิภาพที่ระยะเดียวกัน 32.05% ประสิทธิภาพสูงสุด 60.41 เมื่อวางตัวนำชิดกัน



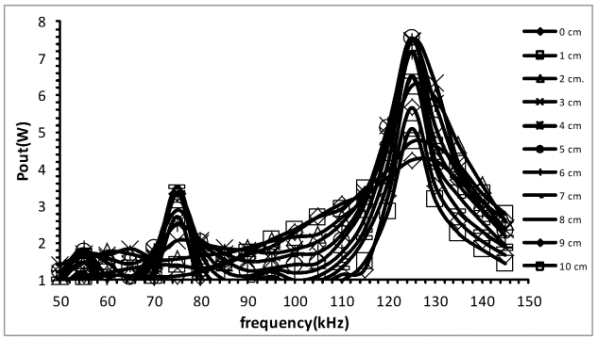
ภาพที่ 28 กำลังไฟฟ้าขาออกแบบคงที่และปรับความถี่



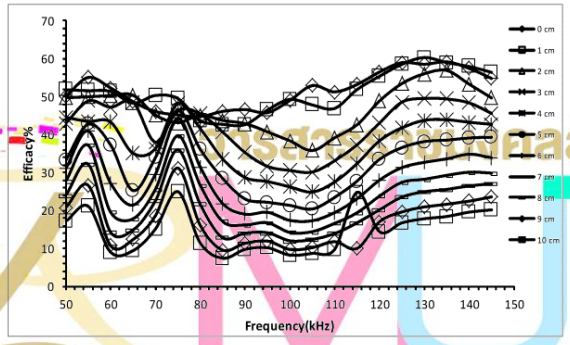
ภาพที่ 29 ประสิทธิภาพแบบคงที่และปรับความถี่

วารสารราชมงคลล้านนา
MUTL
Journal of Rajamangala Lanna

เมื่อนำผลการทดลอง แบบคงที่ความถี่และปรับความถี่มาเปรียบเทียบกันพบว่า กำลังไฟฟ้าขาออกที่ได้จากการปรับความถี่เพิ่มขึ้น 1.07% ที่ระยะ 6 cm และมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีก 0.56% เมื่อวางขดตัวนำชิดกัน เมื่อเทียบกับการคงที่ความถี่



ภาพที่ 30 กำลังไฟฟ้าขาออก กรณีปรับความถี่แต่ละระยะห่าง



ภาพที่ 31 ประสิทธิภาพ กรณีปรับค่าความถี่แต่ละระยะห่าง

มหาวิทยาลัยราชมงคลล้านนา
RMUTL
Journal of Rajamangala Lanna

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

อภิปรายผลการวิจัย

จากการนำลายขดลวดตัวนำแต่ละลักษณะไปทดสอบกับเครื่องเน็ตเวิร์คอนาไลเซอร์พบว่า ลักษณะที่มาค่าการส่งผ่านที่ดีที่สุดคือ ลักษณะแปดเหลี่ยม

กรณีที่ 1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้าน

เมื่อระยะห่างระหว่างขดตัวนำเปลี่ยนแปลงทำให้อัตราส่วนการคล้องของฟลักซ์แม่เหล็กระหว่างขดส่งและขดรับกำลังงานลดลง มีผลทำให้ความเหนี่ยวนำร่วมลดลง ดังนั้นจึงทำให้ความถี่รีโซแนนซ์แต่ละระยะต่างกันออกไป ดังนั้นจึงจำเป็นปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองเห็นได้ว่าการปรับค่าความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีใช้ความถี่คงที่

กรณีที่ 2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้าน ด้านละ 2 แผ่น ต่อแบบอนุกรม

การเพิ่มแผ่นวงจรพิมพ์ลาย ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความถี่รีโซแนนซ์มีค่าลดลงเป็นไปตามสมการความถี่รีโซแนนซ์ อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรเปลี่ยนแปลง จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปรับความถี่ทำกำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีใช้ความถี่คงที่ อย่างไรก็ตามพบว่ากำลังไฟฟ้าขาออกที่ได้ยังน้อยกว่ากรณีใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบ 2 ด้าน ในการทดสอบกรณีที่ 1

ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าสูงขึ้นทำให้กระแสทางด้านขาเข้าไหลผ่านวงจรขดส่งได้น้อย

สรุป

การศึกษานี้ได้ทำการทดลองใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายเป็นขดส่งและขดรับกำลังงาน ได้ทำการออกแบบขดลวดตัวนำพื้นฐาน 4 รูปแบบ โดยออกแบบให้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากัน ผลการนำไปทดสอบกับเครื่องเน็ตเวิร์คอนาไลเซอร์ พบว่า รูปแบบแปดเหลี่ยมให้ค่าสัมประสิทธิการส่งผ่าน (S21) ดีที่สุด จึงได้เลือกรูปแบบแปดเหลี่ยมนำมาพัฒนาเป็นขดส่งและขดรับกำลังงานโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบ 2 ด้าน ผลการทดสอบพบว่า การปรับค่าความถี่แต่ละระยะห่างให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ความถี่คงที่ จากนั้นได้ทำการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำโดยการเพิ่มจำนวนขดส่งและขดรับกำลังงานโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายด้านละ 2 แผ่น พบว่าการปรับค่าความถี่แต่ละระยะห่างสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าขาออกได้ อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเหนี่ยวนำทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรเพิ่มขึ้นทำให้กระแสไหลผ่านขดส่งได้น้อยลง

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการยกระดับปริญญานิพนธ์เป็นงานวิจัยตีพิมพ์งานสร้างสรรค์ และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน (HRS) ปี 2558 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

เอกสารอ้างอิง

Claudia Pacurar et al. (2012). Inductance Calculation and Layout Optimization for Planar Spiral Inductors. **Optimization of Electrical and Electronic Equipment** (OPTIM) 2012, 13th. International Conference. pp. 225-232.

F. Muavi, M. Edington, and W. Eberle. (2012). Wireless power transfer: A survey of EV bettery charging technologies. **Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**. 1804-1810.

J.C. Lin. (2013). Wireless Power Transfer for Mobile Applications, and Health Effects. **IEEE Antennas Propagat Mag**. vol.55, (no.2). 250-253.

P. Natthaphon et al. (2013). Wirelees Power Tranfer Based on MHz Inverter through PCB Antenna. **IEEE conference on Future Energy Electronics Conference (IFEEC) 1st International**. 126-130.

S. Jeong, Y. Jes Jang, and D. Kum. (2015). Economic Analysis of the Dynamic Charging Electric Vehicle. **IEEE Trans. Power Electron.**, vol.30, (no. 11). pp.6368-6377.

S. Raju, R. Wu, M. Chan and C. Patrick Yue.(2014). Modeling of Mutual Coupling Between Planar Inductors in Wireless Power Application. **IEEE Transection on power electronics**. vol.29, (no.1).

S. S. Mohan et al. (1999). Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, vol.34, (no.10). 1419-1424.

S.Y.R. Hui, W.Zhong, and C. K. Lee. (2014). critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer. **IEEE Transection on Power Electronics**. vol.29, (no.9). pp.4500-4511.

วารสารราชมงคลล้านนา
Journal of Rajamangala Lanna