

การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายในรถยนต์ไฟฟ้า
WIRELESS POWER TRANSFER IN ELECTRIC CAR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

WIRELESS POWER TRANSFER IN ELECTRIC CAR



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR'S DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปีการศึกษา 2563

การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายในรถยนต์ไฟฟ้า

WIRELESS POWER TRANSFER IN ELECTRIC CAR



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. สุรินทร์ คำฝอย

อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาโทปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายในรถยนต์ไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นายกฤษณ์นนท์ นาคแก้ว
2. นายจิรัฎฐ์ สมร่าง
3. นายชนาธิป เกษติ
4. นายณัฐพันธ์ นามลี




.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายในรถยนต์ไฟฟ้า

นายกฤษณ์นันทน์ นาคแก้ว

นายจิรัฏฐ์ สมร่าง

นายชนาธิป เกษดี

นายณัฐพนธ์ นามลี

รศ.ดร. สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเรื่องการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับติดตั้งในรถยนต์ไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าแบบ Inductive Power Transfer ในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างขดลวดฝั่งส่งและขดลวดฝั่งรับที่ติดตั้งกับไฟท้ายในรถยนต์ต้นแบบ โดยปัญหาทั่วไปของการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย คือ ประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นในโปรเจกต์นี้ใช้หลักการของการ Resonance Inductive Coupling และวงจรชดเชยแบบ LLC เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน รถยนต์ต้นแบบที่ได้รับการปรับปรุงสามารถส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ระยะอากาศ 5 เซนติเมตร โดยมีพิกัดที่ใช้งานอยู่ที่ 20 วัตต์ และมีประสิทธิภาพ 78.181 % ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ยิ่งไปกว่านั้นผลการทดลองและผลการจำลองสามารถนำไปใช้ต่อยอดการประยุกต์ใช้การส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

WIRELESS POWER TRANSFER IN ELECTRIC CAR

Mr. Krittanan Nakkaew

Mr. Jirat Somrang

Mr. Chanathip Kasdee

Mr. Nathaphon Namlee

Assoc. Prof. Dr. Surin Khomfoi Advisor

Mr. Chaitat Maneein Advisor

Year 2020

Abstract

A wireless power transfer in an electric car is studied in this thesis. An Inductive Power Transfer method is used to transfer electrical power between primary coil and secondary coil which is used for a taillight lamp of an electric vehicle prototype. As known, a general problem of wireless power transfer technique is low efficiency. Therefore, in this project, the proposed design is developed by using Resonance Inductive Coupling and an LLC compensation technique to improve efficiency problem. The developed prototype can transfer power at 20W with 5 cm air gap by achieving 78.181 % at resonant frequency. In addition, simulation and experimental results are also investigated for further wireless power transferred applications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย และอาจารย์ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้คอยให้คำแนะนำแนวทางและให้ข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการมาด้วยดีตลอด อีกทั้งให้ความอนุเคราะห์ในการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ จนโครงการครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ Renewable Energy Applications Laboratory ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ที่จำเป็นต่างๆ ในการทำโครงการได้อย่างครบถ้วน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรพงษ์ ไพรินทร์ และ นาย ปณณวัฒน์ เพียรจัด ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำโครงการและการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ ภายในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ภายใน Renewable Energy Applications Laboratory ทุกคนที่ให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือโครงการให้ผ่านไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท ELEKTRISOLAR แห่งประเทศไทย ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นธุระในการจัดหาลวดตัวนำแบบ Litz Wire เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการสร้างขดลวดตัวนำภายในของโครงการนี้

นอกจากนี้คณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยอย่างดี และคุณนิทยา นากสุข เจ้าหน้าที่รับผิดชอบห้องธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกโครงการ

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ต้องขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนทั้งในด้านการเงินและคอยให้กำลังใจ รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่คอยเป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือตลอดการทำโครงการในครั้งนี้ให้ผ่านไปได้

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

III

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	3
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
1.6 แผนการดำเนินโครงการ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 วงจรเรโซแนนซ์	5
2.2 ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant frequency)	5
2.3 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)	8
2.4 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนซ์	9
2.5 วงจรสวิตชิงความถี่สูงแบบเรโซแนนซ์	10
2.5.1 วงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์	11
2.5.2 วงจรชดเชยแบบพื้นฐาน	11
2.5.3 วงจรชดเชยแบบผสม	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

2.6	วงจรเรียงกระแส	13
2.6.1	วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	13
2.7	วงจรสมมูลของระบบ	16
2.8	ผลกระทบจากการใช้งานที่ความถี่สูง	22
2.8.1	ผลกระทบที่ผิว (Skin Effect)	22
2.8.2	ผลกระทบใกล้ชิด (Proximity Effect)	23
บทที่ 3	การออกแบบระบบส่งกำลังไร้สายสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า	24
3.1	เป้าหมายการออกแบบระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายภายในรถยนต์ไฟฟ้า	24
3.2	การออกแบบวงจรฝั่งส่งกำลังไฟฟ้า	24
3.2.1	การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง	24
3.3	การออกแบบวงจรส่งกำลังไร้สายผ่านอากาศ	26
3.3.1	การออกแบบวงจรชดเชยแบบLLC	26
3.3.2	การออกแบบขดลวดส่งกำลัง	35
3.4	การออกแบบวงจรฝั่งรับกำลังไฟฟ้า	43
3.4.1	วงจรเรียงกระแส (Rectifier)	43
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลอง	45
4.1	อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า	44
4.2	ขั้นตอนลำดับการทดลอง	44
4.3	ผลการทดลอง	45
4.4	สรุปผล	50
บทที่ 5	สรุปผลการดำเนินงาน	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ(ต่อ)

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	51
5.2 ปัญหาระหว่างการดำเนินงาน	52
5.3 แนวทางการแก้ไขและการดำเนินงานในอนาคต	52
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	56
ภาคผนวก ข การจำลองผลการทำงาน	61
ภาคผนวก ค ข้อมูลอุปกรณ์และเครื่องมือวัด	72
ภาคผนวก ง ภาพผลการทดลอง	78
ประวัติผู้เขียน	83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VI

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและแบบขนาน	5
2.2 ผลของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่มีต่อไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ	6
2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impedance กับความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม	7
2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impedance กับความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน	7
2.5 ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กในแกนที่มีลักษณะต่างกัน	8
2.6 โครงสร้างพื้นฐานของการส่งผ่านกำลังเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนซ์	9
2.7 (1) วงจรชดเชยแบบอนุกรม, (2) วงจรชดเชยแบบขนาน	11
2.8 วงจรชดเชยแบบผสม LLC	12
2.9 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	13
2.10 (1) แรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส, (2) แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแส	14
2.11 แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเมื่อมีการต่อขานตัวเก็บประจุ	16
2.12 วงจรไฟฟารวมของระบบส่งกำลังไร้สาย	16
2.13 (1) วงจรสมมูลรวมของระบบอ้างอิงเทียบฝั่งปฐมภูมิแบบไม่เป็นเชิงเส้น, (2) วงจรสมมูลรวมของระบบอ้างอิงเทียบฝั่งปฐมภูมิแบบเป็นเชิงเส้น เมื่อพิจารณาด้วยวิธี FHA	17
2.14 กราฟผลตอบสนองของสมการฟังก์ชันส่งผ่าน (1) $L_n=5$, (2) $L_n=20$	21
2.15 พื้นที่หน้าตัดจำลองของตัวนำที่มีความถี่ผิวเมื่อมีความถี่ที่เปลี่ยนไป	22
3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์	25
3.2 กราฟค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ผลได้ที่ค่า L_n , Q_e	29
3.3 ขนาดของ Litz Wire ที่เหมาะสมกับย่านความถี่ต่างๆที่ใช้งาน	36
3.4 ขดลวดส่งกำลังแบบ Circular Planar Spiral	41
3.5 ขดลวดส่งกำลังแบบ Rectangular Planar Spiral	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

3.6 (1) ชุดขดลวดส่งกำลังด้านส่ง, (2) ชุดขดลวดส่งกำลังด้านรับ	43
3.7 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุกรอง	44
4.1 กราฟเปรียบเทียบผลแรงดันด้านนอกจากการทดลองและผลแรงดันด้านนอกจากโปรแกรม PSpice	48
4.2 กราฟเปรียบเทียบผลกระแสด้านนอกจากการทดลองและผลกระแสด้านนอกจากโปรแกรม PSpice	48
4.3 กราฟแรงดันหลังวงจรอินเวอร์เตอร์ฝั่งส่งที่ 20 วัตต์	49
4.4 กราฟแรงดันเข้าวงจรเรียงกระแสฝั่งรับที่ 20 วัตต์	49
4.5 กราฟแรงดันหลังวงจรเรียงกระแสฝั่งรับที่ 20 วัตต์	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการ	4
3.1 ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้พิจารณาในการออกแบบระบบส่งกำลังพิกัด 20 วัตต์	27
3.2 ค่าตัวแปรที่ได้จากการออกแบบวงจรส่งผ่านกำลังแบบ Resonant LLC topology พิกัด 20 วัตต์	35
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนที่มากที่สุดเกี่ยวกับค่าคงที่	38
3.4 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์กับรูปร่างของขดลวด	40
3.5 ค่าความเหนี่ยวนำและลักษณะทางกายภาพของขดลวดฝั่งส่งและฝั่งรับของแต่ละรูปร่าง	42
3.6 ค่าความเหนี่ยวนำและสัมประสิทธิ์การคัปปลิงของขดลวดของแต่ละรูปร่าง	42
3.7 ค่าความเหนี่ยวนำและลักษณะทางกายภาพของขดลวดฝั่งส่งและฝั่งรับจากการวัดจริง	42
3.8 เปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำและสัมประสิทธิ์การคัปปลิงของขดลวดจากการจำลองและวัดจริง	43
4.1 ค่าตัวแปรทดลองส่งกำลังขนาด 20 วัตต์	46
4.2 ผลการทดลองส่งกำลังขนาด 20 วัตต์	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จากสาเหตุการเกิดเพลิงไหม้ของรถยนต์นั้น เกิดจากการที่ระบบไฟฟ้าบกพร่องมากเป็นถึงอันดับที่ 2 โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 สาเหตุหลักๆ คือ 1. ความบกพร่องของหน้าสัมผัสที่กระแสไฟฟ้าต้องไหลผ่านเช่น รอยบัดกรีหลวมหรือร้าว หน้าสัมผัสของขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ลดลงเช่น ความชื้นหรือน้ำเข้าถึงแล้วเกิดการกัดกร่อนของพื้นที่สัมผัสที่กระแสไฟฟ้าต้องไหลผ่านลดลง ความต้านทานก็เพิ่มสูงขึ้นมากจึงเกิดความร้อนสูงขึ้นบริเวณนี้ ซึ่งตัวอุปกรณ์ที่เข้าข่ายนี้ก็มีอยู่ไม่น้อยเช่น ระบบกันขโมย พัดลมไฟฟ้า ระบายความร้อน คอนเดนเซอร์ของระบบปรับอากาศ แผงวงจรควบคุมอุณหภูมิห้องโดยสารของระบบปรับอากาศ 2. การลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าเช่น ฉนวนหุ้มสายไฟกรอบเปราะแล้วหักหรืออาจมีตำแหน่งเปลี่ยน หรือไม่ก็ถูกชิ้นส่วนที่เป็นกลไกของระบบต่างๆ เสียดสีจนสีถึงเส้นโลหะ ไฟฟ้าจะไหลลัดวงจรด้วยกระแสที่สูงมาก เกิดความร้อนที่เส้นโลหะหลอมละลายเปลือกสายไฟก่อนที่จะลุกไหม้ขึ้น 3. การชำรุดของอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยตรงเช่น แบตเตอรี่ของพัดลมไฟฟ้าชำรุดจนหมุนไม่ได้และเกิดความร้อนสูงที่มอเตอร์จนลุกไหม้ขึ้น หรือเฟืองขับของมอเตอร์สตาร์ทไม่ถอยกลับ ทำให้มอเตอร์สตาร์ทหมุนไปพร้อมๆ กับเครื่องยนต์ตลอดเวลาด้วยความเร็วสูงกว่าหลายสิบเท่าเกิดการเสียดสีของแบตเตอรี่ร้อนจัดและลุกไหม้ขึ้นในที่สุด

จากการเกิดปัญหาของระบบไฟฟ้าบกพร่องที่เกิดขึ้นซึ่งส่วนหนึ่งมีความเกี่ยวข้องกับสายไฟ หากเราสามารถลดจำนวนหรือความยาวของสายไฟลงได้ ก็หมายถึงการลดปัญหาการเกิดเพลิงไหม้ในรถยนต์ได้ด้วยเช่นกัน ซึ่งการลดความยาวของสายไฟนั้นเหมาะกับการที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าเป็นอย่างมาก อีกทั้งเทรนด์ของรถยนต์ไฟฟ้าค่อนข้างจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นในช่วงปีหลังๆมานี้ และยังมีข้อดีเมื่อเทียบกับรถเครื่องยนต์สันดาปเช่น ในเรื่องของความเงียบและอัตราเร่งที่ได้ตั้งใจของคนขับ เนื่องจากการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่สู่มอเตอร์เพื่อทำการขับเคลื่อน จึงไม่ก่อให้เกิดการเผาไหม้ ทำให้เสียงของการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้านั้นเงียบกว่าหลายเท่า และสามารถทำอัตราเร่งให้เป็นไปได้อย่างที่ใจต้องการเพราะไม่มีขั้นตอนการทดเกียร์ ทำให้รถยนต์สามารถตอบสนองการขับที่ได้ตามความต้องการของผู้ขับ อีกทั้งในเรื่องของการประหยัดค่าใช้จ่ายและค่าซ่อมบำรุง เพราะรถยนต์ชนิดนี้ใช้พลังงานไฟฟ้ามาแทนที่ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีราคาสูง เช่นเดียวกับกับค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรถยนต์ไฟฟ้า ที่จะมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อยกว่าเพราะไม่มีเครื่องยนต์และไม่ต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง จึงทำให้การดูแลรักษาเป็นเรื่องที่ง่ายขึ้น อีกข้อหนึ่งที่สำคัญคือเรื่องของความปลอดภัยของรถยนต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ก่อให้เกิดไอเสียและมลภาวะทางอากาศที่นำไปสู่ภาวะโลกร้อน อย่างไรก็ตามในปัจจุบันรถยนต์ไฟฟ้าของรถยนต์ Tesla รุ่น Model S มีความยาวรวมของสายไฟในรถอยู่ที่ 3 กิโลเมตรและต่อมาในรุ่น Model 3 สามารถลดความยาวสายไฟลงมาได้เหลือ 1.5 กิโลเมตรและล่าสุดรุ่น Model Y ได้ตั้งเป้าว่าจะลดความยาวสายไฟให้เหลือเพียง 100 เมตรเท่านั้น สิ่งที่ Tesla ได้ทำคือการออกแบบสถาปัตยกรรมการเดินสายไฟแบบใหม่เพื่อลดความยาวของสายไฟในรถยนต์ไฟฟ้า เราจึงได้หาวิธีอื่นๆ ที่จะสามารถลดความยาวของสายไฟในรถยนต์ไฟฟ้าซึ่งก็คือวิธีการใช้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายภายในรถยนต์

การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟไปยังโหลดไฟฟ้าโดยไม่ต้องต่อสายไฟ มีความน่าเชื่อถือ มีประสิทธิภาพ รวดเร็ว ค่าบำรุงรักษาต่ำและสามารถใช้ได้ทั้งระยะใกล้หรือระยะไกล หลักการทำงานพื้นฐานของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายคือวัตถุที่มีความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงกัน ในกฎของการสั่นพ้องของแม่เหล็กที่มีการเข้าคู่กันอย่างดีจะมีแนวโน้มที่จะแลกเปลี่ยนพลังงานกันและมีการกระจายพลังงานไปยังวัตถุที่ไม่ได้เรโซแนนซ์ด้วยค่อนข้างน้อย แต่วิธีนี้จะมีปัญหาในเรื่องของประสิทธิภาพของการส่งผ่านกำลังซึ่งเกิดจากปัจจัยหลายประการ อีกทั้งการทำงานของระบบนี้จะมีความถี่สูงซึ่งจะต้องคำนึงถึงผลกระทบของความถี่และสนามแม่เหล็กที่อาจจะส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตอื่นๆโดยรอบ แต่อย่างไรก็ตามระบบส่งผ่านกำลังแบบไร้สายถือเป็นก้าวสำคัญในการเริ่มต้นเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาและออกแบบระบบส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาและออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์
3. เพื่อลดความยาวของสายไฟที่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า
4. เพื่อส่งเสริมเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับรถยนต์ไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าขนาด 20 W แบบไร้สายผ่านอากาศในระยะห่างไม่เกิน 5 cm
2. ความถี่ที่ใช้ในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจะอยู่ในย่านความถี่สูง
3. ประสิทธิภาพของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายด้วยวิธี Resonant Inductive Coupling
2. วงจร Half Bridge Inverter
3. วงจรเรียงกระแสแบบ Full Bridge
4. ความถี่ที่ใช้ในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ความถี่ 100 kHz

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่อาศัยหลักการเหนี่ยวนำของขดลวดภายใต้สนามแม่เหล็ก
2. ได้ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการออกแบบระบบส่งผ่านกำลังแบบไร้สาย
3. ได้ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงแบบฮาล์ฟบริดจ์
4. สามารถนำไปต่อยอดและพัฒนาเพื่อใช้งานกับรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.6 แผนการดำเนินงาน

คณะผู้จัดทำงานวิจัยได้มีการวางแผนการดำเนินงาน โดยมีระยะเวลาดำเนินการ ตั้งแต่ วันที่ 21 สิงหาคม 2563 ถึง 31 เมษายน 2564 ดังนี้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2563					พ.ศ. 2564			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย									
2. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับวงจรสวิตซ์ความถี่สูง									
3. ออกแบบวงจรสวิตซ์ความถี่สูง									
4. ทดสอบวงจร									
5. สร้างขดลวดฝั่งส่งและฝั่งรับกำลัง									
6. ทดสอบการส่งกำลังแบบไร้สายของชิ้นงาน									
7. แก้ไขปรับปรุงวงจรให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น									
8. ทดสอบวงจรหลังจากทำการปรับปรุงแล้ว									
9. สรุปและประเมินผลโครงการ									
10. จัดทำและรวบรวมปริญญานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรเรโซแนนซ์

วงจรเรโซแนนซ์เป็นวงจรผสมระหว่างตัวเก็บประจุกับขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งมีความสำคัญในการใช้งานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบอนาล็อกด้วยผลต่อสัญญาณกระแสสลับของขดลวดและตัวเก็บประจุซึ่งแตกต่างกัน ในทางตรงกันข้าม ก็จะทำให้เกิดผลเสียต่อแรงดันในกระแสตรงและกระแสสลับในลักษณะต่างๆ เช่น เกิดการจ่ายและรับกระแสให้กันและกัน ทำให้เกิดสัญญาณกระแสสลับตกคร่อมในวงจรขึ้น เมื่อวงจรได้รับแรงดันกระแสตรงจะเกิดการต่อต้านและยอมให้สัญญาณกระแสสลับบางความถี่ผ่านไปได้ เป็นต้น

วงจรเรโซแนนซ์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและแบบขนาน



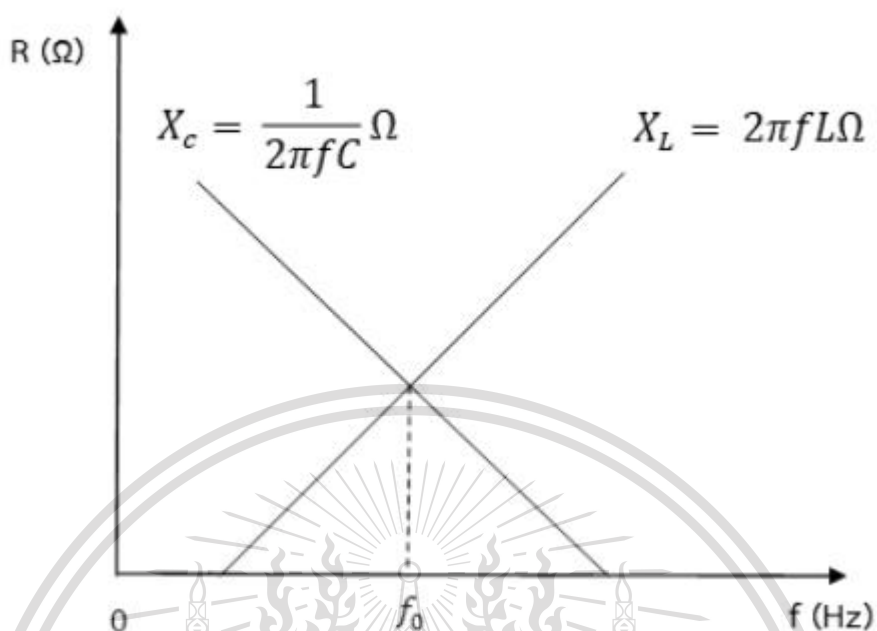
รูปที่ 2.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและแบบขนาน

2.2 ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency)

ความถี่เรโซแนนซ์ คือค่าความถี่ค่าหนึ่งที่ทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ $X_L = X_C$ ทำให้เกิดการหักล้างกันหมด ทำให้เหลือเฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ $Z = R$ ส่งผลให้แรงดันและกระแสในวงจรมีเฟสตรงกัน และตัวประกอบกำลังของวงจรมีค่าเป็น 1 ตามทฤษฎี ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดัน

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.2 ผลของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่มีต่อไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ

โดย

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

(2.1)

f_0 คือ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในวงจร มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

2π คือ ค่าคงที่

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดในวงจร มีหน่วยเป็น เฮนรี่ (H)

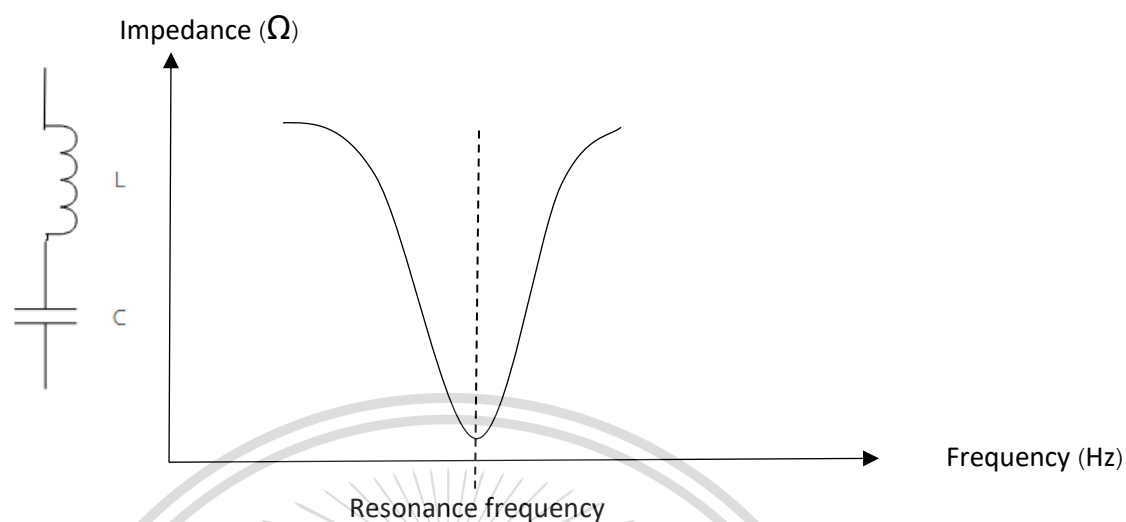
C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)

ซึ่งสามารถแสดงผลต่อวงจร RLC แบบอนุกรมและแบบขนานได้ดังรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

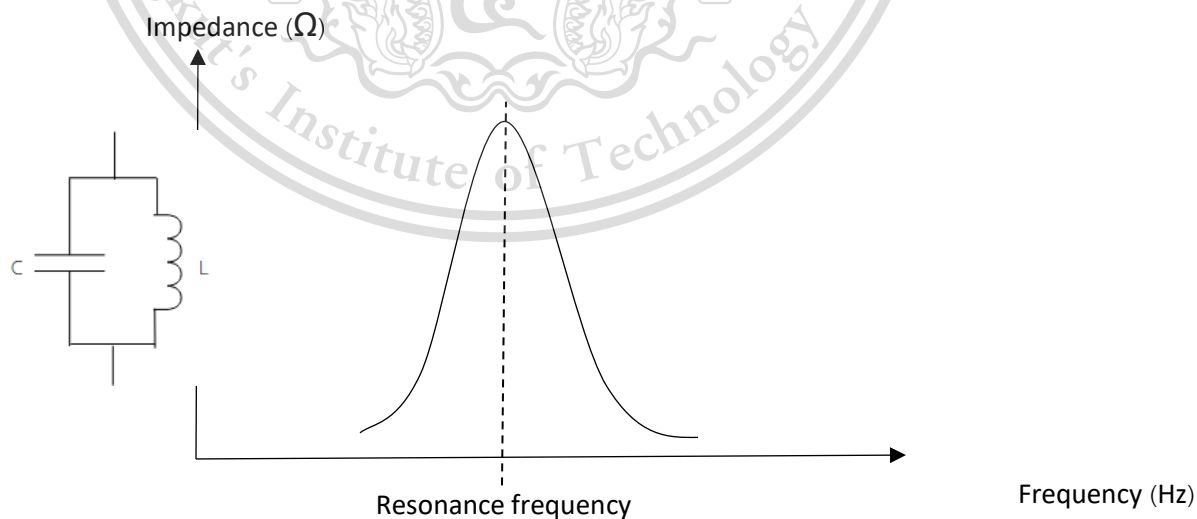
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impedance กับความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

ที่ความถี่ที่ทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ส่งผลให้ผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมมีอิมพีแดนซ์ค่าต่ำสุดและกระแสที่ไหลในวงจรมีค่าสูงสุด



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impedance กับความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

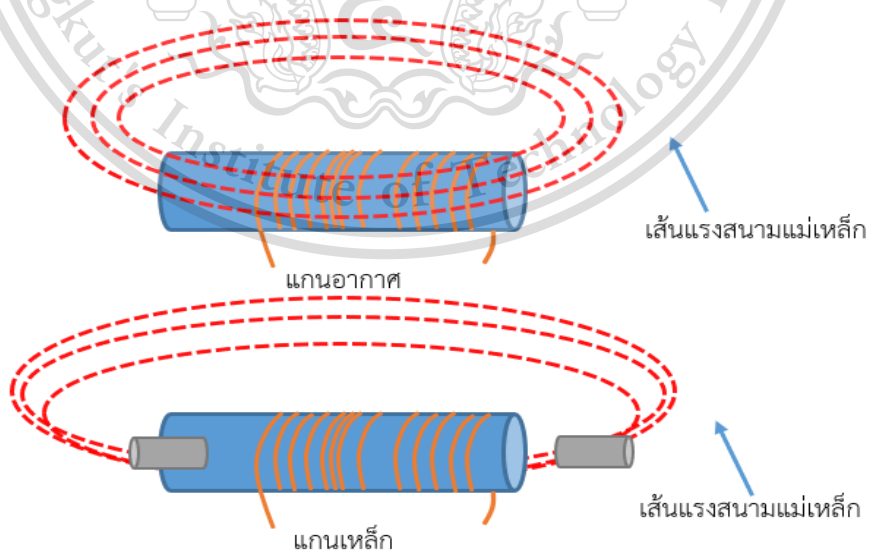
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ที่ความถี่ที่ทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์ส่งผลให้ผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานมีอิมพีแดนซ์ค่าสูงสุดและกระแสที่ไหลในวงจรมีค่าต่ำสุด

2.3 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น ตัวเหนี่ยวนำเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อินดักเตอร์หรือ L มีหน่วยเป็น Henry (H) ตัวเหนี่ยวนำนั้่นนิยมนำไปใช้ในการปรับความถี่โดยอาศัยหลักการของลวดทองแดงนำมาพันหลายๆรอบที่เรียกว่า ขดลวด (Coil) แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปเพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น โครงสร้างประกอบด้วยขดลวด (Coil) พันรอบแกน (Core) ซึ่งแกนจะมีหลายแบบมีทั้งแกนอากาศ , แกนเหล็ก หรือแกนเฟอร์ไรต์ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการเหนี่ยวนำไฟฟ้าและลักษณะการพันขดลวดตัวนำที่แตกต่างกัน เมื่อนำเส้นลวดตัวนำมาพันเป็นขดจะส่งผลให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบลวดตัวนำเกิดการเสริมกันขึ้นและสนามแม่เหล็กเกิดความเข้มเพิ่มมากขึ้น ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 2.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.5 ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กในแกนที่มีลักษณะต่างกัน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

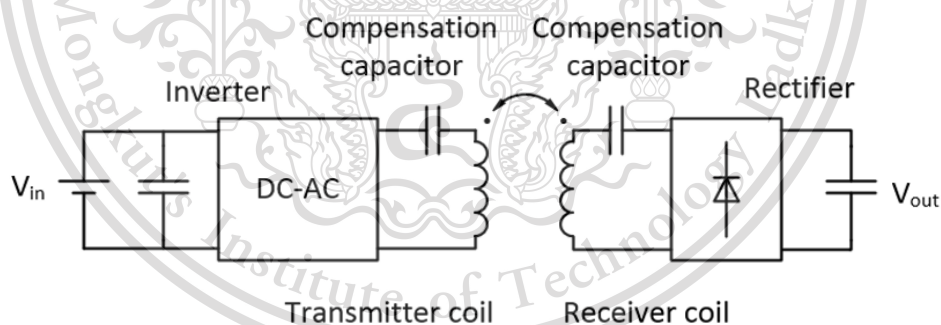
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การทำงานของตัวเหนี่ยวนำอาศัยสมบัติที่เรียกว่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self-inductance) คือ เมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น ถ้ากระแสที่ผ่านขดลวดเปลี่ยนแปลง ฟลักซ์ที่เชื่อมผ่านขดลวดจะเปลี่ยนแปลงด้วย ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะมีทิศทางที่ต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแส นั่นคือ ถ้ากระแสเพิ่มขึ้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะอยู่ในทิศทางที่ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นซึ่งกระแสลัดในขดลวดทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงกับเวลาซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดในทิศทางที่ต้านการเปลี่ยนของกระแส

2.4 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนซ์

การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนซ์ (Resonance Inductive Power Transfer, RIPT) เป็นหลักการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการเช่นเดียวกับหม้อแปลงกำลัง โดยหม้อแปลงของวงจรส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายจะเป็นแกนอากาศ ซึ่งจะส่งผ่านกำลังได้จากค่าความเหนี่ยวนำเกี่ยวค้อง (Mutual Inductance) ของขดลวดฝั่งส่งและขดลวดฝั่งรับ ที่ขดลวดฝั่งรับจะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induce voltage) ขึ้น ขณะที่ขดลวดฝั่งส่งมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน การส่งผ่านกำลังไฟฟ้านี้เรียกว่า Inductive Power Transfer (IPT)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานของการส่งผ่านกำลังเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนซ์

Resonant Inductive Power Transfer หรือ RIPT มีการต่อเชื่อมวงจรชดเชยหรือ Compensation Network ร่วมอยู่ด้วยดังรูปที่ 2.6 วงจรชดเชยทำหน้าที่ชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟให้แก่ขดลวดทั้งสองฝั่ง ค่ารีแอคแตนซ์ของขดลวด X_L จะมีค่าเท่ากับค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ X_C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรจะเหลือเพียง $Z = R$ วงจรส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไร้สายจะทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ (f_0) มีค่าเป็นไปตามสมการที่ (2.1)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.1)$$

เมื่อ f_0 คือ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในวงจร มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด มีหน่วยเป็น เฮนรี (H)

C คือ ค่าเก็บประจุของตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)

โดยทั่วไปย่านความถี่การทำงานของวงจร RIPT จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งมีผลให้เกิดการส่งผ่านกำลังสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์การคับปลิง (coupling coefficient, K) จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.3 ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขดลวดฝั่งส่งและขดลวดฝั่งรับ ตามมาตรฐานของรถยนต์ไฟฟ้าที่ประมาณ 150 ถึง 300 มิลลิเมตร มีค่าเป็นไปตามสมการที่ (2.2)

$$K = \frac{L_m}{\sqrt{L_{tx} \cdot L_{rx}}} \quad (2.2)$$

เมื่อ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การคับปลิง

L_m คือ ค่าความเหนี่ยวนำเกี่ยวคล้อง มีหน่วยเป็น เฮนรี (H)

L_{tx} คือ ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดฝั่งส่ง มีหน่วยเป็น เฮนรี (H)

L_{rx} คือ ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดฝั่งรับ มีหน่วยเป็น เฮนรี (H)

2.5 วงจรสวิตชิงความถี่สูงแบบเรโซแนนซ์

วงจรสวิตชิงความถี่สูงหรืออินเวอร์เตอร์ความถี่สูงใช้สำหรับการแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นหลังจากวิจัยเชื่อมโยงทางดีซีที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยอาร์คไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

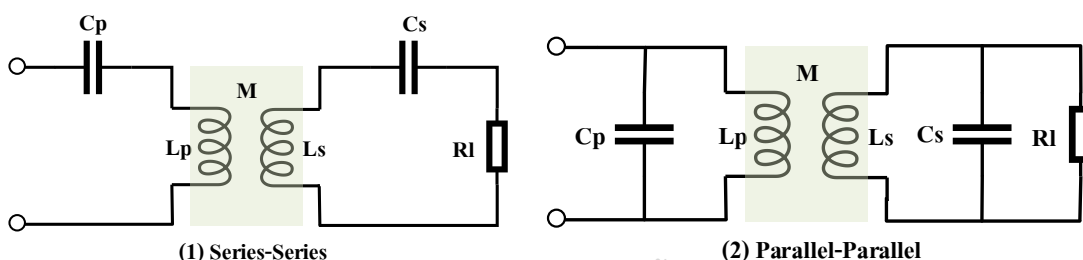
อินเวอร์เตอร์ความถี่สูงจะแตกต่างจากอินเวอร์เตอร์ทั่วไปคือ มีการเพิ่มเรโซแนนซ์แท็งก์ (Resonant Tank) เข้าไปกับโหลด ซึ่งสามารถมีทั้งการต่อตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุแบบขนาน แบบอนุกรม หรือแบบผสม ร่วมกับโหลดความต้านทาน ซึ่งการเกิดเรโซแนนซ์จะส่งผลให้เกิดสภาวะ ZVS (Zero Voltage Switching) มีข้อดีคือ ลดการสูญเสียขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสวิตชิง และมีประสิทธิภาพสูง เมื่อแรงดันด้านเข้ามีหลายค่าที่ความถี่ใดๆ

2.5.1 วงจรฮาร์ตฟริตจอินเวอร์เตอร์ ฮาร์ตฟริตจอินเวอร์เตอร์เป็นชนิดเดียวกันกับแบบพุก-พุลและให้กำลังค่อนข้างสูง ข้อดี คือ แรงดันตกคร่อมขณะไม่นำกระแสต่ำกว่าอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่น และลดการเกิดไม่สมมาตรฟลักซ์ได้

วงจรพื้นฐานของฮาร์ตฟริตจอินเวอร์เตอร์โดย มอสเฟต Q1 และ Q2 จะสลับกันทำงานคนละครึ่งคาบเวลาเช่นเดียวกับพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์ เมื่อ Q1 เริ่มนำกระแส และ Q2 ไม่นำกระแส แรงดันตกคร่อม Q2 จะมีค่าเท่ากับ V_{in} ส่วนแรงดันตกคร่อมโหลด มีค่าเท่ากับ $V_{in}/2$ ในทำนองเดียวกัน เมื่อ Q2 นำกระแส และ Q1 ไม่นำ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อม Q1 และ Q2 ขณะหยุดนำกระแสจะมีค่าเพียงแรงดันอินพุตเท่านั้น ผลของการทำงานของ Q1 และ Q2 ที่ด้าน Secondary จะมีลักษณะเดียวกันกับพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์

2.5.2 วงจรชดเชยแบบพื้นฐาน วงจรชดเชยแบบพื้นฐานที่ใช้ทั่วไป เป็นวงจรที่ง่ายต่อการออกแบบ ใช้ตัวเก็บประจุเพียงตัวเดียวมาทำการต่อในรูปแบบอย่างง่าย เพื่อชดเชยค่าอิมพีแดนซ์ของระบบให้มีค่าน้อยที่สุด

จากรูปที่ 2.7 วงจรชดเชยแบบพื้นฐานที่ใช้ทั่วไป คือ วงจรชดเชยแบบอนุกรม (Series-Series) ใช้ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมร่วมกับขดลวดทั้งฝั่งส่งและขดลวดฝั่งรับ, วงจรชดเชยแบบขนาน (Parallel-Parallel) ใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานกับวงจรทั้งฝั่งส่งและขดลวดฝั่งรับ โดยจะสามารถปรับแรงดันด้านออกได้จากการควบคุมความถี่ของแรงดันด้านเข้า



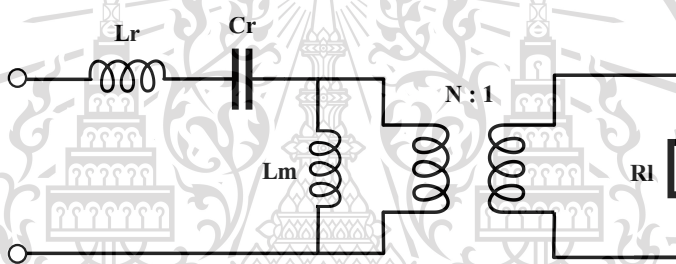
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.7 (1) วงจรชดเชยแบบอนุกรม, (2) วงจรชดเชยแบบขนาน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แม้วงจรทั้งพื้นฐานทั้ง 2 แบบจะง่ายต่อการออกแบบ แต่มีข้อเสียคือวงจรชดเชยแบบอนุกรมที่ความถี่เรโซแนนซ์ f_0 วงจรจะสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้มีประสิทธิภาพสูงแต่ที่สภาวะโหลดเบาจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ทำให้ไม่สามารถส่งผ่านกำลังที่ประสิทธิภาพสูงสุดได้ ส่วนวงจรชดเชยแบบขนานจะแบ่งกระแสจากการขนานของโหลดและวงจรชดเชยส่งผลให้ความต้องการกระแสในวงจรมีค่าสูงขึ้น จึงไม่เหมาะกับการใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดสูง

2.5.3 วงจรชดเชยแบบผสม วงจรชดเชยแบบผสมเป็นการนำขดลวด 2 ตัว และ ตัวเก็บประจุ 1 ตัว (LLC) มาต่ออนุกรมและขนานร่วมกับวงจร ดังรูปที่ 2.8 วงจรชดเชย LLC สามารถแก้ไข ปัญหาของวงจรชดเชยแบบพื้นฐานได้ เนื่องจากเหมาะต่อการใช้งานกับโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงสูง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความถี่มากนักจึงยังทำงานอยู่ในย่านความถี่ที่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ จากรูปที่ 2.8 แสดงวงจรสมมูลวงจรชดเชยแบบ LLC



รูปที่ 2.8 วงจรชดเชยแบบผสม LLC

2.5.3.1 การทำงานของวงจรชดเชย LLC ในย่านความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ไดโอดฝั่งรับจะทำงานด้วยกระแสไม่ต่อเนื่องทำให้วงจรมีความต้องการให้กระแสไหลในวงจรเรโซแนนซ์มากขึ้นเพื่อที่จะสามารถจ่ายพลังงานให้แก่โหลดได้เท่าเดิม และการที่ช่วงนำกระแสไม่ต่อเนื่องส่งผลต่อการเกิดความสูญเสียในวงจรมากขึ้นทั้งในฝั่งส่งและฝั่งรับ นอกจากนี้หากย่านความถี่ที่ใช้งานต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์มากเกินไป อาจทำให้การสวิตช์ซึ่งไม่เป็นแบบ ZVS

2.5.3.2 การทำงานของวงจรชดเชย LLC ในย่านความถี่เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อมอสเฟต Q_1 ไม่นำกระแส กระแสเรโซแนนซ์ (Resonance Current) จะเท่ากับกระแสเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetizing Current) วงจรจะไม่มีกำลังไปยังฝั่งรับ เมื่อทำงานร่วมกับมอสเฟต Q_2 ที่มีการหน่วงเวลาจะทำให้วงจรทำงานในสภาวะ ZVS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

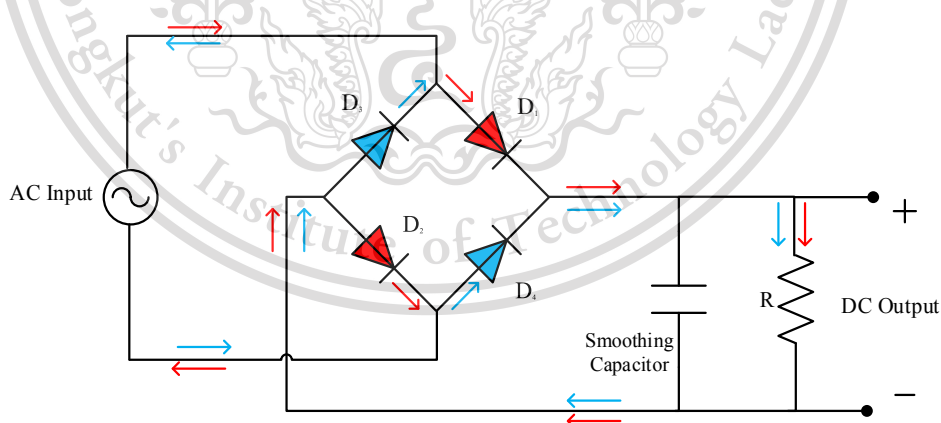
2.5.3.3 การทำงานของวงจรชดเชย LLC ในย่านความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์

ในย่านนี้ กระแสที่ใช้ในวงจรฝั่งส่งมีค่าน้อยลง และยังเป็นผลดีต่อความสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสของอุปกรณ์ เพราะวงจรทำงานด้วยช่วงกระแสต่อเนื่อง ความถี่ใช้งานที่สูงกว่ายังคงสามารถทำงานในสภาวะ ZVS ได้ แต่มีข้อเสียคือการได้รับผลกระทบจากความถี่ที่สูงเกินไปหากมีการใช้งานโหลดเบา นอกจากนี้ ความถี่สูงจะไม่เป็นผลดีต่ออุปกรณ์ในวงจร

2.6 วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแส เป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง นั่นคือมีคุณสมบัติยอมให้ไฟฟ้าไหลไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ไดโอดจึงเป็นอุปกรณ์ทางพาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่งที่มักนำมาใช้ในวงจรเรียงกระแส

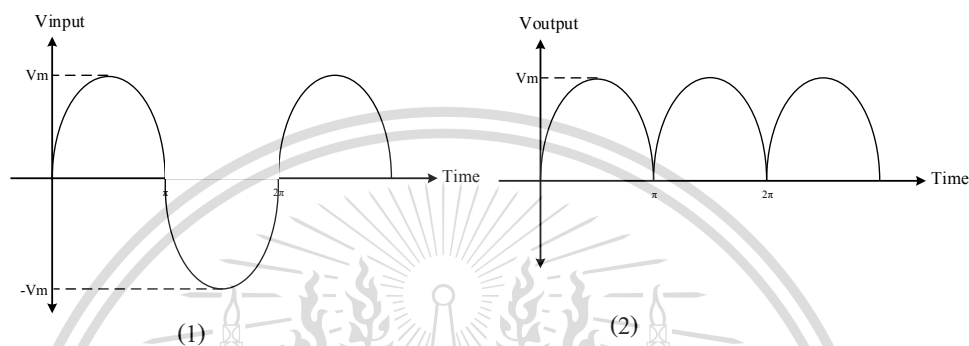
2.6.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ จะใช้ไดโอดอย่างน้อย 2 ตัว หลักการทำงานคือ เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้ามาสู่วงจรทางด้านด้านเข้า ครึ่งสัญญาณที่เป็นแรงดันตกคร่อมไดโอดตัวที่หนึ่งแบบไบอัสตรง เกิดการนำกระแสได้ในช่วงนั้น ส่วนอีกช่วงครึ่งสัญญาณที่เหลือจะได้แรงดันตกคร่อมไดโอดอีกตัวแบบไบอัสตรงเช่นกัน แรงดันเอาต์พุตที่จึงมีลักษณะแบบเต็มคลื่น โดยวงจรเรียงกระแสชนิดเต็มคลื่นมีอยู่ 2 แบบคือ แบบหม้อแปลงเซนเตอร์แท็ปและแบบวงจรบริดจ์เต็มคลื่น ซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรและจำนวนไดโอดที่ต่างกัน



รูปที่ 2.9 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

สำหรับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์จะใช้ไดโอดจำนวน 4 ตัวต่อกันแบบบริดจ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ดังรูปที่ 2.7 หลักการทำงานคือ เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีทั้งครึ่งสัญญาณด้านบวกเข้ามาสู่วงจร ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านเข้าจะทำให้แรงดันตกคร่อมไดโอดคู่ตรงข้าม D_1 และ D_2 ทำงานแบบไบอัสตรงและสามารถนำกระแส ได้สัญญาณบวกที่ด้านด้านออก ส่วนครึ่งสัญญาณลบที่เหลือจะทำให้แรงดันตกคร่อมไดโอดเป็นแบบไบอัสตรงที่ D_3 และ D_4 ซึ่งจะเป็นสัญญาณบวกที่ด้านด้านออก ทำให้วงจรสามารถสลับกันทำงานได้เต็มคลื่นนั่นเอง



รูปที่ 2.10 (1) แรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส, (2) แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแส

จากรูปที่ 2.10 สามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้ดังนี้ โดยมีสมการแรงดันกระแสสลับด้านเข้าคือ $v(t) = V_m \sin \omega t$ และ คาบ $T = 2\pi$

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) d\omega t \quad (2.3)$$

$$V_{DC} = \frac{2V_m}{\pi} = 0.636V_m \quad (2.4)$$

และ

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 d\omega t} \quad (2.5)$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- เมื่อ $v(t)$ คือ แรงดันกระแสสลับด้านด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
- V_m คือ ค่าแรงดันกระแสสลับสูงสุดด้านด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
- V_{DC} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฉลี่ยของวงจรกรองกระแสเต็มคลื่น มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
- V_{rms} คือ แรงดันอาร์เอ็มเอสของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

เช่นเดียวกับแรงดัน สามารถคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าด้านออกได้ดังนี้

$$I_{DC} = \frac{2I_m}{\pi} = 0.636I_m \quad (2.7)$$

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2.8)$$

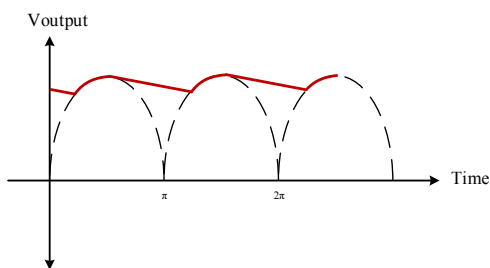
- เมื่อ I_m คือ ค่ากระแสสลับสูงสุดด้านด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
- I_{DC} คือ กระแสตรงเฉลี่ยของวงจรกรองกระแสเต็มคลื่น มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
- I_{rms} คือ กระแสอาร์เอ็มเอสของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

วงจรเรียงกระแสมีแรงดันด้านด้านออกเป็นแรงดันไฟตรงก็จริง แต่ยังคงมีผลต่างระหว่างแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดที่มาก จึงจำเป็นต้องมีการต่อตัวเก็บประจุที่มากเพียงพอ เรียกว่าวงจรเชื่อมโยงทางดีซี โดยอาศัยหลักการเก็บประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุนั้นเพื่อช่วยในการกรองสัญญาณให้เรียบมากยิ่งขึ้นซึ่งจะเพิ่มค่าเฉลี่ยของแรงดันตรงให้กับแรงดันด้านออก ดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

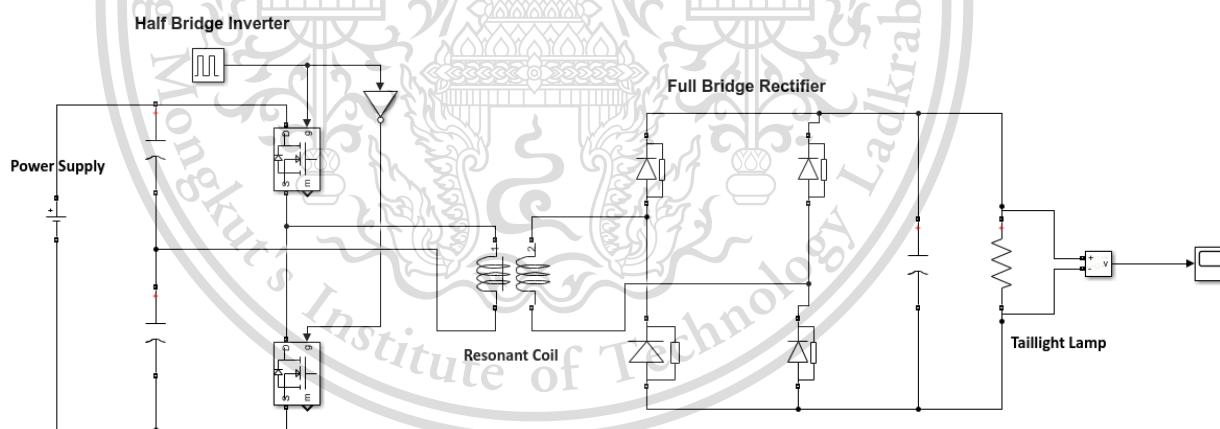
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.11 แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเมื่อมีการต่อขนานตัวเก็บประจุ

2.7 วงจรสมมูลของระบบ

วงจรไฟฟ้าของระบบ ดังรูปที่ 2.12 เริ่มต้นด้วยแรงดันด้านเข้ากระแสตรงที่วงจรเชื่อมโยงดีซี (DC Link) วงจรเรียงอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง, วงจรชดเชยและส่งผ่านกำลัง ไปจนวงจรเรียงกระแสและได้แรงดันด้านออกกระแสตรงที่ออกจากตัวเก็บประจุกรองฝั่งด้านออกเพื่อจะอัดประจุเข้าสู่แบตเตอรี่ต่อไป



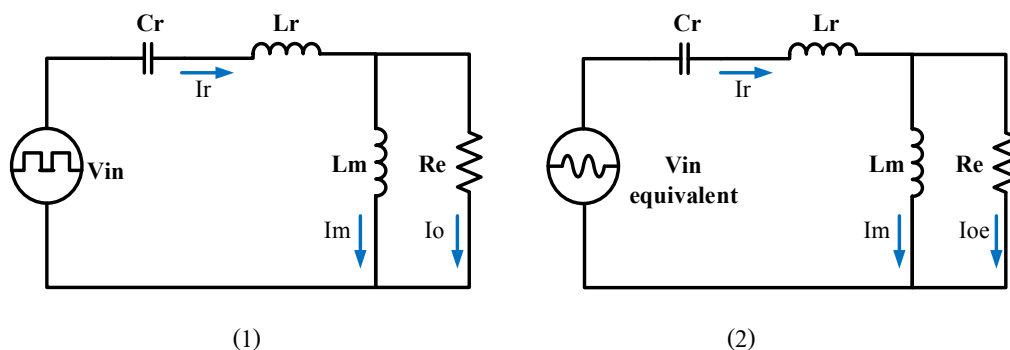
รูปที่ 2.12 วงจรไฟฟ้ารวมของระบบส่งกำลังไร้สาย

จากวงจรไฟฟ้ารวมในรูปที่ 2.12 จะสามารถเขียนในรูปของวงจรสมมูลของระบบ เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ โดยอ้างอิงฟังก์ชันภูมิมายังฟังก์ชันภูมิได้ ดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.13 (1) วงจรสมมูลรวมของระบบอ้างอิงเทียบฝั่งปฐมภูมิแบบไม่เป็นเชิงเส้น, (2) วงจรสมมูลรวมของระบบอ้างอิงเทียบฝั่งปฐมภูมิแบบเป็นเชิงเส้น เมื่อพิจารณาด้วยวิธี FHA

เมื่อ V_{in} คือ แรงดันด้านออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ค่ายอดของแรงดันมีค่าเท่ากับ

V_{dc} มี หน่วยเป็น โวลต์ (V)

I_r คือ กระแสที่ไหลในวงจรเรโซแนนซ์ ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์และตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

I_m คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

R_e คือ ความต้านทานโหลดสมมูลที่อ้างอิงมาจากฝั่งทุติยภูมิ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

V_{out} คือ แรงดันด้านออกทางฝั่งทุติยภูมิ ซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟคล้ายสี่เหลี่ยม เช่นเดียวกับแรงดันด้านเข้า มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

โดยทั่วไปการวิเคราะห์สมการฟังก์ชันส่งผ่าน (Transfer Function) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า จะใช้วิธีกำจัดผลของสวิตช์ เพื่อให้ได้วงจรสมมูลที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ (Generalized State-space Averaging : SSA) แต่ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรโซแนนซ์ วิธีนี้จะไม่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สมการฟังก์ชันส่งผ่าน

จากที่กล่าวไปในหัวข้อวงจรชดเชยแบบพสม จะออกแบบวงจรให้ทำงานอยู่ในย่านความถี่ที่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ นั่นหมายความว่า องค์ประกอบมูลฐาน (Fundamental) ของกระแสในวงจรเรโซแนนซ์จะอยู่ที่ความถี่ที่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ใดๆเพียงความถี่เดียวและสามารถประมาณเป็นรูปคลื่นกระแสสลับได้ เรียกวิธีการประมาณนี้ว่า วิธีประมาณด้วยองค์ประกอบฮาร์โมนิกมูลฐาน (Fundamental Harmonic Approximation : FHA) เพื่อประมาณวงจรที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Circuit) ซึ่งมีแรงดันด้านเข้า V_{in} และแรงดันด้านออก V_o ซึ่งมีลักษณะรูปคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คล้ายสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square Wave) ให้มีลักษณะเป็นวงจรเชิงเส้น (Linear Sinusoidal Circuit) ซึ่งมีแรงดันด้านเข้า V_{in} และแรงดันด้านออก V_o เป็นสัญญาณ Sine

2.7.1 การประมาณค่าด้วยวิธี FHA โดยพิจารณาเพียงองค์ประกอบฮามอนิกมูลฐานของสัญญาณสี่เหลี่ยม จะได้สมการแรงดันด้านเข้าเป็น $V_{in\ equivalent}$, สมการแรงดันด้านออกเป็น V_{oe} และสมการกระแสด้านออก I_{oe} แสดงดังสมการ (2.9), (2.10) และ (2.11) ตามลำดับ

$$V_{in\ equivalent}(t) = \frac{4}{\pi} V_{DC} \sin(2\pi ft) \quad (2.9)$$

$$V_{oe}(t) = \frac{4}{\pi} \times n \times V_o \sin(2\pi ft - \phi_v) \quad (2.10)$$

$$I_{oe}(t) = \frac{\pi}{2} \times n \times I_o \sin(2\pi ft - \phi_{iv}) \quad (2.11)$$

เมื่อ V_{ine} คือ แรงดันด้านเข้าวงจรชดเชย LLC จากวิธีการประมาณแบบFHA มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

f คือ ความถี่ที่ใช้ในการสวิตซ์ซึ่งวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

V_{oe} คือ แรงดันด้านออกวงจรชดเชย LLC จากวิธีการประมาณแบบFHA มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

n คือ อัตราส่วนจำนวนรอบ (Turn Ratio) ของขดลวดฝั่งส่งต่อขดลวดฝั่งรับ

ϕ_v คือ ความต่างเฟสระหว่างแรงดันด้านออกกับแรงดันด้านเข้า มีหน่วยเป็น องศา (degree)

ϕ_{iv} คือ ความต่างเฟสระหว่างกระแสด้านออกกับแรงดันด้านออก มีหน่วยเป็น องศา (degree)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

และสามารถหาความต้านทานโหลดของวงจรสมมูลได้จาก

$$R_e = \frac{V_{oe}}{I_{oe}} = \frac{8xn^2}{\pi^2} \times \frac{V_o}{I_o} = \frac{8xn^2}{\pi^2} \times R_L \quad (2.12)$$

2.7.2 สามารถหาสมการฟังก์ชันส่งผ่าน (Transfer Function) ได้ดังนี้

2.7.2.1 จากความสัมพันธ์ของแรงดันด้านเข้าและแรงดันด้านออกของวงจร สามารถเขียนความสัมพันธ์ในเชิงอัตราส่วนได้ดังนี้

$$M_{g_DC} = \frac{n \times V_o}{V_{in}} = \frac{n \times V_o}{V_{DC}} \quad (2.13)$$

2.7.2.2 จากการประมาณวิธี FHA จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ในเชิงอัตราส่วนได้ดังนี้

$$M_{g_AC} = \frac{V_{oe}}{V_{in \text{ equivalent}}} \approx \frac{n \times V_o}{V_{DC}} \quad (2.14)$$

2.7.2.3 จากสมการที่ (2.12) สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปของค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรไฟฟ้าโดยอ้างอิงจากวงจรสมมูลรูปที่ 2.13 (2) ได้ดังนี้

$$M_g = M_{g_DC} \approx M_{g_AC} = \left| \frac{jX_{Lm} // R_e}{(jX_{Lm} // R_e) + j(X_{Lr} - X_{Cr})} \right| = \left| \frac{j\omega L_m // R_e}{(j\omega L_m // R_e) + j\omega L_r - \frac{j}{\omega C_r}} \right| \quad (2.15)$$

2.7.2.4 จากสมการที่ (2.13) สามารถเขียนสมการฟังก์ชันส่งผ่านให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$M_g = \left| \frac{L_n \times f_n^2}{[(L_n + 1) \times f_n^2 - 1] + [(f_n^2 - 1) \times f_n \times Q_e \times L_n]} \right| \quad (2.16)$$

เมื่อ M_g คือ อัตราส่วนแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้า

L_n คือ อัตราส่วนตัวเหนี่ยวนำแม่เหล็กต่อตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์

$$L_n = \frac{L_m}{L_r} \quad (2.17)$$

f_n คือ อัตราส่วนความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ซึ่งต่อความถี่เรโซแนนซ์

$$f_n = \frac{f_{sw}}{f_0} \quad (2.18)$$

Q_e คือ ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor)

$$Q_e = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_e} \quad (2.19)$$

ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านเข้าและแรงดันด้านออก คือ

$$V_o = M_g(L_n, f_n, Q_e) \times \frac{1}{n} \times V_{in} \quad (2.20)$$

2.7.3 ผลตอบสนองของสมการฟังก์ชันส่งผ่านในย่านความถี่ต่างๆ

นำสมการฟังก์ชันส่งผ่านจากสมการที่ (2.16) มาพล็อตกราฟผลตอบสนองความถี่ f_n ที่ค่า Q_e , ต่างๆ โดยเอกสารนี้เป็นใช้ค่า L_n ที่ 5 และ 20 ดังนั้นการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

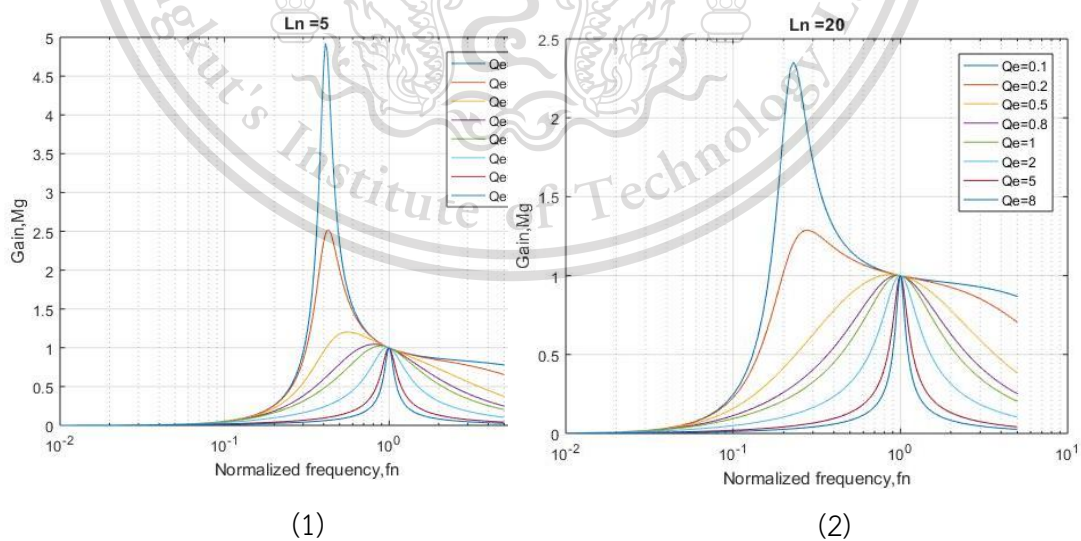
2.7.3.1 ขนาดของอัตราส่วนของแรงดันด้านออกต่อด้านเข้าไม่เท่ากับศูนย์ในทุกๆ ค่าความถี่

2.7.3.2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า L_n และ Q_e กราฟขนาดของอัตราส่วนของแรงดันด้านออกต่อด้านเข้าจะมีรูปร่างที่เปลี่ยนไป

2.7.3.3 เมื่อค่า L_n คงที่ พบว่าเมื่อค่า Q_e เพิ่มขึ้น กราฟขนาดของอัตราส่วนของแรงดันด้านออกต่อด้านเข้าจะมีรูปร่างแคบลง, ค่าสูงสุด (Peak Gain) ที่น้อยกว่าและมีตำแหน่งอยู่ที่ความถี่ที่สูงกว่า ทั้งนี้ ค่า Q_e ที่เพิ่มขึ้น หมายถึง โหลดที่ลดลงซึ่งจะทำให้มีกระแสที่ไหลตมมากขึ้น

2.7.3.4 เมื่อค่า L_n คงที่, ความถี่ $f_n = 1$ หรือ ใช้ความถี่เรโซแนนซ์ในการทำงาน ($f_{sw} = f_0$) พบว่า ค่า Q_e ต่างๆ ขนาดของอัตราส่วนของแรงดันด้านออกต่อด้านเข้า เท่ากับ 1 เสมอ อันเนื่องมาจาก ณ ความถี่เรโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์จะเท่ากับศูนย์ในทุกๆกรณี นั่นคือ ที่ความถี่เรโซแนนซ์ จะเป็นจุดที่ การทำงานไม่ขึ้นอยู่ กับโหลด (Load Independent)

2.7.3.5 เมื่อค่า Q_e คงที่ พบว่าเมื่อค่า L_n ลดลง ภาพรวมของกราฟขนาดอัตราส่วนของแรงดันด้านออกต่อด้านเข้าจะมีรูปร่างแคบกว่า นั่นคือจะสามารถควบคุมระบบด้วยความถี่ได้ดีกว่า



รูปที่ 2.14 กราฟผลตอบสนองของสมการฟังก์ชันส่งผ่าน (1) $L_n=5$, (2) $L_n=20$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.8 ผลกระทบจากการใช้งานที่ความถี่สูง

เนื่องจากระบบส่งผ่านกำลังไร้สายมีความถี่ขณะทำงานที่อยู่ในย่านความถี่สูง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นเมื่อทำงานในความถี่สูงได้ โดยจะมีปรากฏการณ์หลักๆ อยู่ 2 ปรากฏการณ์

2.8.1 ผลกระทบที่ผิว (Skin Effect) คือ การที่กระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลภายในตัวนำมีความหนาแน่นในการไหลที่ไม่สม่ำเสมอ อันเนื่องมาจากกระแสสลับที่ไหลอยู่ภายในตัวนำจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ซึ่งเมื่อความหนาแน่นของกระแสมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดการสร้างสนามไฟฟ้าย้อนกลับ (Back Electromotive Force) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณใจกลางของตัวนำไฟฟ้านั้นเป็นสาเหตุที่ทำให้กระแสสลับภายในตัวนำความถี่สูงจะถูกบังคับให้ไหลได้เพียงแค่ว่าบริเวณผิวของตัวนำ เรียกบริเวณนั้นว่า ความลึกผิว (Skin Depth) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.21

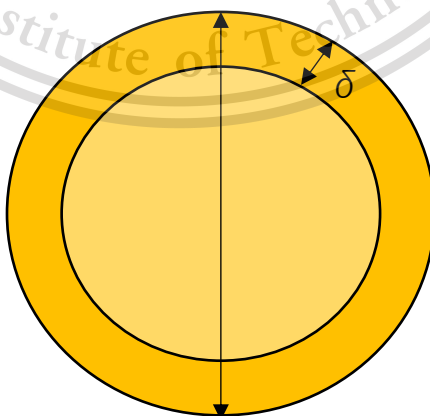
$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f\mu}} \quad (2.21)$$

เมื่อ δ หมายถึง ความลึกผิว มีหน่วยเป็น เมตร (m)

ρ หมายถึง สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวนำ มีหน่วยเป็น โอห์มเมตร ($\Omega \cdot m$)

f หมายถึง ความถี่ของกระแส มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

μ หมายถึง สัมประสิทธิ์ความซึมซาบทางแม่เหล็กของตัวนำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สรุปที่ 2.15 พื้นที่หน้าตัดจำลองของตัวนำที่มีความลึกผิวเมื่อมีความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อตัวนำมีความลึกผิวที่เกิดจาก Skin Effect นั่นคือที่พื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่าเดิม ยิ่งมีความถี่ที่สูงขึ้น พื้นที่ที่สามารถนำกระแสได้จะน้อยลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้น (Effective Resistance) สอดคล้องกับสมการที่ 2.22

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.22)$$

เมื่อ R หมายถึง ค่าความต้านทาน มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

ρ หมายถึง สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวนำ มีหน่วยเป็น โอห์มเมตร ($\Omega \cdot m$)

L หมายถึง ความยาวของตัวนำ หน่วยเป็น เมตร (m)

A หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

2.8.2 ผลกระทบใกล้ชิด (Proximity Effect) คือ ปรากฏการณ์ที่ไฟฟ้ากระแสสลับไหลอยู่ภายในตัวนำสองเส้นที่วางตัวขนานกัน กระแสที่ไหลอยู่ในตัวนำแต่ละเส้น จะสร้างสนามแม่เหล็กของตัวเอง ซึ่งจะมีผลไปหักล้างกันและทำให้กระแสถูกบังคับให้ไหลได้เพียงด้านใดด้านหนึ่งของตัวนำเท่านั้น นั่นคือ จะทำให้มีพื้นที่ในการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ลดลง เช่น ตัวนำที่มีกระแสไหลในทิศทางเดียวกัน สนามแม่เหล็กที่อยู่ด้านที่ตัวนำใกล้กัน จะหักล้างกันและทำให้กระแสมีความหนาแน่นที่ด้านฝั่งไกลจากตัวนำ

จะเห็นว่า ตัวแปรที่ได้รับผลกระทบจาก Skin Effect และ Proximity Effect ได้แก่

- วัสดุของตัวนำ นั่นคือ ยิ่งมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี (มีสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ) และมีความซึมซาบทางแม่เหล็กสูง (μ) จะยิ่งได้รับผลกระทบมาก
- ความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งจะทำให้มีความลึกผิวที่ลดลง
- พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ นั่นคือ หากเปรียบเทียบที่ความถี่ใช้งานเดียวกัน ตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดกว้างกว่า จะมีหน้าตัดในส่วนที่ไม่ยอมให้กระแสไหลผ่านคิดเป็นพื้นที่ที่มากกว่า เสมือนกับมีความต้านทานทางไฟฟ้าที่มากกว่านั่นเอง
- ตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดเดียว (Solid Conductor) จะมีผลกระทบ ที่มากกว่า ตัวนำที่มีลักษณะเป็นเกลียว (Stranded Conductor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

การออกแบบระบบส่งกำลังไร้สายสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

3.1 เป้าหมายการออกแบบระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายภายในรถยนต์ไฟฟ้า

ออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายด้วยพิกัดกำลังเริ่มต้น 12V/20W ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1) วงจรฝั่งส่งกำลัง ประกอบด้วย วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงแบบฮาล์ฟบริดจ์ และขดลวดฝั่งส่ง

2) วงจรฝั่งรับกำลัง ประกอบด้วย ขดลวดฝั่งรับ และวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงแรงดันเป็นกระแสตรงเพื่อส่งมายังโหลด

โดยเป้าหมายของโปรเจกต์นี้ คือ

3.1.1 ระบบดังกล่าวเป็นระบบไฟฟ้าภายในรถยนต์ไฟฟ้า โดยการลดจำนวนสายไฟภายในรถยนต์ไฟฟ้าในส่วนของคุณดไฟท้ายและไฟข้างของรถยนต์

3.1.2 ระบบการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศมีระยะห่างระหว่างส่วนของภาคส่งและภาครับไม่เกิน 5 เซนติเมตร และมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 75

3.1.3 รองรับมาตรฐานของ ICNIRP (International commission on-Non-Ionizing Radiation Protection) เป็นมาตรฐานเรื่องความปลอดภัยของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์ และอื่น ๆ

3.2 การออกแบบวงจรฝั่งส่งกำลังไฟฟ้า

3.2.1 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง แรงดันด้านเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงแบบฮาล์ฟบริดจ์จะเชื่อมต่อมาจากแบตเตอรี่รถยนต์ขนาด 12 V โดยจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ วงจรกำลัง ทำหน้าที่สวิตซ์ซึ่งความถี่สูงเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่เท่ากับความถี่สวิตซ์ซึ่งของวงจรนี้ เพื่อให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์คู่ควบทางแม่เหล็ก (Magnetic

Resonance Coupling) ระหว่างส่วนส่งและส่วนรับกำลังไฟฟ้า และสัญญาณควบคุม ทำหน้าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ควบคุมการทำงานของวงจรควบคุมเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าเป็นไปตามที่ต้องการและปลอดภัย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

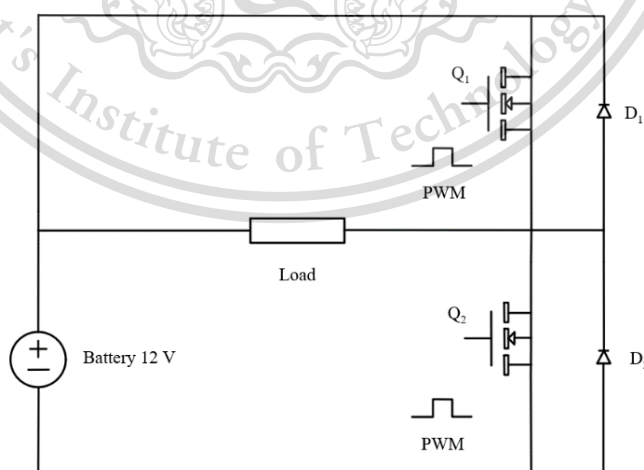
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.1.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ PWM ทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่สูงในการควบคุม มอสเฟต เราจะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาร์ม เอสทีเอ็ม 32 (ARM STM32G431RBT6 64 PINS) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณความถี่สูงเพื่อเข้าไปยังขั้วขับมอสเฟต

3.2.1.2 ขั้วขับมอสเฟต (Mosfet Drive) เราเลือกใช้ FOD3184 ใช้สำหรับขับมอสเฟต โดยรับสัญญาณ Duty Cycle ที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ทำหน้าที่ขยายแรงดัน ของสัญญาณเพื่อส่งไปยังขาเกต (Gate) ของมอสเฟต

3.2.1.3 วงจรสวิตชิงความถี่สูง (Switching Circuit) ประกอบด้วยมอสเฟตชนิด N-channel จำนวนสองตัวทำหน้าที่เป็นฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพื่อแปลงสัญญาณจากไฟฟ้า กระแสตรงไปยังสัญญาณกระแสสลับให้ขดลวดแกนส่งพลังงาน โดยมีหลักการทำงาน คือ

วงจรพื้นฐานของฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์โดย มอสเฟต Q_1 และ Q_2 จะสลับกันทำงาน คนละครึ่งคาบเวลาเช่นเดียวกับพุ่ม-พูลคอนเวอร์เตอร์ เมื่อ Q_1 เริ่มนำกระแส และ Q_2 ไม่นำกระแส แรงดันตกคร่อม Q_2 จะมีค่าเท่ากับ V_{in} ส่วนแรงดันตกคร่อมไหลต มีค่าเท่ากับ $V_{in}/2$ ในทำนองเดียวกัน เมื่อ Q_2 นำกระแส และ Q_1 ไม่นำ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อม Q_1 และ Q_2 ขณะหยุดนำกระแส จะมีค่าเพียงแรงดันอินพุตเท่านั้น ผลของการทำงานของ Q_1 และ Q_2 ที่ด้าน Secondary ที่จะมีลักษณะ เดียวกันกับพุ่ม-พูลคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรู๊พงานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3 การออกแบบวงจรส่งกำลังไร้สายผ่านอากาศ

3.3.1 การออกแบบวงจรชดเชยแบบ LLC วงจรชดเชย LLC จะทำงานที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ และเนื่องจากสัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กับวงจรเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม จึงนำวิธีการออกแบบด้วยวิธี First Harmonic Fundamental Approximation (FHA) มาใช้ ซึ่งเป็นวิธีที่จะวิเคราะห์เพียงค่าฮาร์มอนิกอันดับแรกของกระแสในฝั่งส่งเท่านั้น ไม่คิดผลของตัวเก็บประจุด้านออกและค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดฝั่งรับ จากนั้นทำการออกแบบวงจรโดยเริ่มจาก

3.3.1.1 หาค่า turn ratio ของขดลวดฝั่งส่ง-รับ จากแรงดันด้านเข้า และแรงดันด้านออก ตาม specification ที่กำหนดไว้

3.3.1.2 หาขอบเขตของฟังก์ชันส่งผ่านสูงสุดและต่ำสุด $M_{S_{max,min}}$ พร้อมหาแรงดันตกจากไดโอดของวงจรเรียงกระแสฝั่งรับ

3.3.1.3 เลือกค่า L_n , Q_e จากกราฟฟังก์ชันส่งผ่านสูงสุดเทียบกับ Q_e โดยค่าที่เลือกจะต้องอยู่เหนือกว่าค่าฟังก์ชันส่งผ่านสูงสุดที่คำนวณได้จากข้อ 2

3.3.1.4 คำนวณหาค่าความต้านทานโหลดสมมูลที่ full load และที่ overload

3.3.1.5 คำนวณหาค่าพารามิเตอร์วงจรเรโซแนนซ์ C_r , L_r , L_n

3.3.1.6 ตรวจสอบค่า L_n , Q_e จากกราฟ สมการที่ 16 โดยค่าความถี่ที่จุดตัดของกราฟกับขอบเขตในข้อที่ 2 จะต้องอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ หากไม่อยู่ในช่วงต้องทำการเลือกค่า L_n , Q_e ในข้อที่ 3 ใหม่

3.3.1.7 คำนวณหาค่ากระแสในวงจรฝั่งรับ-ส่ง

3.3.1.8 ออกแบบให้วงจรทำงานในสถานะ ZVS โดยค่ากระแสต่ำสุดที่ยังคงอยู่ในช่วงจะเป็นไปตามสมการ

3.3.1.9 แปลงค่าตัวแปรในรูปแบบ T-Type Model เป็น Mutual Inductance Model

สำหรับการแปลงแรงดันกระแสตรงเป็นแรงดันกระแสสลับความถี่สูง โดยในรายงานนี้

เลือกใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริจด์ โดยมีค่าตัวแปรต่างๆในการออกแบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้พิจารณาในการออกแบบระบบส่งกำลังพิกัด 20 วัตต์

ตัวแปร	ตัวย่อ	ค่า	หน่วย
Minimum Input Voltage	V_{in_min}	12	V
Maximum Input Voltage	V_{in_max}	15	V
Input Nominal Voltage	V_{in_nom}	12	V
Output Voltage	V_{o_nom}	12	V
Output Current	I_o	1.67	A
Rated Output Power	P_o	20	W
Output-voltage line regulation		$\leq 1\%$	-
Output-voltage load regulation		$\leq 1\%$	-
Output-voltage peak-to-peak ripple		$\leq 1\%$	-
Overload Current		10%	-
Maximum efficiency		80%	-
Switching frequency		100	kHz

ลำดับขั้นตอนการออกแบบมีดังต่อไปนี้

3.3.1.1 คำนวณ Turn Ratio ระหว่างขดลวดตัวรับและขดลวดตัวส่ง

จาก
$$n = M_g \times \frac{V_{in_{nom}}}{V_{o_{nom}}} \Big|_{M_g=1} \quad (3.1)$$

ดังนั้น
$$n = \frac{12}{12} = 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3.1.2 คำนวณ Minimum Gain and Maximum Gain

ด้าน Secondary side ใช้วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นชนิดบริดจ์ นั่นคือขณะทำงานในครึ่งไซเคิลหนึ่ง จะใช้ไดโอดในการเรียงกระแสพร้อมกันสองตัว

จาก
$$M_{g_min} = \frac{n \cdot (V_{o_min} + 2V_F)}{V_{in_max}} \quad (3.2)$$

ดังนั้น
$$M_{g_min} = \frac{1 \cdot (12 + 2(0.7))}{15} = 0.88533$$

จาก
$$M_{g_max} = \frac{n \cdot (V_{o_max} + 2V_F + V_{loss})}{V_{in_min}} \quad (3.3)$$

ดังนั้น
$$M_{g_max} = \frac{1 \cdot (15 + 2(0.7) + 0.1212)}{12} = 1.136767$$

เพื่อให้ทำงานใน Inductive Region โดยสามารถทำงานที่สภาวะ Overload Current ได้ 110%

ดังนั้น
$$M_{g_maxover} = 1.136767 \times 110\% = 1.205444$$

3.3.1.3 เลือกค่า L_n , Q_e

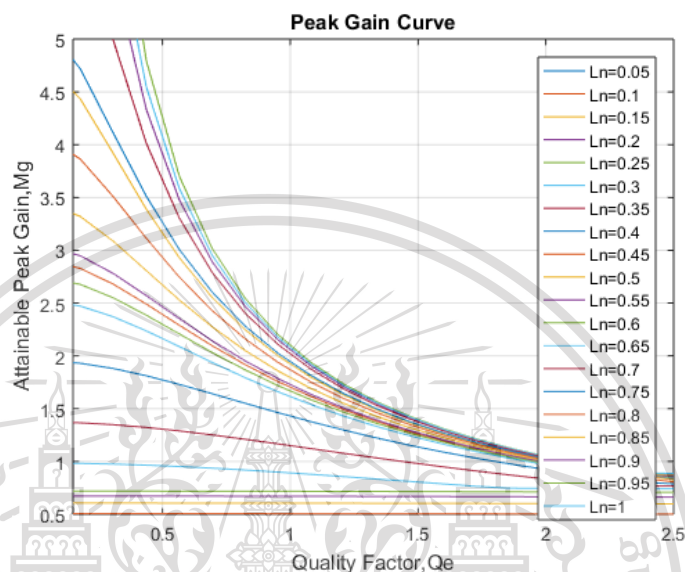
จาก
$$M_g = \left| \frac{L_n \times f_n^2}{[(L_n + 1) \times f_n^2 - 1] + j[(f_n^2 - 1) \times f_n \times Q_e \times L_n]} \right| \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากกราฟ Peak Gain Curve เลือกค่า L_n , Q_e ที่สามารถได้ค่า Peak gain สูงกว่าค่า $M_{g_maxover}$ ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 2



รูปที่ 3.2 กราฟค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ผลได้ที่ค่า L_n , Q_e

เลือก $L_n=0.3$ และ $Q_e=1.25$ ซึ่งได้ค่า Peak gain $\geq M_{g_max}$

3.3.1.4 หาคความต้านทานโหลดสมมูล

ขณะ Full Load

จาก
$$R_e = \frac{8 \times n^2}{\pi^2} \times \frac{V_{o_nom}}{I_o} \tag{3.5}$$

จะได้
$$R_{e_full} = \frac{8 \times n^2}{\pi^2} \times \frac{12}{1.67} = 5.824451 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ขณะ Over-Load Current

$$\text{จะได้ } R_{eOL} = R_{e_{full}}/110\% = 5.294958 \Omega$$

3.3.1.5 หา พารามิเตอร์วงจรเรโซแนนซ์

$$\text{จาก } C_r = \frac{1}{2\pi \times f_{sw} \times Q_e \times R_{e_{Full}}} \quad (3.6)$$

$$\text{จะได้ } C_r = \frac{1}{2\pi \times 100k \times 1.25 \times 5.824451} = 218 \text{ nF}$$

$$\text{จาก } L_r = \frac{1}{(2\pi f_{sw})^2 \times C_r} \quad (3.7)$$

$$\text{จะได้ } L_r = \frac{1}{(2\pi \times 100k)^2 \times 218 \text{ n}} = 11.5874 \mu\text{H}$$

นอกจากนี้ ยังสามารถหาค่า magnetizing inductance ได้จาก

$$\text{จาก } L_n = \frac{L_m}{L_r} \quad (3.8)$$

$$\text{จะได้ } L_m = L_n \times L_r = 0.3 \times 11.5874 \mu = 3.476 \mu\text{H}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3.1.6 ตรวจสอบค่า L_n , Q_e

3.3.1.6.1 Series resonant frequency

จาก
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r \times C_r}} \quad (3.9)$$

จะได้ $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{11.5874\mu \times 218 \text{ n}}} = 100$ กิโลเฮิรตซ์

3.3.1.6.2 Inductance Ratio

จากสมการที่ (3.8) จะได้ $L_n = \frac{L_m}{L_r} = \frac{3.476\mu\text{H}}{11.5874\mu\text{H}} = 0.3$ เท่ากับค่าที่เลือกมา

3.3.1.6.3 Quality Factor at Full load

จาก
$$Q_{e_full} = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_{e_full}} \quad (3.10)$$

จะได้ $Q_{e_full} = \frac{\sqrt{11.5\mu/218 \text{ n}}}{5.824451} = 1.25$ เท่ากับค่าที่เลือกมาในขั้นตอนที่ 3

3.3.1.6.4 Quality Factor at Over-load 110%

จาก
$$Q_{e_OL} = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_{e_OL}} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จะได้ $Q_{e_OL} = \frac{\sqrt{11.5\mu/218n}}{5.294958} = 1.375$

3.3.1.7 คำนวณกระแสต้าน Primary

3.3.1.7.1 RMS Load Current

จาก $I_{oe} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \times \frac{I_o}{n}$ (3.12)

จะได้ $I_{oe} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \times \frac{1.67}{1} = 3.709807 \text{ A}$

3.3.1.7.2 RMS Magnetizing Current at f_{sw_min}

จาก $I_m = \frac{V_{oe}}{X_m} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{nV_o}{2\pi f_{sw_min} L_m}$ (3.13)

จะได้ $I_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{1 \times 12}{2\pi \times 100k \times 3.476} = 4.946429 \text{ A}$

3.3.1.7.3 Resonant circuit current คือกระแสในขดลวดตัวส่ง

จาก $I_r = \sqrt{(I_m)^2 + (I_{oe})^2}$ (3.14)

จะได้ $I_r = 6.183028 \text{ A}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คำนวณกระแสด้านSecondary

3.3.1.7.4 Secondary side RMS load Current

จาก
$$I_{oe_s} = n \times I_{oe} \quad (3.15)$$

จะได้ $I_{oe_s} = 1 \times 3.709807 = 3.709807 \text{ A}$

3.3.1.7.5 Secondary side average load Current

จาก
$$I_{av} = \frac{\sqrt{2} \times I_{oe_s}}{\pi} \quad (3.16)$$

จะได้
$$I_{av} = \frac{\sqrt{2} \times 3.709807253}{\pi} = 1.67 \text{ A}$$

3.3.1.8 ออกแบบให้วงจรทำงานในสภาวะ ZVS

3.3.1.8.1 กระแสต่ำสุดที่ยังคงอยู่ในช่วงจะเป็นไปตามสมการ

จาก
$$I_{m_min} = 0.901 \times \frac{n \times V_0}{2\pi \times f_{sw} \times L_m} \quad (3.17)$$

จะได้
$$I_m = 0.901 \times \frac{1 \times 12}{2\pi \times 100k \times 3.476} = 4.987208375 \text{ A}$$

3.3.1.8.2 Dead time

เมื่อ C_{eq} เป็นค่าที่เกิดจากมอสเฟตโดยทั่วไปแล้ว มอสเฟต IRFP740 จะมี C_{eq} ประมาณ 380 pF ค่าเดดไทม์สามารถคำนวณได้จากสมการ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$T_{\text{deadtime}} \geq \text{turn ratio} \times C_{\text{eq}} \times f_{\text{sw}} \times L_m \quad (3.18)$$

จะได้ $T_{\text{deadtime}} \geq 1 \times 380p \times 100k \times 3.476\mu \geq 0.132ns$

3.3.1.9 คำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำฝั่งส่งและตัวเหนี่ยวนำฝั่งรับ

การคำนวณวงจรชดเชยรูปแบบอื่นๆไป จะคำนวณด้วยรูปแบบของ Mutual Inductance Model คือประกอบด้วย L_p (Primary Inductance) และ L_s (Secondary Inductance) ส่วนการคำนวณวงจรชดเชย LLC ในขั้นตอนข้างต้น จะคำนวณโดยใช้รูปแบบของ T-Type Model หรือ transformer model นั่นคือประกอบด้วย L_r (Resonant Inductance) และซึ่งมีความเหมาะสมกับวงจรเรโซแนนซ์ลักษณะนี้มากกว่า ดังนั้นจะต้องมีการแปลงค่าตัวแปรในรูปแบบ T-Type Model เป็น Mutual Inductance Model โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

จาก $L_m = k^2 \times L_p \quad (3.19)$

$$L_r = (1 - k^2) \times L_p \quad (3.20)$$

จะได้ $L_p = L_r + L_m \quad (3.21)$

ดังนั้น $L_p = 15.0636 \mu H$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรจากการออกแบบวงจรส่งผ่านกำลังแบบ Resonant LLC topology พิกัด 20 วัตต์

ตัวแปร	ตัวย่อ	ค่า	หน่วย
Turns Ratio	n	1	-
Secondary-side diode's forward voltage drop	V_F	0.7	V
Output Voltage Loss	V_{loss}	0.121212	V
Minimum Gain	M_{g_min}	0.885333	-
Maximum Gain	M_{g_max}	1.136768	-
Inductance Ratio	L_n	0.3	-
Quality Factor	Q_e	1.25	-
Equivalent Load Resistance	R_e	5.824451	Ω
Resonant Capacitance	C_r	218	nF
Resonant Inductance	L_r	11.5874	μ H
Magnetizing Inductance	L_m	3.47621	μ H
Primary Inductance	L_p	15.0636	μ H
Secondary Inductance	L_s	15.0636	μ H

3.3.2 การออกแบบขดลวดส่งกำลัง สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ล้อมรอบขดลวดส่งพลังงาน และขดลวดรับพลังงานสามารถถูกแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ สนามแม่เหล็กที่ล้อมรอบใกล้ขดลวด และสนามแม่เหล็กที่แผ่กระจายออกไปโดยที่พลังงานจะถูกเก็บในขดลวดส่งพลังงาน ก่อนที่คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกแผ่กระจายออกไปยังขดลวดรับพลังงาน จากการศึกษาเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในย่านความถี่ที่ใช้งาน โดยตัวแปรเบื้องต้นที่เราควรคำนึงถึงได้แก่

1) ระยะห่างในการส่งผ่านกำลัง (Air Gap) หมายถึง ระยะห่างระหว่างพื้นที่ที่จะทำการติดตั้งขดลวดส่งกำลังไปจนถึงขดลวดรับซึ่งอยู่บริเวณประตู่ทั้งคู่ โดยจะมีระยะห่างอยู่ที่ประมาณ 5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2) ค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง (Coupling Coefficient) สามารถบ่งบอกค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) ที่เกิดขึ้นขณะส่งผ่านกำลังโดยจะขึ้นอยู่กับระยะห่างในการส่งผ่านกำลัง รวมทั้งขนาดและรูปร่างของขดลวดโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 0.2-0.3

ในการออกแบบจะทำการจำลองรูปร่างของขดลวดรวมทั้งคำนวณค่าความเหนี่ยวนำและเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง โดยใช้โปรแกรม ANSYS MAXWELL สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบขดลวด มีดังต่อไปนี้

3.3.2.1 ผลจากการใช้งานในย่านความถี่สูง

ในโครงการนี้ได้มีการออกแบบความถี่ใช้งานอยู่ที่ 100 kHz ซึ่งจัดอยู่ในย่านความถี่สูง ซึ่งจะมีปรากฏการณ์ Skin effect และ Proximity effect เกิดขึ้น วิธีที่จะใช้แก้ไขปรากฏการณ์ที่กล่าวมาข้างต้นคือการใช้ตัวนำที่เรียกว่า Litz Wire ซึ่งเป็นตัวนำที่ประกอบขึ้นจากตัวนำขนาดเล็กหลายๆเส้น ที่เคลือบฉนวนให้ไม่เชื่อมต่อซึ่งกันและกัน (Enable Wire) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มพื้นที่ผิวของตัวนำ ทำให้กระแสไหลได้ดีกว่าตัวนำเดี่ยวที่มีพื้นที่หน้าตัดสุทธิเท่ากันในสภาวะความถี่สูง

โครงการนี้ใช้งานในย่านความถี่ที่ 100 kHz สำหรับขนาดของ Litz Wire ที่แนะนำสำหรับย่านความถี่นี้คือขนาด AWG38 ดังแสดงในรูปที่ 3.3

Frequency	Recommended Wire Gauge	Nominal Copper Diameter	Max DC Resistance (OHMS/1000FT)
60 HZ to 1 KHZ	28 AWG	.0126	66.37
1 KHZ to 10 KHZ	30 AWG	.0100	105.8
10 KHZ to 20 KHZ	33 AWG	.0071	211.7
20 KHZ to 50 KHZ	36 AWG	.0050	431.9
50 KHZ to 100 KHZ	38 AWG	.0040	681.9
100 KHZ to 200 KHZ	40 AWG	.0031	1152
200 KHZ to 350 KHZ	42 AWG	.0025	1801
350 KHZ to 850 KHZ	44 AWG	.0020	2873
850 KHZ to 1.4 MHZ	46 AWG	.00157	4544
1.4 MHZ to 2.8 MHZ	48 AWG	.00124	7285

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระยาโชชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.3 ขนาดของ Litz Wire ที่เหมาะสมกับย่านความถี่ต่างๆที่ใช้งาน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3.2.2 ความต้านทานของขดลวด

สำหรับตัวนำ AWG38 จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.1 มิลลิเมตร จำนวน 500 เส้น ซึ่งสามารถพิจารณาค่าความต้านทานของขดลวดได้ดังนี้

3.3.2.2.1 ความต้านทานกระแสตรง (DC Resistance)

จากรูปที่ 3.2 จะได้ค่า Maximum DC Resistance อยู่ที่ 2.2372 Ω/m

จากนั้น เมื่อพิจารณาตัวนำ Litz Wire 0.1x500 จะเสมือนการนำตัวต้านทานมาต่อขนานกันทำให้ค่าความต้านทานกระแสตรงที่เกิดขึ้นจริงนั้นลดลงดังสมการที่ 3.1

$$R_{DC} = \frac{R_{DC_max} \cdot 1.02^{n_B} \cdot 1.03^{n_C}}{n_S} \quad (3.22)$$

เมื่อ R_{DC} หมายถึง ความต้านทานกระแสตรงต่อหน่วยความยาว มีหน่วยเป็น โอห์ม ต่อเมตร (Ω/m)

n_B หมายถึง จำนวนกลุ่มของตัวนำที่ผ่านการ Bunching Operation

n_C หมายถึง จำนวนกลุ่มของตัวนำที่ผ่านการ Cabling Operation

n_S หมายถึง จำนวนตัวนำทั้งหมด

$$\text{จะได้ } R_{DC} = \frac{2.2372 \cdot 1.02^0 \cdot 1.03^1}{500} = 4.60863 \text{ m}\Omega/\text{meter}$$

3.3.2.2.2 ความต้านทานกระแสสลับ (AC Resistance)

ความต้านทานกระแสสลับจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการใช้งานที่ความถี่สูง จากผลของ Skin Effect และ Proximity Effect ซึ่งสามารถประมาณค่าความต้านทานกระแสสลับได้จากสมการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าต่อไปนี้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = H + K \left(\frac{N D_i}{D_o} \right)^2 G \quad (3.23)$$

เมื่อ H หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความต้านทานกระแสสลับต่อความต้านทานกระแสตรงของตัวนำเดี่ยว ตัวนำขนาด AWG38 จะมีค่าเท่ากับ 1

K หมายถึง ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับจำนวนตัวนำที่นำมาตีเกลียว ดังตารางข้างล่าง

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนตัวนำที่นำมาตีเกลียวกับค่าคงที่

N	3	9	27	Inf.
K	1.55	1.84	1.92	2

N หมายถึง จำนวนตัวนำที่นำมาตีเกลียวร่วมกัน

D_i หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำแต่ละเส้น มีหน่วยเป็น เมตร (m) ในโครงการนี้มีค่าเท่ากับ 0.0001 เมตร

D_o หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำตีเกลียวรวม มีหน่วยเป็น เมตร (m) ในโครงการนี้มีค่าเท่ากับ 0.003 เมตร

G หมายถึง eddy current factor คำนวณได้จาก

$$G = \left(\frac{D_i \cdot \sqrt{\text{frequency}}}{10.44} \right)^4 \quad (3.24)$$

จะได้
$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = 1 + 2 \left(\frac{500 \cdot 0.0001}{0.003} \right)^2 \left(\frac{0.0001 \cdot \sqrt{50000}}{10.44} \right)^4 = 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความต้านทานกระแสสลับจะมีค่าเท่ากับความต้านทานกระแสตรงนั้น คือ 4.60863 mΩ/meter

3.3.2.3 รูปร่างของขดลวด

เนื่องจากพื้นที่ที่จำกัดภายในรถยนต์ จึงได้เลือกออกแบบขดลวดเป็นรูปทรงแบบ 2 มิติ หรือที่เรียกว่า planar spiral โดยจะทำการเปรียบเทียบรูปร่างอยู่ 2 แบบคือ Circular Planar Spiral และ Rectangle Planar Spiral จากนั้นการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้วยสมการของ Modified Wheeler

โดยสมการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของ Circular Planar Spiral คำนวณได้ดังนี้

$$L_{\text{circ}} = 31.33 \mu_0 n^2 \frac{a^2}{8a+11c} \quad (3.25)$$

เมื่อ L_{circ} คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากสมการ Modified Wheeler มีหน่วยเป็น เฮนรี (H)

a คือ ค่าเฉลี่ยของรัศมี มีหน่วยเป็นเมตร (m)

$$a = \frac{d_{\text{in}} + d_{\text{out}}}{4} \quad (3.26)$$

c คือ ความหนาของขดลวด มีหน่วยเป็นเมตร (m)

$$c = \frac{d_{\text{out}} - d_{\text{in}}}{2} \quad (3.27)$$

μ_0 คือ ความสามารถในการซึมผ่านของสุญญากาศ มีหน่วยเป็นเฮนรีต่อเมตร (H / m) โดยมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$

n คือ จำนวนรอบของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สมการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของ Rectangular Planar Spiral คำนวณได้ดังนี้

$$L = K_1 \mu_0 \frac{n^2 d_{avg}}{1 + K_2 \rho} \quad (3.28)$$

เมื่อ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากสมการ Modified Wheeler มีหน่วยเป็น เฮนรี (H)

μ_0 คือ ความสามารถในการซึมผ่านของสุญญากาศ มีหน่วยเป็นเฮนรีต่อเมตร (H / m) โดยมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$

K_1 และ K_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของขดลวด ดังตารางข้างล่าง

ตารางที่ 3.4 ความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์กับรูปร่างขดลวด

Coil Layout	K_1	K_2
Square	2.34	2.75
Hexagonal	2.33	3.82
Octagonal	2.25	3.55

n คือ จำนวนรอบของขดลวด

d_{avg} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขดลวด มีหน่วยเป็นเมตร (m)

ρ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเติมเต็ม (Fill Ratio) โดยคำนวณได้ดังนี้

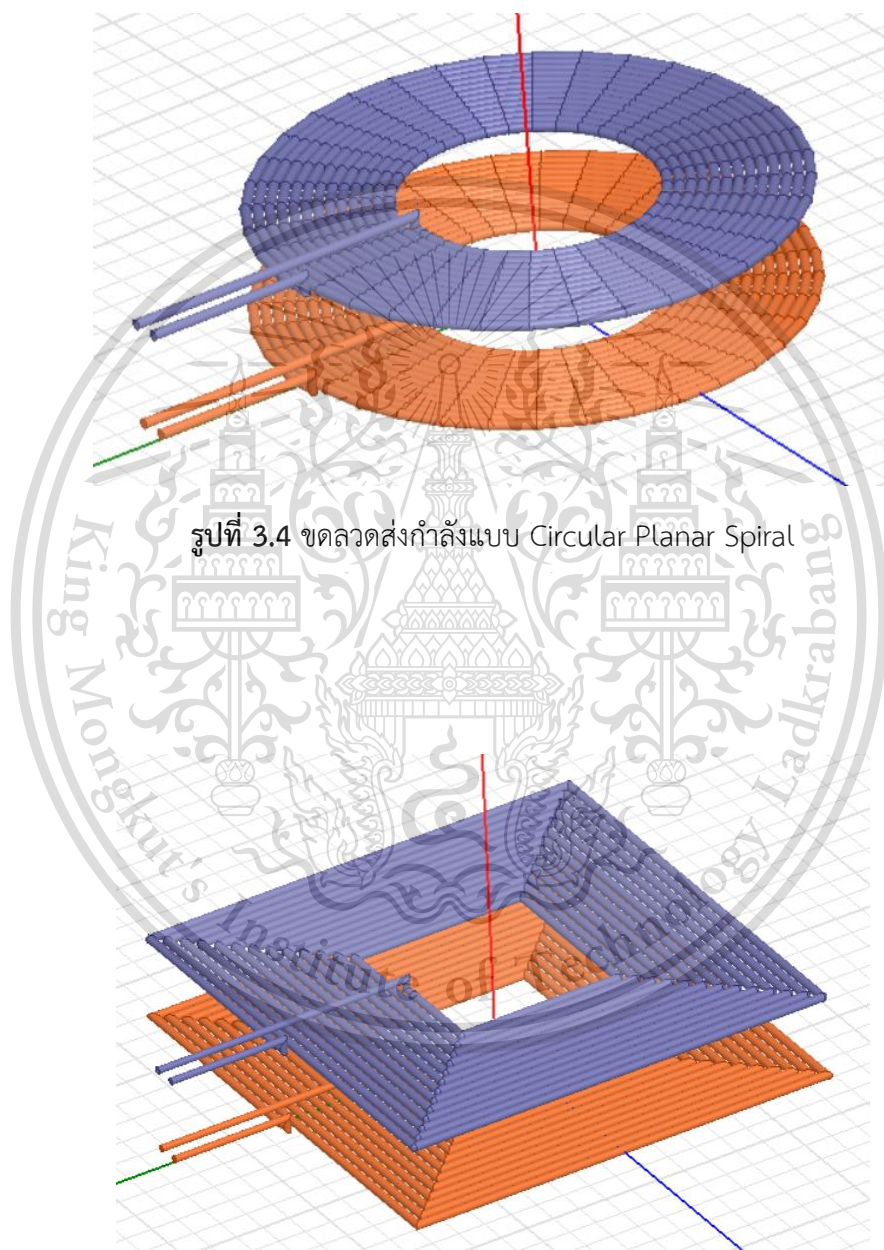
$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} \quad (3.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าความเหนียวนำที่ได้จากขดลวดรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 3.4 ขดลวดส่งกำลังแบบ Circular Planar Spiral

รูปที่ 3.5 ขดลวดส่งกำลังแบบ Rectangular Planar Spiral

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.5 ค่าความเหนี่ยวนำและลักษณะทางกายภาพของขดลวดฝั่งส่งและฝั่งรับของแต่ละรูปร่าง

	หน่วย	Circular Planar Spiral	Rectangular Planar Spiral
L1, L2	μH	16.99	20.3
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	cm	17	17
จำนวนรอบ	turn	13	13
ระยะห่างระหว่างรอบ	cm	0.2	0.2
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	cm	4.4	4.4

ตารางที่ 3.6 ค่าความเหนี่ยวนำและสัมประสิทธิ์การคัปปลิงของขดลวดของแต่ละรูปร่าง

	L1	L2	Mutual	k
	μH	μH	μH	
Circular Planar Spiral	16.99	16.99	3.084	0.1815
Rectangular Planar Spiral	20.3	20.3	3.476	0.2306

จากตารางที่ 3.4 จะพบว่าขดลวดที่มีรูปร่างแบบ Rectangular Planar Spiral จะให้ทั้งค่า Mutual Inductance (M) และค่า Coupling Coefficient (k) ที่สูงกว่ารูปร่างแบบ Circular Planar Spiral การทดลองจึงได้เลือกออกแบบขดลวดเป็นแบบ Rectangular Planar Spiral และมีลักษณะทางกายภาพ, ค่าความเหนี่ยวนำและสัมประสิทธิ์การคัปปลิง ดังนี้

ตารางที่ 3.7 ค่าความเหนี่ยวนำและลักษณะทางกายภาพของขดลวดฝั่งส่งและฝั่งรับจากการวัดจริง

	หน่วย	L1	L2
L	μH	16.412	15.263
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	cm	17	17
จำนวนรอบ	turn	13	13
ระยะห่างระหว่างรอบ	cm	0.2	0.2
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	cm	7	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.8 เปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำและสัมประสิทธิ์การคัปปลิงของขดลวดจากการจำลองและ
วัดจริง

	L1	L2	Mutual	k
	μH	μH	μH	
Simulation	15.0636	15.0636	3.476	0.2306
Experiment	16.412	15.263	4.148	0.2621



(1)

(2)

รูปที่ 3.6 (1) ขดขดลวดส่งกำลังฝั่งส่ง, (2) ขดขดลวดส่งกำลังฝั่งรับ

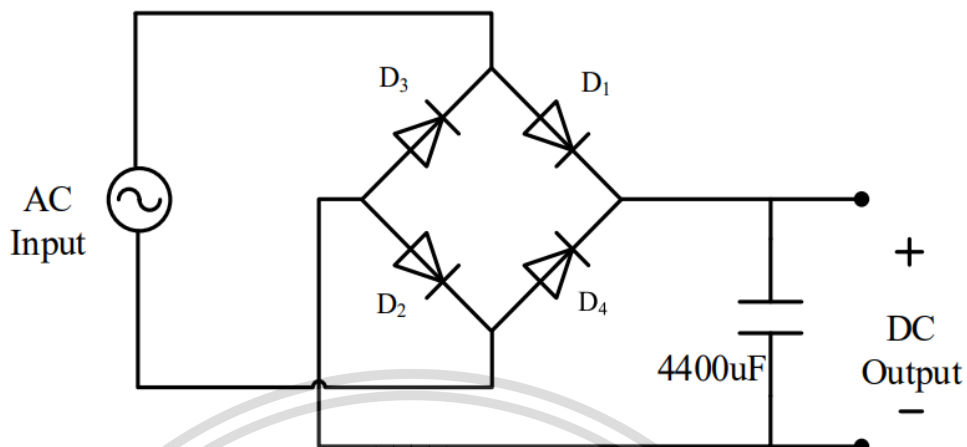
3.4 การออกแบบวงจรฝั่งรับกำลังไฟฟ้า

3.4.1 วงจรเรียงกระแส (Rectifier) วงจรที่แปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง เนื่องจากขดลวดตัวรับ (Receiver) รับกระแสไฟฟ้ามาเป็นกระแสสลับจึงต้องแปลงมาเป็นกระแสตรงเพื่อส่งต่อไปยังโหลด โดยจะใช้วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ต่อขนานกับตัวเก็บประจุขนาด 4400 ไมโครฟารัด เพื่อกรองสัญญาณให้ดียิ่งขึ้น ดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.7 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุกรอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า

- 4.1.1 Power Supply (ALP3003-2D)
- 4.1.2 Differential Probe AP031
- 4.1.3 Current Probe CT6841-05 AC/DC
- 4.1.4 STM32G431RBT6 64 PINS
- 4.1.5 H-Bridge Inverter
- 4.1.6 Rectifier DC/AC
- 4.1.7 YOKOGAWA DLM2054 Mixed Channel oscilloscope
- 4.1.8 HIOKI Power Analyzer PW6001

4.2 ขั้นตอนลำดับการทดลอง

การทดลองการส่งกำลังขนาด 20 วัตต์

- 4.2.1 วัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดฝั่งส่ง และ ขดลวดฝั่งรับ และคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำรวม (M) และค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง (k)
- 4.2.2 คำนวณค่าตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวต้านทานจากค่าความเหนี่ยวนำ
- 4.2.3 ต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดัน 12 V เข้าสู่วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง
- 4.2.4 ปลอ่ยสัญญาณ PWM จาก STM32G431RBT6 64 PINS เข้าสู่วงจร gate driver จากนั้นนำสัญญาณ PWM เข้าสู่วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง
- 4.2.5 ต่อชุดวงจรเรโซแนนซ์ ประกอบด้วยไปด้วยขดลวดฝั่งส่ง ตัวเก็บประจุฝั่งส่ง และ

ขดลวดฝั่งรับ ตัวเก็บประจุฝั่งรับ โดยระยะห่างช่องอากาศของขดลวด คือ 5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงานวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

4.2.6 ต่อวงจรเรียงกระแสหลังจากขดลวดฝั่งรับ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.7 วัดค่ากระแสและแรงดันกระแสตรง ก่อนเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์และหลังจากเข้าวงจรเรียงกระแสและคำนวณค่าประสิทธิภาพที่ได้

4.2.8 เปรียบเทียบกราฟผลลัพธ์จากการทดลองกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSpice

4.3 ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 การทดลองการส่งกำลังขนาด 20 วัตต์

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรการทดลองการส่งกำลังขนาด 20 วัตต์

ตัวแปร	จากการคำนวณ	จากการทดลอง
L_p	15.07 μ H	16.412 μ H
L_s	15.07 μ H	15.263 μ H
R_1	-	0.07
R_2	-	0.07
C_p	218nF	200 nF
M	3.476 μ H	4.148 μ H
k	0.2306	0.2621

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

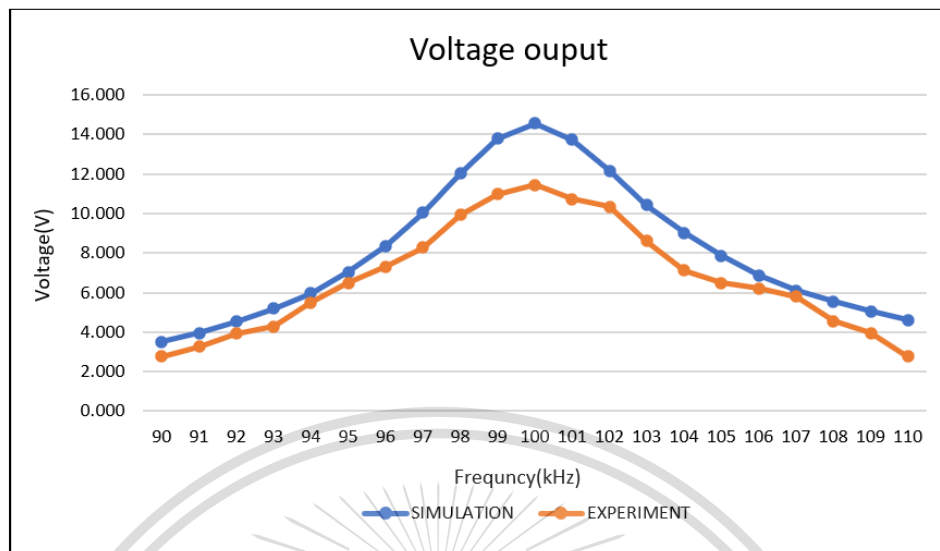
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการส่งกำลังขนาด 20 วัตต์

ความถี่(kHz)	ก่อนเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ ความถี่สูง ขดลวดฝั่งส่ง			หลังจากวงจรเรียงกระแส ขดลวดฝั่ง รับ			eff
	แรงดัน(V)	กระแส(A)	กำลังไฟฟ้า (W)	แรงดัน(V)	กระแส(A)	กำลังไฟฟ้า (W)	
90	12	0.554	6.646	2.756	0.437	1.262	18.122
91	12	0.612	7.348	3.267	0.451	1.472	20.035
92	12	0.684	8.212	3.911	0.592	2.315	28.195
93	12	0.784	9.408	4.274	0.614	2.624	27.892
94	12	0.899	10.786	5.493	0.616	3.384	31.372
95	12	1.040	12.481	6.498	0.801	5.205	41.704
96	12	1.220	14.638	7.324	0.921	6.745	46.082
97	12	1.451	17.412	8.286	1.143	9.471	54.391
98	12	1.708	20.493	9.915	1.212	12.017	58.640
99	12	1.939	23.267	10.986	1.568	17.224	74.029
100	12	2.018	24.213	11.433	1.656	18.930	78.181
101	12	1.888	22.651	10.731	1.530	16.418	72.486
102	12	1.656	19.876	10.341	1.309	13.536	68.103
103	12	1.412	16.949	8.605	1.062	9.138	53.915
104	12	1.207	14.484	7.122	0.838	5.968	41.206
105	12	1.040	12.481	6.480	0.794	5.145	41.225
106	12	0.912	10.940	6.210	0.781	4.853	44.362
107	12	0.808	9.690	5.804	0.706	4.098	42.287
108	12	0.727	8.727	4.568	0.567	2.590	29.678
109	12	0.654	7.843	3.952	0.531	2.099	26.757
110	12	0.600	7.197	2.776	0.389	1.080	15.005

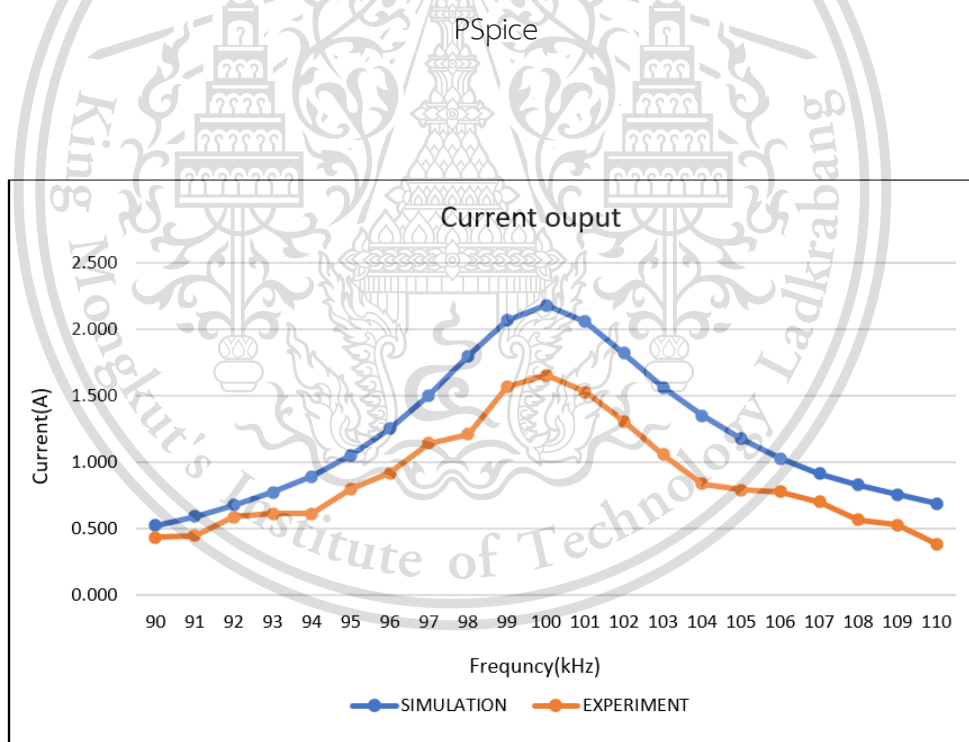
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบผลแรงดันด้านออกจากการทดลอง และผลแรงดันด้านออกจากโปรแกรม



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบผลกระแสด้านออกจากการทดลอง และผลกระแสด้านออกจากโปรแกรม

PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

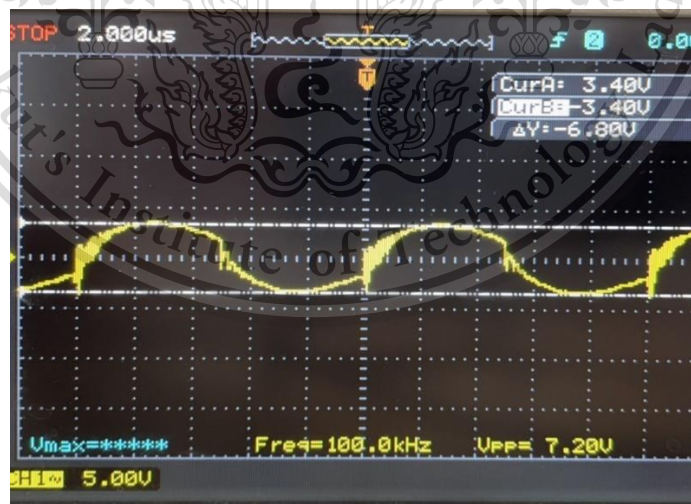
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปกราฟแรงดัน หลังวงจรอินเวอร์เตอร์ฝั่งส่งที่ 20 วัตต์



รูปที่ 4.3 กราฟแรงดันหลังวงจรอินเวอร์เตอร์ฝั่งส่งที่ 20 วัตต์

รูปกราฟแรงดัน เข้าวงจรเรียงกระแสฝั่งรับที่ 20 วัตต์



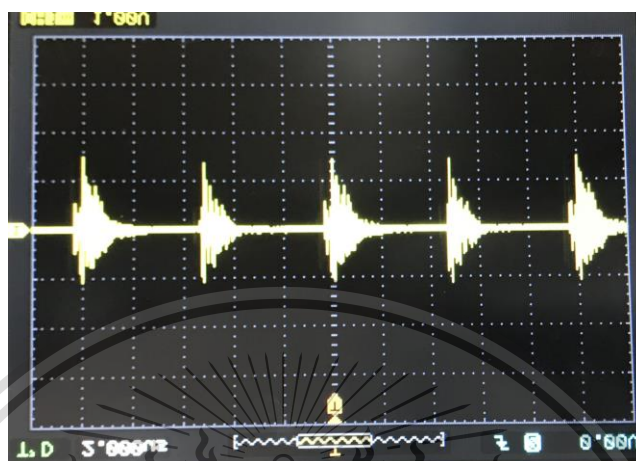
รูปที่ 4.4 กราฟแรงดันเข้าวงจรเรียงกระแสฝั่งรับที่ 20 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปกราฟแรงดัน หลังวงจรเรียงกระแสฝั่งรับที่ 20 วัตต์



รูปที่ 4.5 กราฟแรงดันหลังวงจรเรียงกระแสฝั่งรับที่ 20 วัตต์

4.4 สรุปผล

จากการทดลองส่งผ่านกำลังแบบไร้สายโดยชุดทดลอง 20 วัตต์ ชุดทดลองที่ได้ทำการออกแบบนั้นมีความเหนียวใกล้เคียงกับทางการคำนวณทางทฤษฎี ค่าสัมประสิทธิ์การคับปลิง (k) ที่ระยะ 5 cm มีค่าเท่ากับ 0.2621 ซึ่งสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การคับปลิงที่ได้จากผลจำลองทางโปรแกรม คือ 0.2306 อยู่ 0.0315

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองจริงและการจำลองทางโปรแกรม พบว่าหากความของวงจรมีค่าใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ที่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ค่ากระแสและแรงดันที่ได้จะมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ และจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อความถี่ของวงจรค่อยๆห่างออกไป ซึ่งส่งผลกับประสิทธิภาพในการส่งผ่านกำลังแบบไร้สายด้วยเช่นกันเมื่อให้ระยะห่างระหว่างชุดทดลองที่ 5 เซนติเมตร ค่าที่วัดได้ในการทดลองจริงจะน้อยกว่าค่าที่ได้จากการจำลองทางโปรแกรมอยู่เล็กน้อย แต่มีลักษณะของรูปกราฟที่ได้ไปในทิศทางเดียวกันทั้งกระแสและแรงดันที่การทดสอบหลายๆความถี่ จากผลการคำนวณจะได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 78.181 เปอร์เซ็นต์ที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

การศึกษาระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายในวิจัยเล่มนี้ จัดทำขึ้นเพื่อจำลองระบบส่งกำลังขนาด 20 วัตต์ 12 โวลต์ เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าสู่ไฟท้าย ด้วยหลักการเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนซ์ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะส่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงแบบฮาร์พริคซึ่งภายใต้สภาวะ Zero Voltage Switching เข้าสู่วงจรชดเชยแบบอนุกรม ขดลวดฝั่งส่งกระแสและฝั่งรับกระแสจะถูกออกแบบเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูเพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำและสัมประสิทธิ์การคัปปลิง และวงจรเรียงกระแสจะต่อกับวงจรชดเชยและต่อเข้ากับไฟท้ายรถยนต์

การออกแบบเพื่อส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุดผ่านอากาศได้ออกแบบวงจรชดเชยเป็นแบบ LLC พารามิเตอร์สำคัญได้แก่ L_r , L_m , C_r ถูกนำมาวิเคราะห์ โดยการวิจัยนี้ออกแบบให้ L_r มีค่ามากกว่า L_m มากๆ เพื่อให้ได้สัมประสิทธิ์การคัปปลิงอยู่ในช่วง 0.2-0.3 การออกแบบความถี่ที่ใช้งานออกแบบไว้ให้อยู่ในช่วง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลจากการออกแบบวงจรชดเชย LLC ส่งผลให้อินเวอร์เตอร์ความถี่สูงทำงานภายใต้สภาวะ Zero Voltage Switching ซึ่งเป็นวิธีการลดความสูญเสียจากการสวิตชิง

ผลของค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงและค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นผลมาจากการออกแบบชุดขดลวดให้ได้ผลลัพธ์สูงที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยในงานวิจัยเล่มนี้ ได้ออกแบบขดลวดและนำมาทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำ คือ ชุดขดลวด 20 วัตต์ จากการจำลองรูปทรงของขดลวดทั้งหมดจากโปรแกรมทรงกลมแบนราบ ทรงสี่เหลี่ยมแบนราบ และทรงสี่เหลี่ยมแบนราบมุมโค้ง พบว่าแบบสี่เหลี่ยมแบนราบที่มีมุมโค้งมีการกระจายของสนามแม่เหล็กดีที่สุดเหมาะสมต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายผ่านอากาศ จากที่ระยะห่างคงที่ 5 เซนติเมตร ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงของชุดขดลวด 20 วัตต์ คือ 0.2621

การเลือกวัสดุในการทำชุดขดลวดมีผลต่อความสูญเสียในวงจรชดเชย และค่าสัมประสิทธิ์เกี่ยวคล้อง ในชุดการทดลอง 20 วัตต์ ได้ใช้ขดลวดแบบ Litz wire

สรุปผลจากการวิจัยในเล่มนี้ สามารถส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายผ่านอากาศด้วยกำลังไฟฟ้า

20 วัตต์ด้วยระยะอากาศ 5 เซนติเมตร พบว่าที่ความถี่ 100 kHz มีแรงดันก่อนเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ 12 V

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กระแสก่อนเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ 2.018 แอมแปร์ และ กำลังไฟฟ้าก่อนเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ 24.213 วัตต์ และเมื่อส่งกำลังไฟฟ้าไปแล้วพบว่ามีความแรงดันหลังจากวงจรเรียงกระแส 11.433 โวลต์ , กระแสหลังจากวงจรเรียงกระแส 1.656 แอมแปร์ และ กำลังไฟฟ้าหลังจากวงจรเรียงกระแส 18.930 วัตต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพ 78.181 เปอร์เซ็นต์

5.2 ปัญหาระหว่างการดำเนินงาน

ปัญหาที่พบขณะทำการทดลอง ในตอนแรกแม้จะทำการทดสอบวงจรตามที่ได้ออกแบบไว้แต่กลับไม่ได้ผลตามที่ต้องการ ทำให้ต้องคอยตรวจสอบว่ามีอุปกรณ์ตัวใดชำรุดหรือไม่อยู่บ่อยครั้ง อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายให้ได้ผลตามที่ต้องการ สายไฟที่ใช้ในช่วงที่วงจรเป็นไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีผลของ Skin effect เมื่อใช้ในการทำงานความถี่สูง ผลการทดลองที่ได้จึงมีค่ากระแสและแรงดันที่ลดลงเมื่อเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม

5.3 แนวทางการแก้ไขและการดำเนินงานในอนาคต

5.3.1 ติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยลดการรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรส่งกำลัง และป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กที่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อื่นๆในวงจรโดยอาศัยการออกแบบควบคุมไปกับการจำลองโปรแกรม

5.3.2 เลือกใช้อุปกรณ์ที่มีพิกัดแรงดันและกระแสที่สูงขึ้นเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดการชำรุดมีน้อยลง ปรับปรุงวงจรเรียงกระแสให้เป็นแบบแอคทีฟ เพื่อสามารถควบคุมระบบป้อนกลับ

5.3.3 ปรับปรุงชุดอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงโดยการเปลี่ยนมอสเฟตเป็นชนิดที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

5.3.4 ออกแบบขดลวดใหม่ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้สะดวกในการนำไปติดตั้งมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

- [1] นางสาวนิพิษฐา เกิดรัตนศักดิ์, นายพสธร ชีระกานตภิรัตน์ และ นางสาวพัชฌณ์ สิริโสภณวัฒนา , “ระบบส่งผ่านกำลังแบบไร้สายสำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า”, **ปริญญาพันธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2562.
- [2] New England Wire Technology, “Litz Design,” **New England Wire Technology**, Product Selection Guide, 2005.
- [3] Huang, H. (2010). “Designing an LLC Resonant Half – Bridge Power Converter,” **Taxus instrument Power Supply Design Seminar**, 2010.
- [4] Alashgar, Fujiwara and Nagaoka (2019). “Fundamental Investigation of Short-Range Inductive Coupling Wireless Power Transmission by Using Series-Series Capacitive Compensation Topology,” **Journal of Asian Electric Vehicles**, 2019.
- [5] Aqeel, et al. (2017) “Opportunities and Challenges for Near-Field Wireless Power Transfer,” **Energies 2017,10,1022**, 2017.
- [6] S. K. Mahobia, and G.R. Kumrey, “Study and performance of Single-phase Rectifiers with Various Type of Parameter,” **International Journal of Engineering Technologies and Management Research**, vol. 3, No. 1, 2016, pp. 9-14.
- [7] Li jie, “Wireless Power System Design for Maximum Efficiency,” **Master of Science ‘s Thesis, University of Tennessee**, 2018.
- [8] Hong Zhou, Bin Zhu, Wenshan Hu, Zhiwei Liu, and Xingran Gao, “Modelling and Practical implementation of 2-Coil Wireless Power Transfer Systems,” **Journal of Electrical and Computer Engineering**, 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [9] Jaime Garnica, Joaquin Casanova, and Jenshan Lin, “High Efficiency Midrange Wireless Power Transfer System,” **University of Florida, Gainesville, Florida, 32608 U.S.A.**, 2011.
- [10] Zhongyu Dai, Junhua Wang, Mengjiao Long, Hong Huang, and Mingui Sun, “Magnetic shield structure optimization design for wireless power transmission coil,” **American Institute of Physics**, 2017, pp. 13.
- [11] Manuel Pinuela, David C. Yates, Stepan Lucyszyn, and Paul D., “Maximising DC to Load Efficiency for Inductive Power Transfer,” **IEEE Transaction on Power Electronics**, 2012, pp. 3.
- [12] M. Budhia, G. A. Covic, and J. T. Boys, “Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer system,” **IEEE Trans. Power Electron**, vol. 26, no. 11, pp. 3096-3108, 2011.
- [13] R. Visintini, “rectifiers”, **CERN Accelerator School – Intermediate accelerator physics -Warrington**, CERN-2006-010 Ed. CEAN, 2004., pp. 133-183.
- [14] Bi, Z., Kan, T., Mi, C.C., Zhang, Y., Zhao, Z. and Keoleian, G.A., “A review of wireless power transfer for electric vehicles,” **Prospects to enhance sustainable mobility. Applied Energy**, 179, pp.413-425.
- [15] Haldi R., Schenk K., “Finite-Element-Simulation-Assisted Optimized Design of an Asymmetrical High-Power Inductive Coupler with a Large Air Gap for EV Charging,” **Institute of Energy Systems University of Applied Sciences NTB Buchs SG**, 2013.
- [19] Kesler, M. “Highly Resonant Wireless Power Transfer: Safe, Efficient, and over Distance,” **WiTricity Corporation**, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายในรถยนต์ไฟฟ้า

Wireless Power Transfer in Electric Car

กฤตนันท์ นาคแก้ว¹ จิรัชฐ์ สมร่วง² ชนาธิป เกษดี³ ณัฐพนธ์ นามลี⁴

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-800 ต่อ 3925

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเรื่องการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับติดตั้งในรถยนต์ไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าแบบ Inductive Power Transfer ในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างขดลวดฝั่งส่งและขดลวดฝั่งรับที่ติดตั้งกับไฟท้ายในรถยนต์ต้นแบบ โดยปัญหาทั่วไปของการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย คือ ประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นในโปรเจกต์นี้ใช้หลักการของการ Resonance Inductive Coupling และวงจรชดเชยแบบ LLC เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน รถยนต์ต้นแบบที่ได้รับการปรับปรุงสามารถส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ระยะอากาศ 5 เซนติเมตร โดยมีพิกัดที่ใช้งานอยู่ที่ 20 วัตต์ และมีประสิทธิภาพ 78.181 % ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ยิ่งไปกว่านั้นผลการทดลองและผลการจำลองสามารถนำไปใช้ต่อยอดการประยุกต์ใช้การส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายในอนาคต

คำสำคัญ : การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย, การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนซ์, วงจรชดเชย LLC

ABSTRACT

A wireless power transfer in an electric car is studied in this thesis. An Inductive Power Transfer method is used to transfer electrical power between primary coil and secondary coil which is used for a tail-light lamp of an electric vehicle prototype. As known, a general problem of wireless power transfer technique is low efficiency. Therefore, in this project, the proposed design is developed by using Resonance Inductive Coupling and an LLC compensation technique to improve efficiency problem. The developed prototype can transfer power at 20W with 5 cm

air gap by achieving 78.181 % at resonant frequency. In addition, simulation and experimental results are also investigated for further wireless power transferred applications.

Keywords : Wireless Power Transfer (WPT), Resonant Inductive Power Transfer, LLC compensation

1. บทนำ

จากสาเหตุการเกิดเพลิงไหม้ของรถยนต์นั้น เกิดจากการที่ระบบไฟฟ้าบกพร่องมากเป็นถึงอันดับที่ 2 เราสามารถแบ่งได้เป็น 3 สาเหตุหลักๆ คือ 1. ความบกพร่องของหน้าสัมผัสที่กระแสไฟฟ้าต้องไหลผ่าน 2. การลัดวงจรของกระแสไฟฟ้า และ 3. การชำรุดของอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยตรง ดังนั้นจากการเกิดปัญหาของระบบไฟฟ้าบกพร่องที่เกิดขึ้นซึ่งส่วนหนึ่งมีความเกี่ยวข้องกับสายไฟ หากเราสามารถลดจำนวนหรือความยาวของสายไฟลงได้ ก็หมายถึงการลดปัญหาการเกิดเพลิงไหม้ในรถยนต์ได้ด้วยเช่นกัน ซึ่งการลดความยาวของสายไฟนั้นเหมาะกับการที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้ามาก และยังมีข้อดีเมื่อเทียบกับรถเครื่องยนต์สันดาปเช่น ในเรื่องของความเงียบและอัตราเร่งที่ได้ดีใจของคนขับ และในเรื่องของการประหยัดค่าใช้จ่ายและค่าซ่อมบำรุง เพราะรถยนต์ชนิดนี้ใช้พลังงานไฟฟ้ามาแทนที่ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีราคาสูง เช่นเดียวกันกับค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรถยนต์ไฟฟ้า ที่จะมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อยกว่าเพราะไม่มีเครื่องยนต์และไม่ต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง จึงทำให้การดูแลรักษาเป็นเรื่องที่ง่ายขึ้น อีกข้อหนึ่งที่สำคัญคือเรื่องของการช่วยลดมลภาวะ เพราะไม่มีการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ก่อให้เกิดไอเสียและมลภาวะทางอากาศที่นำไปสู่ภาวะโลกร้อน เราจึงได้หาวิธีอื่นๆ ที่จะสามารถลดความยาวของสายไฟในรถยนต์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ไฟฟ้าซึ่งก็คือวิธีการใช้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายภายในรถยนต์ การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟไปยังโหลดไฟฟ้าโดยไม่ต้องต่อสายไฟ มีความน่าเชื่อถือ มีประสิทธิภาพ รวดเร็ว ค่าบำรุงรักษาต่ำและสามารถใช้ได้ทั้งระยะใกล้หรือระยะไกล หลักการทำงานพื้นฐานของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายคือวัตถุที่มีความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงกัน แต่วิธีนี้จะมีปัญหาในเรื่องของประสิทธิภาพของการส่งผ่านกำลัง แต่อย่างไรก็ตามระบบส่งผ่านกำลังแบบไร้สายถือเป็นก้าวสำคัญในการเริ่มต้นเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆนี้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนซ์

การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนซ์ (Resonance Inductive Power Transfer, RIPT) เป็นหลักการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการเช่นเดียวกันกับหม้อแปลงกำลัง โดยหม้อแปลงของวงจรส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายจะเป็นแกนอากาศ ซึ่งจะส่งผ่านกำลังได้จากค่าความเหนี่ยวนำที่ขดลวด (Mutual Inductance) ของขดลวดส่งและขดลวดรับ ที่ขดลวดส่งรับจะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induce voltage) ขึ้น ขณะที่ขดลวดส่งมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน การส่งผ่านกำลังไฟฟ้านี้เรียกว่า Inductive Power Transfer (IPT) โดยมีการต่อเชื่อมวงจรขดลวด รวมอยู่ด้วย วงจรขดลวดทำหน้าที่ขดลวดกำลังไฟฟ้านี้ให้แก่ขดลวดทั้งสองฝั่ง โดยทั่วไปย่านความถี่การทำงานของวงจร RIPT จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งมีผลให้เกิดการส่งผ่านกำลังสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์การคับปลิง (coupling coefficient, K) จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.3 ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขดลวดส่งและขดลวดรับ

2.2 วงจรสวิตช์ความถี่สูงแบบเรโซแนนซ์

วงจรสวิตช์ความถี่สูงหรืออินเวอร์เตอร์ความถี่สูงใช้สำหรับการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงหลังจากวงจรเชื่อมโยงทางดิซซีที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงจะแตกต่างจากอินเวอร์เตอร์ทั่วไปคือ มีการเพิ่มเรโซแนนซ์แท็งก์ (resonant tank) เข้าไปกับโหลด ซึ่งสามารถมีทั้งการต่อตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุแบบขนาน แบบอนุกรม หรือแบบผสมร่วมกับโหลดความต้านทาน ซึ่งการเกิดเรโซแนนซ์จะส่งผลให้เกิดสภาวะ ZVS (Zero Voltage Switching)

3. การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

เราเลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงแบบฮาล์ฟบริดจ์ โดยในการวิจัยนี้เลือกใช้โมสเฟตหมายเลข IRP740 เป็นอุปกรณ์สวิตช์ จะใช้ Duty Ratio อยู่ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32G431RBT6 64 PINS เป็นอุปกรณ์ในการสัญญาณควบคุม จากนั้นส่งสัญญาณเข้าสู่วงจรควบคุม จากนั้นสัญญาณจะผ่านไปยังวงจรถับเกดที่ประกอบด้วย FOD3184

3.2 วงจรขดลวดแบบ LLC

วงจรขดลวด LLC จะทำงานที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ และเนื่องจากสัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กับวงจรเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม จึงนำวิธีการออกแบบด้วยวิธี First Harmonic Fundamental Approximation (FHA) มาใช้ ซึ่งเป็นวิธีที่จะวิเคราะห์เพียงค่าฮาร์มอนิกอันดับแรกของกระแสในฝั่งส่งเท่านั้น ไม่คิดผลของตัวเก็บประจุด้านออกและค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดรับ

ตารางที่ 3.2.1 ค่าตัวแปรที่ได้จากการออกแบบวงจรส่งผ่านกำลังแบบ Resonant LLC topology 20 วัตต์

ตัวแปร	ตัวย่อ	ค่า	หน่วย
Input nominal voltage	$V_{in, nom}$	12	V
Output voltage	$V_{o, nom}$	12	V
Output current	I_o	1.67	A
Rated output power	P_o	20	W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Maximum efficiency	-	80%	-
Resonant frequency	-	100	kHz
Turn Ratio	n	1	-
Output Voltage Loss	V_{loss}	0.12121212	V
Minimum Gain	M_{g_min}	0.92222222	-
Maximum Gain	M_{g_max}	1.420959596	-
Inductance Ratio	L_n	0.3	-
Quality Factor	Q_c	1.25	-
Equivalent Load resistance	R_c	9.100705118	Ω
Resonant Capacitance	C_r	140	nF
Resonant Inductance	L_r	18.1052776	μ H
Magnetizing Inductance	L_m	5.431583	μ H
Primary Inductance	L_p	15.0636	μ H
Secondary Inductance	L_s	15.0636	μ H

3.3 ขดลวดส่งกำลัง

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ล้อมรอบขดลวดส่งพลังงาน และขดลวดรับพลังงานสามารถถูกแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ สนามแม่เหล็กที่ล้อมรอบใกล้ขดลวดและสนามแม่เหล็กที่แผ่กระจาย โดยตัวแปร

Circular Planar Spiral และ Rectangle Planar Spiral จากนั้นทำการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้วยสมการของ Modified Wheeler จึงได้เลือกออกแบบขดลวดเป็นแบบ Rectangular Planar Spiral

ตารางที่ 3.3.1 ค่าความเหนี่ยวนำและลักษณะทางกายภาพของขดลวดส่งและรับจากการวัดจริง

ตัวแปร	หน่วย	L1	L2
L	μ H	16.412	15.263
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	cm	17	17
จำนวนรอบ	turn	13	13
ระยะห่างระหว่างรอบ	cm	0.2	0.2
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	cm	7	7

3.4 วงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์

วงจรที่แปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง เนื่องจากขดลวด รับกระแสไฟฟ้ามาเป็นกระแสสลับจึงต้องแปลงมาเป็นกระแสตรงเพื่อส่งต่อไปยังโหลด โดยจะใช้วงจรเรียงกระแสแบบเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เบื้องต้นที่เราควรคำนึงถึงได้แก่ 1.ระยะห่างในการส่งผ่านกำลัง (Air Gap) หมายถึง ระยะห่างระหว่างพื้นที่ที่จะทำการติดตั้งขดลวดส่งกำลังไปจนถึงขดลวดรับซึ่งอยู่บริเวณประตูทั้งคู่ โดยจะมีระยะห่างอยู่ที่ประมาณ 5-10 เซนติเมตร 2.ค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง (Coupling Coefficient) สามารถบ่งบอกค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) ที่เกิดขึ้นขณะส่งผ่านกำลังโดยจะขึ้นอยู่กับระยะห่างในการส่งผ่านกำลังรวมทั้งขนาดและรูปร่างของขดลวดโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 0.2-0.3

ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบขดลวด 1.ผลจากการใช้งานในย่านความถี่สูงในโครงการนี้ได้มีการออกแบบความถี่ใช้งานอยู่ที่ 100 kHz ซึ่งจัดอยู่ในย่านความถี่สูง ซึ่งจะมีปรากฏการณ์ Skin effect และ Proximity effect เกิดขึ้น วิธีที่จะใช้แก้ไขปรากฏการณ์ที่กล่าวมาข้างต้นคือการใช้ตัวนำที่เรียกว่า Litz Wire ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มพื้นที่ผิวของตัวนำ ทำให้กระแสไหลได้ดีกว่าตัวนำเดี่ยวที่มีพื้นที่หน้าตัดสุทธิเท่ากัน ในสภาวะความถี่ สำหรับตัวนำ AWG38 จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.1 มิลลิเมตร จำนวน 500 เส้นความต้านทานกระแสตรง (DC Resistance) 2.รูปร่างของขดลวดได้เลือกออกแบบขดลวดเป็นรูปทรงแบบ 2 มิติหรือที่เรียกว่า planar spiral โดยจะทำการเปรียบเทียบรูปร่างอยู่ 2 แบบคือ คลื่น ต่อขนานกับตัวเก็บประจุขนาด 4400 ไมโครฟารัด เพื่อกรองสัญญาณให้ดียิ่งขึ้น

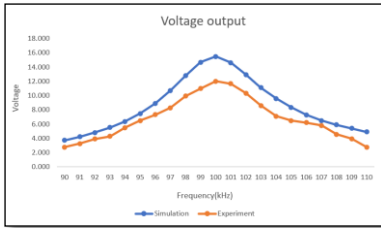
4. ผลการทดลอง

การวัดประสิทธิภาพของวงจรจะวัดจากอินพุตก่อนวงจร เชื่อมโยงทางคิซีของชุดทดลองฝั่งส่งถึงเอาต์พุตหลังจากเชื่อมโยงทางคิซีของชุดทดลองฝั่งรับ โดยประสิทธิภาพที่สูงสุดอยู่ที่ 78.181% ที่ความถี่ใช้งาน 100kHz

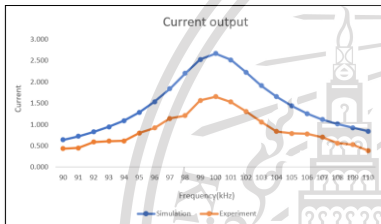
ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรการทดลองการส่งกำลังขนาด 20 วัตต์

ตัวแปร	จากการทดลอง
L_p	16.412 μ H
L_s	15.263 μ H
R_1	0.07
R_2	0.07
C_p	200 nF

M	4.148 μH
k	0.2621



รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบผลแรงดันค่านอกจากการทดลอง และผลแรงดันค่านอกจากโปรแกรมPSpice



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบผลกระแสค่านอกจากการทดลอง และผลกระแสค่านอกจากโปรแกรมPSpice

5. สรุปผล

จากการทดลองส่งผ่านกำลังแบบไร้สายโดยชุดขดลวด 50 วัตต์ จะได้ว่าเมื่อวัดค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการออกแบบขดลวด ผลมีค่าใกล้เคียงกันกับทางทฤษฎีที่ออกแบบไว้ โดยค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง จะมีค่าเท่ากับ 0.2621 ซึ่งสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงที่นำมาใช้เพื่อคำนวณหาขนาดของขดลวดฝั่งรับ คือ 0.2306 อยู่ 0.0315 ซึ่งส่งผลกระทบต่อช่วงความถี่ที่ออกแบบไว้คือ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ จากผลการคำนวณที่จะได้ค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ เหลือประสิทธิภาพ 78.181 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งลดลง 2.388 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้ทราบได้ว่าถ้าค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพลดลง

6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณ รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย และอาจารย์ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา ศศ.ดร.วรพงษ์ ไพรินทร์ ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาแนะนำแนวทาง ให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดี ตลอด รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์ในการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

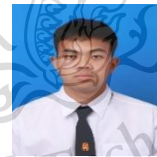
7. อ้างอิง

- [1]New England Wire Technology, “Litz Design,” *New England-Wire Technology, Product Selection Guide*, 2005.
- [2]Huang, H. (2010). “Designing an LLC Resonant Half – Bridge Power Converter,” *Taxus instrument Power Supply Design Seminar*, 2010.

8. ประวัติผู้แต่ง



ชื่อ-นามสกุล : กตนันท์ นาคแก้ว
เบอร์โทรศัพท์ : 0849941829



ชื่อ-นามสกุล : จิรฎฐ์ สมร่าง
เบอร์โทรศัพท์ : 0925689946



ชื่อ-นามสกุล : ชนาธิป เกษติ
เบอร์โทรศัพท์ : 0852873006



ชื่อ-นามสกุล : ณัฐพันธ์ นามลี
เบอร์โทรศัพท์ : 0931247100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ข.1 สคริปต์โค้ดของสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของมอสเฟตที่ความถี่ต่างๆ

การควบคุมการทำงานของมอสเฟตในโครงการนี้ ใช้โปรแกรมSTM32CubeIDE ในการปรับค่าความถี่ต่างๆ โดยมีสคริปต์โค้ดดังนี้

```

/* USER CODE BEGIN Header */
/**
*****
* @file      : main.c
* @brief     : Main program body
*****
* @attention
*
* <h2><center>&copy; Copyright (c) 2021 STMicroelectronics.
* All rights reserved.</center></h2>
*
* This software component is licensed by ST under BSD 3-Clause license,
* the "License"; You may not use this file except in compliance with the
* License. You may obtain a copy of the License at:
*
*           opensource.org/licenses/BSD-3-Clause
*
*****
*/
/* USER CODE END Header */
/* Includes -----
*/
#include "main.h"
/* Private includes -----
*/
/* USER CODE BEGIN Includes */
/* USER CODE END Includes */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

/* Private typedef -----
*/
/* USER CODE BEGIN PTD */

/* USER CODE END PTD */

/* Private define -----
*/
/* USER CODE BEGIN PD */
/* USER CODE END PD */

/* Private macro -----
*/
/* USER CODE BEGIN PM */

/* USER CODE END PM */

/* Private variables -----
*/
TIM_HandleTypeDef htim1;

/* USER CODE BEGIN PV */
/* USER CODE END PV */

/* Private function prototypes -----
*/
void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_TIM1_Init(void);
/* USER CODE BEGIN PFP */

/* USER CODE END PFP */

/* Private user code -----
*/
/* USER CODE BEGIN 0 */

/* USER CODE END 0 */

/**
 * @brief The application entry point.
 * @retval int
 */
int main(void)
{
    /* USER CODE BEGIN 1 */

    /* USER CODE END 1 */

    /* MCU Configuration-----
    */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

/* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick.
*/
HAL_Init();

/* USER CODE BEGIN Init */

/* USER CODE END Init */

/* Configure the system clock */
SystemClock_Config();

/* USER CODE BEGIN SysInit */

/* USER CODE END SysInit */

/* Initialize all configured peripherals */
MX_GPIO_Init();
MX_TIM1_Init();
/* USER CODE BEGIN 2 */
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_2);
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_2);
/* USER CODE END 2 */

/* Infinite loop */
/* USER CODE BEGIN WHILE */
while (1)
{
    /* USER CODE END WHILE */

    /* USER CODE BEGIN 3 */
}
/* USER CODE END 3 */
}

/**
 * @brief System Clock Configuration
 * @retval None
 */
void SystemClock_Config(void)
{
    RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
    RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};

    /** Configure the main internal regulator output voltage
    */
    HAL_PWREx_ControlVoltageScaling(PWR_REGULATOR_VOLTAGE_SCALE1);
    /** Initializes the RCC Oscillators according to the specified parameters
    * in the RCC_OscInitTypeDef structure.
    */
    RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSE;
    RCC_OscInitStruct.HSEState = RCC_HSE_ON;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSE;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLM = RCC_PLLM_DIV3;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

RCC_OscInitStruct.PLL.PLLN = 25;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLP = RCC_PLLP_DIV2;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLQ = RCC_PLLQ_DIV2;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLR = RCC_PLLR_DIV2;
if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
/** Initializes the CPU, AHB and APB buses clocks
*/
RCC_ClkInitStruct.ClockType = RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYSCLK
                               |RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;
RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;
RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;

if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_2) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
}

/**
 * @brief TIM1 Initialization Function
 * @param None
 * @retval None
 */
static void MX_TIM1_Init(void)
{
    /* USER CODE BEGIN TIM1_Init 0 */

    /* USER CODE END TIM1_Init 0 */

    TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig = {0};
    TIM_OC_InitTypeDef sConfigOC = {0};
    TIM_BreakDeadTimeConfigTypeDef sBreakDeadTimeConfig = {0};

    /* USER CODE BEGIN TIM1_Init 1 */

    /* USER CODE END TIM1_Init 1 */
    htim1.Instance = TIM1;
    htim1.Init.Prescaler = 2-1;
    htim1.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
    htim1.Init.Period = 500;
    htim1.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
    htim1.Init.RepetitionCounter = 0;
    htim1.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
    if (HAL_TIM_PWM_Init(&htim1) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_RESET;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

sMasterConfig.MasterOutputTrigger2 = TIM_TRG02_RESET;
sMasterConfig.MasterSlaveMode = TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(&htim1, &sMasterConfig) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
sConfigOC.OCMode = TIM_OC_MODE_PWM1;
sConfigOC.Pulse = 250;
sConfigOC.OCpolarity = TIM_OC_POLARITY_HIGH;
sConfigOC.OCNPolarity = TIM_OCNPOLARITY_HIGH;
sConfigOC.OCFastMode = TIM_OCFAST_DISABLE;
sConfigOC.OCIdleState = TIM_OCIDLESTATE_RESET;
sConfigOC.OCNIdleState = TIM_OCINIDLESTATE_RESET;
if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim1, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_2) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
sBreakDeadTimeConfig.OffStateRunMode = TIM_OSSR_DISABLE;
sBreakDeadTimeConfig.OffStateIDLEMode = TIM_OSSI_DISABLE;
sBreakDeadTimeConfig.LockLevel = TIM_LOCKLEVEL_OFF;
sBreakDeadTimeConfig.DeadTime = 10;
sBreakDeadTimeConfig.BreakState = TIM_BREAK_DISABLE;
sBreakDeadTimeConfig.BreakPolarity = TIM_BREAKPOLARITY_HIGH;
sBreakDeadTimeConfig.BreakFilter = 0;
sBreakDeadTimeConfig.BreakAFMode = TIM_BREAK_AFMODE_INPUT;
sBreakDeadTimeConfig.Break2State = TIM_BREAK2_DISABLE;
sBreakDeadTimeConfig.Break2Polarity = TIM_BREAK2POLARITY_HIGH;
sBreakDeadTimeConfig.Break2Filter = 0;
sBreakDeadTimeConfig.Break2AFMode = TIM_BREAK_AFMODE_INPUT;
sBreakDeadTimeConfig.AutomaticOutput = TIM_AUTOMATICOUTPUT_DISABLE;
if (HAL_TIMEx_ConfigBreakDeadTime(&htim1, &sBreakDeadTimeConfig) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
/* USER CODE BEGIN TIM1_Init 2 */
/* USER CODE END TIM1_Init 2 */
HAL_TIM_MspPostInit(&htim1);
}

/**
 * @brief GPIO Initialization Function
 * @param None
 * @retval None
 */
static void MX_GPIO_Init(void)
{
    /* GPIO Ports Clock Enable */
    __HAL_RCC_GPIOF_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOC_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE();

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

}

/* USER CODE BEGIN 4 */

/* USER CODE END 4 */

/**
 * @brief This function is executed in case of error occurrence.
 * @retval None
 */
void Error_Handler(void)
{
    /* USER CODE BEGIN Error_Handler_Debug */
    /* User can add his own implementation to report the HAL error return state */
    __disable_irq();
    while (1)
    {
    }
    /* USER CODE END Error_Handler_Debug */
}

#ifdef USE_FULL_ASSERT
/**
 * @brief Reports the name of the source file and the source line number
 * where the assert_param error has occurred.
 * @param file: pointer to the source file name
 * @param line: assert_param error line source number
 * @retval None
 */
void assert_failed(uint8_t *file, uint32_t line)
{
    /* USER CODE BEGIN 6 */
    /* User can add his own implementation to report the file name and line number,
    ex: printf("Wrong parameters value: file %s on line %d\r\n", file, line)
    */
    /* USER CODE END 6 */
}
#endif /* USE_FULL_ASSERT */

/***** (C) COPYRIGHT STMicroelectronics *****/
FILE****/

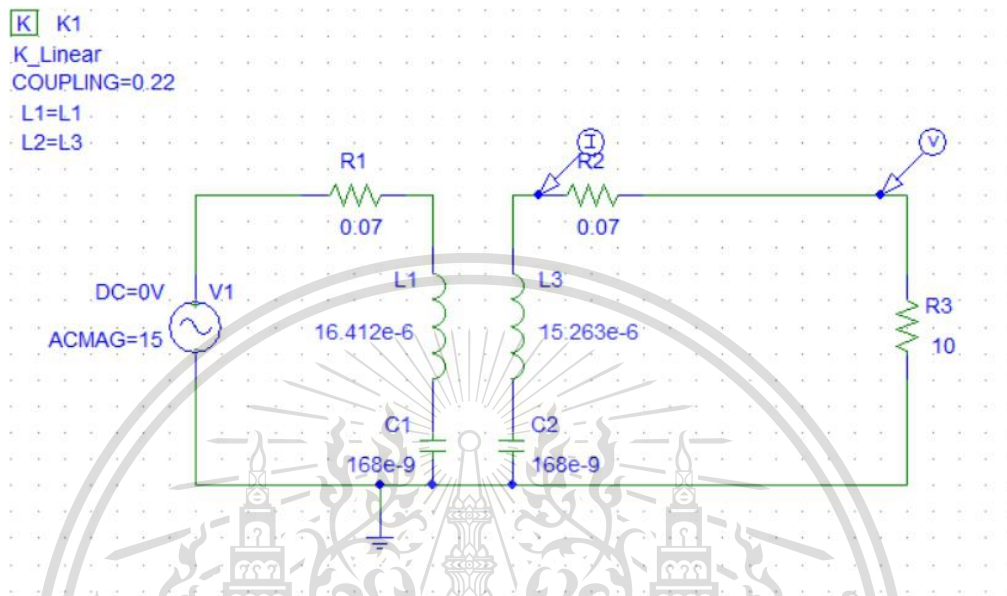
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ข.2 การจำลองผลการทำงานของวงจรรวมด้วยโปรแกรม PSpice



รูปที่ ข.1 การจำลองการทำงานของวงจรส่งกำลังพิกัด 20 วัตต์ ด้วยโปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

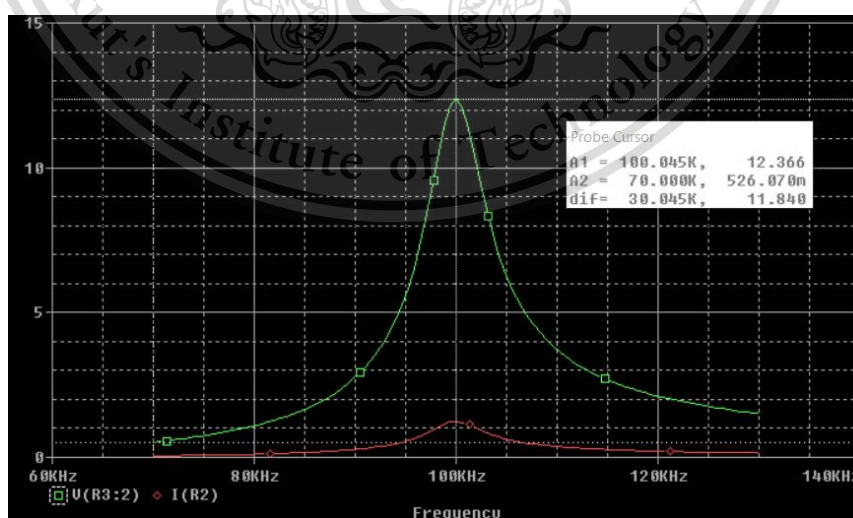
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ข.1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรส่งกำลังพิกัด 20 วัตต์ ในโปรแกรม PSpice

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
แรงดันด้านเข้า	12	V
ความเหนี่ยวนำของขดลวดฝั่งส่ง	16.412e-6	H
ความต้านทานภายในขดลวดฝั่งส่ง	0.07	Ohm
ความเหนี่ยวนำของขดลวดฝั่งรับ	15.263e-6	H
ความต้านทานภายในขดลวดฝั่งรับ	0.07	Ohm
ตัวเก็บประจุฝั่งส่ง	168e-9	F
ตัวเก็บประจุฝั่งรับ	168e-9	F
ค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง (k)	0.22	-
ความต้านทานโหลด	10	Ohm

การจำลองการทำงานของวงจรในโปรแกรม PSpice นั้นจะเริ่มตั้งแต่ด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ ผ่านวงจรส่งกำลังในลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรดังตารางที่ ข. จากนั้นจำลองผลการทำงานในลักษณะแบบ AC Sweep Type ตั้งแต่ความถี่ 70-130 kHz เพื่อดูลักษณะการทำงานของวงจรส่งกำลังที่ความถี่ต่างๆ



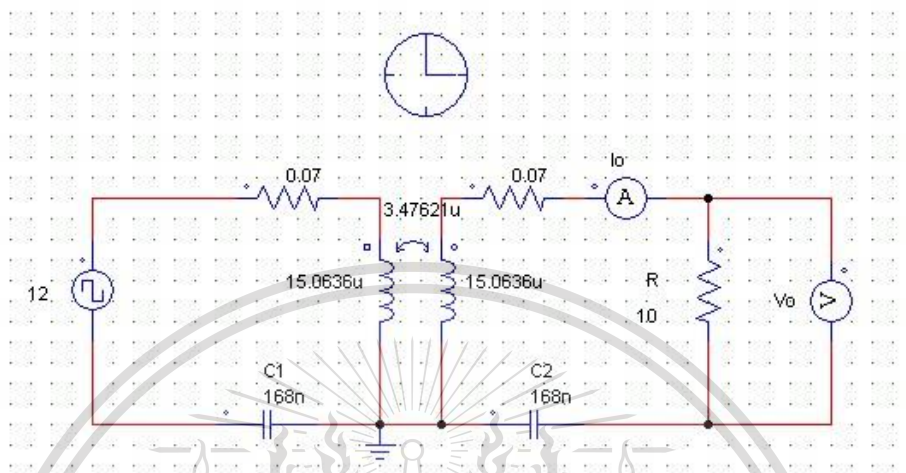
รูปที่ ข.2 ผลการจำลองการทำงานที่พิกัด 20 วัตต์ ด้วยโปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

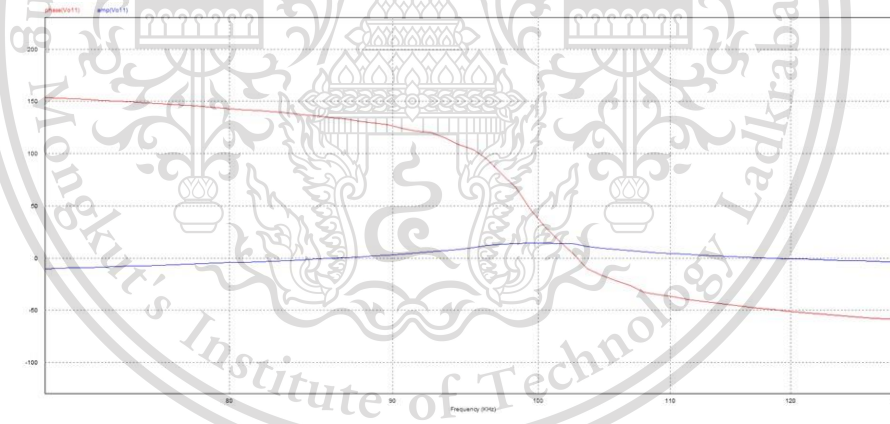
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ข.3 การจำลองผลการทำงานของวงจรรวมด้วยโปรแกรม PSIM



รูปที่ ข.3 การจำลองการทำงานของวงจรส่งกำลังพิกัด 20 วัตต์ ด้วยโปรแกรม PSIM



รูปที่ ข.4 ผลการจำลองการทำงานที่พิกัด 20 วัตต์ ด้วยโปรแกรม PSIM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ข.2 เปรียบเทียบผลการทำงานของวงจรส่งกำลังที่ได้จากการทดลองและการจำลองด้วย
โปรแกรมต่างๆที่พิกัด 20 วัตต์ ที่ความถี่ 100 kHz

	แรงดันด้านออก (V)	กระแสด้านออก (A)	กำลัง (W)
ผลการทดลอง	11.433	1.656	18.930
PSpice	12.636	1.778	22.472
PSIM	14.827	1.4827	21.984



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ค.1 อุปกรณ์สำหรับสร้างขดลวด


ตารางที่ ค.1 คุณสมบัติทั่วไปที่เกี่ยวข้องของทองแดง

ความต้านทานทางไฟฟ้า	16.78	nΩ.m
การนำความร้อน	401	W/(m*K)
ความซึมซาบทางแม่เหล็ก	1	H/m

ในโครงการนี้มีการทดลองสร้างขดลวดส่งกำลัง เริ่มจากทดลองสร้างขดลวดตัวเหนี่ยวนำเดี่ยวขนาดเล็กลงบนกระดาษ เพื่อให้ได้รูปร่างที่ต้องการเพื่อทดลองการส่งกำลัง จากการทดลองส่งกำลังพบว่า สามารถส่งผ่านกำลังได้ แต่วิธีที่สร้างขดลวดเหนี่ยวนำบนกระดาษเป็นวิธีที่ไม่สามารถควบคุมรูปร่างและความคงทนของขดลวดได้ไม่ดี ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการทำงานและประสิทธิภาพของวงจร

การทดลองสร้างขดลวดด้วยวิธีที่สอง ขึ้นรูปขดลวดเหนี่ยวนำบนเหนี่ยวนำบนแผ่นอะคริลิกซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีความทนทานต่อแรงกระแทก พบว่าเป็นวิธีที่ง่ายสามารถสร้างขดลวดให้มีรูปร่างตรงตามการออกแบบและมีความคงทนของรูปร่างที่ดี


ตารางที่ ค.2 รายละเอียดอุปกรณ์สำหรับสร้างขดลวด

อุปกรณ์	รายละเอียด	ภาพประกอบ
ตัวนำทองแดง	-Litz Wire 0.1x500	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.


แผ่นอะคริลิก	-แผ่นอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตรขนาด50x50 เซนติเมตร ใช้เป็นฐานรองของขดลวด	
--------------	---	--

ตารางที่ ค.3 คุณสมบัติทั่วไปที่เกี่ยวข้องของอะคริลิก (อ้างอิงจากอะคริลิกความหนา 3 มิลลิเมตร)

ความหนาแน่น	1.15-1.19	g/cm ³
อุณหภูมิที่ทำให้เสียรูปร่าง	100	°C
จุดหลอมเหลว	130-140	°C
จุดเดือด	200	°C
ค่าความยืดหยุ่น	30,000	Kg/cm ²

ค.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ

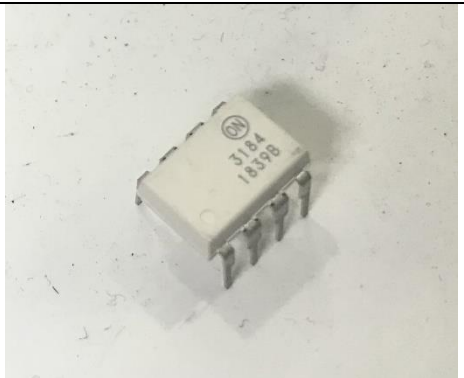

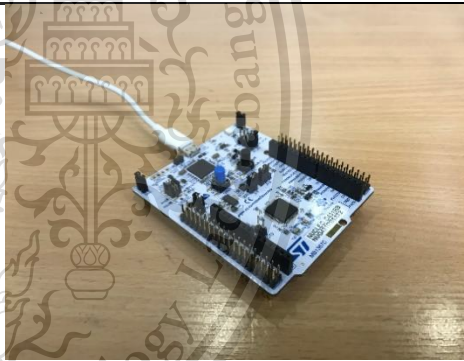

ตารางที่ ค.4 รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ

วงจร	รายละเอียด	ภาพประกอบ
แหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรง	- ALP3003-2D 2*0-30V 2*0-3A 5V/3A DC POWER SUPPLY	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

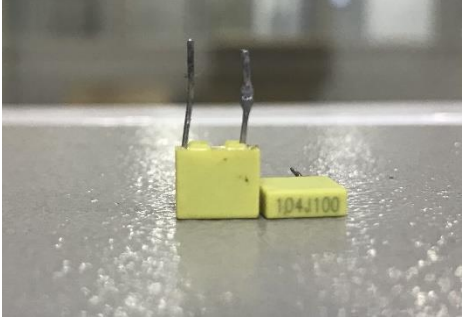
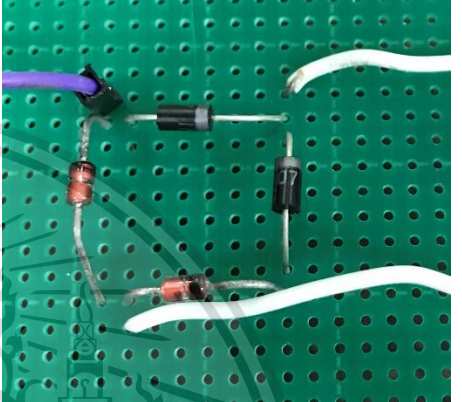

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

อุปกรณ์แปลง สัญญาณ	- FOD3184	
วงจรขับเคลื่อน	<ul style="list-style-type: none"> - R 300E 1/4W 1% - R 5W 5% กระเบื้อง Royal - R 5.0k 1/4W 1% - 1N4742A: 12V/1W, Zener Diode - C100U16E: 100uF/16V,Elite, 	
Microcontroller	- STM32G431RBT6 64 PINS	
อินเวอร์เตอร์ความถี่สูงแบบฮาร์ฟบริดจ์	- Power MOSFET IRFP740	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

วงจรตัวเก็บประจุ เรโซแนนซ์ฝั่งส่ง		
วงจรเรียงกระแสแบบ ฟลูบริดจ์	-Ultrafast Diode, ฟลูบริดจ์	
ตัวเก็บประจุกรอง	4700uF	




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ค.3 อุปกรณ์ในการมาตรวัด

ตารางที่ ค.5 รายละเอียดเครื่องมือวัดที่ใช้ภายในโครงการ

อุปกรณ์	รายละเอียด	ภาพประกอบ
KC-605 LCR METER 42Hz-5MHz	- วัดค่าความเหนี่ยวนำ - วัดค่าความเหนี่ยวนำรวม	
RIGOL DS1104B Digital Oscilloscope	- วัดค่าแรงดัน วัดค่ากระแส - ดูกราฟความสัมพันธ์	
EXCEL DT-9205A	- วัดค่าแรงดัน วัดค่ากระแส - วัดค่าความต้านทาน	

HIOKI Power Analyzer PW6001	- วัดประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลัง - วัดค่ากระแสต่ำ	
-----------------------------	---	---

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ง.1 การวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด

การวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ในโครงการนี้ใช้เครื่อง โดยปรับความถี่ไปที่ความถี่ใช้งาน คือ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยใช้เครื่อง KC-605 LCR METER



รูปที่ ง.1 ขดลวดฝั่งรับ

ง.2. การวัดค่าความเหนี่ยวนำร่วมและค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงของขดลวด

ในการวัดค่าความเหนี่ยวนำร่วมและค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง จะใช้หลักการเดียวกับการวัดค่าความเหนี่ยวนำร่วมของหม้อแปลง ซึ่งขดลวดส่งกำลังนี้จะเปรียบเสมือนหม้อแปลงแกนอากาศที่มีขนาดแกนอากาศอยู่ที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตร โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) วัดค่าความเหนี่ยวนำเมื่อต่ออนุกรมขดลวดฝั่งส่งและขดลวดฝั่งรับเข้าด้วยกัน โดยต่อแบบดอต ต่อ แบลงค์ จะได้ L_{aid} มีหน่วยเป็น μH
- 2) วัดค่าความเหนี่ยวนำเมื่อต่ออนุกรมขดลวดฝั่งส่งและขดลวดฝั่งรับเข้าด้วยกัน โดยต่อแบบดอต ต่อ ดอต จะได้ L_{opp} มีหน่วยเป็น μH
- 3) คำนวณค่าความเหนี่ยวนำร่วมจาก $M = \frac{L_{aid} - L_{opp}}{4}$ มีหน่วยเป็น μH
- 4) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง จาก $k = \frac{M}{\sqrt{L1 * L2}}$

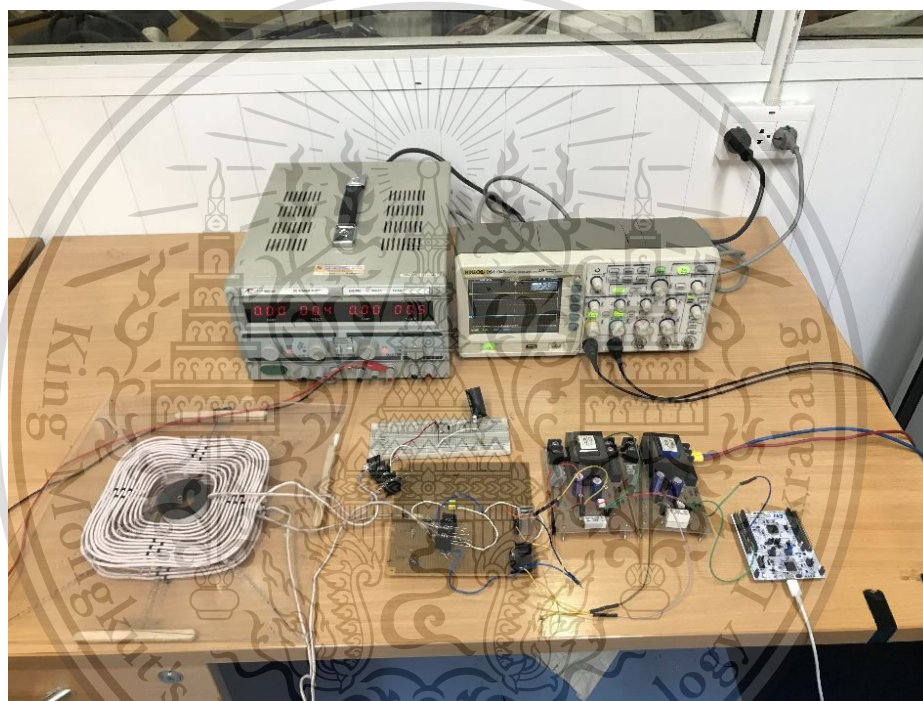
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ง.1 ค่าความเหนี่ยวนำร่วมและค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงของขดลวดชุด 20 วัตต์

ตัวแปร	ค่าที่วัดได้	หน่วย
L_{aid}	52.04	μH
L_{opp}	35.45	μH
M	4.148	μH
k	0.2621	-



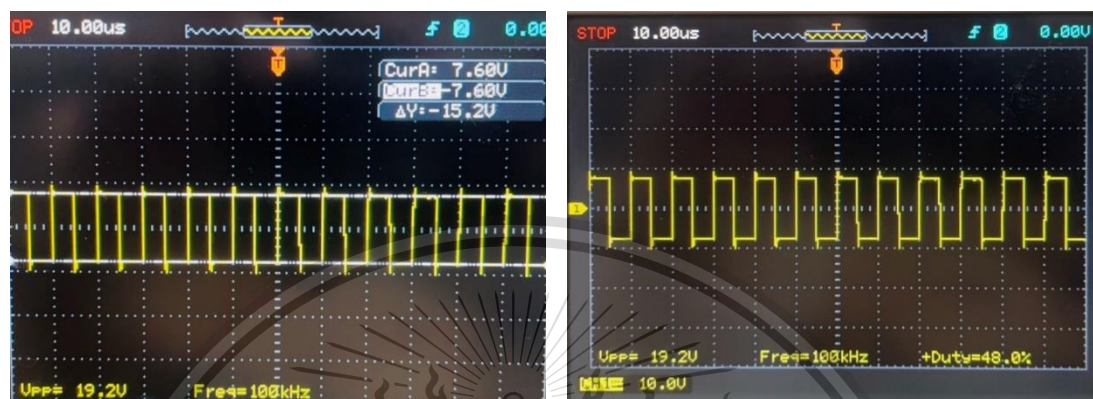
รูปที่ ง.2 ภาพรวมวงจรส่งกำลังพิกัด 20 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

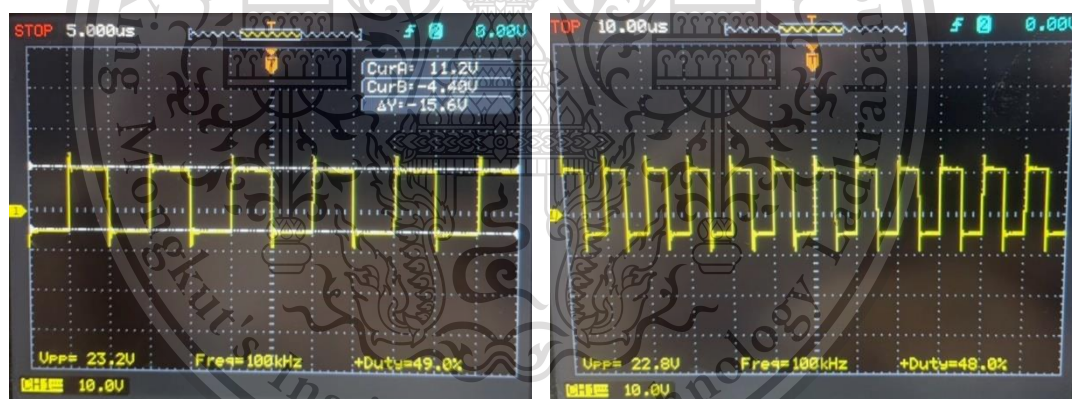
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลการทดลองส่งผ่านกำลังพิกัด 20 วัตต์ ได้กราฟอินเวอร์เตอร์ , กราฟแรงดันและกระแส หลังวงจรฝั่งส่ง และก่อนวงจรฝั่งรับ ณ ความถี่ต่างๆ และระยะช่องอากาศต่างดังนี้



รูปที่ ง.3 กราฟแรงดันที่ได้จากมอสเฟตตัวที่ 1



รูปที่ ง.4 กราฟแรงดันที่ได้จากมอสเฟตตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ๓.5 กราฟแรงดันหลังวงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ ๓.6 กราฟแรงดันด้านเข้าวงจรเรียงกระแสฝั่งรับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ ๓.7 กราฟแรงดันด้านนี้ออกจากวงจรเรียงกระแสฝั่งรับไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล: นายกฤษณ์นันทน์ นาคแก้ว

วัน เดือน ปีเกิด: 26 มิถุนายน 2541

ที่อยู่ 39 หมู่ 3 ซอยตลาดซอยหน้าโพธิ์ ตำบลนาทราย อำเภอเมือง นครศรีธรรมราช 80280

ประวัติการศึกษาปีการศึกษา 2559 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย

จากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ

ปีการศึกษา 2563

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ-นามสกุล: นายจิรัฐ สมราง

วัน เดือน ปีเกิด: 21 กุมภาพันธ์ 2542

ที่อยู่ 82 หมู่ 12 ตำบลบ้านกลาง อำเภอสอง จังหวัดแพร่ 54120

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2559 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย

โรงเรียนพิริยาลัย แพร่

ปีการศึกษา 2563

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นฝึกงานภาคฤดูร้อน สำหรับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ชื่อ-นามสกุล: นายชนาธิป เกษติ

วัน เดือน ปีเกิด: 21 กุมภาพันธ์ 2542

ที่อยู่ 1/31 ซอยคุ้มเกล้า 35 แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร
10520

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2559 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย

จากโรงเรียนบดินทรเดชา(สิงห์ สิงหเสนี) ๔

ปีการศึกษา 2563 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ-นามสกุล: นายณัฐพงษ์ นามลี

วัน เดือน ปีเกิด: 10 พฤษภาคม 2542

ที่อยู่ 119/144 ซอยคูบอน 27 แยก 11 แขวงท่าแร้ง เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร
10220

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2559 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย

จากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า

ปีการศึกษา 2563 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.