



## ผลกระทบทางความถี่ที่มีต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

เอกชัย ชัยดี\* และ อนนท์ นำอิน

อาจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

สุกัลย์ ยะอู๋ และ เอกพจน์ ยศแก้ว

นักศึกษา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09-9291-2214 อีเมล: ekkachai.ch799@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.09.001

รับเมื่อ 5 มิถุนายน 2558 ตอรับเมื่อ 8 กันยายน 2558 เผยแพร่ออนไลน์ 7 มีนาคม 2559

© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความถี่ที่มีต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ได้ทำการวิเคราะห์วงจรสมมูลทางไฟฟ้า หาสมการกำลังไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพ และอิมพีแดนซ์ ออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น ความถี่ใช้งานระดับ kHz ทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายกรณีความถี่รีโซแนนซ์คงที่ 160 kHz และปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์ตามระยะห่างระหว่างตัวนำ จ่ายกำลังงานให้กับโหลดขนาด 0.54 kΩ (60W) ใช้แรงดันอินพุทกระแสตรง 20 V ระยะห่างระหว่างขดตัวนำ 0–30 cm ผลการศึกษาพบว่าความเหนี่ยวนำร่วมเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างขดตัวนำ การชดเชยผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำได้โดยการปรับค่าความถี่ มีผลทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นโดยมีปรากฏการณ์ที่ต้องพิจารณาคือ Frequency Splitting จากผลการทดสอบพบว่าการปรับค่าความถี่ตามระยะห่างทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นสูงสุด 20.77% และประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้น 28.38% ที่ระยะห่าง 7 cm เมื่อเทียบกับผลการทดสอบใช้ค่าความถี่คงที่

**คำสำคัญ:** ความถี่รีโซแนนซ์ ความเหนี่ยวนำร่วม อิมพีแดนซ์ กำลังไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพ



## Effect of Frequency on a Performance of Wireless Power Transfer

**Ekkachai Chaidee\* and Anon Namin**

Lecturer, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai, Chiangrai, Thailand

**Ekaphot Yotkaew and Sukan Yaau**

Student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai, Chiangrai, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 09-9291-2214, E-mail: ekkachai.ch799@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.09.001

Received 5 June 2015; Accepted 8 September 2015; Published online: 7 March 2016

© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

The objective of this work was to study effect of frequency on the performance of wireless power transfer. An electrical equivalence circuit was analyzed to find the equations for efficiency, output power, and impedance. The wireless power transfer circuit was designed driven by a full-bridge converter using an operating frequency in the kHz range, testing transfer power when the constant resonance frequency was 160 kHz and adjusting resonance frequency based on the distance between resonators, to the 0.54 k $\Omega$  (60W) load using input voltage of 20 Vdc for 0-30 cm distance between resonators. The study's results showed that the mutual inductance changed due to changes in the distance between coils. Frequency tuning was performed in order to compensate for the changes of the mutual inductance and as a result power output and efficiency increased. Furthermore, the frequency splitting phenomenon should be considered. According to the testing results for the frequency tuning, output power and efficiency increased by 20.77% and 28.38% at 7 cm of distance compared with the testing results for constant frequency.

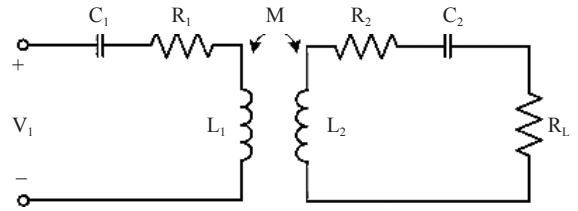
**Keywords:** Resonance Frequency, Mutual Inductance, Impedance, Output Power, Efficiency

### 1. บทนำ

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย คือเทคโนโลยีที่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องใช้สายตัวนำแบ่งประเภทตามกลไกการส่งกำลังงานได้ 2 แบบ คือ แบบ Radiative และ Non-radiative โดยที่แบบ Radiative ใช้หลักการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กออกมาจากสายอากาศ การส่งกำลังงานทำได้ระยะไกลแต่ให้ประสิทธิภาพต่ำ ส่วนแบบ Non-radiative ใช้สนามแม่เหล็กในสภาวะรีโซแนนซ์ คล้องระหว่างขดตัวนำ การส่งกำลังงานทำได้ในระยะใกล้ [1], [2]

ลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพของการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบ Non-radiative ลดลงอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างขดตัวนำ ด้านส่งและรับกำลังงาน [3] จากลักษณะดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าขาออกของการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายเมื่อระยะห่างระหว่างขดตัวนำเพิ่มมากขึ้น พบว่ามีอยู่ 2 วิธีที่นิยมใช้ คือ 1) การปรับค่าอิมพีแดนซ์ [4]-[7] 2) การปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์ [8]-[11] จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์ พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นนำเสนอวิธีการอธิบายปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Frequency Splitting ซึ่งยังไม่ครอบคลุมลักษณะทางความถี่ทั้งหมด การอธิบายใช้วิธีการวิเคราะห์สมการซึ่งพบว่ามี 2 วิธี คือ วิธี Coupled Mode Theory [12], [13] ยุ่งยากต่อการทำความเข้าใจและการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ และการวิเคราะห์วงจรมูลทางไฟฟ้า [1]-[7] ส่วนใหญ่อธิบายเฉพาะกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพไม่ได้พิจารณาถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำร่วมและอิมพีแดนซ์

บทความนี้จึงได้นำเสนอผลการศึกษาลักษณะทางความถี่ของวงจรการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายที่มีผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย โดยใช้วิธีการวิเคราะห์วงจรมูลทางไฟฟ้าหาสมการกำลังไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพ อิมพีแดนซ์ของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสำหรับอธิบายปรากฏการณ์ และความสัมพันธ์ระหว่าง



รูปที่ 1 วงจรมูลวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

พารามิเตอร์ วิเคราะห์และอภิปรายผลร่วมกับผลการทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายให้กับโหลด

### 2. วิธีดำเนินการ

#### 2.1 ศึกษาลักษณะทางไฟฟ้า

จากวงจรรูปที่ 1  $V_1$  คือแรงดันไฟฟ้าขาเข้าวงจร  $C_1$ ,  $C_2$  คือคาปาซิเตอร์  $R_1$ ,  $R_2$  คือความต้านทาน  $L_1$ ,  $L_2$  คือความเหนี่ยวนำ ทางด้านส่งและด้านรับกำลังงาน  $R_L$  คือความต้านทานของโหลด และ  $M$  คือความเหนี่ยวนำร่วม การพิสูจน์หาสมการกำลังไฟฟ้าขาเข้า กำลังไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพ และอิมพีแดนซ์ ได้ตามสมการที่ (1)-(4) ดังนี้

$$P_m = \frac{\{R_1[(R_2 + R_L)^2 + X_2^2] + (\omega M)^2(R_2 + R_L)\}V_1^2}{[R_1(R_2 + R_L) - X_1X_2 + (\omega M)^2]^2 + [R_1X_2 + (R_2 + R_L)X_1]^2} \quad (1)$$

$$P_{out} = \frac{(\omega M)^2 V_1^2 R_L}{[R_1(R_2 + R_L) - X_1X_2 + (\omega M)^2]^2 + [R_1X_2 + (R_2 + R_L)X_1]^2} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 R_L}{R_1[(R_2 + R_L)^2 + X_2^2] + (\omega M)^2(R_2 + R_L)} \quad (3)$$

$$Z_{in} = Z_1 + \frac{(\omega M)^2}{Z_2} \quad (4)$$

เมื่อ  $X_1 = \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}$ ,  $X_2 = \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}$ ,

$$\omega = 2\pi f, Z_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}$$

$$Z_2 = R_2 + R_L + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2}$$

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (5)$$

ค่า  $k$  ในสมการที่ (5) คือ Coefficient of Coupling มีรูปสมการเป็นฟังก์ชันของระยะทางได้ดังนี้ [1], [14]

$$k = \frac{1}{\left[1 + 2^{2/3} \left(d / \sqrt{r_1 r_2}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (6)$$

$r_1, r_2$  คือรัศมีขดตัวนำด้านส่งและด้านรับ และ  $d$  คือระหว่างขดตัวนำด้านส่งและด้านรับ

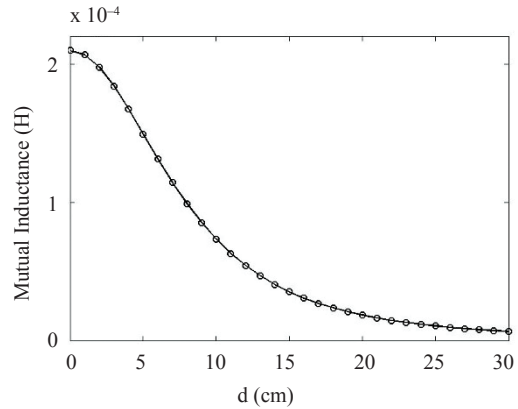
พิจารณาเทอม  $(\omega M)^2$  ในสมการที่ (2), (3) และ (4) เห็นได้ว่าถ้าความถี่มีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ หรือเมื่อความเหนี่ยวนำร่วมเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง พิจารณาความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (5)–(6) จะส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน โดยที่การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำร่วม ( $M$ ) นี้จึงสามารถชดเชยได้โดยการปรับค่าความถี่ได้แทนค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 1 ซึ่งได้จากการออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแทนค่าลงในสมการที่ (2)–(5) ได้ลักษณะของความเหนี่ยวนำร่วม กำลังไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพ และอิมพีแดนซ์ดังนี้

**ตารางที่ 1** ค่าพารามิเตอร์วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

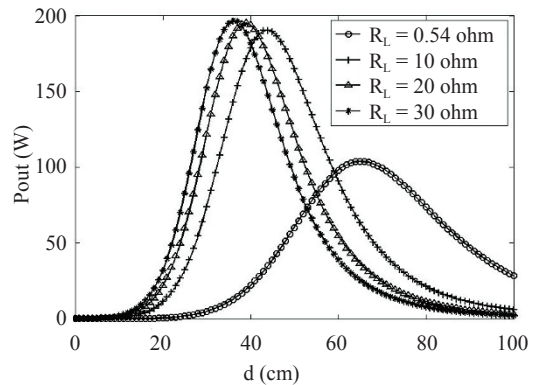
$L_1, L_2$	$R_1, R_2$	$R_L$	$C_1, C_2$	$f_r$
0.21 mH	0.5 $\Omega$	0.54 $\Omega$	4.7 nF	160 kHz

ลักษณะการลดลงของความเหนี่ยวนำร่วมตามรูปที่ 2 ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพซึ่งมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3–4 ดังนี้

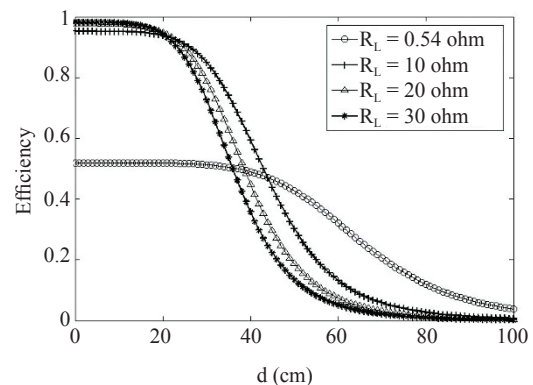
ลักษณะกราฟกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพตามรูปที่ 3 และ 4 เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างขดตัวนำ ส่วนหนึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำร่วม และความต้านทานของโหลด ( $R_L$ )



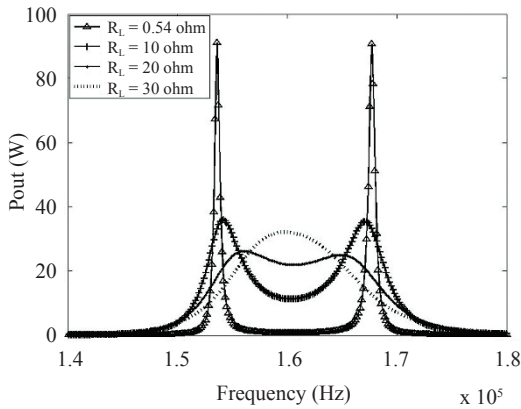
**รูปที่ 2** ลักษณะการลดลงของความเหนี่ยวนำร่วม ( $M$ )



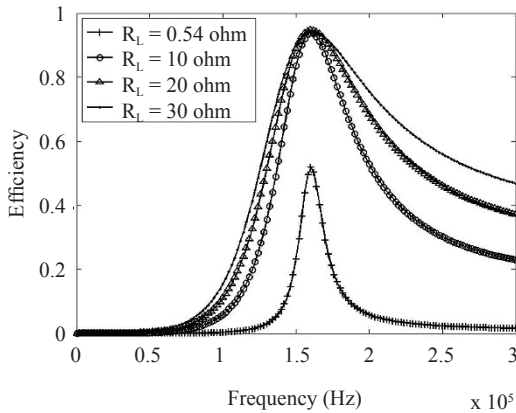
**รูปที่ 3** กำลังไฟฟ้าขาออกและระยะห่างระหว่างขดตัวนำที่โหลดต่างกัน



**รูปที่ 4** ประสิทธิภาพกับระยะห่างระหว่างขดตัวนำที่โหลดต่างกัน

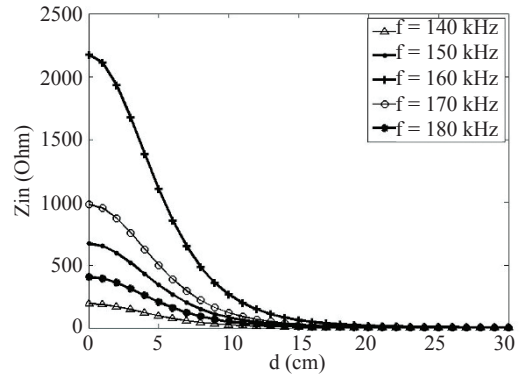


รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าขาออกและความถี่ ที่ไหลแตกต่างกัน

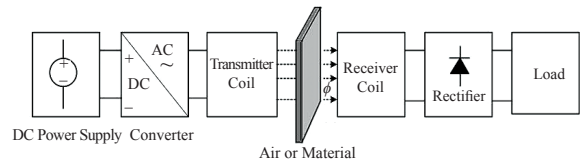


รูปที่ 6 ประสิทธิภาพและความถี่ที่ไหลแตกต่างกัน

พิจารณารูปที่ 5 และ 6 พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้น 2 จุดใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์ ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า Frequency Splitting ในขณะที่ประสิทธิภาพ มีค่าสูงสุด จุดเดียวที่ความถี่เรโซแนนซ์ ปรากฏการณ์ Frequency Splitting นี้เกิดขึ้นเมื่อตัวนำวางตัวอยู่ในระยะใกล้ ผลทำให้ในช่วงแรก กำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าต่ำทั้งๆ ที่ตัวนำวางตัวอยู่ใกล้กัน พิจารณารูปที่ 7 ประกอบกับสมการที่ (2) ถึง (6) พบว่าความถี่และความเหนี่ยวนำรวมมีผลต่อลักษณะของอิมพีแดนซ์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ส่งผลกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพพิจารณาตามทฤษฎีของการส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 7 อิมพีแดนซ์กับระยะห่างระหว่างขดตัวนำ



รูปที่ 8 องค์ประกอบของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

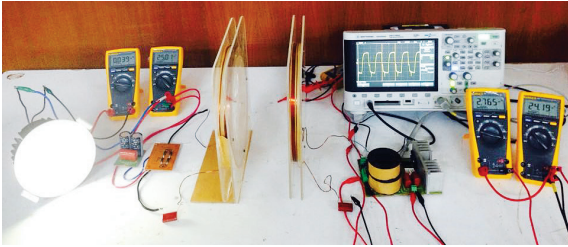
## 2.2 ออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

องค์ประกอบของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแสดงดังรูปที่ 8

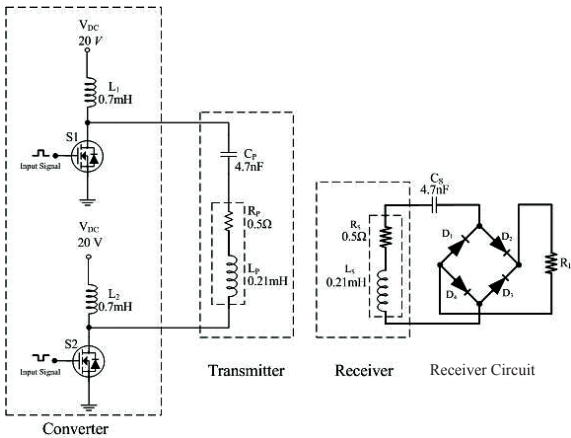
ส่วนประกอบหลักประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกระแสตรง คอนเวอร์เตอร์สำหรับแปลงกระแสตรงเป็นกระแสสลับ ทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ ขดตัวนำด้านส่ง (Transmitter) และด้านรับ (Receiver) ทำมาจากขดลวดทองแดงต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์พินบนแกนอากาศ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลผ่านขดตัวนำด้านส่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กส่งผ่านไปคล้องขดตัวนำด้านรับเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้ กระแสไฟฟ้าสลับความถี่สูงจึงต้องผ่านวงจรเรียงกระแสเป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อนจ่ายให้กับโหลดต่อไป แสดงวงจรขณะทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ดังรูปที่ 9

### 2.2.1 คอนเวอร์เตอร์ความถี่สูง

การออกแบบคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น ปรับค่าความถี่ได้สูงสุด 500 kHz แสดงวงจรดังรูปที่ 10 ทำการทดสอบจ่ายโหลดขนาด 0.54 kΩ (60W) ใช้แรงดันอินพุตกระแสตรง 20 V ความถี่เรโซแนนซ์ 160 kHz ระยะห่าง



รูปที่ 9 วงจรการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย



รูปที่ 10 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น

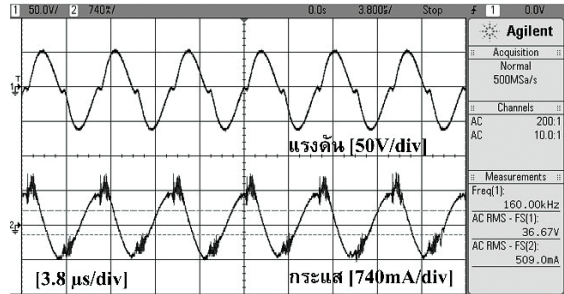
ระหว่างขดตัวนำ 10 cm ได้ลักษณะสัญญาณแรงดันและกระแสด้านขดรับและขดส่งกำลังงานแสดงดังรูปที่ 11

2.2.2 พารามิเตอร์ของวงจรส่ง กำลังไฟฟ้าไร้สาย ขดตัวนำด้านส่ง และด้านรับกำลังงาน ใช้ขดลวดทองแดงเบอร์ 18 SWG พันบนแกนอากาศเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm จำนวน 21 รอบ กว้าง 2 cm ค่าพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 1 โดยที่ค่าความเหนี่ยวนำความต้านทานทำการวัดค่าโดยใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ส่วนคาปาซิแตนซ์คำนวณให้สัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์และความเหนี่ยวนำ

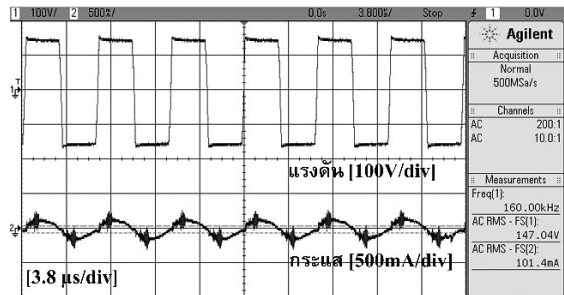
### 3. ผลการศึกษา

#### 3.1 การจำลองกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพ

ใช้ค่าพารามิเตอร์จากการออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายในตารางที่ 1 แทนลงในสมการที่ (2) และ (3)



(ก) สัญญาณด้านขาเข้าขดส่งกำลังงาน



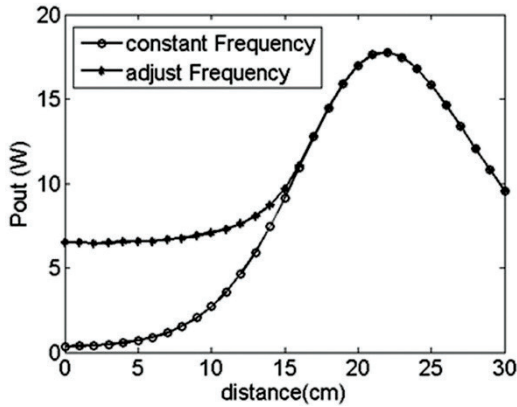
(ข) สัญญาณด้านขาออกขดรับกำลังงาน

รูปที่ 11 สัญญาณขาเข้าและขาออกวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายขณะจ่ายโหลด

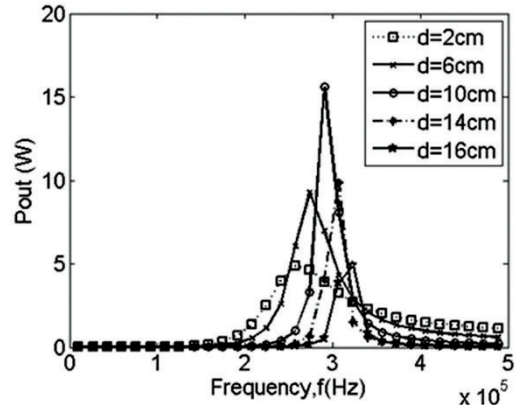
เพื่อศึกษาผลของความถี่ที่มีต่อกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพในกรณีต่างๆ ดังนี้

เมื่อระยะห่างระหว่างขดตัวนำ (d) เปลี่ยนแปลงทำให้ค่า Coefficient of Coupling (k) เปลี่ยนส่งผลให้ความเหนี่ยวนำร่วม (M) เปลี่ยนตาม จากนั้นจึงประมาณการค่าความถี่เรโซแนนซ์แต่ละระยะห่างโดยการแทนค่าความเหนี่ยวนำร่วมลงในสมการความถี่เรโซแนนซ์และแทนค่าลงในสมการกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ ได้ลักษณะของกราฟรูปที่ 12 และ 13

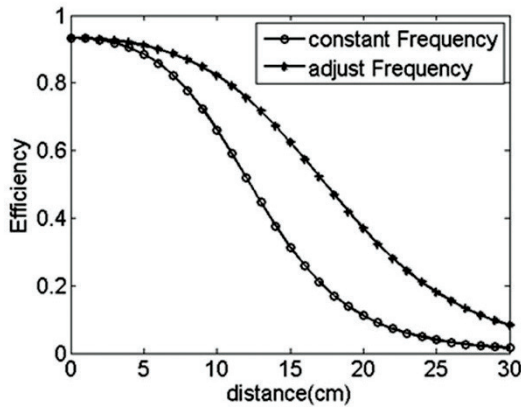
กราฟรูปที่ 14 และ 15 ได้จากการแทนค่าระยะห่างระหว่างขดตัวนำ (d) ลงในสมการ Coefficient of Coupling (k) ทำให้ความเหนี่ยวนำร่วม (M) เปลี่ยนแปลง จากนั้นจึงแทนค่าความเหนี่ยวนำร่วมลงในสมการกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ พบว่ากำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพมีค่าสูงสุดที่ความถี่ต่างกันเนื่องจากผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำร่วมทำให้หิมพ์แดนซ์เปลี่ยนทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนตาม



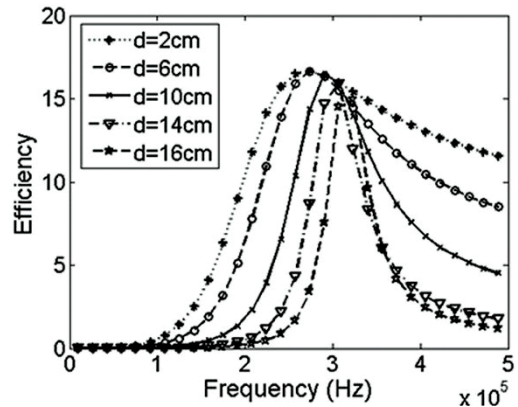
รูปที่ 12 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าขาออกในกรณีความถี่คงที่และปรับความถี่ตามระยะห่างขดตัวนำ



รูปที่ 14 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้ากับความถี่ที่ระยะห่างระหว่างขดตัวนำต่างกัน



รูปที่ 13 ผลการจำลองประสิทธิภาพในกรณีความถี่คงที่และปรับความถี่ตามระยะห่างขดตัวนำ



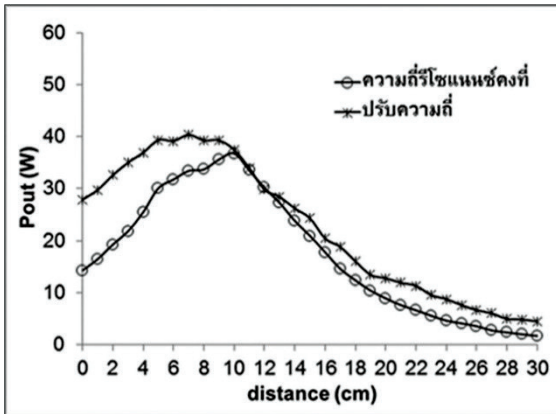
รูปที่ 15 ผลการจำลองประสิทธิภาพกับความถี่ที่ระยะห่างระหว่างขดตัวนำต่างกัน

### 3.2 การทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

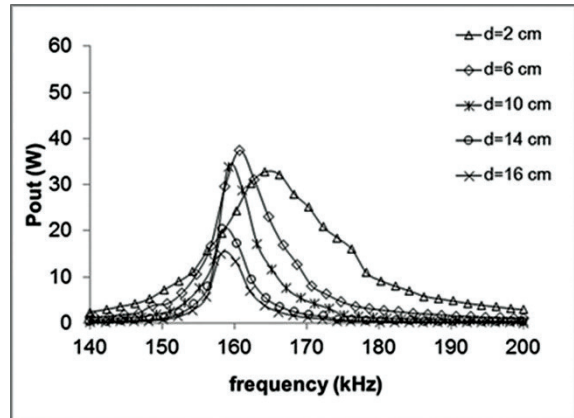
ทำการทดสอบจ่ายโหลดความต้านทานขนาด 0.54 kΩ (60 W) ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุท 20 V คงที่ตลอดการทดลอง ใช้ความถี่รีโซแนนซ์ 160 kHz ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาเข้าและขาออกของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้เครื่องมือวัดที่มีคุณสมบัติแบบ True RMS เพิ่มระยะห่างระหว่างขดตัวนำด้านส่งและด้านรับตั้งแต่ 0–30 cm ได้ลักษณะประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าขาออกของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

จากการปรับค่าความถี่ด้วยมือหาความถี่ที่ทำให้ส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด โดยใช้สัญญาณสี่เหลี่ยมจากออสซิลโลสโคป Agilent DOS-X 2002A ผ่านวงจรขับสำหรับควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟต การปรับค่าความถี่ทุกระยะห่างทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้ามียิ่งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีใช้ค่าความถี่รีโซแนนซ์คงที่ตลอดการทดลองโดยที่ กำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นสูงสุด 20.77% ที่ระยะห่าง 7 cm แสดงดังรูปที่ 16

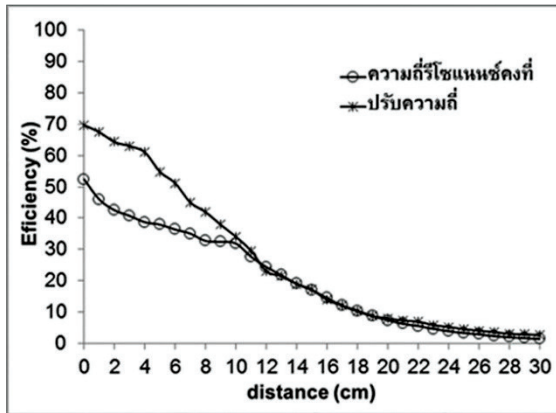
ลักษณะของกราฟประสิทธิภาพแสดงดังรูปที่ 17 พบว่าการปรับค่าความถี่ทุกระยะห่างทำให้ได้ค่า



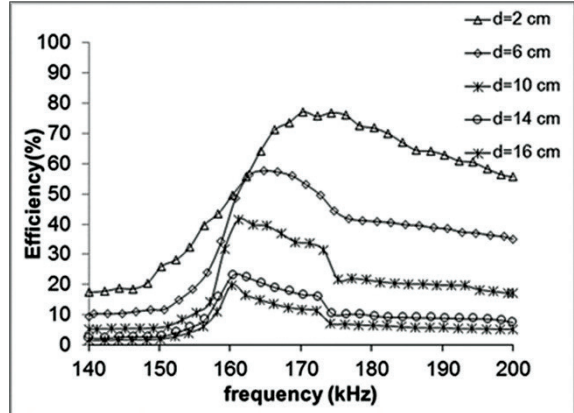
รูปที่ 16 กำลังไฟฟ้าขาออกในกรณีความถี่คงที่และปรับความถี่ตามระยะห่างขดตัวนำ



รูปที่ 18 กำลังไฟฟ้ากับความถี่ที่ระยะห่างระหว่างขดตัวนำต่างกัน



รูปที่ 17 ประสิทธิภาพในกรณีความถี่คงที่และปรับความถี่ตามระยะห่างขดตัวนำ



รูปที่ 19 ประสิทธิภาพกับความถี่ที่ระยะห่างระหว่างขดตัวนำต่างกัน

ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีใช้ค่าความถี่รีโซแนนซ์คงที่ตลอดการทดลองโดยที่ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 28.38% ที่ระยะห่าง 7 cm เมื่อเทียบกับตำแหน่งการเกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นสูงสุด 57.59% ที่ระยะห่าง 4 cm

กราฟรูปที่ 18 และ 19 ได้จากการทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ค่าความถี่ตั้งแต่ 140 ถึง 200 kHz พบว่ากำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพในแต่ละระยะห่างมีค่าสูงสุดต่างกันเนื่องจากความเหนี่ยวนำรวม อิมพีแดนซ์ และความถี่รีโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างนั่นเอง

#### 4. อภิปรายผลและสรุป

ลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายลดลงอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างขดตัวนำด้านส่งและด้านรับ เนื่องจากความเหนี่ยวนำรวมเปลี่ยนแปลงตามระยะทางเป็นผลให้แต่ละระยะห่างมีค่าความถี่รีโซแนนซ์ต่างกันออกไป การชดเชยผลของการเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำรวมนี้สามารถทำได้โดยการปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์ ในการปรับค่าความถี่มีปรากฏการณ์ที่ต้องพิจารณาเรียกว่า Frequency Splitting ทำให้กำลังไฟฟ้า



ขาออกมีค่าสูงสุดสองจุด ในขณะที่ประสิทธิภาพสูงสุดจุดเดียวในตำแหน่งความถี่รีโซแนนซ์ จากผลการทดสอบการปรับค่าความถี่ตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างขดตัวนำพบว่ากำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นสูงสุด 20.77% ในขณะที่ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 28.38% ที่ระยะห่างเดียวกัน 7 cm โดยที่ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นสูงสุด 57.59% ที่ระยะห่าง 4 cm

การเปลี่ยนแปลงค่า Mutual Inductance ขึ้นอยู่กับระยะห่าง ขนาด และการจัดวางตัวนำ โดยที่ประสิทธิภาพจะมีค่าสูงสุดที่ระยะห่างหนึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบพารามิเตอร์ เมื่อระยะห่างระหว่างตัวนำเปลี่ยนแปลงทำให้ค่า Mutual Inductance เปลี่ยนทำให้ค่าอิมพีแดนซ์และความถี่รีโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงตาม การปรับค่าความถี่เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงควรปรับเมื่อขดตัวนำไม่ได้อยู่ในลักษณะตามที่ออกแบบไว้ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้โดยที่ในทางปฏิบัติ การปรับค่าความถี่จะนำสัญญาณกระแสและแรงดันมาวิเคราะห์เพื่อทำการปรับความถี่สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้หลักการที่ว่ากระแสจะมีค่าสูงสุดในสภาวะรีโซแนนซ์ที่ระยะห่างนั้นๆ ส่วนวิธีการควบคุมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้

เทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานในหลายลักษณะ เช่น งานทางการแพทย์ในการส่งกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่ฝังอยู่ในร่างกายมนุษย์โดยไม่ต้องผ่าตัดใหม่ การประยุกต์ใช้ให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าลดอันตรายจากการสัมผัสโดยตรงหรือประยุกต์ใช้ร่วมกับพลังงานทดแทน เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการประยุกต์ใช้ไร้สายให้กับรถไฟฟาลดปัญหาการประยุกต์ใช้เมื่อใช้งานรถพร้อมกันเป็นจำนวนมาก

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบ 2 ขด ในงานวิจัยในครั้งนี้เหมาะสำหรับพัฒนาใช้กับงานประยุกต์ใช้ให้กับรถยนต์ไฟฟ้าซึ่งผู้วิจัยจะได้ทำการศึกษาพัฒนาและรายงานผลการวิจัยต่อไป อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าความสูญเสียจากการ Coupling ระหว่างขดตัวนำจากการใช้ตัวกลางอากาศมีค่ามาก ดูเหมือนว่าจะไม่คุ้มค่าต่อการ

ใช้งาน แต่เมื่อพิจารณาด้านประโยชน์ที่ได้รับจากการประยุกต์ใช้งานจึงเป็นเทคโนโลยีที่คุ้มค่าต่อการพัฒนาประกอบกับในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าขาออกซึ่งเป็นหัวข้อการวิจัยที่ได้รับความสนใจพัฒนาอย่างแพร่หลาย ดังนั้นถ้าสามารถพัฒนาให้การส่งกำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าขาออกสูงขึ้นได้จะเป็นเทคโนโลยีที่เป็นประโยชน์อย่างมาก

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ สำหรับทุนอุดหนุนการวิจัยจากโครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์งานสร้างสรรค์ และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน (HRM) ปี 2557 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Y. R. Hui, W. Zhong, and C. K. Lee, "A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4500–4511, September, 2014.
- [2] W. 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 Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 1, January, 2013.
- [3] C. K. Lee, W. Zhong, and S. Y. R. Hui, "Effects of magnetic coupling of nonadjacent resonators on wireless power domino – resonator systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 4, pp. 1905–1916, April, 2012.
- [4] Y. Lim, S. Lim, and J. Park, "An adaptive impedance-matching network based on a novel capacitor matrix for wireless power transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29,



- no. 8, August, 2014.
- [5] T. C. Beh, M. Kato, T. Imura, S. Oh, and Y. Hori, "Automated impedance matching system for robust wireless power transfer via magnetic resonance coupling," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 9, pp. 3689–3698, September, 2013.
- [6] T. C. Beh, T. Imura, M. Kato, and Y. Hori, "Basic study of improving efficiency of wireless power transfer via magnetic resonance coupling based on impedance matching," in *Industrial Electronics (ISIE), IEEE International Symposium*, 2010, pp. 2011–2016.
- [7] A. Ong, J. P. K. Sampath, G. F. H. Tan Yenkeng, D. M. Vilathgamuwa, and N. X. Bac, "Analysis of impedance matched circuit for wireless power transfer," in *Industrial Electronics Society, IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE*, 2014, pp. 2965–2970.
- [8] N. Y. Kim, K. Y. Kim, and C. W. Kim, "Automated frequency tracking system for efficient mid-range magnetic resonance wireless power transfer," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 54, no. 6, pp. 1423–1426, June 2012.
- [9] A. P. Sample, D. A. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544–554, February 2011.
- [10] Y. Zhang, Z. Zhao, and K. Chen, "Frequency-splitting analysis of four-coil resonant wireless power transfer," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 4, pp. 2436–2445, July/August, 2014.
- [11] Y. Zhang and Z. Zhao, "Frequency splitting analysis of two-coil resonant wireless Power transfer," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 400–402, March 2014.
- [12] W. Q. Niu, W. Gu, J. X. Chu, and A. D. Shen, "Frequency splitting pattern in wireless power relay transfer," *IET. Circuits, Devices and System.*, vol. 8, no. 6, pp. 561–567, July 2014.
- [13] W. Q. Niu, W. Gu, J. X. Chu, and A. D. Shen, "Coupled-mode analysis of frequency splitting phenomena in CPT system," *Electronics Letters*, vol. 48, no. 12, pp. 723–724, June 2012.
- [14] J. O. Mur-Miranda, G. Fanti, Y. Feng, K. Omanakuttan, R. Ongie, A. Setjoadi, and N. Sharpe, "Wireless power transfer using weakly coupled magnetostatic resonators," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) IEEE*, 2010, pp. 4179–4186.