

การศึกษาและพัฒนางจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย Study and Development of Wireless Power Transfer

เอกชัย ชัยดี* ดุสิต มหิทธิ และอนนท์ นามิน

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

99 หมู่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120

Email : ekkachai.ch799@gmail.com โทร 0-5372-3979

Ekkachai Chaidee*, Dusit mahitti and Anon Namin

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Lanna Chiang rai

99 Moo 10, Sai khoa, Phan District, Chiangrai 57120, Thailand.

E-mail: Ekkachai.ch799@gmail.com Tel: 0-5372-3979

บทคัดย่อ

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย คือเทคโนโลยีที่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องใช้สายตัวนำ ใช้สนามแม่เหล็กในสถานะรีโซแนนซ์คล้องระหว่างขดตัวนำด้านส่ง และด้านรับกำลังงาน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์ และทดสอบการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ได้ทำการวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าหาสมการประสิทธิภาพ และกำลังไฟฟ้าขาออก เพื่อแสดงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ระดับ kHz ผลการทดสอบจ่ายโหลดขนาด 25 W ใช้แรงดันกระแสตรงขาเข้า 40 V ความถี่รีโซแนนซ์ 11.8 kHz เลื่อนระยะห่างระหว่างตัวนำ 0 – 30 cm พบว่าประสิทธิภาพการส่งกำลังงานสูงสุด 92% ที่ระยะห่าง 2 cm กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด 27 W ที่ระยะห่าง 17 cm ผลการทดสอบพิกัดของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายพบว่าสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 355 W ประสิทธิภาพการส่งกำลังงาน 73.5% ที่ระยะห่าง 17 cm ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้า 230 V ผลการศึกษาสามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาเชิงลึก และการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายต่อไป

คำสำคัญ: ความถี่ รีโซแนนซ์, กำลังไฟฟ้าขาออก, ประสิทธิภาพ, อินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น, การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

Abstract

Wireless power transfer is a technology that power can transferred wirelessly using magnetic field coupling between transmitter and receiver coil. Objectives of this study are study, analyze and test the wireless power transfer. Equivalent circuit was analyzed to determine the efficiency and out power equation to reveal parameters that have effect on performance of the wireless power transfer circuit. Inverter was designed operating in kHz range. The transfer power was tested by using rated load 25 W, 40 V dc input voltage, and 11.8 kHz resonance frequency at distance between resonators 0 – 30 cm. It was found that the highest efficiency of 92% at distance 2 cm and the highest output power of 27 W at distance 17 cm. From result of rated testing, power can be transferred at the maximum output power of 355 W with the highest efficiency of 73.5 % at distance 17 cm. The results from this study can be used to study deeply and design wireless power transfer system.

Keywords: resonance frequency, output power, efficiency, full bridge inverter, wireless power transfer

1. บทนำ

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย คือ เทคโนโลยีที่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องใช้สายตัวนำ ใช้สนามแม่เหล็กความถี่สูงในสภาวะรีโซแนนซ์คล้องระหว่างขดตัวนำทางด้านส่งและด้านรับกำลังงาน เทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายเป็นที่รู้จักครั้งแรกจากการทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายของนิโกลาร์ เทสลา [1] นิโกลาร์ เทสลา ได้ทำการทดลองใช้สนามแม่เหล็กคล้องระหว่างขดตัวนำผ่านตัวกลางอากาศ ขดตัวนำพันบนแกนอากาศเรียกว่ารีโซเนเตอร์ [1-5] ต่อมาหลักการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายของนิโกลาร์ เทสลา ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในการพัฒนาเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ในการส่งผ่านสนามแม่เหล็กข้ามช่องว่างอากาศคล้องระหว่างสเตเตอร์ และโรเตอร์ [5]

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบ่งประเภทตามกลไกการส่งกำลังไฟฟ้าได้ 2 แบบ คือ แบบ Radiative และ Non-radiative แบบ Radiative กำลังไฟฟ้าถูกส่งออกมาจากสายอากาศโดยใช้คลื่นแม่เหล็ก การส่งกำลังไฟฟ้าทำได้ในระยะไกลแต่ให้ประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าต่ำ ส่วนแบบ Non-radiative ส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้สนามแม่เหล็กคล้องระหว่างขดตัวนำ การส่งกำลังไฟฟ้าทำได้ในระยะใกล้ [1-6]

การพัฒนาเทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายหลังจากยุคของนิโกลาร์ เทสลา เป็นต้นมา ไม่ได้ได้รับความสนใจอย่างเท่าที่ควร ทั้งนี้เนื่องจากอุปสรรคที่ใช้ในการทดสอบ เช่น เพอร์เวอร์แอมป์พลิไฟเออร์ สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ความก้าวหน้าของเทคโนโลยียังไม่เทียบเท่ากับปัจจุบัน ทำให้งานวิจัยทางด้านนี้ไม่เป็นที่สนใจมากนัก อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายกลับมาได้รับความสนใจอีกครั้งพิจารณาได้

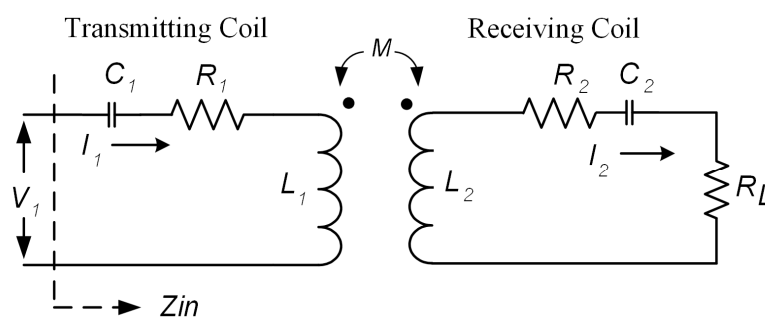
จากบทความวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์แบตเตอรี่ไร้สายให้กับโทรศัพท์มือถือ อุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็ก รถยนต์ไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ [7-10]

การพัฒนางจรการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายนั้น พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่เริ่มต้นจากการวิเคราะห์สมการเพื่อแสดงตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย จากนั้นจึงทำการออกแบบวงจรแต่ละส่วนที่เกี่ยวข้อง พิจารณาการวิเคราะห์สมการแล้วพบว่ามี 2 วิธี คือ วิธีแรกคือ Coupled Mode Theory [12-13] วิธีที่สองคือการวิเคราะห์วงจรสมมูลทางไฟฟ้า [1-6] การวิเคราะห์ด้วยวงจรสมมูลแตกต่างกันตามลักษณะวงจรสมมูล และพารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณาซึ่งสัมพันธ์กับจำนวนขดตัวนำที่ใช้ส่งและรับกำลังงาน อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้วิธีการไหนขึ้นอยู่กับพื้นฐานความรู้ ความสนใจของผู้ศึกษาเอง พิจารณาด้านวงจรขับที่ใช้สำหรับแปลงไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสสลับความถี่สูงจ่ายให้กับขดส่งกำลังงาน มีหลายแบบที่ใช้ เช่น วงจรขยายคลาสอี (Class E amplifier) อินเวอร์เตอร์แบบครึ่งคลื่น (Half bridge inverter) แบบเต็มคลื่น (Full bridge inverter) [13-16] เป็นต้น แต่ละรูปแบบมีลักษณะแตกต่างกัน

เพื่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย บทความนี้จึงเป็นการนำเสนอผลการศึกษาวเคราะห์ และทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย โดยใช้วิธีวิเคราะห์สมการจากวงจรสมมูลหม้อแปลงแกนอากาศต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์ แสดงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ทำการทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ทดสอบหาพิกัดที่วงจรสามารถส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายได้ และข้อเสนอแนะในการพัฒนางจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

2. การวิเคราะห์วงจรสมมูลทางไฟฟ้า

วิเคราะห์วงจรสมมูลทางไฟฟ้าโดยใช้วงจรสมมูลของหม้อแปลงแกนอากาศต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์ แสดงวงจรสมมูลดังรูปที่ 1 ดังนี้



รูปที่ 1 วงจรสมมูลวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

พิจารณาวจรสมมูลตามรูปที่ 1 V_1 คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้าทางด้านส่งกำลังงาน M คือ ความเหนี่ยวนำร่วม I_1, I_2 คือ กระแสไฟฟ้า R_1, R_2 คือ ความต้านทาน L_1, L_2 คือ ความเหนี่ยวนำ ทางด้านขดส่งและขดรับกำลัง

งาน และ R_L คือ ความต้านทานของโหลดทางไฟฟ้า ในขณะที่ C_1, C_2 คือ คาปาซิแตนซ์ภายนอกต่อเข้ากับวงจรทางด้านส่งและด้านรับเพื่อทำให้เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ การวิเคราะห์หาสมการกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพสามารถหาได้โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ฮอฟฟ์ (KVL) หาสมการแรงดันแต่ละด้านของวงจร จากนั้นจึงแก้สมการหากระแส I_1 และ I_2 ได้สมการกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพในสภาวะรีโซแนนซ์ได้ดังนี้

$$P_{out} = \frac{\omega^2 k^2 L_1 L_2 V_1^2}{\left[(R_1)(R_2 + R_L) + (\omega^2 k^2 L_1 L_2) \right]^2} \times R_L \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\omega^2 k^2 L_1 L_2 R_L}{(R_2 + R_L) \left[(R_1)(R_2 + R_L) + (\omega^2 k^2 L_1 L_2) \right]} \quad (2)$$

ค่า k ในสมการที่ (1) และ (2) คือค่า Coefficients of Coupling มีรูปสมการที่สัมพันธ์กับค่า M และระยะห่างระหว่างขดตัวนำ 2 ขด กับรัศมีของขดตัวนำ [17-18] ดังนี้

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} \quad (3)$$

$$k = \frac{1}{\left[1 + 2^{2/3} \left(d / \sqrt{r_1 r_2} \right)^2 \right]^{3/2}} \quad (4)$$

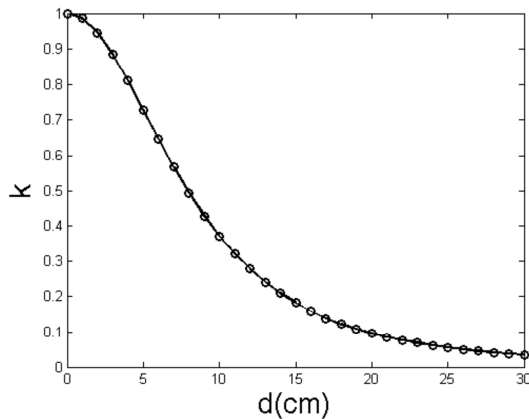
เมื่อ r_1, r_2 คือ รัศมีของขดตัวนำ d คือ ระยะห่างระหว่างขดตัวนำทางด้านส่งและรับกำลังงาน

พิจารณาจากสมการที่ (1) และ (2) พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย คือ ความต้านทาน (R_1, R_2) ความเหนี่ยวนำ (L_1, L_2) ความถี่ ($\omega = 2\pi f$) ความเหนี่ยวนำร่วม (M) และโหลดทางไฟฟ้า (R_L) เพื่อแสดงผลของพารามิเตอร์ดังกล่าวที่มีต่อกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย จึงได้กำหนดค่าพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 1 ใช้ในการจำลอง และใช้ในการออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ดังนี้

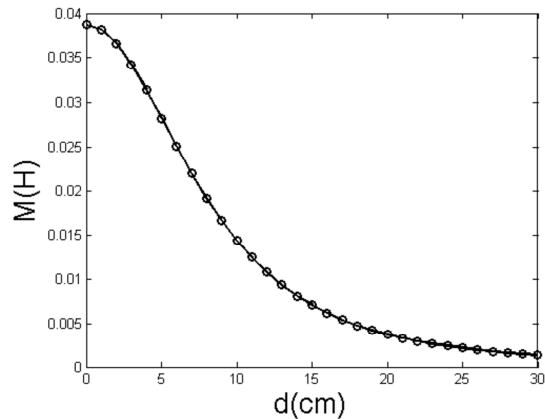
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองโดยใช้สมการ

R_1, R_2 (Ω)	L_1, L_2 (mH)	C_1, C_2 (nF)	R_L (Ω)	f_r (kHz)	V_1 (V)	r_1, r_2 (cm)
5	38.7	4.7	10 - 10,000	11.8	100	13

พล็อตกราฟ Coefficient of coupling (k) โดยการแทนค่ารัศมีของขดตัวนำ r_1, r_2 เท่ากับ 13 cm และระยะห่างระหว่างขดตัวนำ d ตั้งแต่ 0 – 30 cm ลงในสมการที่ (4) จากนั้นจึงแทน Coefficient of coupling (k) ลงในสมการความเหนี่ยวนำร่วม (M) ตามสมการที่ (3) ได้ลักษณะกราฟแสดงดังรูปที่ 2 ดังนี้



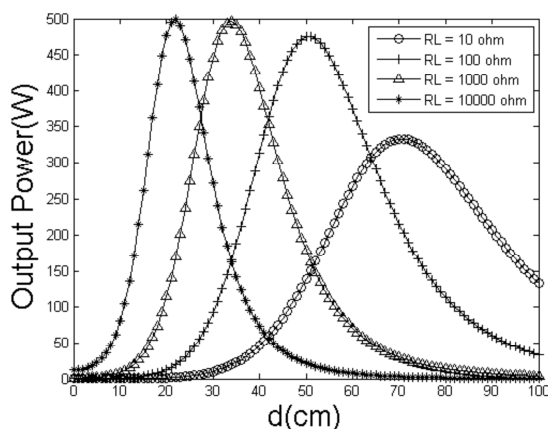
ก) Coefficient of coupling (k)



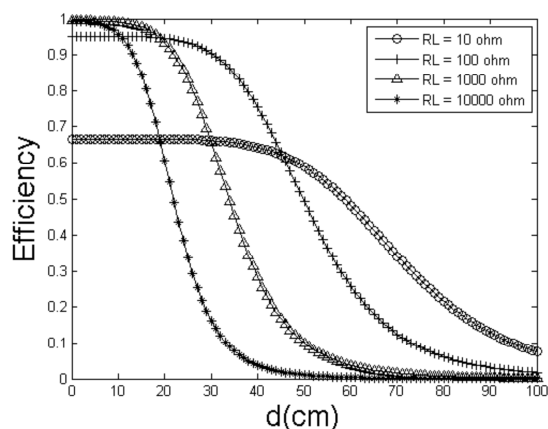
ข) ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual inductance)

รูปที่ 2 Coefficient of coupling และ ความเหนี่ยวนำร่วม

จากลักษณะกราฟดังรูปที่ 2 ค่า Coefficient of Coupling (k) ลดลงตามระยะห่างระหว่างขดตัวนำ แสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะห่างระหว่างขดตัวนำเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราการคล้องสนามแม่เหล็กลดลงตาม ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำร่วมลดลงในลักษณะเดียวกัน การลดลงของ k และ M ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย เพื่อแสดงผลดังกล่าวจึงได้แทนสมการ (3) - (4) และพารามิเตอร์ในตารางที่ 1 ลงในสมการกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพตามสมการที่ (1) และ (2) ได้ลักษณะกราฟตามรูปที่ 3 ดังนี้



ก) กำลังไฟฟ้าขาออก



ข) ประสิทธิภาพ

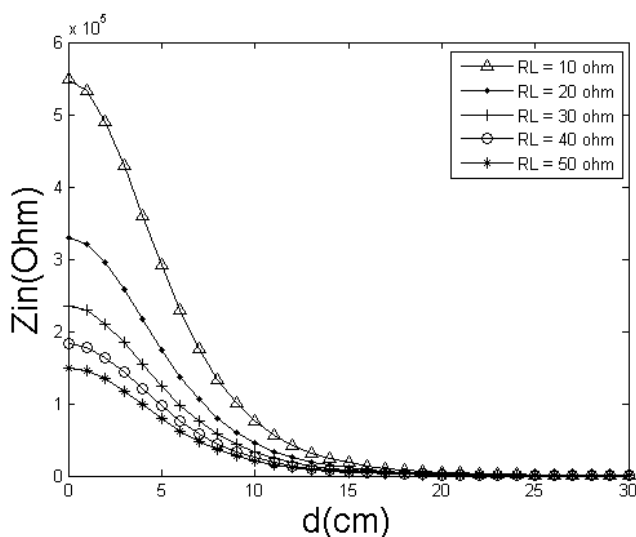
รูปที่ 3 กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพที่โหลดต่างกัน

พิจารณารูปที่ 3 ก) เห็นว่าในขณะที่ระยะห่างระหว่างขดตัวนาเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าที่โหลดแต่ละค่าได้เพิ่มขึ้นก่อนแล้วจึงลดลง และตำแหน่งจุดการเกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแตกต่างกันออกไป เนื่องจากระยะห่าง(d) เปลี่ยนแปลงทำให้ความเหนี่ยวนำร่วม (M) เปลี่ยนแปลงตาม และโหลดแต่ละค่า มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรโดยตรง และอิมพีแดนซ์ของวงจรมีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าขาออก เป็นไปตามหลักการส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด สมการอิมพีแดนซ์พิจารณาได้ตามสมการที่ (5) ได้มาจากการพิสูจน์สมการโดยใช้วงจรสมมูลตามรูปที่ 1

$$Z_{in} = Z_1 + \frac{(\omega M)^2}{Z_2} \quad (5)$$

$$\text{เมื่อ } Z_1 = R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right), Z_2 = R_2 + R_L + j\left(\omega L_2 + \frac{1}{\omega C_2}\right)$$

พิจารณาสมการที่ (5) เห็นได้ว่าพารามิเตอร์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายและมีผลต่ออิมพีแดนซ์ คือ ความต้านทานโหลด (R_L) ความเหนี่ยวนำร่วม (M) และความถี่ (f) ทำการพล็อตกราฟอิมพีแดนซ์ โดยแทนค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 1 ความเหนี่ยวนำร่วม (M) และ Coefficient of coupling (k) ตามสมการที่ (3) และ (4) แทนค่าโหลดตั้งแต่ 10 – 50 Ω ลงในสมการที่ (5) ได้ลักษณะกราฟอิมพีแดนซ์ที่โหลดต่างกันแสดงดังรูปที่ 4 ดังนี้



รูปที่ 4 ลักษณะอิมพีแดนซ์ของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายที่โหลดต่างกัน

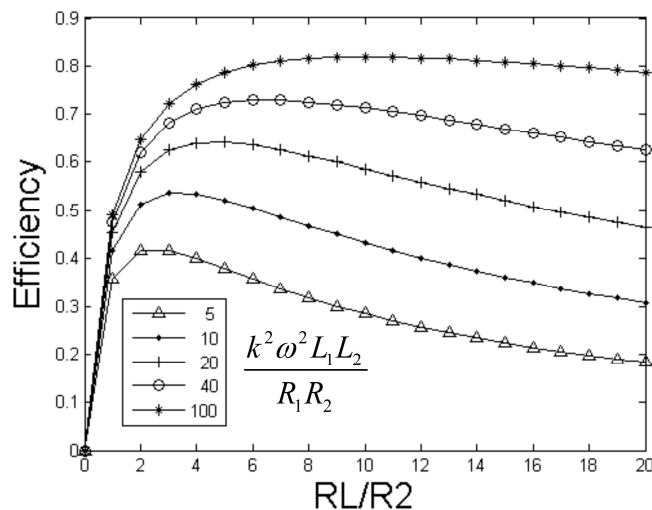
พิจารณารูปที่ 4 เห็นได้ว่าเมื่อระยะห่าง(d) เปลี่ยน ทำให้ความเหนี่ยวนำร่วม (M) เปลี่ยน และโหลด (R_L) เปลี่ยนทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าโดยตรง

พารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำร่วม (M) หรือพิจารณาได้ในลักษณะของ Coefficient of coupling (k) และระยะห่าง (d) และ โหลด (R_L) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ง่ายแล้ว ยังมีพารามิเตอร์อื่นที่มีผลต่อ

กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ คือ ความต้านทาน (R_1, R_2) ความเหนี่ยวนำ (L_1, L_2) และความถี่ ($\omega = 2\pi f$) เนื่องพารามิเตอร์เหล่านี้มีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ไม่มากนักอยู่กับการออกแบบ ดังนั้นจึงแสดงผลที่มีผลต่อประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย โดยนำสมการที่ (2) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (6) สอดคล้องกับเอกสารอ้างอิง [6]

$$\eta = \frac{\frac{R_L}{R_2} \frac{k^2 \omega^2 L_1 L_2}{R_1 R_2}}{\left(1 + \frac{R_L}{R_2}\right) \frac{k^2 \omega^2 L_1 L_2}{R_1 R_2} + \left(1 + \frac{R_L}{R_2}\right)^2} \quad (6)$$

ทำการพล็อตกราฟประสิทธิภาพตามสมการที่ (6) โดยสมมติให้เทอม $k^2 \omega^2 L_1 L_2 / R_1 R_2$ เป็นค่าคงที่ ได้ลักษณะกราฟแสดงดังรูปที่ 5



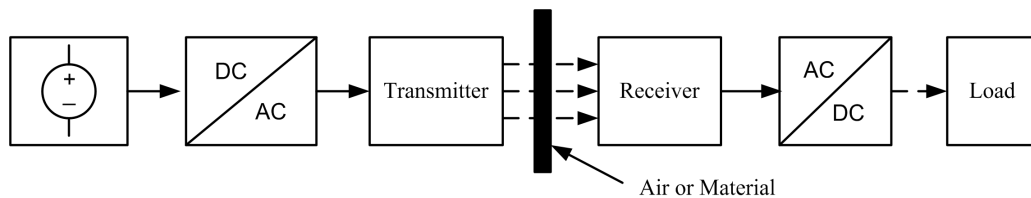
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและพารามิเตอร์วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

จากสมการที่ (6) และรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาในแง่ของการออกแบบวงจรการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายให้มีประสิทธิภาพสูง พารามิเตอร์ควรมีลักษณะดังนี้ 1) ความเหนี่ยวนำ (L_1, L_2) ควรมีค่าสูง 2) ความต้านทาน (R_1, R_2) ควรมีค่าต่ำ 3) ความถี่โซแนนซ์ (f) ควรมีค่าสูง

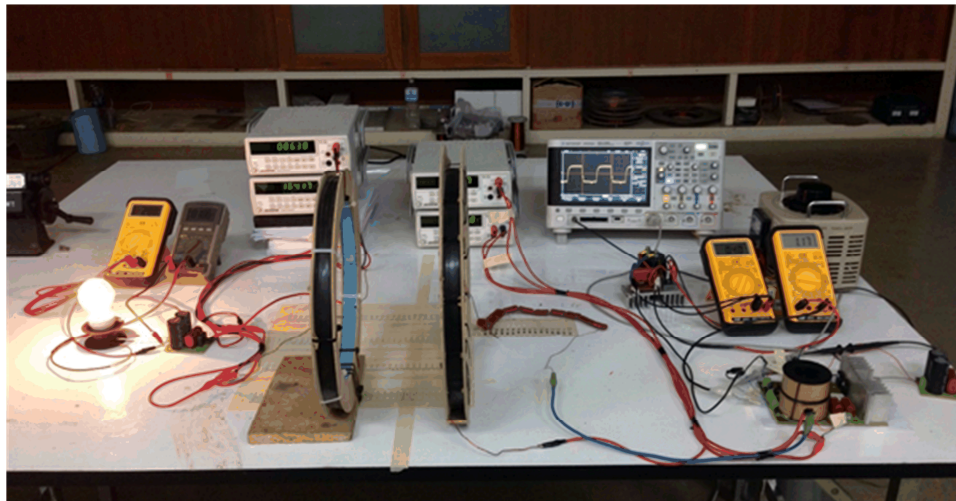
3. การออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

องค์ประกอบของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแสดงดังรูปที่ 6 ส่วนประกอบหลักประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง อินเวอร์เตอร์ใช้สำหรับแปลงกระแสตรงเป็นกระแสสลับทำงานที่ความถี่โซแนนซ์ ขดส่งกำลังงาน (Transmitter) ขดรับกำลังงาน (Receiver) ทำมาจากขดลวดทองแดงพันบนแกนอากาศต่ออนุกรมกับคาปาซิ

เตอร์เพื่อให้เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลผ่านขดตัวนำด้านส่งกำลังงานทำให้เกิดสนามแม่เหล็กส่งผ่านไปยังขดตัวนำด้านรับเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้ กระแสไฟฟ้าสลับความถี่สูงจึงต้องผ่านวงจรเรียงกระแสเป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อนจ่ายให้กับโหลดต่อไป วงจรการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายขณะทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 7



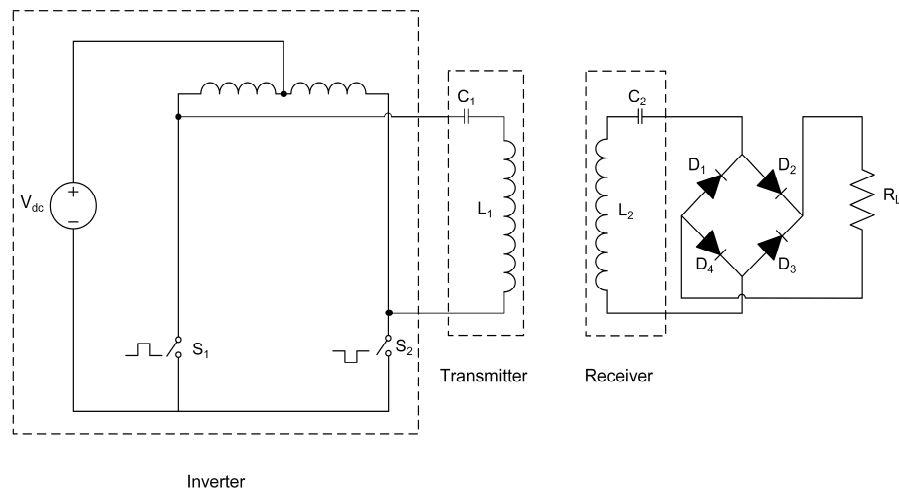
รูปที่ 6 องค์ประกอบวงจรการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย



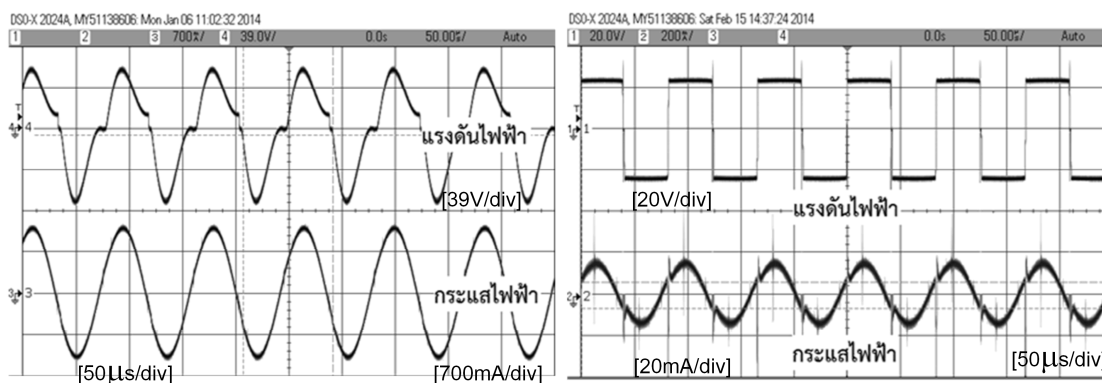
รูปที่ 7 การทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

3.1 ออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับความถี่สูง วงจรอินเวอร์เตอร์ใช้กับวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายมีหลายแบบ เช่น แบบครึ่งคลื่น (Half bridge) แบบเต็มคลื่น (Full bridge) หรือใช้วงจรขยาย เช่น คลาสอี (Class E amplifier) เป็นต้น การใช้งานรูปแบบไหนขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้งานของผู้ออกแบบวงจร ในการศึกษาเลือกใช้อินเวอร์เตอร์แบบพุช-พูล (Push-pull inverter) ลักษณะวงจรแสดงดังรูปที่ 8 และมีลักษณะแรงดัน และกระแสไฟฟ้า ด้านขดส่งและรับกำลังงานขณะจ่ายโหลดแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพช-พช



ก) สัญญาณด้านขาเข้าขดส่งกำลังงาน

ข) สัญญาณด้านขาออกขดรับกำลังงาน

รูปที่ 9 สัญญาณแรงดัน และกระแสไฟฟ้า ด้านส่ง และรับกำลังงาน ขณะจ่ายโหลด 25 W ที่ระยะห่าง 17 cm

3.2 พารามิเตอร์วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

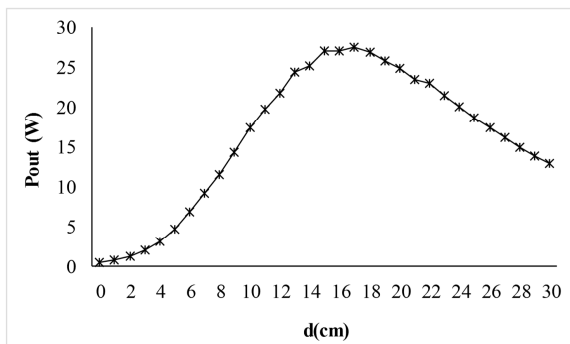
ขดตัวนำด้านส่ง และด้านรับกำลังงาน มีค่าพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 1 ใช้ทองแดงเบอร์ 18 AWG พันเป็นขดตัวนำใช้แกนอากาศเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 cm จำนวน 260 รอบ กว้าง 2 cm มีค่าพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 1 โดยที่ค่าความเหนี่ยวนำ ความต้านทานทำการวัดค่าโดยใช้ R-L-C ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ส่วนคาปาซิแตนซ์คำนวณหาจากสมการความถี่เรโซแนนซ์ แสดงดังสมการที่ (7) ดังนี้

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} \quad (7)$$

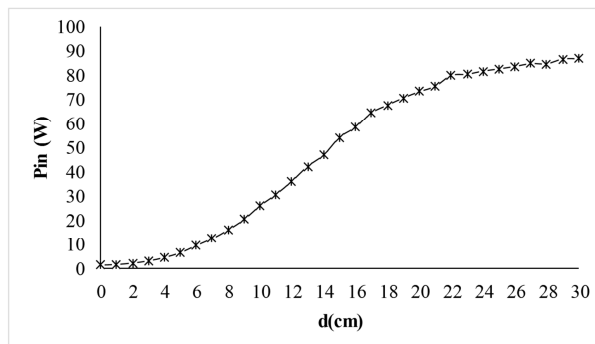
4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบจ่ายโหลด

ทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายให้กับโหลดหลอดไส้ขนาด 25 W ป้อนแรงดันกระแสตรงขาเข้า 40 V คงที่ตลอดการทดลอง ใช้ความถี่รีโซแนนซ์ 11.8 kHz ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในแต่ละส่วนของวงจร โดยใช้เครื่องมือวัดที่มีคุณสมบัติแบบ True RMS เพิ่มระยะห่างระหว่างขดตัวนำด้านส่ง และด้านรับกำลังงาน 0 – 30 cm ได้ลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกและกำลังไฟฟ้าขาเข้าดังรูปที่ 10 และประสิทธิภาพดังรูปที่ 11

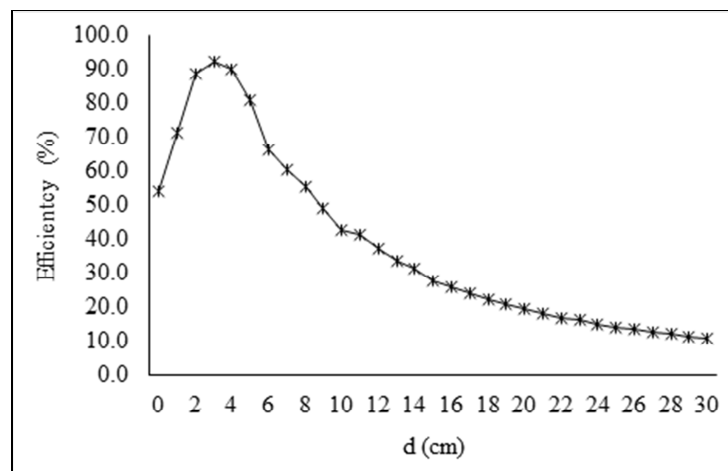


ก) กำลังไฟฟ้าขาออก



ข) กำลังไฟฟ้าขาเข้า

รูปที่ 10 กำลังไฟฟ้าขาออกและขาเข้าจากการทดสอบจ่ายโหลด 25 W

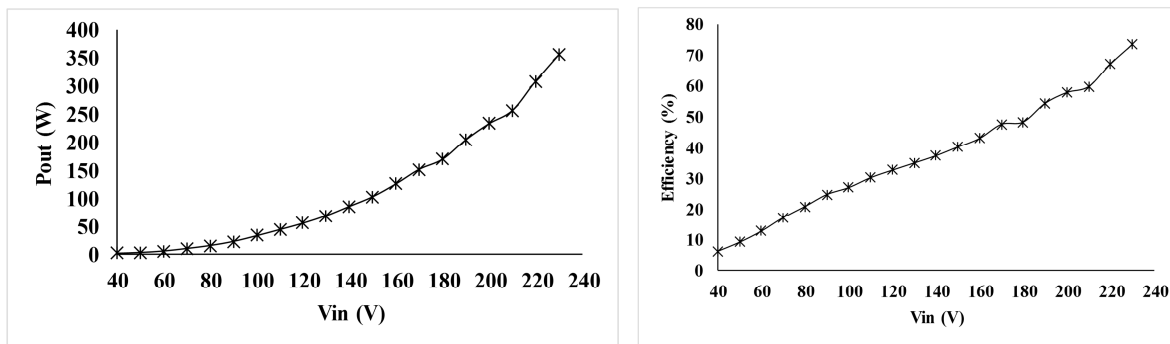


รูปที่ 11 ประสิทธิภาพจากการทดสอบจ่ายโหลด 25 W

พิจารณารูปที่ 10 และ 11 พบว่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด 27 W ที่ระยะห่าง 17 cm ในขณะที่ให้ประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด 92% ที่ระยะห่าง 2 cm จากนั้นจึงลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อขดตัวนำมีระยะห่างมากขึ้น อิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าลดลงทำให้วงจรดึงกระแสขาเข้าเพิ่มมากขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าเพิ่มมากขึ้นตาม มีลักษณะกราฟแสดงดังรูปที่ 10 ข)

4.2 ผลการทดสอบสมรรถนะวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

ทดสอบจ่ายโหลดที่ระยะ 17 cm เนื่องจากเป็นระยะที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ใช้ความถี่ 11.8 kHz จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าเริ่มที่ 40 V เพิ่มขึ้นทีละ 10 V จนกระทั่งวงจรจับไม่สามารถทำงานได้ ได้ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้า แสดงดังรูปที่ 12



ก) กำลังไฟฟ้าขาออก

ข) ประสิทธิภาพ

รูปที่ 12 กำลังไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าที่ระยะห่าง 17 cm

5. อภิปรายผล

จากผลการวิจัยมีประเด็นการพิจารณา ดังนี้

จุดสูงสุดของกราฟกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพ ไม่เกิดขึ้นในระยะที่ขดตัวนำวางใกล้กันทั้งคู่ ที่ระยะใกล้ๆ สนามแม่เหล็กคัลล์ระหว่างขดตัวนำควรมีค่าสูง แต่กลับมีค่าสูงสุดเมื่อขดตัวนำเลื่อนออกมาระยะหนึ่ง เนื่องมาจากความเหนี่ยวนำร่วมเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างทำให้อิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงตาม โดยที่อิมพีแดนซ์ที่ระยะหนึ่งมีความสมดุลกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายทำให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด และมีผลต่อประสิทธิภาพโดยตรง

การออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายให้มีประสิทธิภาพสูง พารามิเตอร์ควรมีลักษณะดังนี้ ความเหนี่ยวนำควรมีค่าสูง ความต้านทานควรมีค่าต่ำ ความถี่ที่ใช้ควรมีค่าสูง การออกแบบให้พารามิเตอร์มีลักษณะดังกล่าว การประยุกต์ใช้งานบางอย่างอาจมีข้อจำกัดด้านรูปร่างที่ไม่สะดวกต่อการใช้งาน ในขณะที่โหลดควรมีผลต่ออิมพีแดนซ์ของวงจร หมายถึง วงจรสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่โหลดค่าหนึ่ง

ความเหนี่ยวนำร่วม หรือมองในรูป Coefficient of coupling เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างขดตัวนำ ทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบเปลี่ยนแปลงตาม ส่งผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังงานโดยตรง ดังนั้นในการออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายควรพิจารณาด้านเทคนิคการชดเชยค่าความเหนี่ยวนำร่วม ซึ่งมีอยู่ 2 เทคนิคหลักและเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจ คือการติดตามความถี่และการทำอิมพีแดนซ์แมชชิง

จากผลการทดสอบจ่ายกำลังงานให้กับโหลดหลอดไส้ขนาด 25 W แต่ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้ 27 W เนื่องจากหลอดที่ใช้เป็นหลอดไส้เมื่อทำงานจะเกิดความร้อนที่ไส้หลอด อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไส้หลอดได้ ดังนั้นการใช้หลอดในการทดสอบครั้งต่อไปควรใช้หลอดเป็นตัวต้านทานที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำ

6. สรุป

ผลการจ่ายโหลดขนาด 25 W ใช้แรงดันอินพุตกระแสตรง 40 V ความถี่รีโซแนนซ์ 11.8 kHz เลื่อนระยะห่างระหว่างขดตัวนำ 0 – 30 cm พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 27 W ที่ระยะห่าง 17 cm ในขณะที่ประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสุด 92% ที่ระยะห่าง 2 cm ผลการทดสอบหาพิกัดการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย พบว่า วงจรสามารถส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายได้สูงสุด 355 W ที่ระดับแรงดันขาเข้ากระแสตรง 230 V ความถี่รีโซแนนซ์ 11.8 kHz ที่ระยะห่าง 17 cm

พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำ(d) หรือพิจารณาในรูปของ Coefficient of coupling (k) ความเหนี่ยวนำร่วม(M) และโหลด(R_L) เมื่ออิมพีแดนซ์ของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสอดคล้องกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายจะทำให้ส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายได้สูงสุด เป็นไปตามหลักการส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายที่ค่าโหลดต่างกันทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกมีตำแหน่งจุดสูงสุดต่างกันเนื่องจากค่าโหลดแตกต่างกันทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรสอดคล้องกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายเกิดขึ้นในตำแหน่งต่างกันนั่นเอง

การออกแบบให่วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายมีประสิทธิภาพสูง พารามิเตอร์ที่ควรพิจารณา คือ ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ ของขดตัวนำ และ ความถี่ใช้งาน ซึ่งควรมีค่าสูง อย่างไรก็ตามการออกแบบขดตัวนำให้มีลักษณะดังกล่าว ต้องพิจารณาข้อจำกัดด้านขนาด รูปร่างของขดตัวนำ ประกอบกับลักษณะงานที่นำไปประยุกต์ใช้ด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัย งบประมาณประจำปี 2558 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

เอกสารอ้างอิง

- [1] C.K. Lee, W.X. Zhong, and S.Y.R. Hui, "Effects of Magnetic Coupling of Nonadjacent Resonators on Wireless Power Domino-Resonator Systems," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 27, No. 4, pp.1905-1916, April, 2012.

- [2] 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., Vol. 58, No. 2, pp.544-554, February, 2011.
- [3] W.X. Zhong, C.K.Lee, and S.Y.R.Hui, "General Analysis on the Use of Tesla's Resonators in Domino Forms for Wireless Power Transfer," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 60, No. 1, pp. 261 - 270, January, 2013.
- [4] Chih-Jung Chen, Tah-Hsiung Chu, Chin-Lung Lin, and Zeui-Chown Jou, "A Study of Loosely Coupled Coils for Wireless Power Transfer," IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs., Vol. 57, No. 7, pp. 536 - 540, November, 2012.
- [5] C.K. Lee, W.X. Zhong, and S.Y.R. Hui, "Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)., 2012 IEEE, pp. 3819 - 3824.
- [6] F.Z.Shen, W.Z.Cui, W.Ma, J.T. Huangfu, and L.X.Ran, "Circuit analysis of wireless power transfer by "coupled magnetic resonance"," Wireless mobile and computing (CCWMC 2009)., 2009, pp. 602 - 605.
- [7] F. Muavi, M. Edington, and W. Eberle, "Wireless power transfer: A survey of EV battery charging technologies," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)., 2012, pp.1804-1810.
- [8] S. Jeong, Y. Jae Jang, and D. Kum, "Economic Analysis of the Dynamic Charging Electric Vehicle," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 30, No. 11, pp.6368-6377, 2015.
- [9] J.C. Lin, "Wireless Power Transfer for Mobile Applications, and Health Effects," IEEE Antennas Propagat. Mag., Vol. 55, No. 2, pp.250-253, 2013.
- [10] H. Jiang, J. Zhang, D.Lan, K.K. Chao, S.Liou, H. Shahnasser, R.Fechter, S.Hirose, M.Harrison, and S.Roy, "A Low-Frequency Versatile Wireless Power Transfer Technology for Biomedical Implants," IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst., Vol. 7, No. 4, pp.526-535, 2013.
- [11] W.Q. Niu, W. Gu, J.X. Chu, and A.D. Shen, "Frequency splitting pattern in wireless power relay transfer," IET.Circuit, Devices & System., Vol. 8, No. 6, pp.561-567, July 2014.
- [12] W.Q. Niu, W. Gu, J.X. Chu, and A.D. Shen, " Coupled-mode analysis of frequency splitting phenomena in CPT system," Electron.Lett., Vol. 48, No. 12, pp.723-724, June 2012.
- [13] S. Aldhafer, P.C.K. Luk, A. Bai, and J.F. Whidborne, "Wireless Power Transfer Using Class E Inverter With Saturable DC-Feed Inductor," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 50, No. 4, pp.2710-2718, April, 2014.
- [14] T. Nagashima, W. Xiugin, and H. Sekiya, "Analytical design procedure for resonant inductively coupled wireless power transfer system with class-DE and class-E rectifier," Circuit and Systems (APCCAS)., 2014, pp.288-291.

- [15] M. Galizzi, M. Caldara, V. Re, and A. Vitali, "A novel Qi-standard compliant full-bridge wireless power transfer charger for low power devices," Wireless Power Transfer (WPT)., 2013, pp.44-47.
- [16] K. Sukjin, D.H. Jung, J.J. Kim, B.Bumhee, K.Sunkyu, A.Seungyoung, K.Jonghoon, and K. Joungho, "High-Efficiency PCB and Package Level Wireless Power Transfer Interconnection Scheme Using Magnetic Field Resonance Coupling," IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf., Vol. 5, No. 7, pp.863-878, 2015.
- [17] S.Y.R. Hui, W.X. Zhong, and C.K. Lee, "A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 29, No. 9, pp.4500-4511, 2014.
- [18] J.O. Mur-Miranda, G. Fanti, Y.Feng, K. Omanakuttan, R. Ongie, A. Setjoadi, and N. Sharpe, "Wireless Power Transfer Using Weakly Magnetostati Resonators," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)., 2010, pp.4179-4186.