บทความวิจัย (Research Article)

การสร้างและทดสอบเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

Construction and Testing of A Wireless Power Transmitter

ธนพล ตรีธรรมานุรักษ์[1], จีรณัฐ ทัดจำปา[1], ศุภวิชญ์ หลักบุญ[1], สรอรรจ เทียมศรีทัศนากร[1], ภมร ศิลาพันธ์[1]* และ วินัย ใจกล้า[2]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
[2] ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
* ผู้รับผิดชอบบทความ
silapan_p@su.ac.th

Received: 23 Jan 2021
Revised: 9 Apr 2021
Accepted: 29 Apr 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพและสร้างระบบเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรสร้างความถี่สูงและวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ ในการทดลองใช้ความถี่เรโซแนนซ์จากการคำนวณคือ 49.2kHz โดยการต่อ Load เป็นหลอดไฟ LED 2 ขนาด คือ LED 12W/12V และ LED 4W/12V ซึ่งผลการทดลองแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ทำให้หลอดไฟ LED 12W/12V ส่องสว่างอยู่ คือ 7.08V และ 0.01A ตามลำดับ ที่ระยะ 19cm ส่วนหลอดไฟ LED 4W/12V แรงดันไฟฟ้า 7.40V และกระแสไฟฟ้า 0.01A ที่ระยะ 20cm ประสิทธิภาพของเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายขึ้นอยู่กับระยะห่างของขดลวด โดยที่ช่วงความถี่ที่ให้ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าได้ดีที่สุดคือช่วงความถี่เรโซแนนซ์

คำสำคัญ: เครื่องส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ความถี่เรโซแนนซ์

Abstract

The purpose of the article is to study factors that affected and developed the wireless power transfer system. The system consists of a high-frequency generator and a half-bridge converter. The experiment used the calculated resonance frequency is 49.2kHz. The loads use LED bulbs, LED 12V/12W, and LED 12V/4W. The experiment results, the voltage and current of LED 12V/12W illuminated are 7.08V, and 10mA at 19cm. The LED 12V/4W illuminated are 7.40V and 10mA at 20cm. The wireless power transmitter's performance depends on the pitch between the transmitter and receiver coil, where the frequency range that provides the best electric efficiency is the resonant frequency range.

Keywords: Wireless power transfer, Half-bridge converters, Resonance frequency

1. บทนำ

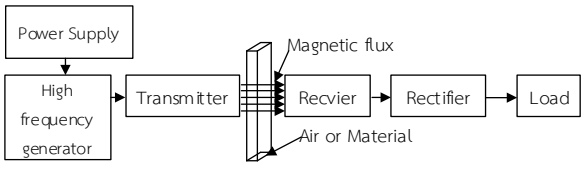
ปัจจุบันการส่งกำลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายถูกนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น แท่นชาร์จแบตเตอรี่สำหรับโทรศัพท์มือถือ ระบบชาร์จพลังงานของรถยนต์ไฟฟ้าและยานพาหนะอื่นๆ [1-2] อีกทั้งหุ่นยนต์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม เป็นต้น การศึกษาส่งกำลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายโดยใช้สนามแม่เหล็ก [3-4] เกี่ยวคล้องระหว่างขดลวดตัวนำ ผ่านตัวกลางอากาศ ขดลวดตัวนำ ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ สร้างเป็นลูปตัวนำที่เรียกว่า Loop resonator [5] จากนั้นใช้ขดลวดตัวนำปฐมภูมิทำหน้าที่เป็นตัวส่งและใช้ขดลวดตัวนำทุติยภูมิทำหน้าที่เป็นตัวรับ

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ 1) แบบแผ่กระจาย 2) แบบไม่แผ่กระจายพลังงาน ซึ่งแบบแผ่กระจายพลังงาน เป็นการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่สูง โดยกำลังไฟฟ้าจะถูกปล่อยออกมาจากสายอากาศ ในลักษณะการแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กผ่านตัวกลาง เช่น สุญญากาศ หรืออากาศ ได้ในระยะทางไกล ส่วนแบบไม่แผ่กระจายกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านตัวกลางที่ใช้สนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้องระหว่างลูปตัวนำถูกส่งผ่านได้ในระยะทางใกล้

จากการศึกษาแนวคิดพื้นฐานของระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ทางผู้วิจัยจึงได้สร้างเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ส่งผ่านพลังงานด้วยสนามแม่เหล็ก [6] เกี่ยวคล้องระหว่างตัวนำด้านส่งและรับโดยผ่านตัวนำอากาศ ตัวนำทั้งสองด้านเป็นการต่ออนุกรมระหว่างพารามิเตอร์ของขดลวดและตัวเก็บประจุเพื่อทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ที่สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์สามารถนำไปประยุกต์เข้ากับงานที่ใช้การส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

2. การออกแบบวงจร

การออกแบบและการสร้างเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ใช้หลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเรโซแนนซ์ โดยสร้างขดลวดขึ้นมาสองชุดมีขดลวดตัวนำด้านส่งและขดลวดตัวนำด้านรับสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศได้ด้วยหลักการเหนี่ยวนำ



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

บล็อกไดอะแกรมเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายในรูปที่ 1 แสดงภาพรวมของเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ประกอบด้วยภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Power supply) ภาควงจรสร้างความถี่สูง (High frequency generator) ภาคส่งกำลังไฟฟ้า (Transmitter) ซึ่งมีวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter) และขดลวดตัวนำด้านส่งกำลัง (Inductance transmitter) ส่วนภาครับประกอบด้วย ขดลวดตัวนำด้านรับ (Inductance receiver) และวงจรเรียงกระแส อย่างละหนึ่งตัว โดยหน้าที่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงคือจ่ายกำลังไฟฟ้าให้วงจรสร้างความถี่สูง เพื่อผลิตความถี่ให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ โดยส่งพลังงานให้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์ให้ไปขับขดลวดตัวนำด้านส่งกำลัง ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด ฟลักซ์แม่เหล็กส่งผ่านพลังงานแม่เหล็กผ่านอากาศให้กับขดลวดตัวนำด้านรับ เมื่อได้รับพลังงานแม่เหล็กทำให้ตัวรับเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้าที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจึงต้องผ่านวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงให้อยู่ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงก่อนจ่ายให้กับภาระ (Load)

2.1 วงจรสร้างความถี่สูง

วงจรสร้างสัญญาณความถี่ออกแบบโดยใช้ไอซี SG3525 และ IR2110 ที่แสดงดังรูปที่ 2 (ก) เพื่อสร้างสัญญาณความถี่ในรูปแบบของสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) สามารถสร้างความถี่ได้ 100Hz – 400kHz ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงขนาด 8-35V

2.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์

วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่แสดงในรูปที่ 2 (ข) ถูกออกแบบด้วยวงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์โดยมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมแบบฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ [7] ซึ่งวงจรคอนเวอร์เตอร์ในบทความนี้ออกแบบมาเพื่อรับสัญญาณ PWM ความถี่สูง ดังนั้นจึงเลือกใช้อุปกรณ์พาวเวอร์มอสเฟตเบอร์ IRF640 สร้างเป็นอุปกรณ์สวิตช์ ด้วยอุปกรณ์ IRF640 นั้นสามารถทำงานแบบสวิตชิ่งที่ความถี่สูงได้ มีกำลังสูญเสียขณะสวิตชิ่งต่ำใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงขนาด 25V

2.3 ขดลวดตัวนำด้านรับและส่ง

สภาวะเรโซแนนซ์เกิดขึ้นกับวงจรก็ต่อเมื่อค่าความต้านทานของขดลวดทองแดง (X_L) มีค่าเท่ากับค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุ (X_C) จากการหักล้างเป็นศูนย์เนื่องจากค่า X_L เป็นบวก ส่วนค่าของ X_C เป็นลบ ($X_L - X_C = 0$) ทำให้กระแสไฟฟ้าไหล

ได้สูงสุดบนขดลวดและสนามแม่เหล็กแผ่ออกมา เกิดการส่งกำลังไฟฟ้าสนามแม่เหล็กสูงสุด

การออกแบบขดลวดตัวนำใช้ลักษณะการพันแบบคอยล์เนื่องจากใช้พื้นที่น้อย แต่เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าขดลวดแบบคอยล์จะทำให้สามารถสร้าง ฟลักซ์แม่เหล็กได้น้อยกว่าขดลวดแบบสี่เหลี่ยม การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำแกนอากาศคำนวณได้ดังนี้

$$L = \frac{d^2 n^2}{18d + 40l} \quad (1)$$

L คือ ค่าความเหนี่ยมนำ (μH)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด (cm)

l คือ ความยาวของขดลวด (cm)

n คือ จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำหรับคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ

พารามิเตอร์	ค่า
d	3.2cm
l	0.2363cm
n	12รอบ

จากสมการ (1) ทำการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำโดยกำหนดพารามิเตอร์ดังตารางที่ 1 มีค่า

$$L = \frac{3.2^2 \times 12^2}{18(3.2) + 40(0.2363)} = 19\mu H$$

จาก $X_L = X_C$ สามารถคำนวณหาค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (f) ในสภาวะเรโซแนนซ์ได้ดังนี้

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

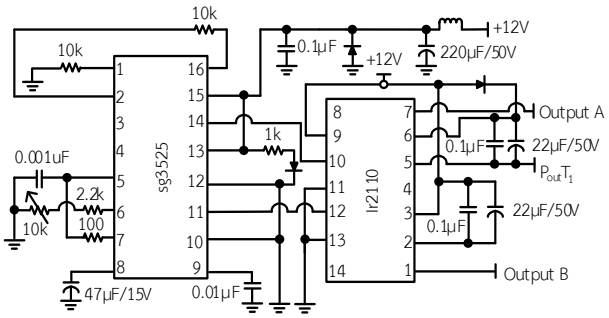
เมื่อคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ (L) ซึ่งได้เท่ากับ 19 μH และกำหนดค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 0.47 μF แทนค่าลงในสมการ (3) จะได้ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าดังนี้

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(19\mu)(0.47\mu)}} = 49.2kHz \quad (4)$$

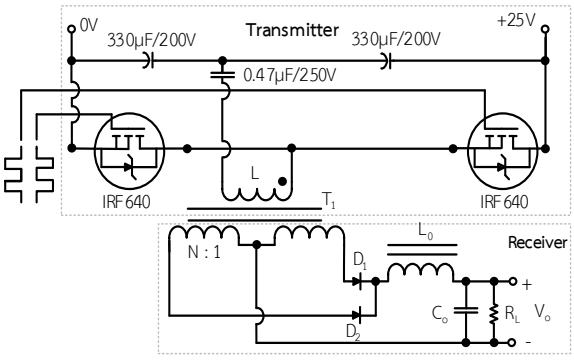
3. การดำเนินงาน

3.1 โครงสร้างของเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

การออกแบบแผ่นยึดขดลวดด้านส่งและด้านรับประกอบด้วยแผ่นอะคลีลิกหนาขนาด 3cm ด้านส่งตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความยาวด้านละ 30cm และด้านรับตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสความยาวด้านละ 40cm ภายในเป็นวงกลมสำหรับยึดใส่ขดลวดของเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ส่วนการออกแบบโครงสร้างของเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายทำการออกแบบโดยใช้โครงไม้ความยาว 97cm และความกว้าง 45cm โดยมีการแบ่งภาคส่งและภาครับด้วยแผ่นอะคลีลิกเพื่อใช้ในการวางอุปกรณ์ต่างๆ

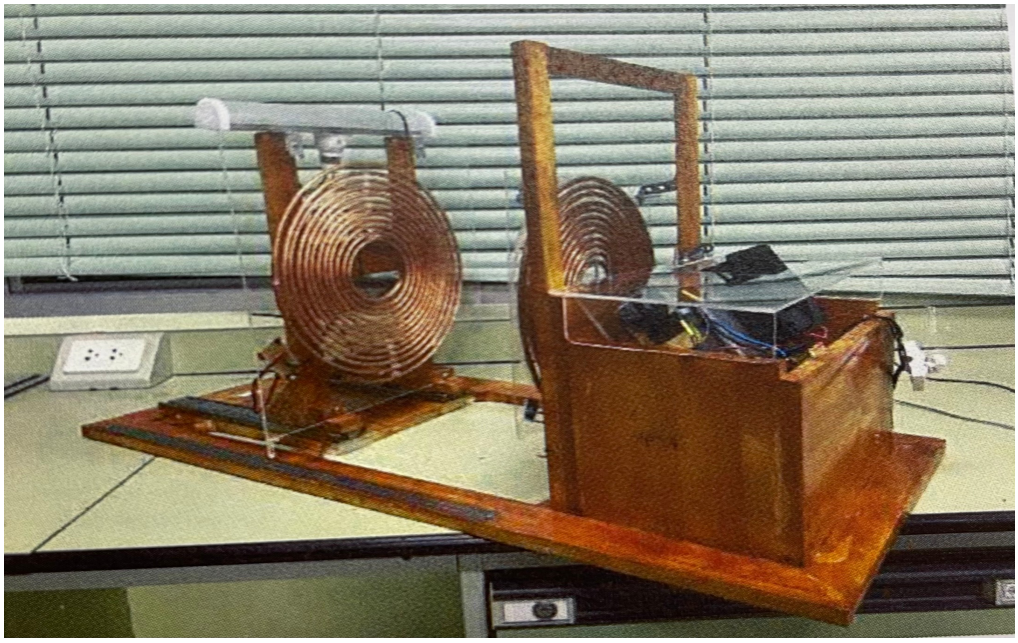


(ก)



(ข)

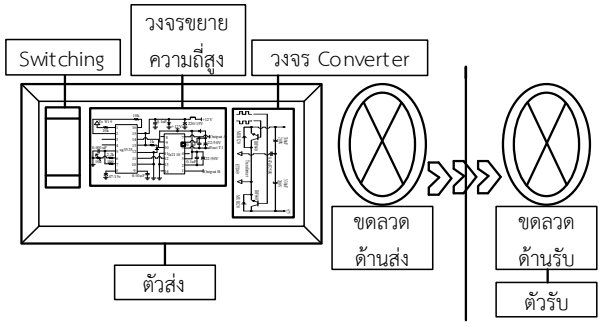
รูปที่ 2 (ก) วงจรสร้างความถี่สูง [8] (ข) วงจรคอนเวอร์เตอร์ [9]



รูปที่ 3 เครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

3.2 การประกอบเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

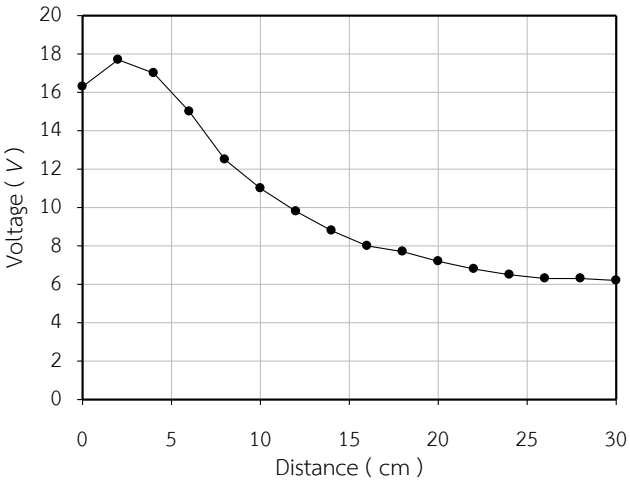
เครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายออกแบบดังรูปที่ 3 โดยมีแผนผังการต่ออุปกรณ์ด้วยวงจร Converter เข้ากับวงจรขยายความถี่สูง และ Switching แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนผังการต่ออุปกรณ์เครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

4. ผลการทดลอง

ทำการทดลองกระแสและแรงดันไฟฟ้าของการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย โดยทดลองกับ Load ที่เป็นหลอดไฟชนิดไดโอดเปล่งแสง (LED) ในการทดลองนั้นเลือกใช้หลอด LED 2 ขนาด คือ LED 12W/12V และ LED 4W/12V

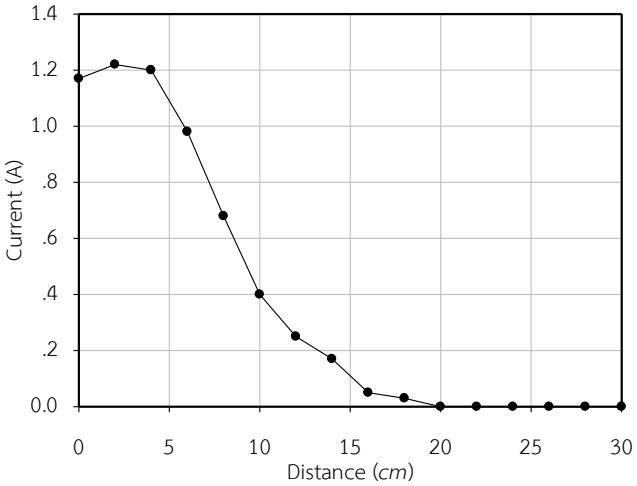


รูปที่ 5 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากับระยะห่างของขดลวดของ LED 12W/12V

4.1 การทดสอบเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อ Load เป็นหลอดไฟ LED 12W/12V

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของผลการทดลองแรงดันไฟฟ้ากับระยะห่างของขดลวดระหว่างด้านส่งและด้านรับ จากผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านรับมีค่าน้อยลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้นหรือแรงดันไฟฟ้านั้นแปรผันกับระยะห่าง ซึ่งหลอดไฟ LED 12W/12V ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ 7.08V ที่

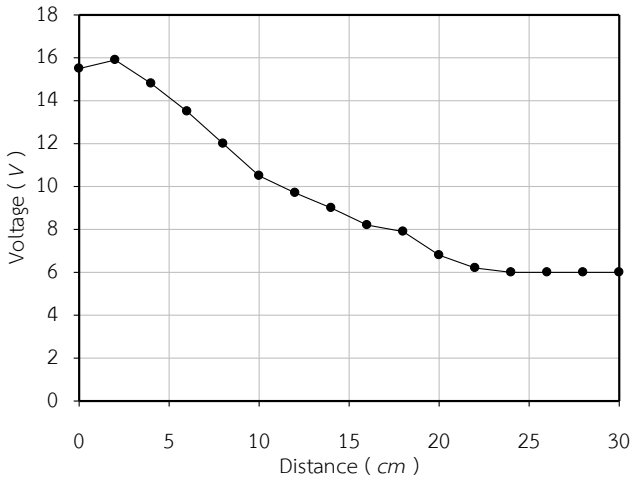
ระยะห่าง 19cm ที่ยังทำให้หลอดไฟสามารถติดหรือส่องสว่างได้ ความสัมพันธ์ของผลการทดลองกระแสไฟฟ้ากับระยะห่างของขดลวดระหว่างด้านส่งและด้านรับที่แสดงดังรูปที่ 6 นั้น เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้า ก็คือกระแสไฟฟ้าแปรผันกับระยะห่าง โดยระยะห่างสูงสุดที่ทำให้หลอดไฟสามารถส่องสว่างได้คือ 19cm ที่กระแส 0.01A



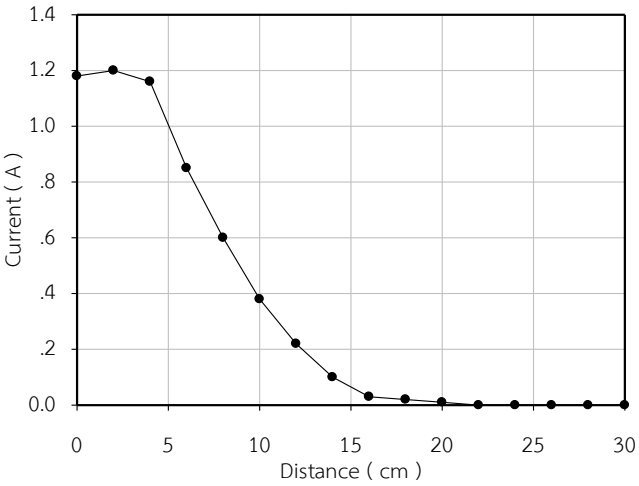
รูปที่ 6 การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้ากับระยะห่างของขดลวดของ LED 12W/12V

4.2 การทดสอบเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อ Load เป็นหลอดไฟ LED 4W/12V

รูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของผลการทดลองแรงดันไฟฟ้ากับระยะห่างของขดลวดระหว่างด้านส่งและด้านรับ จากผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านรับมีค่าน้อยลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้นหรือแรงดันไฟฟ้านั้นแปรผันกับระยะห่าง ซึ่งหลอดไฟ LED 4W/12V ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ 7.40V ที่ระยะห่าง 20cm ที่ยังทำให้หลอดไฟสามารถติดหรือส่องสว่างได้ ความสัมพันธ์ของผลการทดลองกระแสไฟฟ้ากับระยะห่างของขดลวดระหว่างด้านส่งและด้านรับที่แสดงดังรูปที่ 8 เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้า ก็คือกระแสไฟฟ้าแปรผกผันกับระยะห่าง โดยระยะห่างสูงสุดที่ทำให้หลอดไฟสามารถส่องสว่างได้คือ 20cm ที่กระแส 0.01A



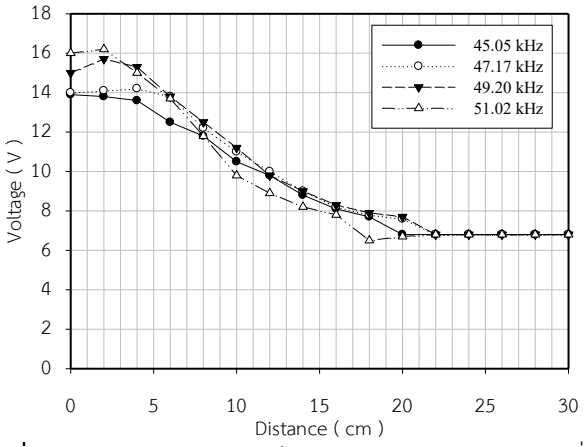
รูปที่ 7 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากับระยะห่างของขดลวดของ LED 4W/12V



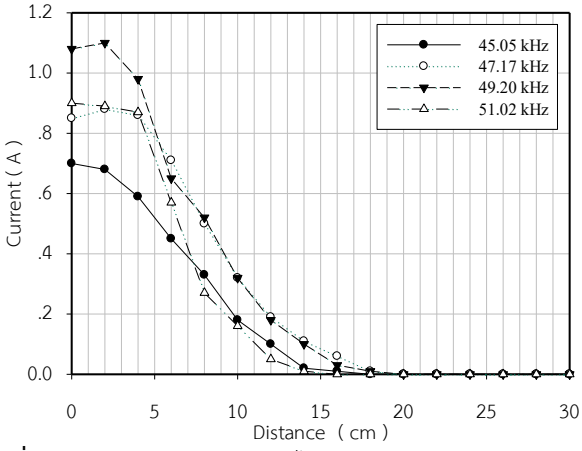
รูปที่ 8 การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้ากับระยะห่างของขดลวดของ LED 4W/12V

4.3 การทดสอบเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่

จากรูปที่ 9 และ 10 แสดงความสัมพันธ์ของผลการทดลองแรงดันและกระแสไฟฟ้ากับระยะห่างของขดลวดระหว่างด้านส่งและด้านรับที่ความถี่ต่างๆดังนี้ 45.05kHz 47.17kHz 49.20kHz และ 51.02kHz โดยที่ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้จากการคำนวณคือ 49.20kHz ซึ่งให้กระแสไฟฟ้าที่แปรผันกับระยะห่างของขดลวดระหว่างด้านส่งและด้านรับสูงกว่าความถี่อื่นๆ



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากับระยะห่างของขดลวดที่ความถี่ต่างๆ



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้ากับระยะห่างของขดลวดที่ความถี่ต่างๆ

5. สรุป

เครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ออกแบบโดยใช้หลักการทางแม่เหล็กและเรโซแนนซ์ ประกอบไปด้วยวงจรสร้างความถี่สูงและวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ ในการทดลองเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย โดยทำการต่อ Load หลอดไฟ LED 2 ขนาด ซึ่งผลการทดลองหลอดไฟ LED 12W/12V ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด 7.08V และกระแส 0.01A ที่ระยะ 19cm ส่วนหลอดไฟ LED 4W/12V ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด 7.40V และกระแส 0.01A ที่ระยะ 20cm ประสิทธิภาพของเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายขึ้นอยู่กับความถี่และระยะห่างของขดลวด ซึ่งความถี่ที่ให้ประสิทธิภาพได้ดีที่สุดคือความถี่เรโซแนนซ์ (49.2kHz)

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

7. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Shin et al., "Wireless power transfer system for high power application and a method of segmentation," *2013 IEEE Wireless Power Transfer (WPT)*, Perugia, Italy, pp. 76-78, 2013.

[2] M.Dionigi Life Fellow IEEE ,G.Franceschetti Life Fellow IEEE,M. Monigiardo Fellow IEEE "Resonant Wireless Power Transfer Investigation of radiating resonance," *IEEE Conference*, 2013.

[3] C. H. Lee, G. Jung, K. A. Hosani, B. Song, D. -k. Seo and D. Cho, "Wireless Power Transfer System for an Autonomous Electric Vehicle*," 2020 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, Seoul, Korea (South), pp. 467-470, 2020.

[4] Taghi Mohamadi "Moderling and Designing Wireless Ennergy Transfer Circuit in High Voltage Based on MagneticCoupling" *IEEE International Conference on Engineering and Informatics*, Indonesia, 2011.

[5] Resonance Circuit (14 October 2017). [Online] Available : https://www.hs8iyx.com/

[6] Magnetic field (13 september 2017). [Online] Available : https://th.wikipedia.org/

[7] Wasan Phetphimoon, Krischonme Bhumkittipich "Modeling and -simulation of bidirectional half bridge dc-dc converter," *13thECTI-CON*, 2016.

[8] SG3525 Full Bridge Inverter Circuit (17 October 2016). [Online] Available : http//homemade-circuits.com/

[9] Half-Bridge Converter (13 October 2016). [Online] Available : https://www.industrial-electronics.com/