

การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า
Wireless Power Transmission for Electric Vehicle

โดย

ภัทรธร	เผ่าจินดา
ภาณุ	มีทวรรัตน์
ภูธร	สุขวณิช
ราชการ	สุวจสุวรรณ

ปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า
Wireless Power Transmission for Electric Vehicle

โดย

ภัทรธร	เผ่าจินดา
ภาณุ	มัทธวรรตน์
ภูธร	สุขวนิช
ราชการ	สุวสุวรรณ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

WIRELESS POWER TRANSMISSION FOR ELECTRIC VEHICLE

PHATTHARATORN	PAOJINDA
PANU	MATTHAWARAT
BHUTORN	SUKWANITCH
RACHAKARN	SUWAJASUWAN

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

2013

ปีการศึกษา 2556

การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า
Wireless Power Transmission for Electric Vehicle

โดย

นายภัทรธร	เผ่าจินดา
นายภาณุ	มัทธวรรตน์
นายภูธร	สุขวนิช
นายราชการ	สุขสุวรรณ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.สมยศ	เกียรติวนิชวิไล
รศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นาย ภัทรธร เผ่าจินดา
2. นาย ภาณุ มัทธวรรตน์
3. นาย ภูธร สุขวณิช
4. นาย ราชการ สுவจสุวรรณ



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ)

การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

นาย ภัทรธร เผ่าจินดา
นาย ภาณุ มัทธวรรตน์
นาย ภูธร สุขวณิช
นาย ราชการ สุวจสุวรรณ
ผศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีชื่อว่า การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำพื้นฐานของฟาราเดย์และหลักการของวงจรเรโซแนนซ์ ต้นแบบที่พัฒนานี้จะเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแม่เหล็กและส่งไปยังตัวรับพลังงาน ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กกลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ เนื่องจากการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศนั้นได้ถูกนำมาใช้กับตัวต้นแบบ ข้อดีที่เกิดขึ้นคือ สามารถใช้งานได้ง่ายและสะดวกขึ้น นอกจากนี้ความปลอดภัยและขีดจำกัดในการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนก็ได้ถูกพิจารณาไว้ในการออกแบบด้วย

Wireless Power Transmission for Electric Vehicle

Mr.Pattharatorn	Paojinda
Mr.Panu	Matthawarat
Mr.Bhutorn	Sukwanitch
Mr.Rachakarn	Suwajasuwan
Ast.Prof.Somyot	Kaitvanitvilai,Ph.D Supervisor
Assoc.Prof.Anuwat	Jangwanitlert,Ph.D Supervisor

Year 2013

Abstract

This thesis presents Wireless Power Transmission for Electric Vehicle by using a basic induction of Faraday and resonance circuit. The developed prototype converts the energy from electrical to magnetic energy and transfers to the receiver which converts the magnetic energy back to the electrical energy for charging battery. Since the wireless power transmission is applied to the developed prototype, the advantages of simple configuration and user friendly interface can be gained. In addition, safety and electromagnetic emission are considered in the proposed design.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
กิตติกรรมประกาศ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 วงจรเรโซแนนซ์	5
2.2 แรงดันกระแสสลับกับวงจรเรโซแนนซ์	5
2.3 ความถี่เรโซแนนซ์	7
2.4 ตัวเหนี่ยวนำ	8
2.5 วงจรแม่เหล็กและความสูญเสียในการสวิตซ์	13
2.6 วงจรเรียงกระแส	16
2.6.1 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์	16
2.7 อินเวอร์เตอร์	18
2.7.1 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์	18
2.8 วงจรสมมูลของขดลวดตัวส่ง และขดลวดตัวรับ	19
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง	22
3.1 ภาพรวมของระบบการทำงานการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า	22
3.2 การออกแบบการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า	23
3.2.1 แหล่งจ่ายพาวเวอร์กระแสตรง	23
3.2.2 อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง	23
3.2.2.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ	23
3.2.2.2 วงจรสวิตซ์	24
3.2.3 ขดลวดตัวส่งและขดลวดตัวรับ	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.4 วงจรเรียงกระแส	26
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	27
4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า	27
4.2 ขั้นตอนลำดับการทดลอง	27
4.3 การทดลองและผลการทดลอง	29
4.3.1 การทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ระยะห่างแกน z 4 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	38
4.3.2 การทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 4 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	39
4.3.3 การทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 5 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	40
4.3.4 การทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 6 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	41
4.3.5 การทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 7 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	42
4.3.6 การทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 8 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	43
4.3.7 การทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 9 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	44
4.3.8 การทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 10 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	45
4.3.9 การทดลองที่ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ห่างกันในแกน z 4 เซนติเมตร และ เลื่อนไปตามแกน x ที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน ดูค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น โดยให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าคงที่เท่ากับ 139.38 วัตต์	46
4.3.10 การทดลองที่ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ห่างกันในแกน z 6 เซนติเมตร และ เลื่อนไปตามแกน x ที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน ดูค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น โดยให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าคงที่เท่ากับ 139.38 วัตต์	47
4.3.11 การทดลองที่ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ห่างกันในแกน z 8 เซนติเมตร และ เลื่อนไปตามแกน x ที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน ดูค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น โดยให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าคงที่เท่ากับ 139.38 วัตต์	48
4.4 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจากการส่งกำลังไฟฟ้า	49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 สรุปผลการทดลอง	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	55
5.1 บทสรุปและวิจารณ์	55
5.2 ข้อดีของการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า	55
5.3 ข้อเสียของการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า	55
5.4 ปัญหาระหว่างดำเนินโครงการ	56
5.5 แนวทางการพัฒนาโครงการ	56
เอกสารอ้างอิง	57
ภาคผนวก	59
ภาคผนวก ก. Wireless Power Transmission Circuit	60
ภาคผนวก ข. Source Code	64
ภาคผนวก ค. Paper Project	72
 ประวัติผู้เขียน	

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและแบบขนาน	5
2.2 ผลของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่มีต่อกระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ	6
2.3 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม	7
2.4 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน	7
2.5 ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กในแกนที่มีลักษณะต่างกัน	8
2.6 แสดงการเกิดความเหนี่ยวนำตัวเอง	9
2.7 ลักษณะตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ	10
2.8 ลักษณะตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบแท่งและแบบวงแหวน	10
2.9 ลักษณะตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก	11
2.10 ตัวเหนี่ยวนำ	12
2.11 วงจรอนุกรมทางแม่เหล็ก และวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าวงจรแม่เหล็ก	14
2.12 วงจรขนานทางแม่เหล็ก และวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าวงจรแม่เหล็ก (R_L)	14
2.13 วงจรผสมทางแม่เหล็ก และวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าวงจรแม่เหล็ก	14
2.14 ฮีสเทอรีซิสลูป	15
2.15 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น	16
2.16 กราฟของสัญญาณแรงดันด้านอินพุตและแรงดันที่โหลด (R_L)	17
2.17 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์	18
2.18 กราฟของสัญญาณแรงดันที่โหลด (R_L)	19
2.19 วงจรของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย	19
2.20 วงจรสมมูลของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย	20
2.21 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย	20
3.1 ระบบการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า	22
3.2 วงจรแหล่งจ่ายพาวเวอร์กระแสตรง	23
3.3 วงจรขับมอเตอร์	23
3.4 วงจรอินเวอร์เตอร์	24
3.5 การพันขดลวดตัวส่ง และขดลวดตัวรับ	25
3.6 ทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขดลวดส่งและขดลวดรับ	25
3.7 วงจรเรียงกระแส	26
4.1 สัญญาณด้านอินพุตจากวาริแอกที่กำลังไฟฟ้า 690.83 วัตต์ ที่ $z = 4$ เซนติเมตร	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 สัญญาณด้านอินพุทจากอินเวอร์เตอร์ที่กำลังไฟฟ้า 620.50 วัตต์ ที่ $z = 4$ เซนติเมตร	29
4.3 สัญญาณด้านเอาต์พุทที่เป็นกระแสสลับที่กำลังไฟฟ้า 484.90 วัตต์ ที่ $z = 4$ เซนติเมตร	30
4.4 สัญญาณด้านเอาต์พุทที่เป็นกระแสตรงที่กำลังไฟฟ้า 504.18 วัตต์ ที่ $z = 4$ เซนติเมตร	30
4.5 สัญญาณด้านเอาต์พุทที่เป็นกระแสตรงที่กำลังไฟฟ้า 489.76 วัตต์ ที่ $z = 5$ เซนติเมตร	31
4.6 สัญญาณด้านเอาต์พุทที่เป็นกระแสตรงที่กำลังไฟฟ้า 454.00 วัตต์ ที่ $z = 6$ เซนติเมตร	31
4.7 สัญญาณด้านเอาต์พุทที่เป็นกระแสตรงที่กำลังไฟฟ้า 409.47 วัตต์ ที่ $z = 7$ เซนติเมตร	32
4.8 สัญญาณด้านเอาต์พุทที่เป็นกระแสตรงที่กำลังไฟฟ้า 370.17 วัตต์ ที่ $z = 8$ เซนติเมตร	32
4.9 สัญญาณด้านเอาต์พุทที่เป็นกระแสตรงที่กำลังไฟฟ้า 275.41 วัตต์ ที่ $z = 9$ เซนติเมตร	33
4.10 สัญญาณด้านเอาต์พุทที่เป็นกระแสตรงที่กำลังไฟฟ้า 232.83 วัตต์ ที่ $z = 10$ เซนติเมตร	33
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกที่โหลดกับระยะทางที่เลื่อนไปตามแกน z	34
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับระยะทางที่เลื่อนไปตามแกน z	34
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่เลื่อนไปตามแกน x (cm) กับกำลังไฟฟ้าขาออกที่โหลดที่ระยะห่างแกน z คงที่เท่ากับ 4 เซนติเมตร	35
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่เลื่อนไปตามแกน x (cm) กับกำลังไฟฟ้าขาออกที่โหลดที่ระยะห่างแกน z คงที่เท่ากับ 8 เซนติเมตร	35
4.15 วงจรฝั่งส่ง	36
4.16 วงจรฝั่งรับ	36
4.17 ไฟเลี้ยง 24VDC	37
4.18 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ stm32-vldiscovery	37
4.19 ขดลวดทั้งฝั่งส่งและฝั่งรับโดยวางทับกัน	38
4.20 กำลังไฟฟ้าจากควาริแอก	49
4.21 กำลังไฟฟ้าจากบริดจ์เรกติไฟเออร์	49
4.22 กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์	50
4.23 กำลังไฟฟ้าที่โหลด	50
4.24 กำลังไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำฝั่งส่ง	51

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานในระยะเวลา 1 ปี	3
4.1 ผลการทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ระยะห่างแกน z 4 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	38
4.2 ผลการทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 4 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	39
4.3 ผลการทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 5 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	40
4.4 ผลการทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 6 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	41
4.5 ผลการทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 7 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	42
4.6 ผลการทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 8 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	43
4.7 ผลการทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 9 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	44
4.8 ผลการทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 10 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	45
4.9 ผลการทดลองที่ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ห่างกันในแกน z 4 เซนติเมตร และ เลื่อนไป ตามแกน x ที่ระยะห่างต่างๆกัน ดูค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น โดยให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าคงที่ เท่ากับ 139.38 วัตต์	46
4.10 ผลการทดลองที่ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ห่างกันในแกน z 6 เซนติเมตร และ เลื่อนไป ตามแกน x ที่ระยะห่างต่างๆกัน ดูค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น โดยให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าคงที่ เท่ากับ 139.38 วัตต์	47
4.11 ผลการทดลองที่ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ห่างกันในแกน z 8 เซนติเมตร และ เลื่อนไป ตามแกน x ที่ระยะห่างต่างๆกัน ดูค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น โดยให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าคงที่ เท่ากับ 139.38 วัตต์	48

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการดำเนินงาน จาก ผศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล และ รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมดูแลโครงการมาโดยตลอดจนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงที่ให้ความกรุณามา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องโปรเจกต์ทุกคนที่ได้คอยให้คำแนะนำขั้นตอนในการทำโปรเจกต์ด้วยดีมาตลอด

ขอขอบคุณคุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือ

ในลำดับสุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวที่ได้สนับสนุนด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในหลายๆด้านทำให้การทำโครงการครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รถยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในอนาคตซึ่งสังเกตได้จากการที่บริษัทรถยนต์ชั้นนำของโลกเริ่มมีแนวโน้มที่จะผลิตและพัฒนารถยนต์ไฟฟ้าส่งเข้ามาสู่ตลาดรถยนต์มากขึ้น เช่น รถยนต์ไฟฟ้า และรถยนต์กึ่งไฟฟ้ากึ่งน้ำมัน เนื่องจากข้อดีของรถยนต์ไฟฟ้า ไม่จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน แต่จะใช้พลังงานไฟฟ้าแทน ซึ่งจะไม่ปล่อยก๊าซเสียเหมือนรถยนต์ที่ใช้น้ำมัน ในปัจจุบัน รถยนต์ไฟฟ้าจึงถือเป็นการใช้พลังงานสะอาด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งพลังงานที่ต้องการสำหรับรถยนต์ไฟฟ้ายังถูกกว่าน้ำมันมาก ถือเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญอย่างหนึ่งของรถยนต์ไฟฟ้าแต่สิ่งที่ยังยากอย่างหนึ่งที่จะนำมาพิจารณาคือ ผู้ใช้ต้องมีการเสียบสายชาร์จเข้ากับแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้าทิ้งไว้ทุกครั้งที่ไม่ใช้งานหรือแบตเตอรี่ใกล้หมด ซึ่งมีความยืดหยุ่นน้อยกว่าสิ่งที่จะต้องเกิดขึ้นเป็นอยู่เป็นประจำ อีกทั้งยังขาดความสะดวกในการใช้งาน

ความเป็นไปได้ในการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านอากาศเกิดขึ้นมานานับ 100 ปีแล้วหากเทคโนโลยีนี้ถูกพัฒนาให้มากขึ้นจะทำให้เกิดประโยชน์อย่างยิ่งต่อสภาพแวดล้อมในปัจจุบัน เช่น การเปลี่ยนพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถจากการใช้น้ำมันมาเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าแทน อีกทั้งการลดการใช้น้ำมัน จะทำให้ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดภาวะเรือนกระจก ถือเป็นทางเลือกที่เปลี่ยนแปลงครั้งยิ่งใหญ่ของโลกหากเราสามารถส่งพลังงานไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์

ปีเตอร์พิซเซอร์, โรเบิร์ตมอฟแพต , มาริน โซลจาซิก, อังเดรย์เคอส์, จอห์น โจนโนโมปูลอส และ อริสทิดิส คาราลิส ทีมนักวิจัยจาก เอ็มไอที ได้ทดลองส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายให้กับหลอดไฟขนาด 60 วัตต์ โดยส่งที่ระยะ 2 เมตร และสูญเสียพลังงานไฟฟ้าประมาณ 60% หลักการที่นำมาใช้คือ การเรโซแนนซ์คัปปลิงกันระหว่าง 2 ขดลวด โดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ 19.5 เมกะเฮิรตซ์ โดยข้อดีของทีมวิจัยนี้คือสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ระยะไกลแต่ยังส่งได้ในกำลังไฟฟ้าที่ต่ำอยู่ซึ่งยังไม่พอมือเพียงกับการประจุแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้า ต่อมาโจเซออสการ์เมอร์-มिरานดา และทีมงานก็ได้ใช้วิธีการคัปปลิงแม่เหล็กแบบอ่อนที่สภาวะเรโซแนนซ์ โดยประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับการคัปปลิงระยะทางซึ่งระยะทางจะห่างพอที่จะส่งกำลังไฟฟ้าได้โดยเป็นการต่อแบบอนุกรมทั้งด้านส่งและด้านรับ ซึ่งจากวิธีนี้ประสิทธิภาพในการส่งนั้นน้อยกว่า 50% กำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่า 10^{-3} หรือ 1 มิลลิวัตต์ ซึ่งถือว่าน้อยมากจากนั้น ยานปิง เหยา , เซงเกงและทีมงานจากวิทยาลัยแห่งวิศวกรรมศาสตร์ โอลิน ก็ได้สร้างตัวต้นแบบในการส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้การคัปปลิงแม่เหล็กแบบเข้มที่สภาวะเรโซแนนซ์ซึ่งจากการทดลองพวกเขาใช้ความถี่ 19.08 เมกะเฮิรตซ์ สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ไกล 32 เซนติเมตร ที่กำลังไฟฟ้าขาเข้าไม่เกิน 4 วัตต์ โดยประสิทธิภาพอยู่ที่ 52% ซึ่งจะเห็นว่าใช้ความถี่ที่สูงมากในการส่งแต่ประสิทธิภาพที่ได้ออกมาก็ยังไม่สูงมาก หลังจากนั้น ฟาบีโอ เกนดูโซ และทีมงานจากมหาวิทยาลัยปา

เลอร์โมก็ได้พยายามคิดค้นหาวิธีในการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ ซึ่งพวกเขาใช้ความถี่ที่ 5.5 ถึง 7.5 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยสามารถส่งออกไปได้ไกล 30 เซนติเมตร ที่ความถี่ 7.5 กิโลเฮิร์ตซ์ แต่เมื่อปรับความถี่ ลดลงระยะทางที่ได้ก็ลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลโดยส่งไปได้ 4 ถึง 6 เซนติเมตร ที่กำลังไฟฟ้า 1 วัตต์ มีประสิทธิภาพในการส่ง 80-84% ซึ่งถือว่ากำลังไฟฟ้าที่ออกมายังมีค่าน้อยและระยะทางในการส่งที่ยังมีค่าน้อยอยู่

ซึ่งจากนักวิจัยหลายๆท่านก็ได้พยายามคิดค้นหาวิธีในการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ อาทิเช่น ริคาร์โด มาร์ติอาส และทีมงาน ก็ได้ใช้การคับปลิงโดยมีตัวเหนี่ยวนำฝั่งรับและฝั่งส่ง เพื่อที่จะให้เกิดความเหนี่ยวนำร่วมกันในการส่งกำลังไฟฟ้าโดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาใช้ เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ เช่น การชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า ด้วยเหตุผลต่างๆดังกล่าวนี้ กลุ่มของข้าพเจ้าได้เล็งเห็นปัญหา จึงพยายามคิดค้นที่จะแก้ไขสถานการณ์ดังกล่าว จึงเกิดเป็นโครงการนี้ขึ้นมา

ปัญหาสำคัญของการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายผ่านอากาศนั้น เป็นเรื่องของประสิทธิภาพของการส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งจะเกิดการสูญเสียของพลังงานไฟฟ้า โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพคือ ระยะระหว่างตัวส่งและตัวรับ ระดับของกำลังไฟฟ้าที่จะส่ง และปริมาณของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โครงการนี้มีจุดประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศให้มากขึ้น ซึ่งจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยที่อาจจะมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตเป็นสิ่งสำคัญ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและออกแบบการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศโดยอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดสองชุด
2. เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศและนำไปพัฒนาให้สูงขึ้นเพื่อประโยชน์ในอนาคต
3. เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ และนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงกับอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่างๆ

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 วัตต์ ผ่านอากาศในระยะทางไม่เกิน 10 เซนติเมตร
2. ความถี่ที่ใช้ในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจะอยู่ในย่านของคลื่นความถี่วิทยุ (19.5 กิโลเฮิร์ตซ์)
3. อาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กกระหว่างขดลวดสองชุดในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า
4. ควบคุมผลกระทบจากผลของสนามแม่เหล็กไม่ให้มีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. มีความรู้ความเข้าใจในพื้นฐานในการศึกษาการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายผ่านอากาศ
2. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการแรงดันเหนี่ยวนำพื้นฐานของฟาราเดย์
3. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเรื่องสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า
4. สามารถนำมาใช้งานได้จริงกับการชาร์จแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ

1.5 แผนการดำเนินงานโครงการ

ตั้งแต่คณะผู้จัดทำงานวิจัยได้เริ่มทำงานวิจัยโดยมีการวางแผนการดำเนินงานมีระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 30 พฤษภาคม 2556 ถึง 31 มีนาคม 2557 ดังนี้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานในระยะเวลา 1 ปี

การดำเนินงาน	พ.ศ.2556							พ.ศ.2557		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย										
2.ออกแบบวงจรสวิตซ์ความถี่สูง										
3.จำลองอุปกรณ์ลงโปรโตบอร์ด										
4.ออกแบบลักษณะแกนและขดลวดที่ใช้ในการส่งและรับกำลังไฟฟ้า										
5.จัดทำรายงานวิชาโครงการ 1										
6.ออกแบบลายวงจรอินเวอร์เตอร์บนพีซีบีและบัดกรีลงบนบอร์ด										
7.พันขดลวดที่ใช้เป็นตัวส่งและตัวรับกำลังไฟฟ้า										

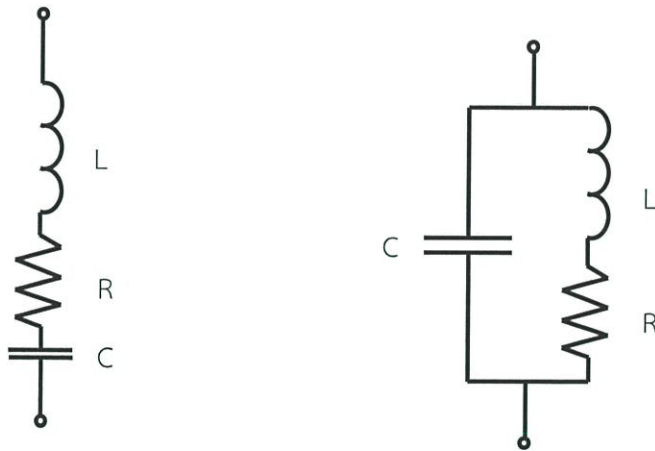
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรเรโซแนนซ์

วงจรเรโซแนนซ์เป็นวงจรผสมระหว่างตัวเก็บประจุกับขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งมีความสำคัญในการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบอนาล็อก ด้วยผลต่อสัญญาณระแแสสลับของขดลวดและตัวเก็บประจุซึ่งแตกต่างกัน ในทางตรงกันข้าม จะทำให้เกิดผลต่อแรงดันในกระแสตรง และกระแสสลับในลักษณะต่างๆ เช่น เกิดการจ่ายและรับกระแสให้ซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดสัญญาณกระแสสลับตกคร่อมวงจรขึ้น เมื่อวงจรได้รับแรงดันกระแสตรงจะเกิดการต่อต้านและยอมให้สัญญาณกระแสสลับบางความถี่ผ่าน เป็นต้น

วงจรเรโซแนนซ์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม
- วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน



รูปที่ 2.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและแบบขนาน

2.2 แรงดันกระแสสลับกับวงจรเรโซแนนซ์

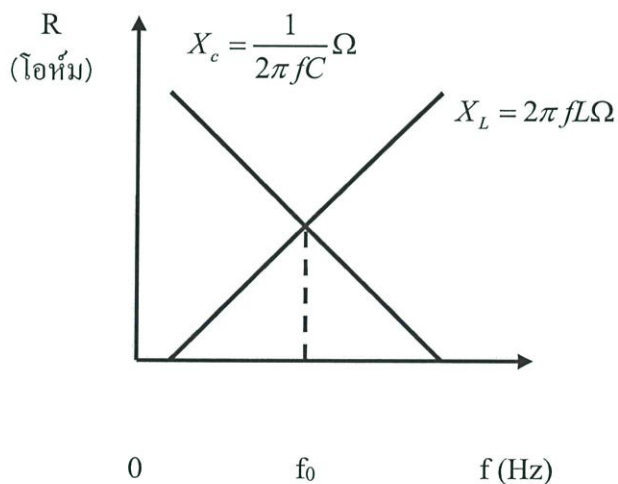
วงจรเรโซแนนซ์ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งมีผลต่อกระแสไฟฟ้าสลับตรงกันข้ามกัน กล่าวคือ ตัวเก็บประจุจะมีค่าความต้านทานต่อไฟกระแสสลับ ในส่วนแปรผกผันต่อความถี่ คือค่าความถี่สูงจะผ่านตัวเก็บประจุได้ดี ค่าความต้านทานต่อกระแสสลับของตัวเก็บประจุหาได้จาก

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \Omega \quad (2.1)$$

สำหรับขดลวดเหนี่ยวนำจะมีคุณสมบัติต้านไฟกระแสสลับในทางตรงกันข้ามกับตัวเก็บประจุ คือมีส่วนโดยตรงกับค่าความถี่ของไฟฟ้กระแสสลับที่ป้อนผ่าน ซึ่งเป็นดังสมการ

$$X_L = 2\pi fL\Omega \quad (2.2)$$

เมื่อจ่ายไฟฟ้กระแสสลับให้กับวงจรเรโซแนนซ์ จะเกิดผลอย่างไรขึ้นอยู่กับลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์ว่าเป็นแบบอนุกรมหรือขนาน แต่ผลที่เหมือนกันคือ ถ้าค่าความถี่สูงค่า X_L จะมากและค่า X_C จะต่ำ ซึ่งจะเห็นว่าค่า X_L และ X_C จะมีค่าที่สวนทางกัน ดังนั้นหากมีค่าความถี่ที่ทำให้ X_L และ X_C มีค่าเท่ากันจะทำให้ค่ารีแอกแตนซ์หักล้างกันหมดจึงเหลือเฉพาะค่าความต้านทาน (R) ซึ่งค่าความถี่ที่ทำให้เกิดผลดังกล่าวเราเรียกว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_0)



รูปที่ 2.2 ผลของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่มีต่อกระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

f_0 คือ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในวงจร มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

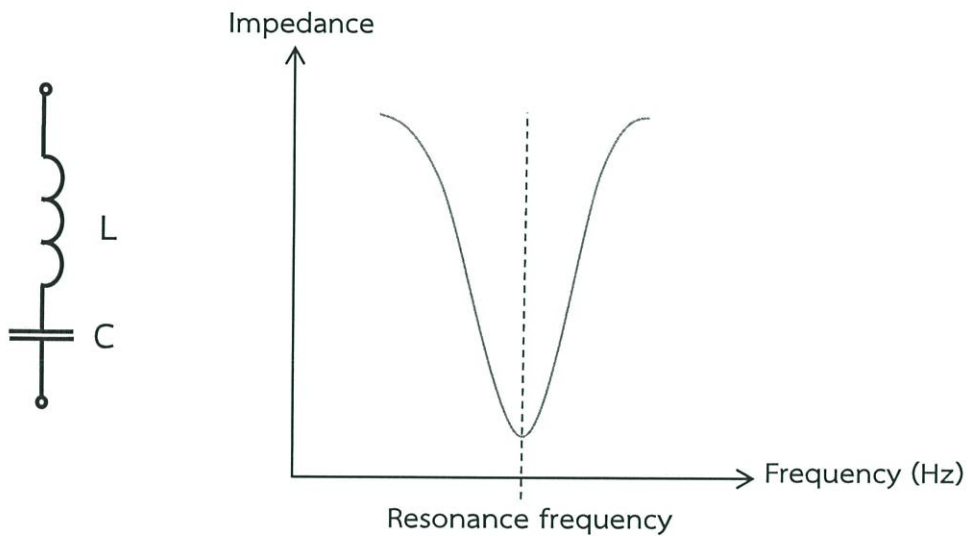
2π เป็นค่าคงที่

L คือ ค่าของขดลวดในวงจร มีหน่วยเป็น เฮนรี่ (H)

C คือ ค่าของตัวเก็บประจุในวงจร มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)

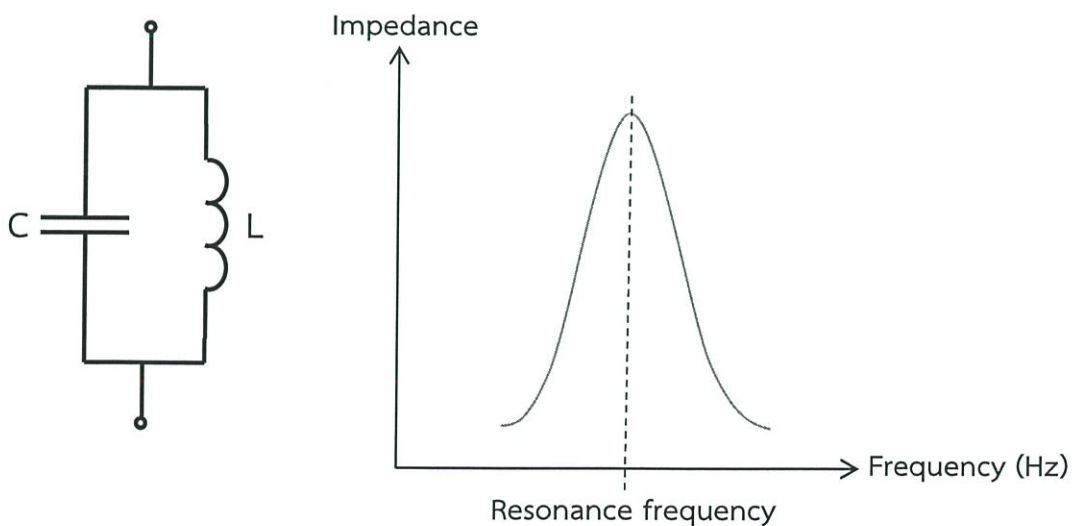
2.3 ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant frequency)

ความถี่เรโซแนนซ์ คือความถี่ที่ทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ สามารถทำได้โดยการปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันที่ความถี่ค่าหนึ่งทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ $X_L = X_C$ ทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ $Z = R$ ส่งผลให้แรงดันและกระแสในวงจรมีเฟสตรงกันตัวคุณกำลังของวงจรมีค่าเป็นหนึ่งตามทฤษฎี ซึ่งสามารถแสดงผลต่อวงจรอาร์แอลซี (RLC) แบบอนุกรม และแบบขนานได้ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.3 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series resonant)

ที่ความถี่ที่ทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ส่งผลให้ผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าต่ำสุดกระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าสูงสุด

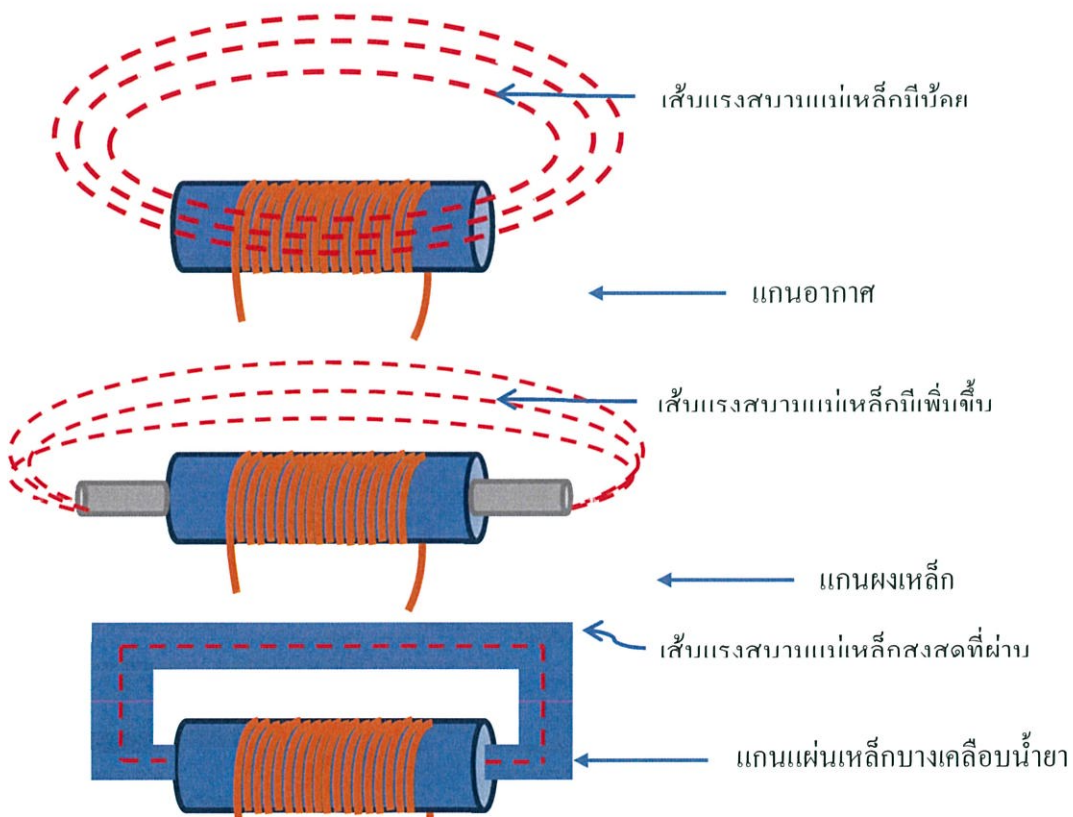


รูปที่ 2.4 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel resonant)

ที่ความถี่ที่ทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์ส่งผลให้ผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีค่าเป็นศูนย์วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานอิมพีแดนซ์มีค่าสูงสุด กระแสที่ไหลในวงจรมีค่าต่ำสุดแต่มีค่าแรงดันตกคร่อมสูงสุด

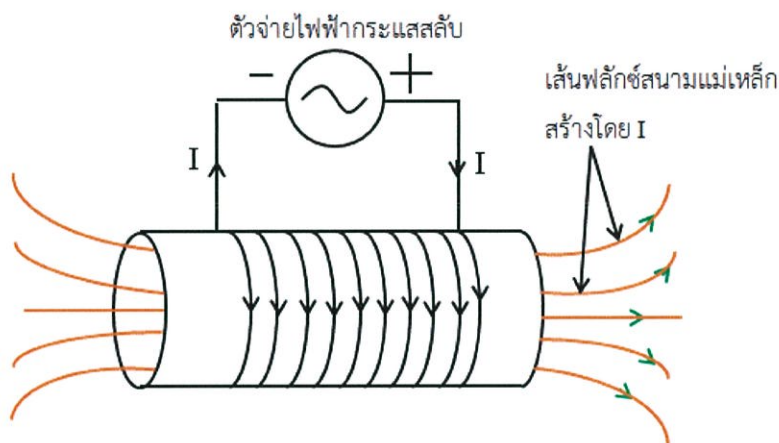
2.4 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น ตัวเหนี่ยวนำเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อินดักเตอร์หรือเรียกย่อๆว่าตัวแอล (L) หน่วยของการเหนี่ยวนำคือ เฮนรี (Henry) ตัวเหนี่ยวนำนั้มนิยมนำไปใช้ในการปรับความถี่โดยอาศัยหลักการของลวดทองแดงนำมาขดหลายๆ รอบที่เรียกว่าคอยล์ (Coil) แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไป เพื่อให้แสดงคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ โครงสร้างประกอบด้วยขดลวด (Coil) พันรอบแกน (Core) ซึ่งแกนนี้อาจจะเป็นแกนอากาศ, แกนเหล็ก, หรือแกนเฟอร์ไรต์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการเหนี่ยวนำไฟฟ้าและลักษณะการพันเส้นลวดตัวนำแตกต่างกัน ทำให้ตัวเหนี่ยวนำแตกต่างกัน เมื่อนำเส้นลวดตัวนำมาพันเป็นขดจะส่งผลให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบเส้นลวดตัวนำเกิดการเสริมแรงกันเกิดเป็นสนามแม่เหล็กขึ้นและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความเข้มเพิ่มมากขึ้น ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กในแกนที่มีลักษณะต่างกัน

การทำงานของตัวเหนี่ยวนำอาศัยสมบัติที่เรียกว่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self-inductance) คือ เมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น ถ้ากระแสที่ผ่านขดลวดเปลี่ยนแปลงจะทำให้ฟลักซ์ที่เชื่อมผ่านขดลวดจะเปลี่ยนแปลงด้วย ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งจะมีทิศทางที่ต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแส นั่นคือ ถ้ากระแสกำลังเพิ่มขึ้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะอยู่ในทิศทางที่พยายามให้กระแสลดลง แต่ถ้ากระแสกำลังลดลง แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะอยู่ในทิศทางที่ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นซึ่งกระแสกลับในขดลวดทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเปลี่ยนกับเวลาซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดในทิศทางที่ต้านการเปลี่ยนของกระแส ดังรูปที่ 2.6

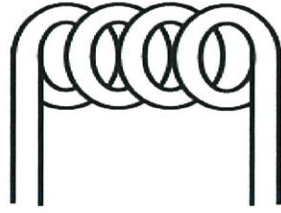


รูปที่ 2.6 การเกิดความเหนี่ยวนำตัวเอง

ประเภทของตัวเหนี่ยวนำในแกนต่างๆ สามารถเรียกตามชื่อของแกนที่ทำเป็นฐานขดลวดแบ่งออกได้เป็น

1. ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ

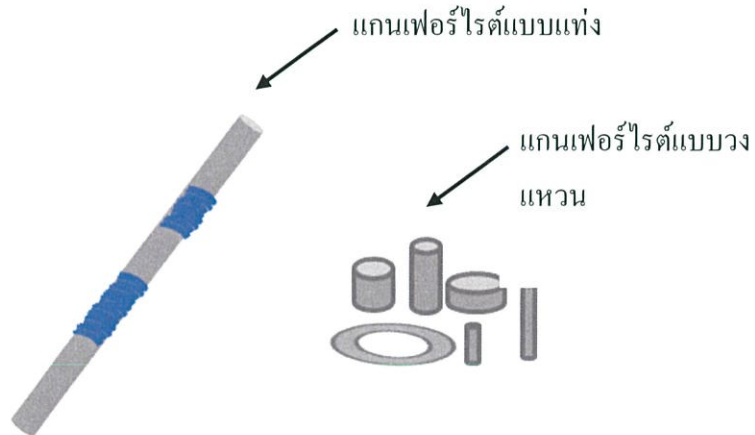
ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศเป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนทำมาจากวัสดุที่เป็นฉนวน เช่น คาร์บอน พลาสติก ไฟเบอร์ และพีวีซี เป็นต้น หรืออาจพันลวดๆไว้โดยไม่มีอะไรรองรับ ตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้นิยมนำไปใช้งานกับพวกความถี่สูงๆ หรือความถี่วิทยุ (RF) ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำเพราะแกนไม่สามารถช่วยเสริมค่าความเหนี่ยวนำได้ การจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นต้องใช้จำนวนรอบในการพันขดลวดเพิ่มขึ้น ลักษณะตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ

2. ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์

ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยเฟอร์ไรต์ ส่วนผสมของเฟอร์ไรต์มีความแตกต่างกันหลายอย่าง เช่น แมกนีเซียมกับสังกะสี แมกนีเซียมกับแมงกานีสแมกนีเซียมกับทองแดงนิกเกิลกับสังกะสีและแมงกานีสกับสังกะสีเป็นต้นแต่ละชนิดของเฟอร์ไรต์ให้ความเข้มของค่าความเหนี่ยวนำแตกต่างกัน ข้อดีของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ คือสามารถสร้างให้มีรูปร่างลักษณะต่างๆได้ใช้งานได้ดีทั้งความถี่ต่ำ และความถี่สูง ลักษณะตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบแท่งและแบบวงแหวน

3. ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก

ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กเป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยเหล็กแผ่นบางวางซ้อนกัน เหล็กแผ่นบางแต่ละแผ่นเคลือบฉนวนไว้ เพื่อช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน และช่วยทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น การใช้งานนิยมนำไปใช้งานในย่านความถี่ต่ำเช่น ไข่เป็นตัวกรองไฟ (Filter) แรงดันไฟสลับเป็นแรงดันไฟตรง เป็นต้นลักษณะตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก

ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ

ค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปร 4 ประการคือ

1. จำนวนรอบของขดลวดเขียนแทนด้วยอักษร N ถ้าจำนวนรอบของขดลวดมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวด
 2. วัสดุที่นำมาทำเป็นแกน เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ μ วัสดุที่นำมาทำเป็นแกนมีหลายชนิดเช่น อากาศ , เหล็ก , เฟอร์ไรต์, โคบอล ฯลฯ เป็นต้น แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กที่เรียกว่าความซึมซาบ (Permeability) แตกต่างกัน ในกรณีที่มีความซึมซาบมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมาก ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับค่าความซึมซาบของแกน
 3. พื้นที่หน้าตัดของแกน เขียนแทนด้วยอักษร A ถ้าพื้นที่ของแกนมีปริมาณมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับพื้นที่ของแกน
 4. ความยาวของแกนเขียนแทนด้วยอักษร l ถ้าความยาวของแกนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำน้อย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผกผันกับความยาวของแกน
- จากปัจจัยทั้ง 4 ประการจึงสามารถหาสัมพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำได้จากสมการ

$$L = \frac{N^2 A \mu}{l} \quad (2.4)$$

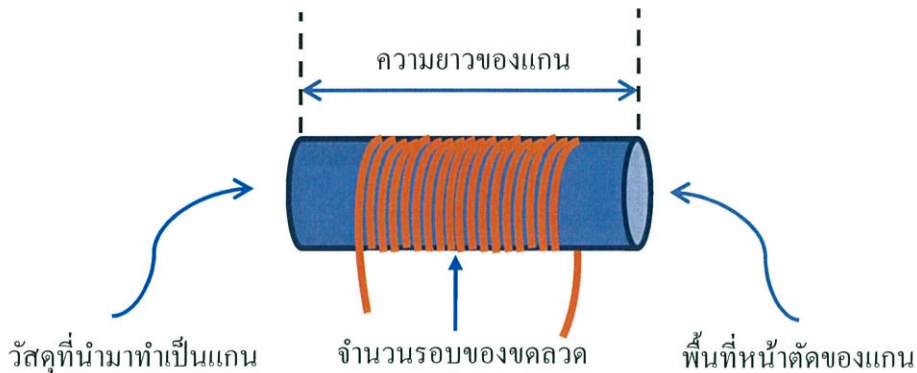
L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น เฮนรี (H)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด มีหน่วยเป็น รอบ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability)

l คือ ความยาวของแกน มีหน่วยเป็น เมตร(m)



รูปที่ 2.10 ตัวเหนี่ยวนำ

คุณสมบัติของสารแม่เหล็ก

คุณสมบัติความเป็นสารแม่เหล็กของวัสดุต่าง ๆ แบ่งตามค่าของความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (μ_r)

- 1) ไดอะแมกเนติก (Diamagnetic) $\mu_r \leq 1$ เช่น พลาสติก, ทองแดง, เจอร์มาเนียม, เงิน, ทองคำ, อากาศ วัสดุจำพวกนี้ การป้อนสนามแม่เหล็กจากภายนอกจะส่งผลน้อยมาก
- 2) พาราแมกเนติก (Paramagnetic) $\mu_r \geq 1$ เช่น อะลูมิเนียม, แมกนีเซียม, ไททาเนียม, ทังสเตน วัสดุจำพวกนี้การป้อนสนามแม่เหล็กจากภายนอกจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นบ้างเล็กน้อย
- 3) เฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) $\mu_r \gg 1$ เช่น พลาสติก, โคบอลต์, นิกเกิล วัสดุจำพวกดังกล่าวจะมีคุณสมบัติเด่น ๆ คือ
 - เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กจากภายนอกจะสามารถคงค่าสนามแม่เหล็กไว้ได้ (กลายเป็นแม่เหล็กถาวร)
 - ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (B) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) จะไม่เป็นเชิงเส้น
 - อาจกลายเป็นพาราแมกเนติกได้ถ้าได้รับความร้อนสูงถึงระดับหนึ่ง

2.5 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit) และความสูญเสียในการสวิตชิง (Hysteresis Loss)

เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux, Φ) คือจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งออกจากขั้วเหนือของแม่เหล็ก แม่เหล็กที่มีอำนาจมากจะมีจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กมากตามไปด้วย

ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux density, B) คือ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (2.5)$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force, mmf) คือ อำนาจแม่เหล็กของแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการขับเคลื่อนเส้นแรงแม่เหล็กออกไปภายนอกมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวดตัวนำ และปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดนั้น

$$mmf = NI \quad (2.6)$$

ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance, \mathfrak{R}) คือ ค่าความต้านทานแม่เหล็กที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu A} \quad (2.7)$$

ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Field Intensity, H) คือ ปริมาณแรงเคลื่อนแม่เหล็กตามแนวแกนของขดลวด มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนระหว่าง แรงเคลื่อนแม่เหล็กกับความยาวของแกนของขดลวด

$$H = \frac{mmf}{l} \quad (2.8)$$

ความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability, μ) คือความตัวเลขค่าคงที่แสดงความสามารถในการนำเส้นแรงแม่เหล็กของแกนของแม่เหล็ก

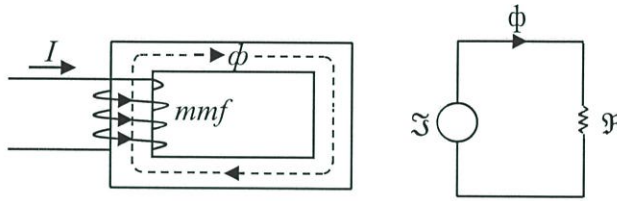
$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.9)$$

วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit) คือ วงจรที่แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) ว่าเคลื่อนที่ผ่านความต้านทานแม่เหล็กในรูปแบบใดบ้าง หากเปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กและวงจรไฟฟ้าแล้วจะเห็นได้ว่ามีความคล้ายคลึงกันอย่างมากดังนี้

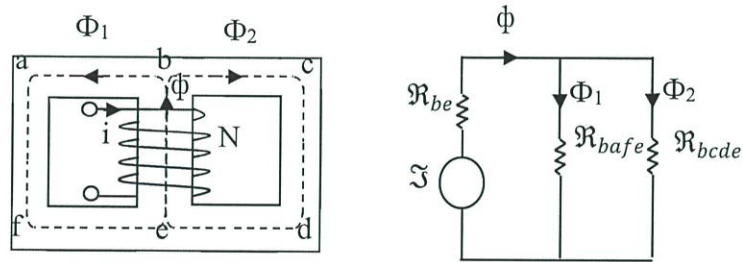
เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) เปรียบเสมือนกระแส (I)

แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) เปรียบเสมือน แรงดัน (V)

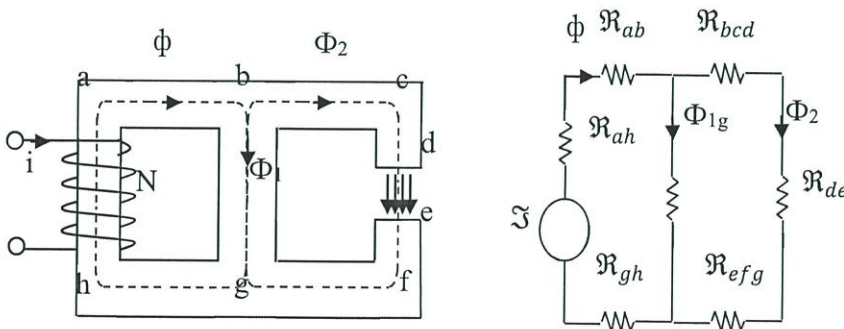
ความต้านทานแม่เหล็ก (\mathcal{R}) เปรียบเสมือน ความต้านทานไฟฟ้า (R)



รูปที่ 2.11 วงจรอนุกรมทางแม่เหล็ก และวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าวงจรแม่เหล็ก

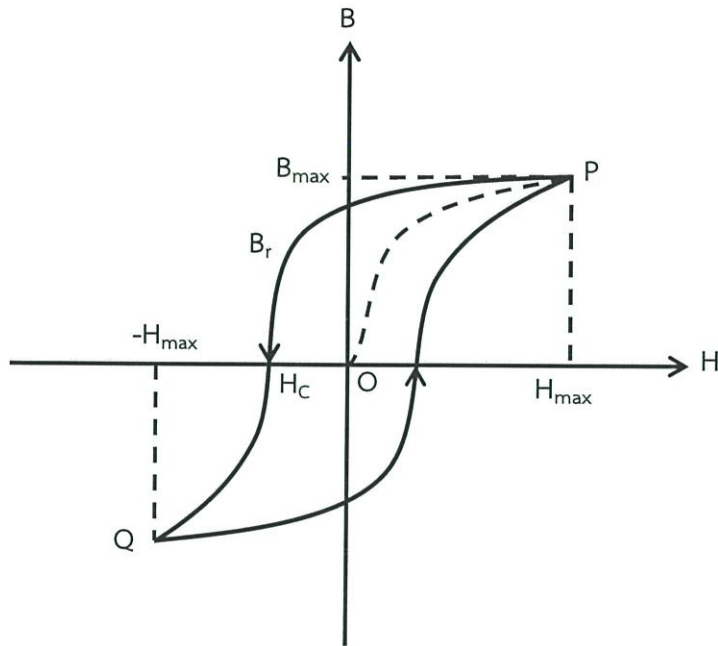


รูปที่ 2.12 วงจรขนานทางแม่เหล็ก และวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าวงจรแม่เหล็ก



รูปที่ 2.13 วงจรผสมทางแม่เหล็ก และวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าวงจรแม่เหล็ก

ความสูญเสียในการสวิตชิง (Hysteresis Loss)



รูปที่ 2.14 ฮีสเทอรีซิสลูป (Hysteresis Loop)

เราพบว่า หากมีการนำสารเฟอร์โรแมก (Ferromagnetic) มาเหนี่ยวนำให้เกิดความเข้มสนามแม่เหล็กจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (B) และความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ดังรูป 2.14 ทำให้เมื่อเราค่อยๆเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กจะทำให้ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามแนวเส้น OP แต่เมื่อลดความเข้มสนามแม่เหล็กลงมาจนเท่ากับศูนย์พบว่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก จะยังคงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (B_r) อยู่ นั่นคือ มีการเกิดอุปกรณ์แม่เหล็กถาวรขึ้น แต่ถ้าหากต้องการให้ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกลายเป็นศูนย์ จะต้องป้อนความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตรงข้าม (ทำได้โดยการกลับขั้วกระแส) จน $H = H_c$ โดยค่า B_r และ H_c จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารและค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด (H_{max}) ที่ป้อน หากต่อมามีการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กอีกครั้ง ความสัมพันธ์จะไปตามแนว QP เกิดเป็นการวนรอบที่เรียกว่าฮีสเทอรีซิสลูป (Hysteresis loop) ความกว้างของการวนรอบแสดงถึงความสูญเสียในการสวิตชิง (Hysteresis loss) ซึ่งอาจใช้ประโยชน์ได้ในงานพวก การสร้างอุปกรณ์แม่เหล็กต่างๆ แต่ในเรื่องของเครื่องจักรกลไฟฟ้า จำพวก มอเตอร์ , เจนเนอเรเตอร์, หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะความสูญเสียในการสวิตชิง (Hysteresis loss) ที่เกิดขึ้นจะกลายเป็นความร้อนในหนึ่งไซเคิลของการกลับขั้วความเข้มสนามแม่เหล็ก ยิ่งความเข้มสนามแม่เหล็กมีความถี่สูงขึ้นก็

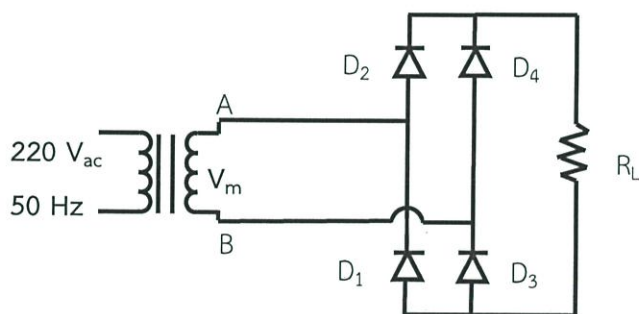
จะทำให้เกิดความสูญเสียเยอะตามไปด้วย ดังนั้น สารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) ที่ดีต้องมีฮีสเตอร์ซีสที่แคบๆ เพื่อลดความสูญเสียที่เกิดขึ้น

2.6 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

วงจรเรียงกระแสหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เรกติไฟเออร์คือวงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงหรือมีคุณสมบัติยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการแปลงสัญญาณได้แก่ไดโอด ซึ่งในโครงงานนี้จะใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์มาทำการสร้างชิ้นงาน

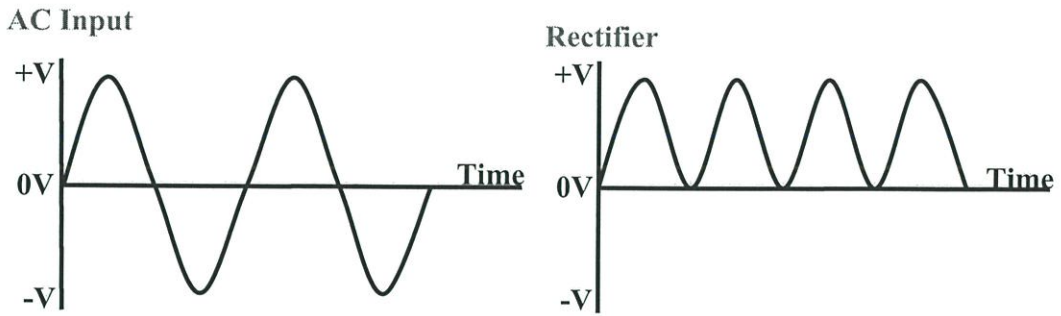
2.6.1 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier Circuit)

วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Wave) ชนิดหนึ่งคือวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ แรงดันไฟสลับจะต่อเข้ากับสองมุมของวงจรบริดจ์และเอาต์พุตจะถูกนำออกที่สองมุมที่เหลือ



รูปที่ 2.15 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

ในแต่ละครึ่งไซเคิลของวงจรอินพุตสมมติว่าเมื่อขั้ว A ของขดทุติยภูมิมีค่าเป็นบวก และขั้ว B มีค่าเป็นลบจึงเหมือนกับครึ่งไซเคิลลบถูกป้อนเข้าทางขดปฐมภูมิของหม้อแปลง ไดโอด D2 และ D3 จะอยู่ในลักษณะไบอัสตรงดังนั้นกระแสจึงไหลครบวงจรจากขั้ว A ผ่านไดโอด D2 ความต้านทานโหลด (R_L) และไดโอด D3 แลวกกลับเข้าสู่ขั้ว B ของหม้อแปลง และเมื่อแรงดันไฟสลับเปลี่ยนข้างมาเป็นขั้วบวกที่ขั้ว B และเป็นลบที่ขั้ว A การนำกระแสของไดโอดจะเปลี่ยนไปโดยเริ่มจากจุด B ของขดทุติยภูมิผ่าน D4 ความต้านทานโหลดและ D1 กลับเข้าขั้ว A ของหม้อแปลงทิศทางแรงดันตกคร่อมโหลดจะมีทิศทางเดียวกับตอนแรกคือ มีขั้วบวกอยู่ทางด้านบน ดังนั้นการนำกระแสไดโอดจะเกิดสลับกันทีละสองตัว D2 กับ D3 และ D1 กับ D4



รูปที่ 2.16 กราฟของสัญญาณแรงดันด้านอินพุตและแรงดันที่โหลด (R_L)

คาพารามิเตอร์ในวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

ในวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นจะได้สัญญาณเอาต์พุตทุกรูปคลื่นของสัญญาณอินพุต ดังนั้นค่าแรงดันหรือค่ากระแสสามารถคำนวณหาค่าโดยใช้สมการเดียวกันแต่จะให้ผลลัพธ์ดังนี้

$$I_{dc} = \frac{2I_m}{\pi} = 0.636I_m \quad (2.10)$$

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = 0.636V_m \quad (2.11)$$

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2.12)$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (2.13)$$

V_{dc} คือ ค่าแรงดันเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

V_m คือ ค่าแรงดันสูงสุดของสัญญาณไฟสลับ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

V_{rms} คือ ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

I_{dc} คือ ค่ากระแสเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

I_m คือ ค่ากระแสสูงสุดของสัญญาณไฟสลับ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

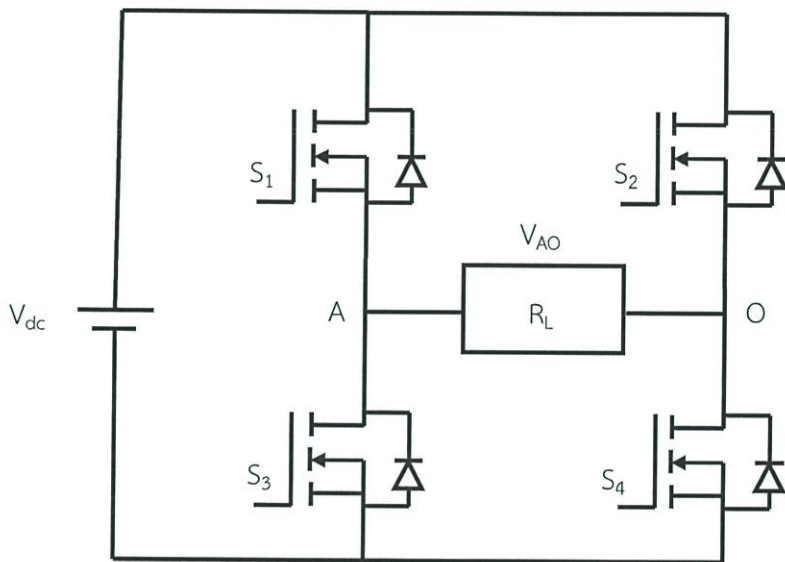
I_{rms} คือ ค่ากระแสอาร์เอ็มเอส มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

2.7 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

อินเวอร์เตอร์ (Inverters) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลง หรือควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า และความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับได้ซึ่งในโครงการนี้จะใช้วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์มาทำการสร้างชิ้นงานเพื่อรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรเรียงกระแสอีกที

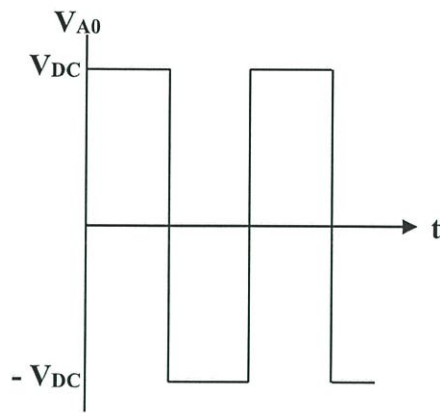
2.7.1 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Full Bridge Inverter)

คือวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยอาศัยการสวิตซ์ซึ่งแบบเทคนิคการมอดูเลชันความกว้างพัลส์แบบชานน์



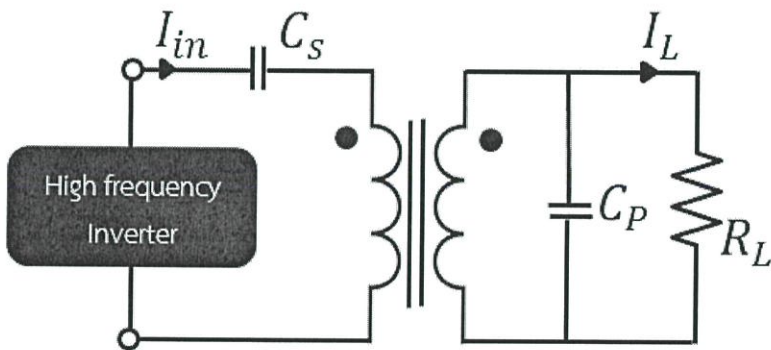
รูปที่ 2.17 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

ถ้าให้สวิตซ์ (S1, S4) และ (S2, S3) ทำหน้าที่ปิดและเปิดสลับกันไปจะได้รูปคลื่นของเอาต์พุต V_{AO} ซึ่งมีขนาดเท่ากับ V_{dc} แต่เป็นแรงดันกระแสสลับแล้วดังรูปที่ 2.18 ดังนั้นวงจรในรูปที่ 2.17 จึงจัดเป็นสแควเวฟอินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่ง



รูปที่ 2.18 กราฟของสัญญาณแรงดันที่โหลด (R_L)

2.8 วงจรสมมูลของขดลวดตัวส่ง (Transmitter) และขดลวดตัวรับ (Receiver)

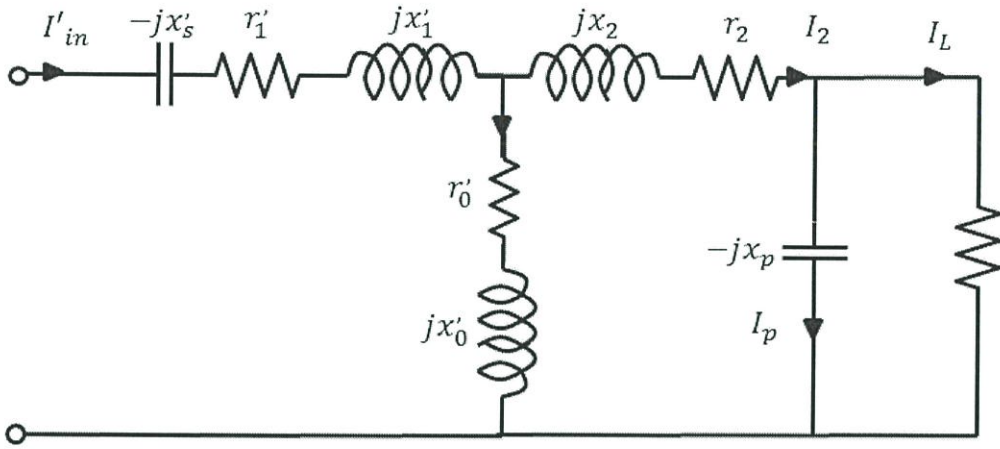


รูปที่ 2.19 วงจรของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

ส่วนประกอบ

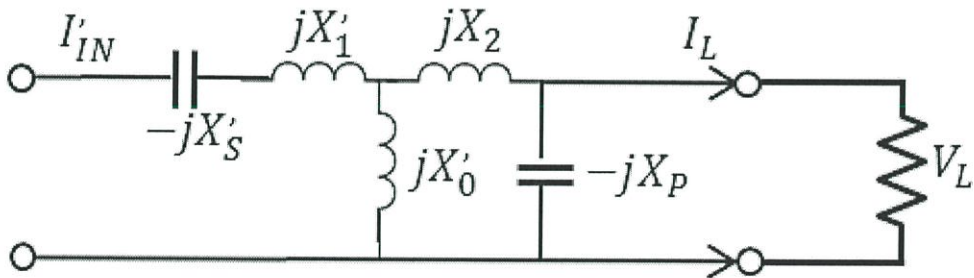
1. อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (High frequency Inverter)
2. ตัวเก็บประจุที่ต่อแบบอนุกรม
3. ตัวเก็บประจุที่ต่อแบบขนาน

จากรูปที่ 2.19 เมื่อแปลงเป็นวงจรสมมูลระหว่างขดลวดตัวส่งและขดลวดตัวรับ จะได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

จากรูปที่ 2.20 แสดงวงจรสมมูลอย่างละเอียดของระบบ โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์ เราจะพบว่า ความต้านทานขดลวด (winding resistance, r_1' และ r_2) และความสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite core-loss, r'_0) จะมีค่าน้อยมากๆเมื่อเทียบกับความสูญเสียร่วม (Mutual reactance, jx'_0) และความสูญเสียรั่วไหล (Leakage reactance, jx_2) เราจึงสามารถวาดวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบได้ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

เพื่อที่จะให้ระบบทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ จึงทำการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน (C_p) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ mutual reactance (x_0') บวกกับ leakage reactance (x_2)

$$\frac{1}{\omega_0 C_p} = X_p = X_0' + X_2 \quad (2.14)$$

ส่วนตัวเก็บประจุที่ต่อด้านขดลวดปฐมภูมิ C_s (C_s คือ การย้ายค่ามาฝั่งทุติยภูมิของขดลวด)

$$\frac{1}{\omega_0 C_s} = X_s = \frac{X_0 X_2}{X_0 + X_2} + X_1 \quad (2.15)$$

ประสิทธิภาพของวงจร (η)

$$\eta = \frac{R_L I_L^2}{R_L I_L^2 + r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2} = \frac{R_L}{R_L + \frac{r_1}{b^2} + r_2 \left[1 + \left(\frac{R_L}{X_p} \right)^2 \right]} \quad (2.16)$$

โดยวงจรจะเกิดประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อ $R_L = R_{L\max}$

$$R_{L\max} = X_p \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r_1}{r_2} + 1} \quad (2.17)$$

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{2r_2}{X_p} \sqrt{\frac{r_1}{b^2 r_2} + 1}} \quad (2.18)$$

$$b = \frac{X_0'}{X_0' + X_2} \quad (2.19)$$

บทที่ 3

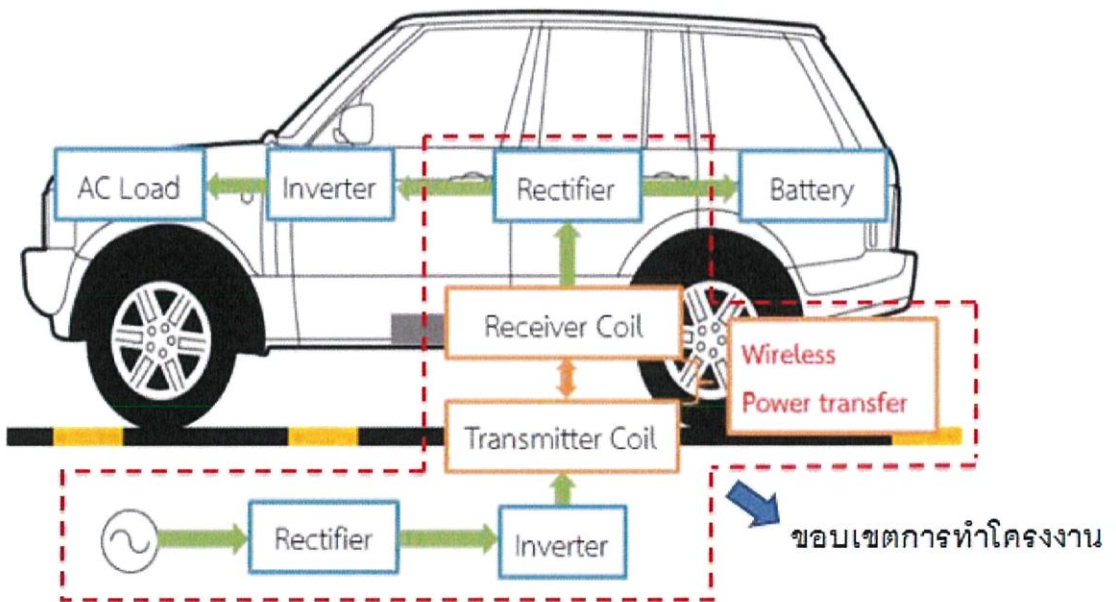
การออกแบบสร้างการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

3.1 ภาพรวมของระบบการทำงานการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

1. ระบบดังกล่าวเป็นระบบสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้า โดยไม่ต้องทำการเชื่อมถึงกันทางไฟฟ้าระหว่างแบตเตอรี่ที่อยู่ในรถยนต์ไฟฟ้าและอุปกรณ์ส่งพลังงาน เพื่อเพิ่มความสะดวก และความยืดหยุ่นในการชาร์จแบตเตอรี่รถยนต์

2. จากรูปที่ 3.1 ระบบการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าจะแบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนส่ง (Transmitter) และส่วนรับ (Receiver) โดยเราจะทำการติดตั้งส่วนส่งไว้ที่พื้นหรือจุดที่ต้องการและติดตั้งส่วนรับไว้ที่ตัวรถยนต์ไฟฟ้าเมื่อรถยนต์ไฟฟ้ามาจอดตรงจุดส่งพลังงาน ก็จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าไปยังส่วนรับเพื่อนำไปชาร์จแบตเตอรี่

3. ระยะห่างระหว่างส่วนส่งและส่วนรับควรมีระยะห่างอย่างน้อย 4 เซนติเมตร เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้มากยิ่งขึ้นในการส่งกำลังไฟฟ้าที่กำลังงานเอาต์พุต 500 วัตต์

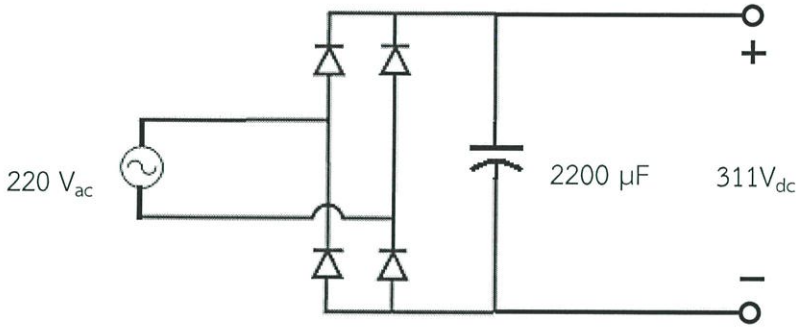


รูปที่ 3.1 ระบบการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

3.2 การออกแบบการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆต่อไปนี้

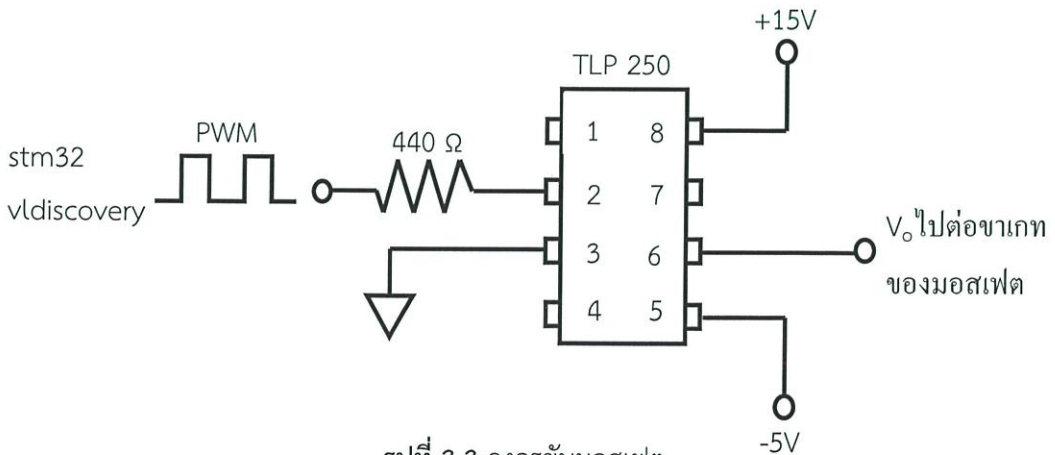
3.2.1 แหล่งจ่ายพาวเวอร์กระแสตรง ในวงจรจะทำการแปลงแรงดันจาก $\sim 220V_{ac}$ เป็น $311V_{dc}$ โดยประกอบด้วยบริดจ์ไดโอดและตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.2 วงจรแหล่งจ่ายพาวเวอร์กระแสตรง

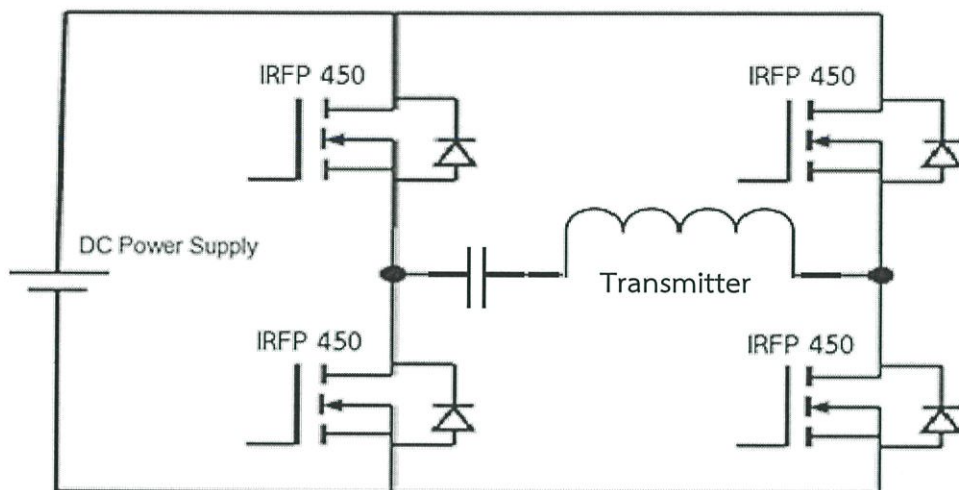
3.2.2 อินเวอร์เตอร์ความถี่สูงคือ ส่วนที่แปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเพื่อเป็น ตัวสร้างความถี่ (Oscillator) ที่จะจ่ายให้กับขดลวดตัวส่ง (Transmitter) ซึ่งจะมีความถี่อยู่ที่ 34 กิโลเฮิรตซ์ ประกอบด้วย

3.2.2.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่สูงเพื่อใช้ในการขับมอเตอร์ในที่นี่จะใช้บอร์ด stm32vldiscovery ในการกำเนิดสัญญาณ และจะใช้ออปโตคัปเปิลทำการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าสำหรับขับขาคารถของมอเตอร์จาก 0, 3.3 โวลต์ที่มาจากบอร์ดไปเป็น -5 , 15 โวลต์ รวมถึงการแยก (Isolated) กราวด์ (GND) ระหว่างบอร์ดอาร์มกับมอเตอร์ด้วย เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับบอร์ดหากมีการลัดวงจร



รูปที่ 3.3 วงจรขับมอเตอร์

3.2.2.2 วงจรสวิตช์ (Switching circuit) ประกอบด้วยมอสเฟตจำนวน 4 ตัวสำหรับสวิตช์ทิศทางของกระแสไฟฟ้าจากกระแสตรงให้เป็นกระแสลับซึ่งจะได้รูปสัญญาณเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.4 วงจรอินเวอร์เตอร์

หลักการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

1. หม้อแปลง 220/18 V แบบแท๊ป 1 แอมแปร์
2. ใช้ไอซี 7815 เป็นตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage regulator) ให้จ่ายไฟเลี้ยงกระแสตรงขนาด 15 โวลต์เข้าออปโตคัปเปิล (OPTO TLP250)
3. ใช้ไอซี 7905 เป็นตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage regulator) ให้จ่ายไฟเลี้ยงกระแสตรงขนาด -5 โวลต์เข้าออปโตคัปเปิล (OPTO TLP250)
4. ใช้มอสเฟต (MOSFET IRFP450) เป็นตัวสวิตช์ซิง
5. ใช้ออปโตคัปเปิล (OPTO TLP250) เป็นตัวขับขาเกต (Gate) ของมอสเฟต
6. ใช้อาร์ม (arm stm32 vldiscovery) เป็นตัวสร้างสัญญาณพัลส์ (PWM) เพื่อสั่งสวิตช์ซิง

3.2.3 ขดลวดตัวส่ง (Transmitter) และขดลวดตัวรับ (Receiver)

หลักการออกแบบขดลวดตัวส่ง (Transmitter) และขดลวดส่วนขดลวดตัวรับ (Receiver)

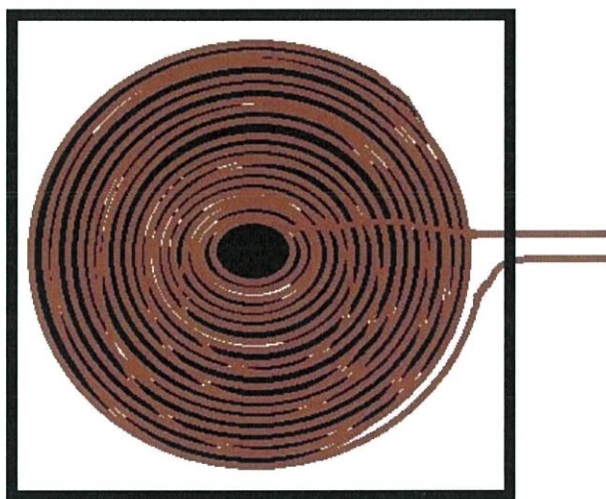
1. ขดลวดตัวส่ง (Transmitter) คือ ขดลวดที่ใช้กำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อส่งพลังงานไปขดลวดตัวรับ (Receiver) ในที่นี้จะใช้แกนอากาศ เป็นแกนกลางในการพันขดลวด โดยออกแบบให้ความเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 0.3 มิลลิเฮนรี และต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ 180 นาโนฟารัด

2. ส่วนขดลวดตัวรับ (Receiver) คือ ขดลวดที่ใช้รับเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดตัวส่ง (Transmitter) ที่กำเนิดขึ้นเพื่อแปลงกลับเป็นพลังงานไฟฟ้า และจะใช้แกนอากาศ เป็นแกนกลางในการพันขดลวดเช่นเดียวกับขดลวดตัวส่ง ใช้ไดโอดชนิดขดตส์กีไดโอด scs210AM มาต่อเป็นบริดจ์แรก

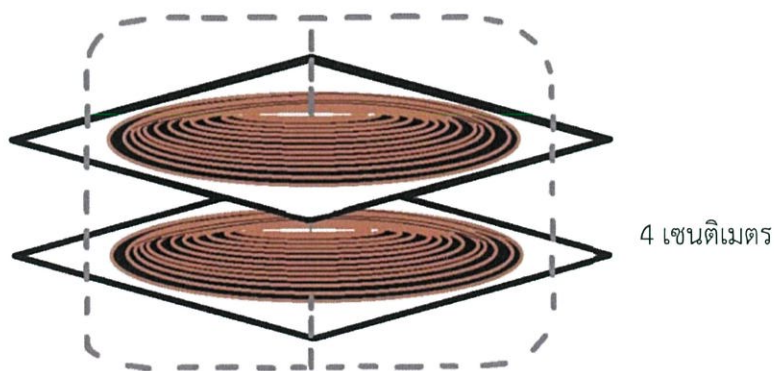
ดีไฟเออร์ โดยออกแบบให้ความเหนียวมีค่าเท่ากับ 0.3 มิลลิเฮนรี และต่อขนานกับตัวเก็บประจุ 180 นาโนฟารัด

หลักการออกแบบโครงสร้างของขดลวด

ในการพันขดลวด เพื่อที่จะมีประสิทธิภาพสูงสุดจึงจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงการรั่วไหลของฟลักซ์ให้น้อยที่สุด หากเป็นไปได้จึงควรออกแบบให้พันไปในลักษณะจานกลมพันขดลวดเป็นรูปกันหอยเพื่อลดผลของการรั่วไหลของฟลักซ์ เพราะหากออกแบบไปในรูปแบบของทรงกระบอก จะทำให้เกิดการรั่วไหลของฟลักซ์มาก โดยการพันได้ออกแบบไปในลักษณะดังรูปที่ 3.5

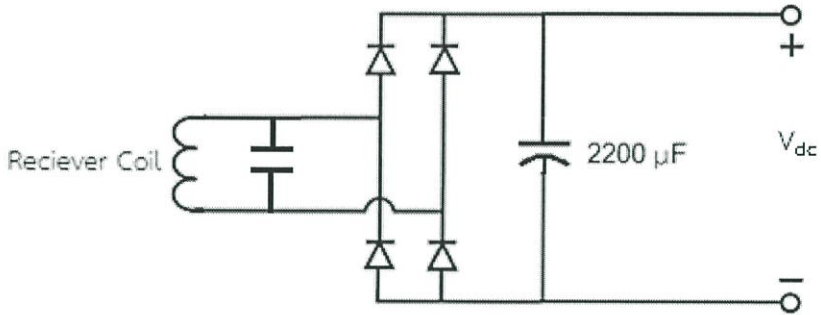


รูปที่ 3.5 การพันขดลวดตัวส่ง (Transmitter) และขดลวดตัวรับ (Receiver)



รูปที่ 3.6 ทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขดลวดส่ง (Transmitter) และขดลวดรับ (Receiver)

3.2.4 วงจรเรียงกระแส (Rectifier) คือ วงจรที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับไปสู่อไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากขดลวดตัวรับ (Receiver) จะรับมาเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จึงต้องทำการแปลงเป็นกระแสตรงเพื่อทำการชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 3.7 วงจรเรียงกระแส

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า

1. Oscilloscope
2. RLC meter
3. Coupling Coil
4. Variac
5. High Frequency Inverter
6. Current Probe
7. Load Incandescent 6 bulb (30 Ohm)

4.2 ขั้นตอนลำดับการทดลอง

1. ในวงจรควบคุม จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 3.3V เข้าที่อาร์ม เพื่อสร้างสัญญาณเข้าที่ออปโต จากนั้นออปโตขยายสัญญาณเพื่อนำไปขับมอสเฟต

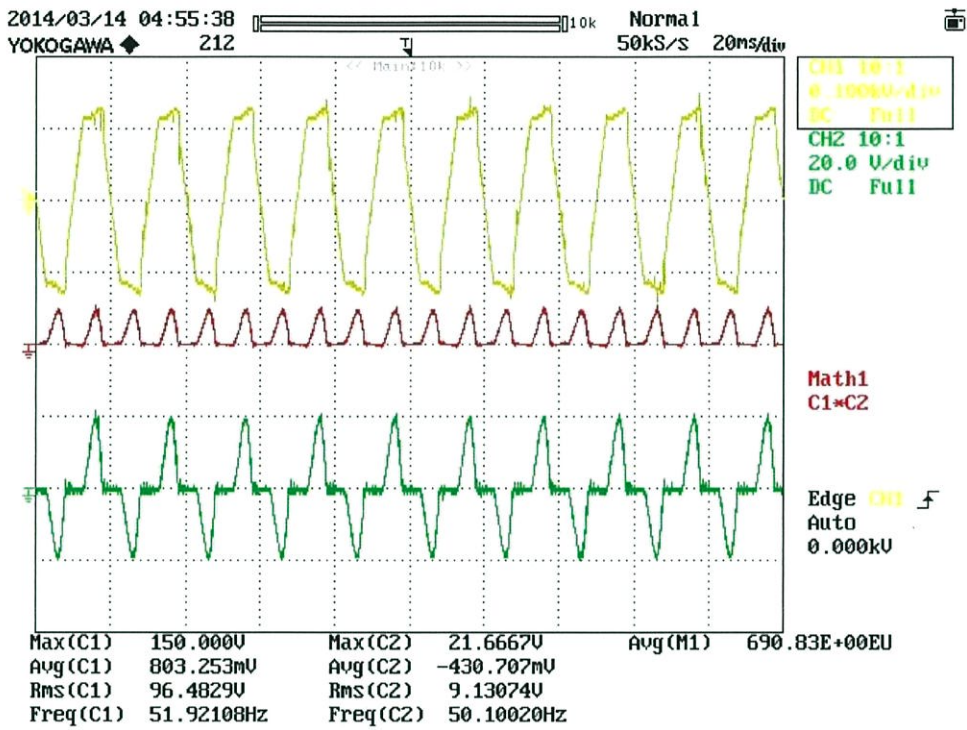
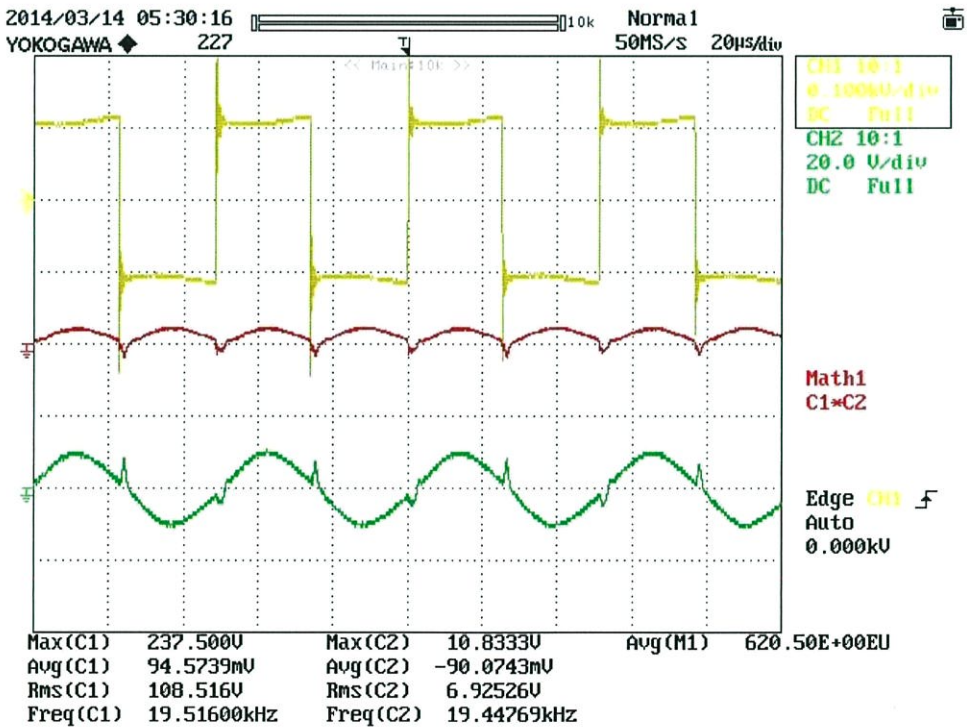
2. ในวงจรกำลัง จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าที่บริดจ์ เรกติไฟเออร์เพื่อเรียงกระแสให้เป็นกระแสตรง ส่งไปอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับที่ความถี่สูงโดยมี LC ต่ออนุกรมกัน ก่อนจ่ายเข้าที่ตัว Coupling Coil ตัวส่ง เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศไปยัง Coupling Coil ตัวรับที่มีโหลดขนาด 30 โอห์ม

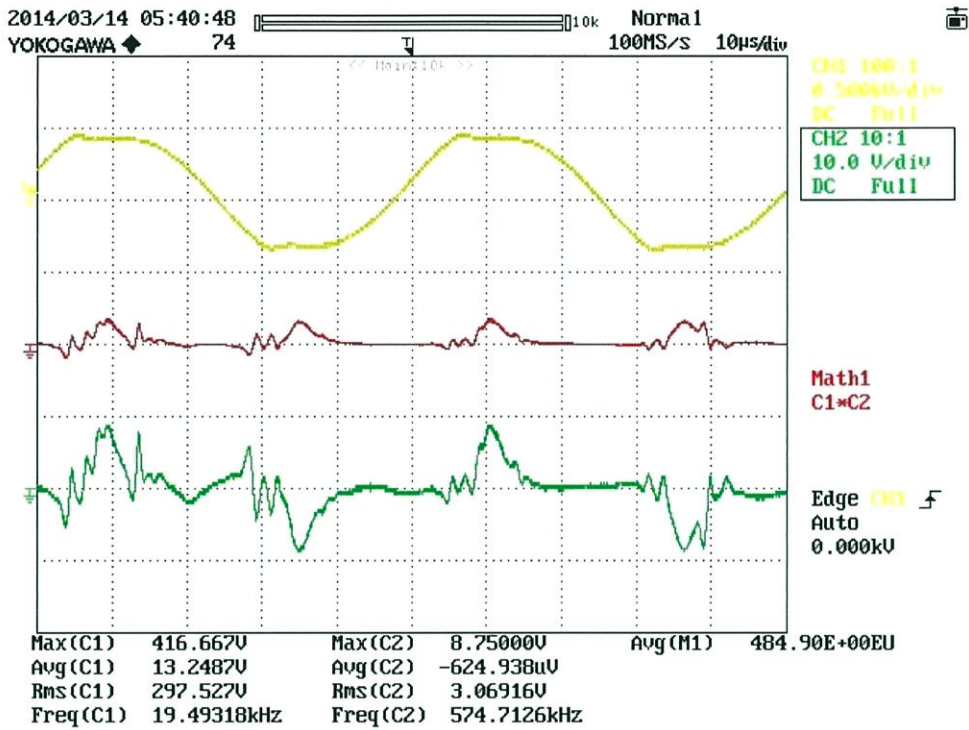
3. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณแรงดัน และ กระแสที่อินเวอร์เตอร์ เพื่อนำมาหาลำกำลังไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์แล้วบันทึกค่า

4. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณแรงดัน และ กระแสเพื่อนำมาหาลำกำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ระยะห่างแกน z 4 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์มแล้วบันทึกค่า

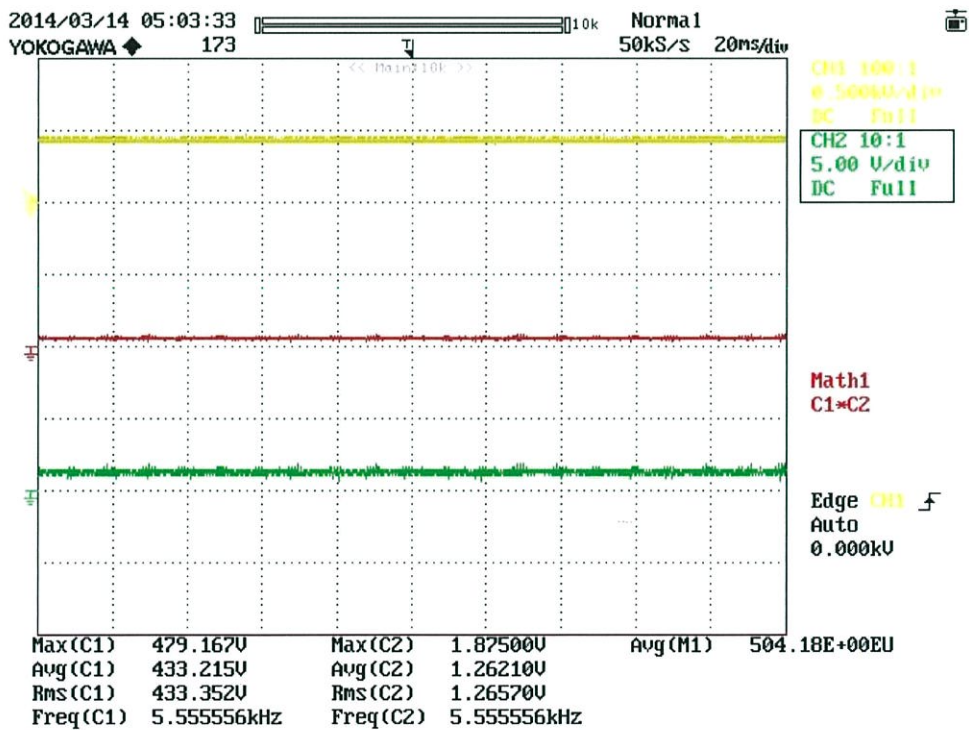
5. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณแรงดัน และ กระแสเพื่อนำมาหาลำกำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 4 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์มแล้วบันทึกค่า

4.3 การทดลองและผลการทดลอง

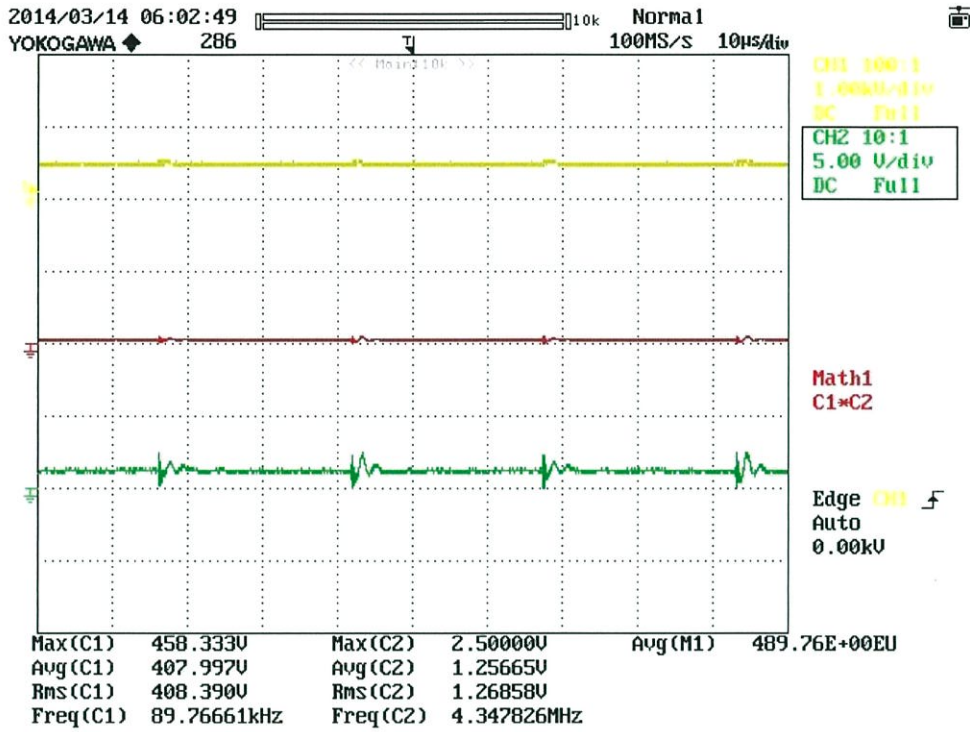
รูปที่ 4.1 สัญญาณด้านอินพุตจากวาริแอกที่กำลังไฟฟ้า 690.83 วัตต์ ที่ $z = 4$ เซนติเมตรรูปที่ 4.2 สัญญาณด้านอินพุตจากอินเวอร์เตอร์ที่กำลังไฟฟ้า 620.50 วัตต์ ที่ $z = 4$ เซนติเมตร



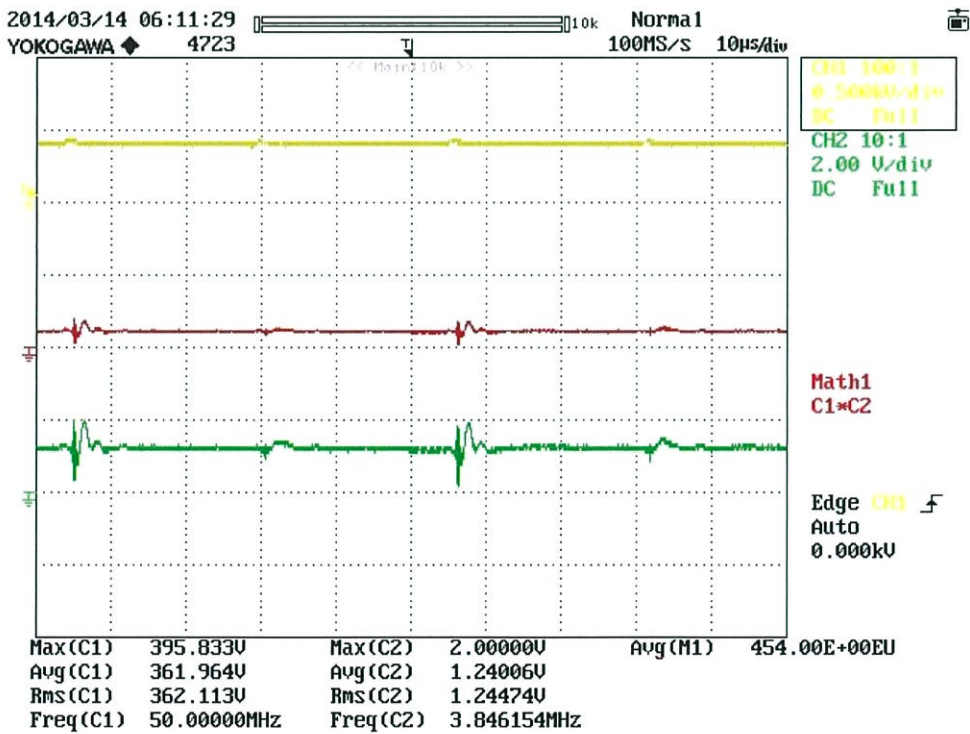
รูปที่ 4.3 สัญญาณด้านเอาต์พุตที่เป็นกระแสสลับที่กำลังไฟฟ้า 484.90 วัตต์ ที่ $z = 4$ เซนติเมตร



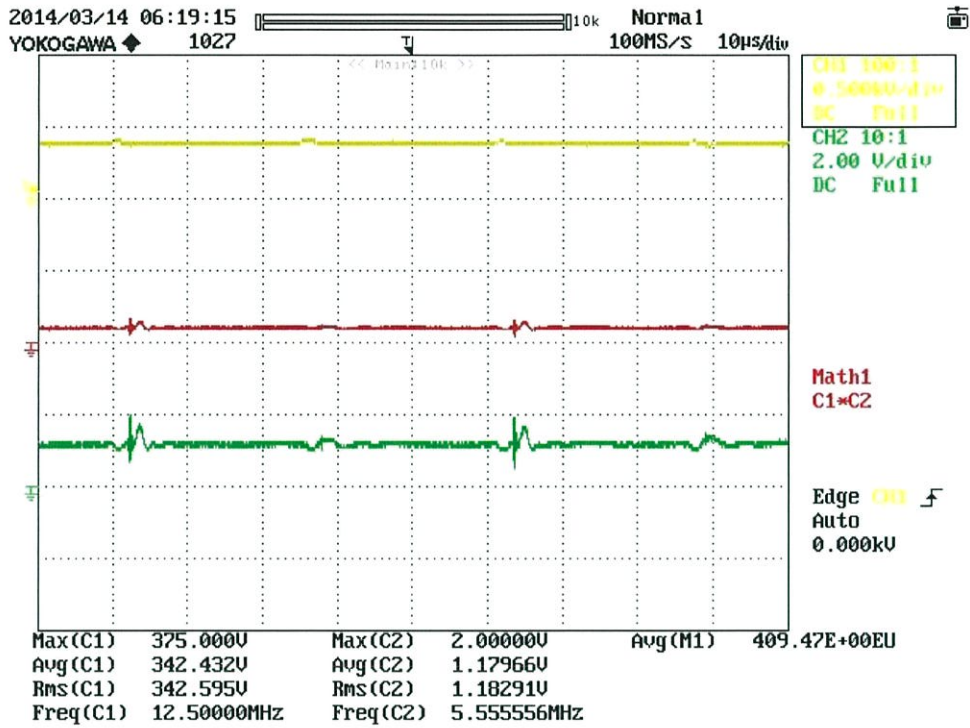
รูปที่ 4.4 สัญญาณด้านเอาต์พุตที่เป็นกระแสตรงที่กำลังไฟฟ้า 504.18 วัตต์ ที่ $z = 4$ เซนติเมตร



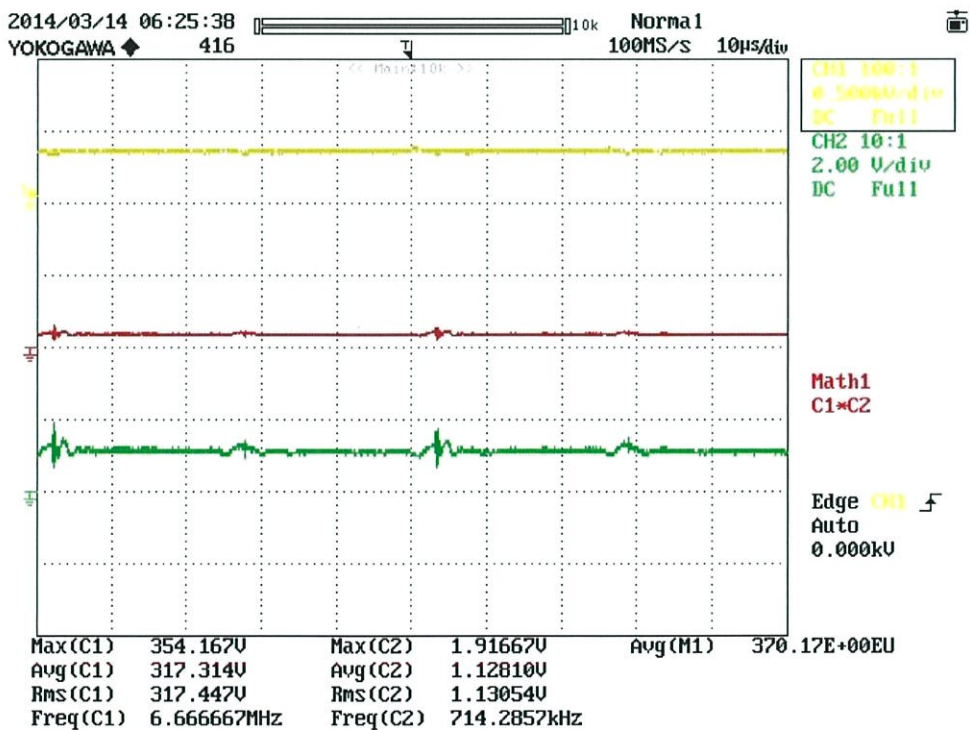
รูปที่ 4.5 สัญญาณด้านเอาร์ทพุทที่เป็นกระแสดรังกที่กำลังไฟฟ้า 489.76 วัตต์ ที่ $z = 5$ เซนติเมตร



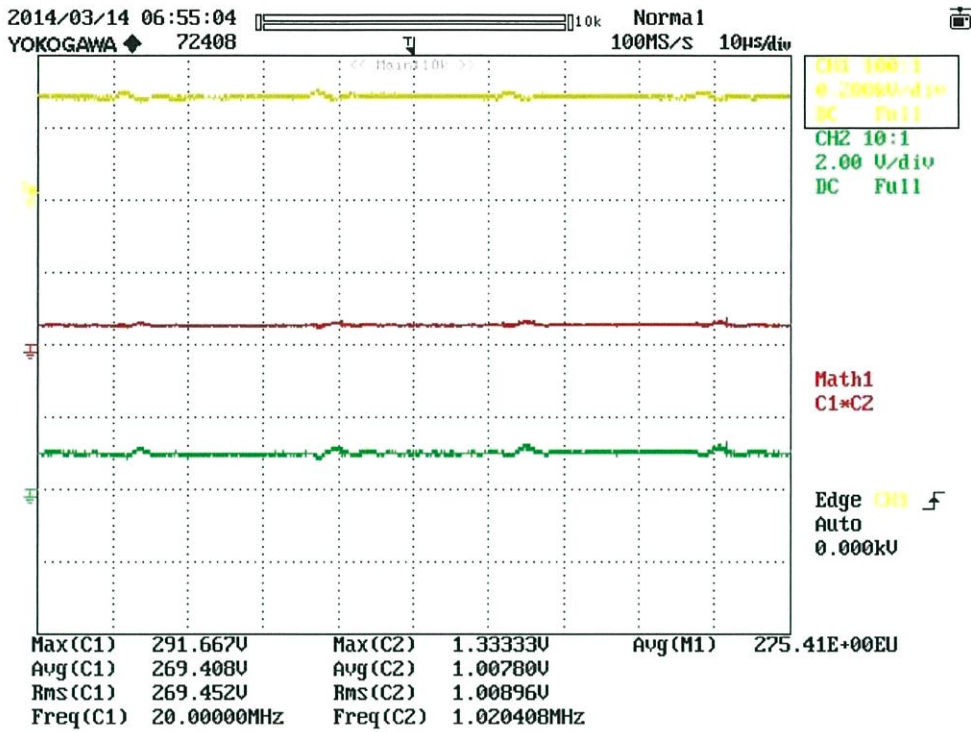
รูปที่ 4.6 สัญญาณด้านเอาร์ทพุทที่เป็นกระแสดรังกที่กำลังไฟฟ้า 454.00 วัตต์ ที่ $z = 6$ เซนติเมตร



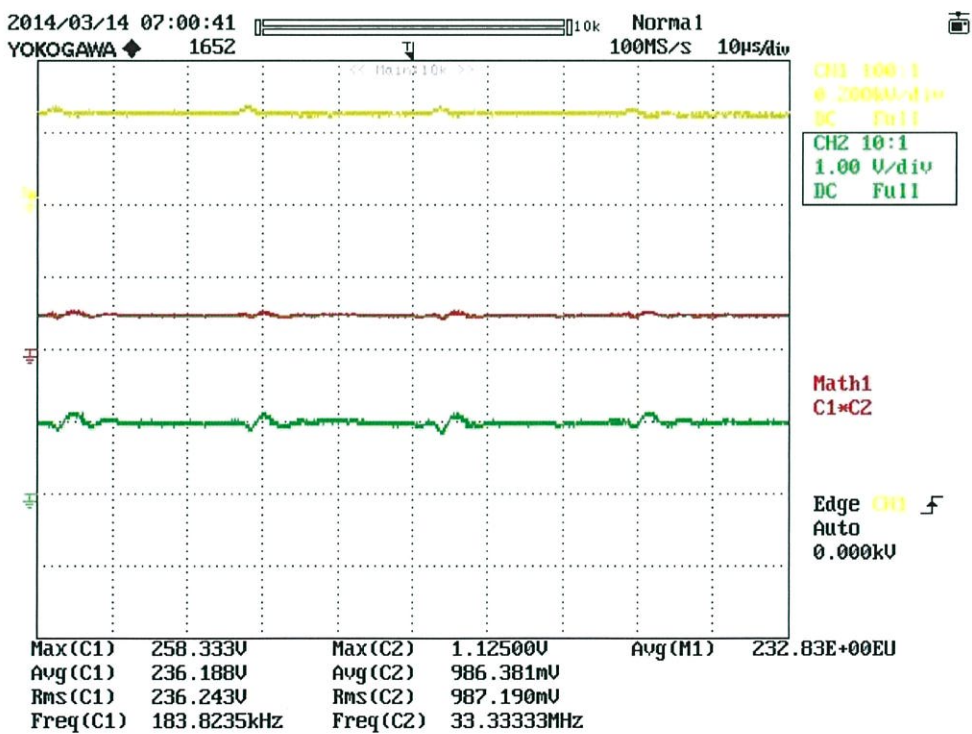
รูปที่ 4.7 สัญญาณด้านเอาร์ทพุทที่เป็นกระแสดรังกที่กำลังไฟฟ้า 409.47 วัตต์ ที่ $z = 7$ เซนติเมตร



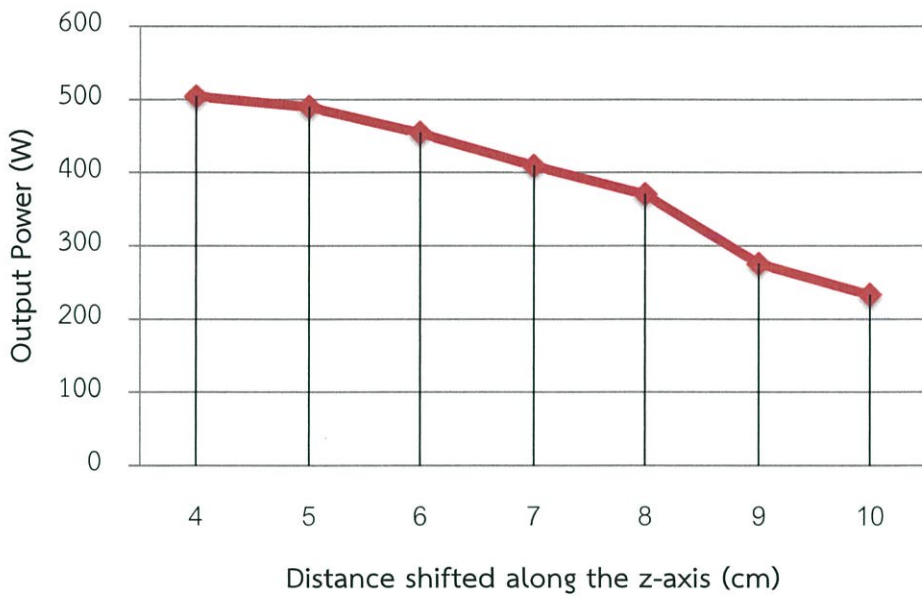
รูปที่ 4.8 สัญญาณด้านเอาร์ทพุทที่เป็นกระแสดรังกที่กำลังไฟฟ้า 370.17 วัตต์ ที่ $z = 8$ เซนติเมตร



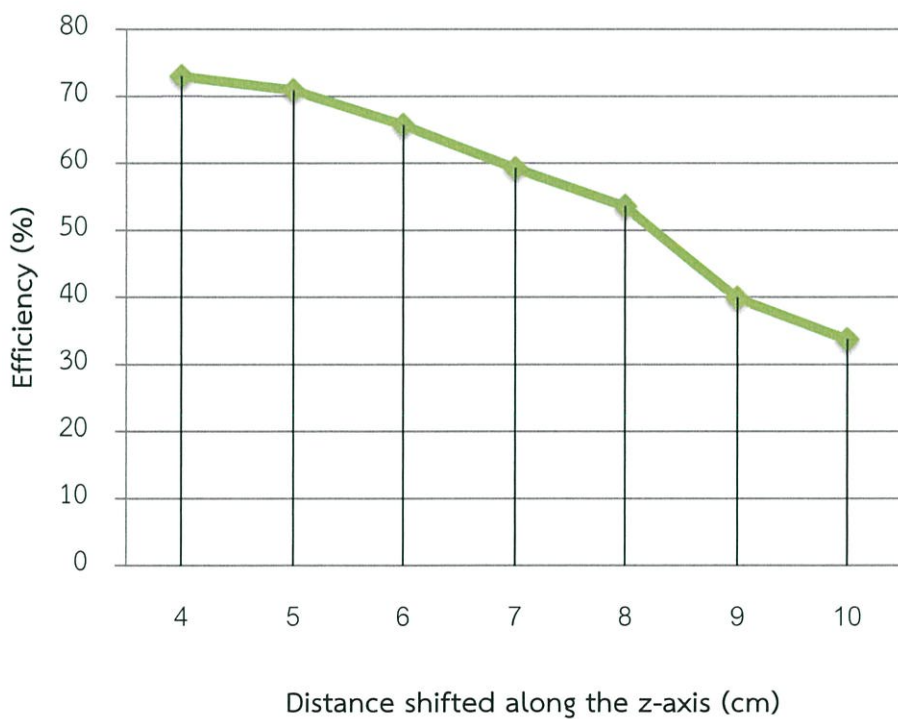
รูปที่ 4.9 สัญญาณด้านเอาต์พุตที่เป็นกระแสตรงที่กำลังไฟฟ้า 275.41 วัตต์ ที่ $z = 9$ เซนติเมตร



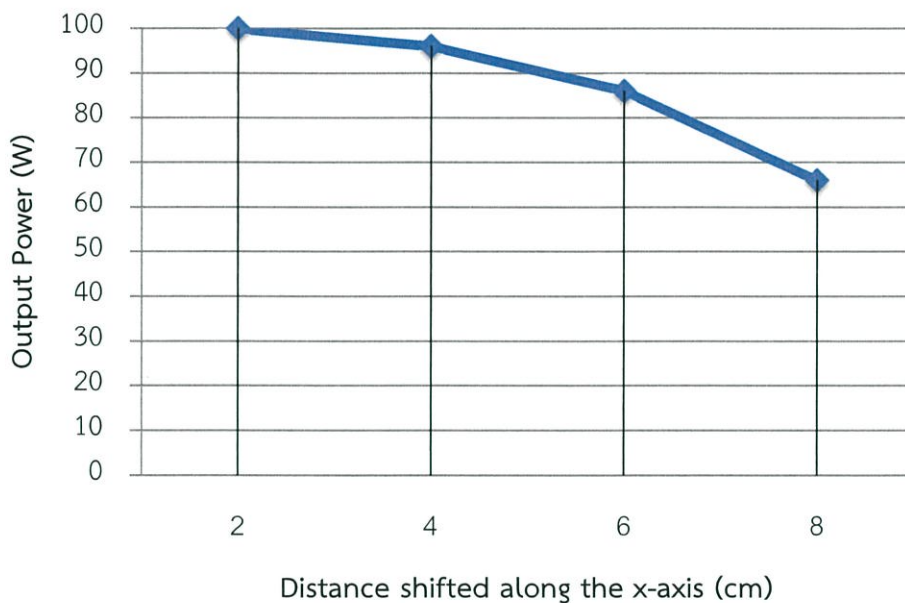
รูปที่ 4.10 สัญญาณด้านเอาต์พุตที่เป็นกระแสตรงที่กำลังไฟฟ้า 232.83 วัตต์ ที่ $z = 10$ เซนติเมตร



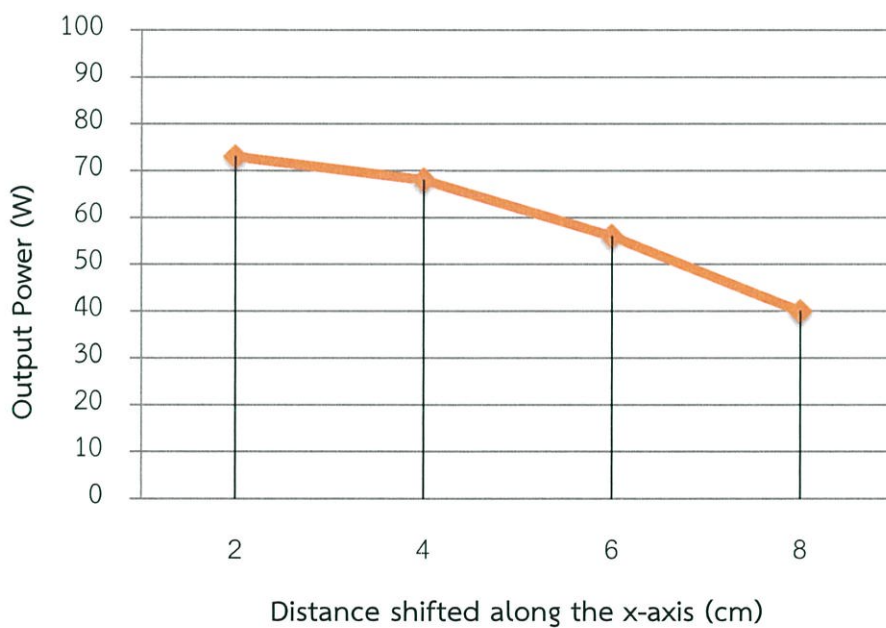
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกที่โหลดกับระยะทางที่เลื่อนไปตามแกน z



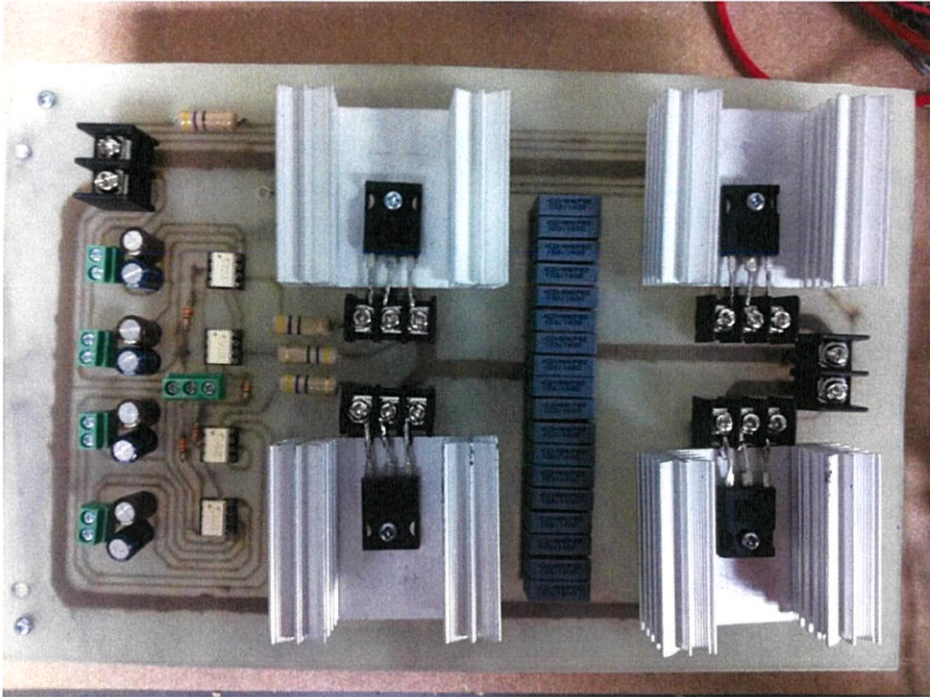
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับระยะทางที่เลื่อนไปตามแกน z



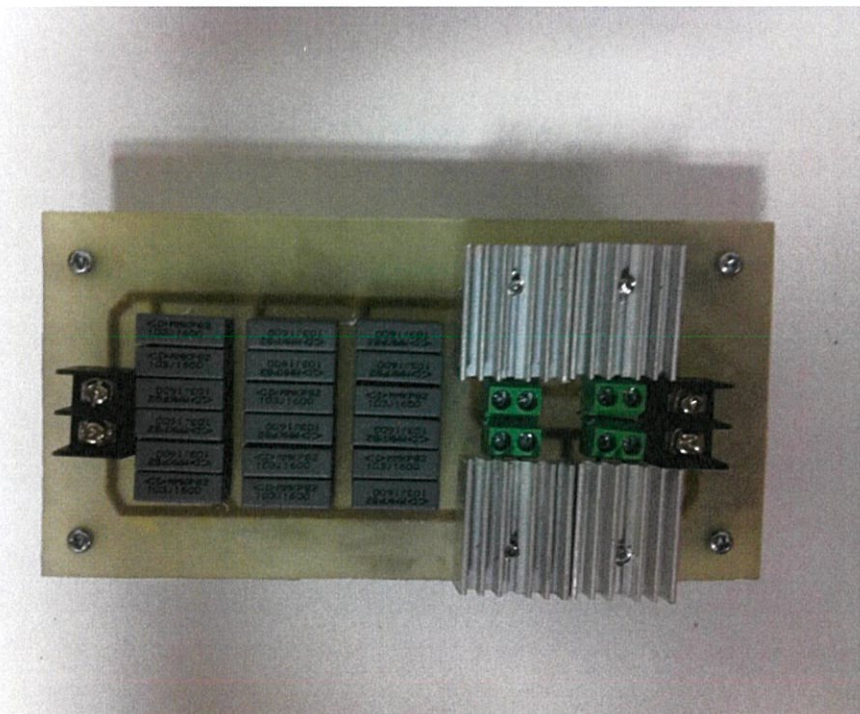
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่เลื่อนไปตามแกน x (cm) กับกำลังไฟฟ้าขาออกที่โหลดที่ระยะห่างแกน z คงที่เท่ากับ 4 เซนติเมตร



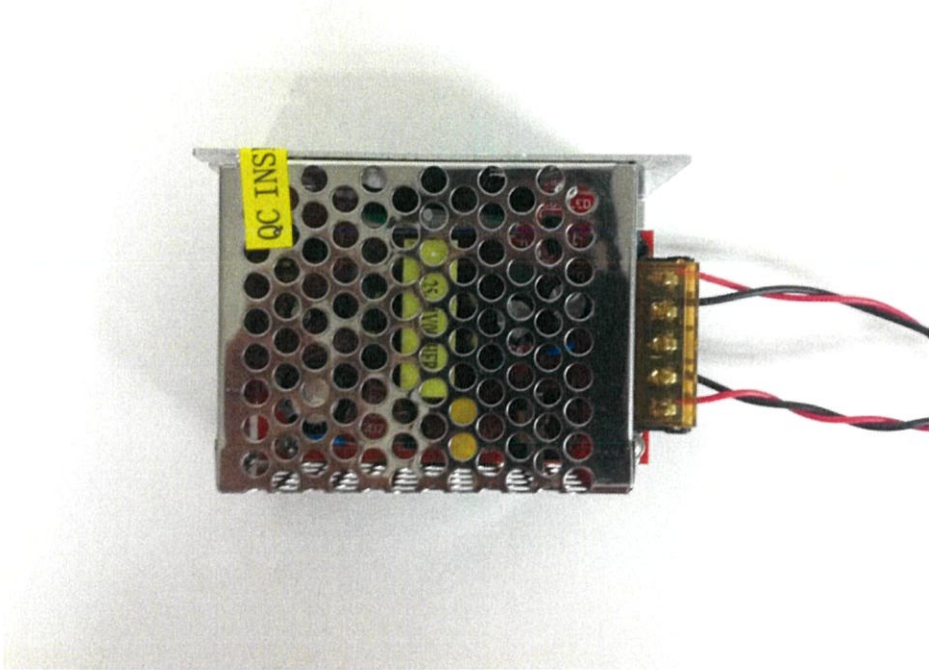
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่เลื่อนไปตามแกน x (cm) กับกำลังไฟฟ้าขาออกที่โหลดที่ระยะห่างแกน z คงที่เท่ากับ 8 เซนติเมตร



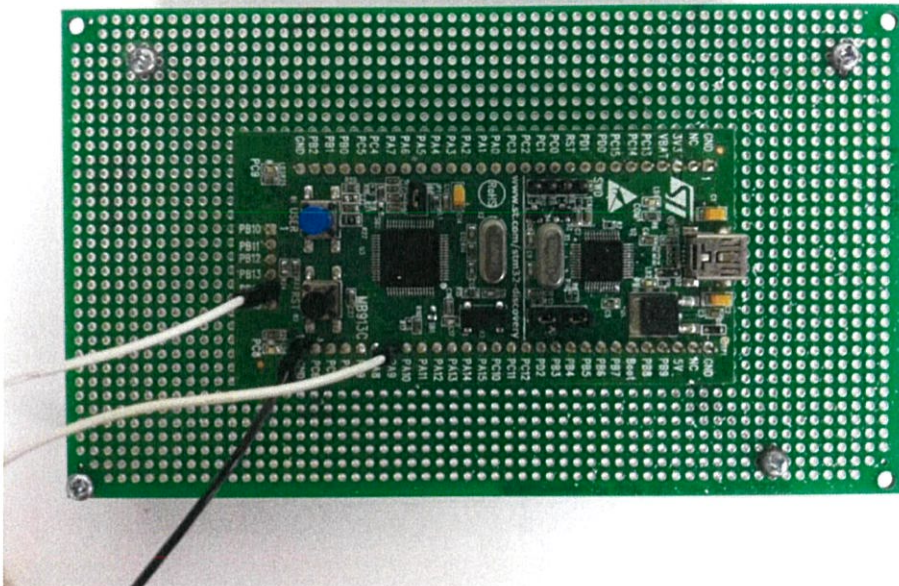
รูปที่ 4.15 วงจรฝั่งส่ง



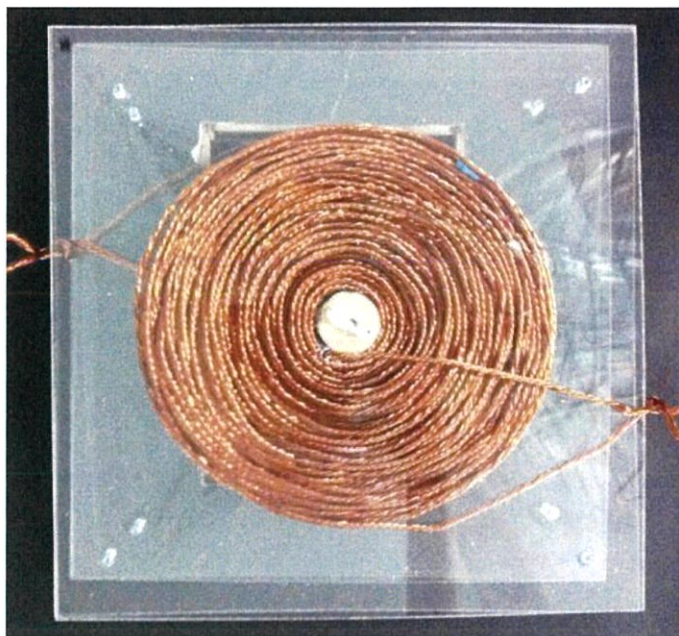
รูปที่ 4.16 วงจรฝั่งรับ



รูปที่ 4.17 ไฟเลี้ยง 24VDC



รูปที่ 4.18 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ stm32-vldiscovery



รูปที่ 4.19 ขดลวดทั้งฝั่งส่งและฝั่งรับโดยวางทับกัน

4.3.1 การทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ระยะห่างแกน z 4 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ระยะห่างแกน z 4 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

Input Power (W)	139.38	254.42	388.68	525.36	690.83
Input Voltage (V)	44.0512	59.3019	72.9366	84.3388	96.4829
Input Current (A)	4.27945	5.57655	6.85526	7.98579	9.13074
Output Power AC (W)	99.123	194.21	287.32	378.95	484.90
Output Voltage AC (V)	107.67	166.394	209.684	251.291	297.527
Output Current AC (A)	1.47215	1.97153	2.38339	2.60512	3.06916
Efficiency (%)	71.12	76.33	73.92	72.13	70.19

4.3.2 การทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 4 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 4 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

Input Power (W)	139.38	254.42	388.68	525.36	690.83
Input Voltage (V)	44.0512	59.3019	72.9366	84.3388	96.4829
Input Current (A)	4.27945	5.57655	6.85526	7.98579	9.13074
Output Power DC (W)	100.38	202.95	301.48	403.57	504.18
Output Voltage DC (V)	142.475	223.542	291.287	379.150	433.352
Output Current DC (A)	0.7085	0.91943	1.06206	1.17885	1.2657
Efficiency (%)	72.02	79.77	77.57	76.82	72.98

4.3.3 การทดลองที่ก้างไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 5 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองที่ก้างไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 5 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

Input Power (W)	139.38	254.42	388.68	525.36	690.83
Input Voltage (V)	44.0512	59.3019	72.9366	84.3388	96.4829
Input Current (A)	4.27945	5.57655	6.85526	7.98579	9.13074
Output Power DC (W)	90.025	182.94	262.61	383.82	489.76
Output Voltage DC (V)	135.396	202.538	269.139	325.430	408.390
Output Current DC (A)	0.6967	0.8729	1.01106	1.14585	1.26858
Efficiency (%)	64.59	71.9	67.56	73.06	70.89

4.3.4 การทดลองที่กำล้งไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 6 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองที่กำล้งไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 6 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

Input Power (W)	139.38	254.42	388.68	525.36	690.83
Input Voltage (V)	44.0512	59.3019	72.9366	84.3388	96.4829
Input Current (A)	4.27945	5.57655	6.85526	7.98579	9.13074
Output Power DC (W)	86.555	166.76	248.11	324.22	454.00
Output Voltage DC (V)	132.353	192.451	255.693	295.995	362.113
Output Current DC (A)	0.6875	0.86299	0.9931	1.08169	1.24474
Efficiency (%)	62.10	65.55	63.83	61.71	65.72

4.3.5 การทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 7 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 7 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

Input Power (W)	139.38	254.42	388.68	525.36	690.83
Input Voltage (V)	44.0512	59.3019	72.9366	84.3388	96.4829
Input Current (A)	4.27945	5.57655	6.85526	7.98579	9.13074
Output Power DC (W)	75.687	150.91	220.54	298.50	409.47
Output Voltage DC (V)	121.689	179.997	233.091	289.337	342.595
Output Current DC (A)	0.6754	0.8433	0.9652	1.05353	1.18291
Efficiency (%)	54.30	59.32	56.74	56.82	59.27

4.3.6 การทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 8 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 8 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

Input Power (W)	139.38	254.42	388.68	525.36	690.83
Input Voltage (V)	44.0512	59.3019	72.9366	84.3388	96.4829
Input Current (A)	4.27945	5.57655	6.85526	7.98579	9.13074
Output Power DC (W)	59.270	138.90	193.95	265.42	370.17
Output Voltage DC (V)	113.392	172.006	217.522	271.026	317.447
Output Current DC (A)	0.6507	0.8113	0.9249	1.02323	1.13054
Efficiency (%)	42.52	54.59	49.90	50.52	53.58

4.3.7 การทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 9 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 9 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

Input Power (W)	139.38	254.42	388.68	525.36	690.83
Input Voltage (V)	44.0512	59.3019	72.9366	84.3388	96.4829
Input Current (A)	4.27945	5.57655	6.85526	7.98579	9.13074
Output Power DC (W)	52.555	111.40	169.55	216.33	275.41
Output Voltage DC (V)	103.210	158.655	198.237	233.386	269.452
Output Current DC (A)	0.6059	0.73898	0.8474	0.9399	1.00896
Efficiency (%)	37.71	49.79	43.62	41.18	39.87

4.3.8 การทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 10 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 10 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

Input Power (W)	139.38	254.42	388.68	525.36	690.83
Input Voltage (V)	44.0512	59.3019	72.9366	84.3388	96.4829
Input Current (A)	4.27945	5.57655	6.85526	7.98579	9.13074
Output Power DC (W)	50.534	104.72	155.19	199.15	232.83
Output Voltage DC (V)	90.9666	142.174	180.722	210.354	236.243
Output Current DC (A)	0.55695	0.73963	0.8456	0.9283	0.9872
Efficiency (%)	36.26	41.16	39.93	37.91	33.70

4.3.9 การทดลองที่ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ห่างกันในแกน z 4 เซนติเมตร และเลื่อนไปตามแกน x ที่ระยะห่างต่างๆกัน ดูค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น โดยให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าคงที่เท่ากับ 139.38 วัตต์

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองที่ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ห่างกันในแกน z 4 เซนติเมตร และเลื่อนไปตามแกน x ที่ระยะห่างต่างๆกัน ดูค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น โดยให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าคงที่เท่ากับ 139.38 วัตต์

ระยะห่างกันแนวแกน x (cm)	2	4	6	8
Input Power (W)	139.38	139.38	139.38	139.38
Input Voltage (V)	44.0512	44.0512	44.0512	44.0512
Input Current (A)	4.27945	4.27945	4.27945	4.27945
Output Power (W)	100	96	86	66
Efficiency (%)	71.75	68.88	61.70	47.35

4.3.10 การทดลองที่ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ห่างกันในแกน z 6 เซนติเมตร และเลื่อนไปตามแกน x ที่ระยะห่างต่างๆกัน ดูค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น โดยให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าคงที่เท่ากับ 139.38 วัตต์

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองที่ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ห่างกันในแกน z 6 เซนติเมตร และเลื่อนไปตามแกน x ที่ระยะห่างต่างๆกัน ดูค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น โดยให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าคงที่เท่ากับ 139.38 วัตต์

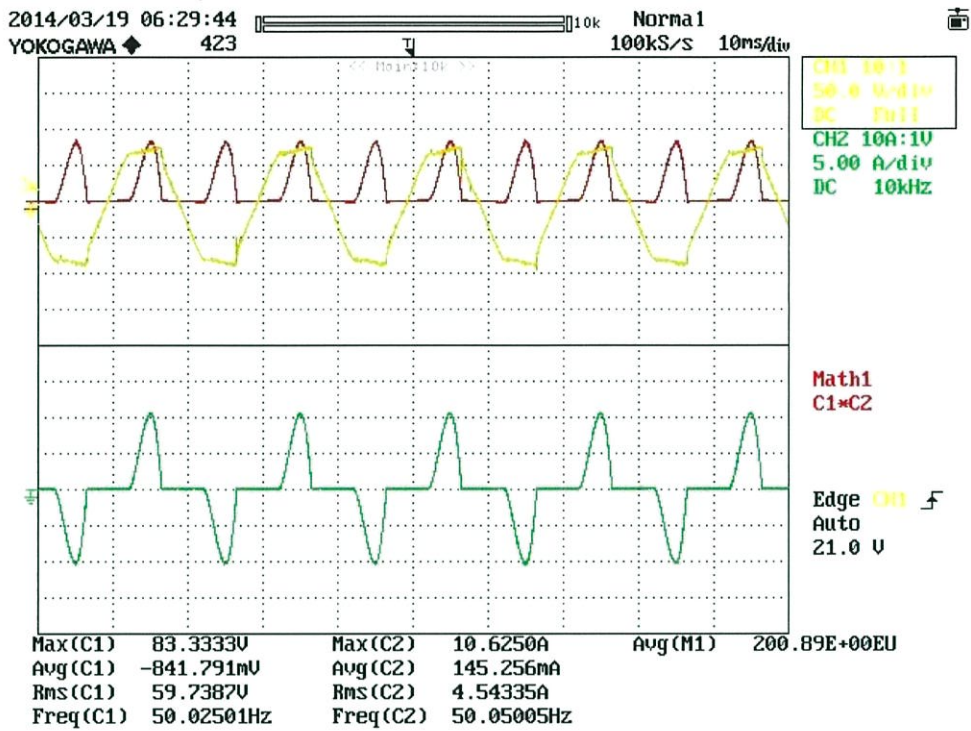
ระยะห่างกันแนวแกน x (cm)	2	4	6	8
Input Power (W)	139.38	139.38	139.38	139.38
Input Voltage (V)	44.0512	44.0512	44.0512	44.0512
Input Current (A)	4.27945	4.27945	4.27945	4.27945
Output Power (W)	94	87	71	55
Efficiency (%)	67.44	62.42	50.94	39.46

4.3.11 การทดลองที่ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ห่างกันในแกน z 8 เซนติเมตร และเลื่อนไปตามแกน x ที่ระยะห่างต่างๆกัน ดูค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น โดยให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าคงที่เท่ากับ 139.38 วัตต์

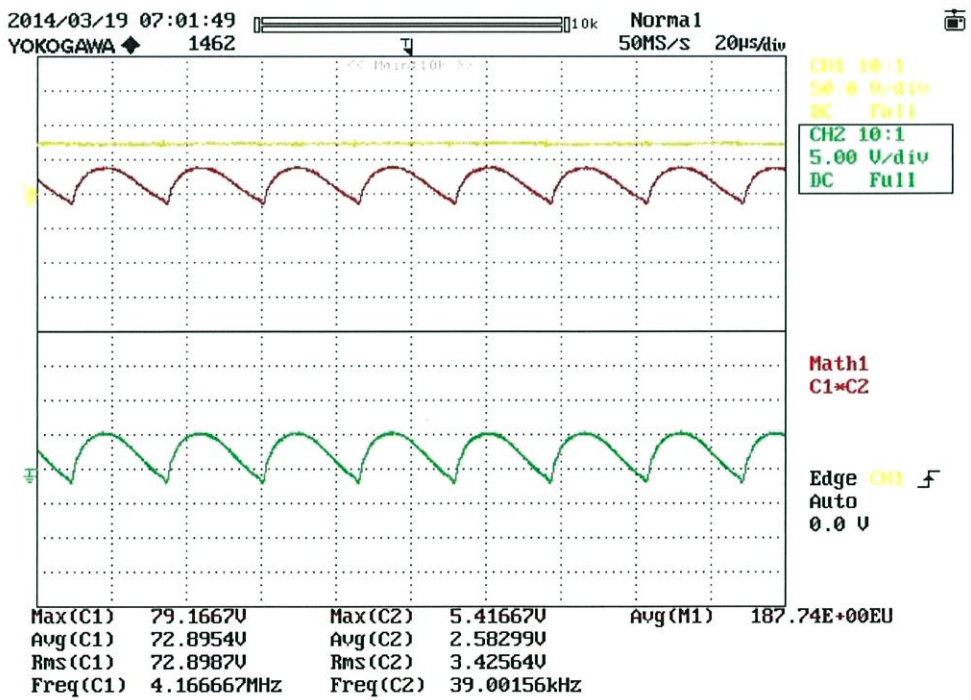
ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองที่ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ห่างกันในแกน z 8 เซนติเมตร และเลื่อนไปตามแกน x ที่ระยะห่างต่างๆกัน ดูค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น โดยให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าคงที่เท่ากับ 139.38 วัตต์

ระยะห่างกันแนวแกน x (cm)	2	4	6	8
Input Power (W)	139.38	139.38	139.38	139.38
Input Voltage (V)	44.0512	44.0512	44.0512	44.0512
Input Current (A)	4.27945	4.27945	4.27945	4.27945
Output Power (W)	73	68	56	40
Efficiency (%)	52.37	48.79	40.18	29.70

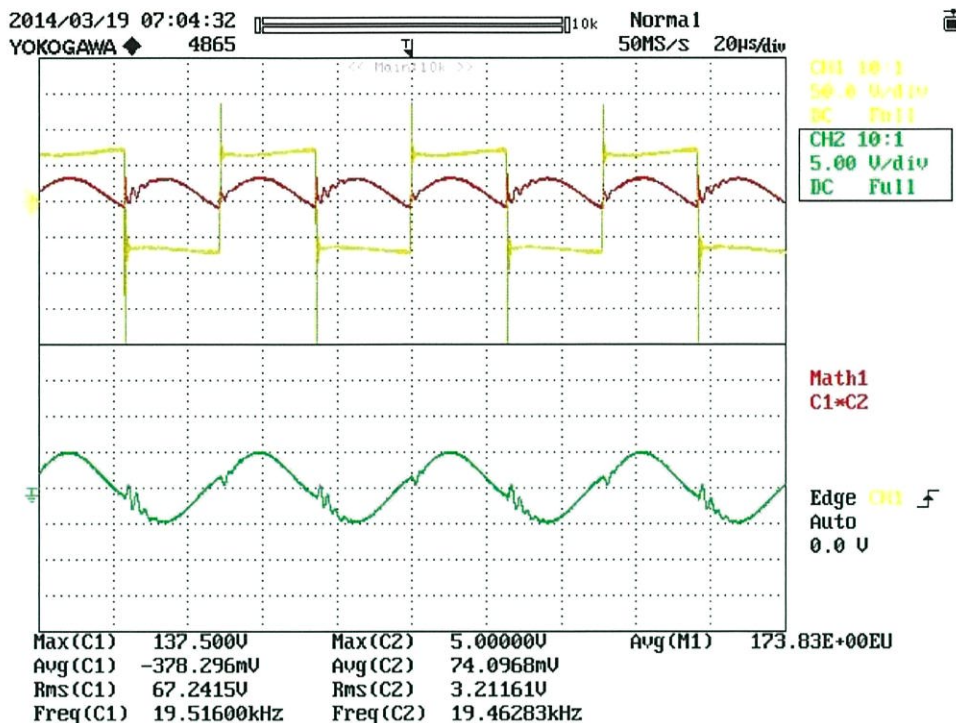
4.4 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจากการส่งกำลังไฟฟ้า



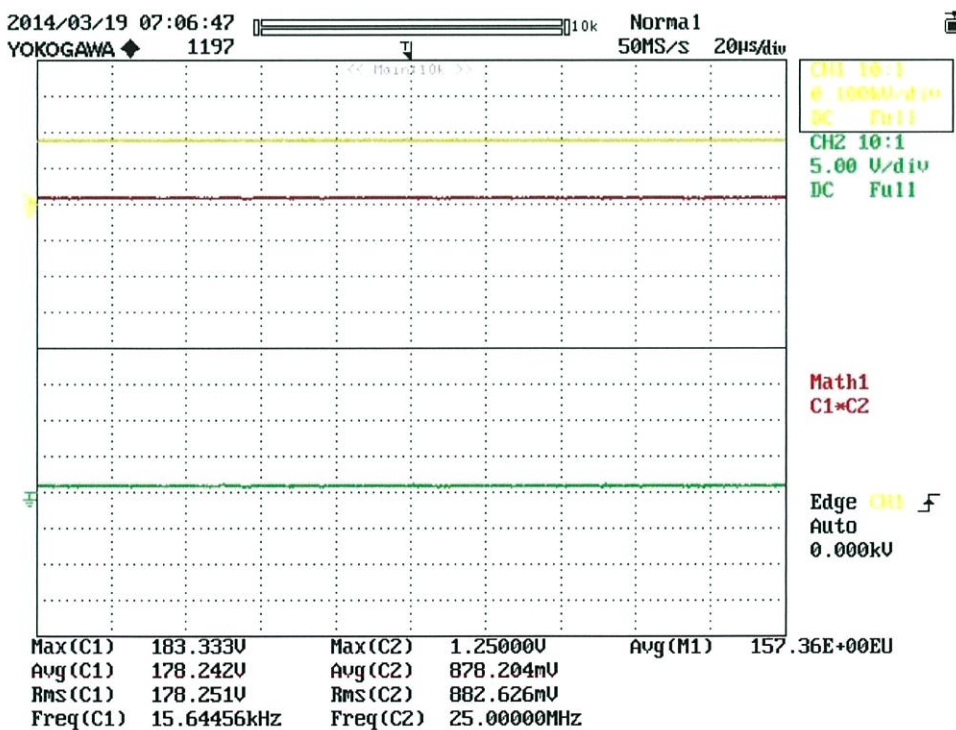
รูปที่ 4.20 กำลังไฟฟ้าจากวาริแอก



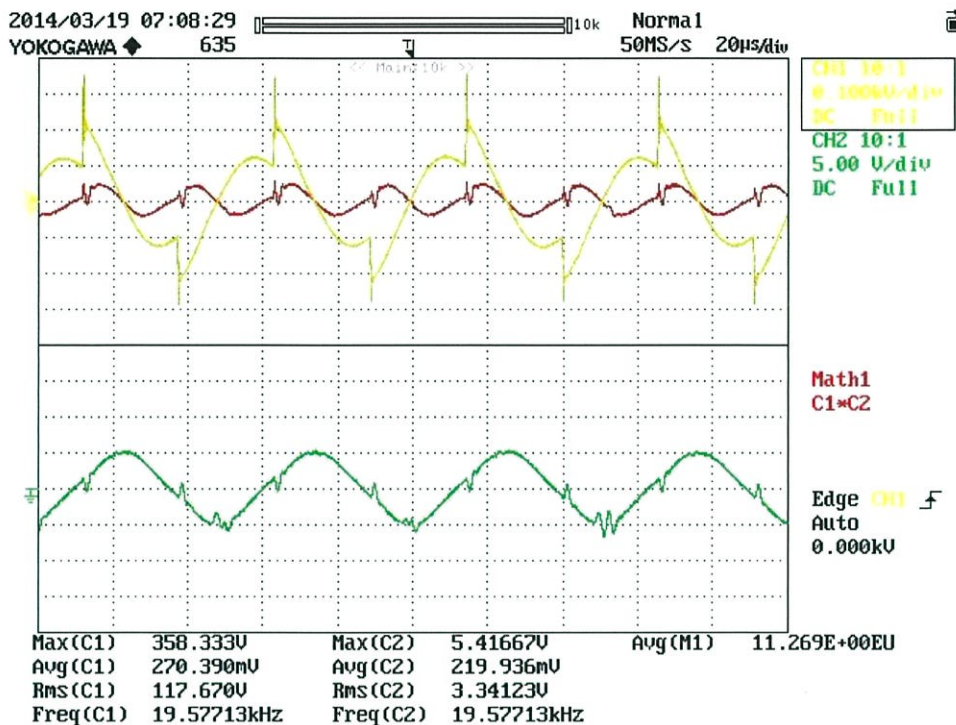
รูปที่ 4.21 กำลังไฟฟ้าจากบริดจ์เรกติไฟเออร์



รูปที่ 4.22 กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.23 กำลังไฟฟ้าที่โหลด



รูปที่ 4.24 กำลังไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำฝั่งส่ง

จากรูปที่ 4.20 ถึง 4.24 จะได้กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย(Power Loss) ไปในระหว่างการส่งดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่บริดจ์(W)} &= \text{กำลังไฟฟ้าที่วาริแอก} - \text{กำลังไฟฟ้าที่บริดจ์} \\
 &= 200.89 - 187.74 \\
 &= 13.15 \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่อินเวอร์เตอร์(W)} &= \text{กำลังไฟฟ้าที่บริดจ์} - \text{กำลังไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์} \\
 &= 187.74 - 173.83 \\
 &= 13.91 \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวด(W)} &= \text{กำลังไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ} \\
 &= 11.269 \text{ W}
 \end{aligned}$$

นำกำลังไฟฟ้าที่จุดต่างๆมารวมกันจะได้กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม} &= 13.15 + 13.91 + 11.27 \\
 &= 38.33 \text{ W}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ กำลังไฟฟ้าสูญเสียระหว่างขดลวด ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียระหว่างขดลวด} &= \text{กำลังไฟฟ้าที่วาริแอค} - \text{กำลังไฟฟ้าที่โหลด} - \\
 &\quad \text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม} \\
 &= 200.89 - 157.36 - 38.33 \\
 &= 5.2 \text{ W}
 \end{aligned}$$

จากการคำนวณด้านบน กำลังไฟฟ้าสูญเสียระหว่างขดลวดนั้นไปเหนี่ยวนำโลหะหรือเหล็กอื่นๆซึ่งไม่ใช่ขดลวดอีกฝั่งที่อยู่ในบริเวณนั้นทำให้ประสิทธิภาพในการส่งลดลงรวมถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่จุดต่างๆเช่น บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ ก็ทำให้ประสิทธิภาพในการส่งลดลงไปด้วย เป็นต้น

4.5 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ ในรูปที่ 4.1 เป็นสัญญาณที่ได้จากวาริแอคไปเข้าอินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 4.2 เป็นสัญญาณที่ได้จากอินเวอร์เตอร์จะสังเกตเห็นว่าเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมต่างจากสัญญาณที่ออกจากวาริแอค ในรูปที่ 4.3 เป็นสัญญาณที่วัดหลังจากขดลวดตัวรับ หรือสัญญาณที่วัดเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้านเอาท์พุทซึ่งยังไม่ผ่านการกรอง ส่วนในรูปที่ 4.4 เป็นสัญญาณที่ได้จากการกรองให้เป็นกระแสตรงเพื่อจะต่อเข้ากับโหลดแล้ว จะสังเกตเห็นว่ากราฟเป็นเส้นตรงต่างจากรูปที่ 4.3 ที่เป็นกระแสสลับ และในรูปที่ 4.5 ถึง 4.10 เป็นกราฟที่ได้จากการเลื่อนระยะของขดลวดทั้ง 2 ด้านในแกน z ห่างออกไป จะสังเกตเห็นได้ว่า กำลังไฟฟ้าที่ได้นั้นมีค่าลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นดังกราฟในรูปที่ 4.11 ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการส่งนั้นลดลงตามไปด้วยดังกราฟในรูปที่ 4.12 จากการทดลองแสดงให้เห็นว่ากราฟที่ระยะห่างแกน z เท่ากับ 4 เซนติเมตร เป็นผลที่น่าพอใจโดยกำลังไฟฟ้าที่โหลดรับได้สูงสุดถึง 504.18 วัตต์ โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับ 72.98% และที่ กำลังไฟฟ้าที่โหลดรับได้เท่ากับ 202.95 วัตต์ นั้นมีประสิทธิภาพสูงสุดถึง 79.77%

ที่ระยะห่างในแกน z เท่ากับ 5 เซนติเมตร ประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้เท่ากับ 73.06% โดยมีกำลังไฟฟ้าที่โหลดรับได้เท่ากับ 383.82 วัตต์

ที่ระยะห่างในแกน z เท่ากับ 6 เซนติเมตร ประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้เท่ากับ 65.72% โดยมีกำลังไฟฟ้าที่โหลดรับได้เท่ากับ 454 วัตต์

ที่ระยะห่างในแกน z เท่ากับ 7 เซนติเมตร ประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้เท่ากับ 59.32% โดยมีกำลังไฟฟ้าที่โหลดรับได้เท่ากับ 150.91 วัตต์

ที่ระยะห่างในแกน z เท่ากับ 8 เซนติเมตร ประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้เท่ากับ 54.59% โดยมีกำลังไฟฟ้าที่โหลดรับได้เท่ากับ 138.9 วัตต์

ที่ระยะห่างในแกน z เท่ากับ 9 เซนติเมตร ประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้เท่ากับ 49.79% โดยมี กำลังไฟฟ้าที่โหลดรับได้เท่ากับ 111.4 วัตต์

ที่ระยะห่างในแกน z เท่ากับ 10 เซนติเมตร ประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้เท่ากับ 41.16% โดยมี กำลังไฟฟ้าที่โหลดรับได้เท่ากับ 104.72 วัตต์

และการทดลองที่เลื่อนทั้งระยะในแกน z และแกน x นั้นสรุปได้ว่า เมื่อเราเลื่อนระยะห่างทั้ง ในแกน z และ แกน x ออกไปจะทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกที่โหลดนั้นลดลงตามระยะทางที่เลื่อนออกไป ตามกราฟในรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นการเลื่อนระยะในแกน z จาก 4 เซนติเมตร เป็น 8 เซนติเมตร และเลื่อนระยะในแกน x ออกไปตั้ง 2,4,6 และ 8 เซนติเมตร ตามลำดับ

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปและวิจารณ์

ในอนาคตอันใกล้พลังงานจากเชื้อเพลิงที่เราใช้กันจะไม่พอใช้สำหรับประชากรโลกดังนั้นพลังงานจึงเป็นพลังงานทางเลือกแทน รถยนต์หลายๆคันอาจจะใช้เพื่อการขับเคลื่อนบนถนน เราสามารถประจุแบตเตอรี่ด้วยวิธีการเชื่อมต่อแบบไร้สาย จากการทดลองของพวกเรา แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศเพื่อที่จะประจุแบตเตอรี่ ตัวแปรที่สำคัญในการทดลองคือ ความถี่ ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ แมตซ์อิมพีแดนซ์ และการเปลี่ยนแปลงของโหลด ประสิทธิภาพในการส่งนั้นขึ้นอยู่กับวงจรเรโซแนนซ์ของตัวส่งและตัวรับ ประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้จากการทดลองคือ 79.77% ที่ระยะ 40 มิลลิเมตร โดยกำลังไฟฟ้าขาออกเป็นกระแสตรงคือ 202.95 วัตต์ และ กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่โหลด คือ 504.18 วัตต์ มีประสิทธิภาพ 72.98% ซึ่งผลจากการทดลองแสดงให้เห็นการยอมรับทางทฤษฎี

5.2 ข้อดีของการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

- 1). มีความสะดวกสบายในการชาร์จแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า
- 2). ทำให้เกิดเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการชาร์จแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า
- 3). ทำให้ประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงลงโดยใช้พลังงานไฟฟ้าแทน

5.3 ข้อเสียของการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

- 1). มีประสิทธิภาพน้อยกว่าการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยสายส่ง
- 2). ไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าในระยะไกลได้
- 3). มีสัญญาณรบกวนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ระหว่างการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ
- 4). มีฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลออกมาระหว่างขดลวด

5.4 ปัญหาในระหว่างดำเนินโครงการ

- 1). อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชิ้นเกิดความเสียหายในระหว่างการทดลองทำให้มีกลิ่นไหม้
- 2). ในด้านอุปกรณ์ที่ใช้วัด บางครั้งไม่มีอุปกรณ์ในการทำการทดลองเนื่องจากอุปกรณ์มีไม่พอกับจำนวนกลุ่มนักศึกษาที่ต้องใช้ทดลอง
- 3). เนื่องจากโครงการนี้เป็นเทคโนโลยีใหม่ การศึกษาหาข้อมูลให้ตรงประเด็นในโครงการจึงหาได้ยาก ต้องใช้เวลาในการศึกษาหาข้อมูลในการทำโครงการนี้เป็นเวลานาน
- 4). ขดลวดที่ใช้ในการทดลองนั้นมีช่องอากาศทำให้เกิดฟลักซ์รั่วไหลออกมา ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการส่งกำลังไฟฟ้าต่ำ
- 5). ไดโอดที่ใช้ในการทดลองเป็นไดโอดที่ความถี่สูง ราคาแพง
- 6). ตัวเก็บประจุที่ใช้บางตัวมีแรงดันไม่พอที่จะใช้ทำการทดลอง

5.5 แนวทางการพัฒนาโครงการ

- 1). ควรปรับปรุงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆให้สามารถทนแรงดัน และ กระแสได้เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ต่างๆ และเพื่อต่อยอดในการพัฒนาโครงการต่อไป
- 2). ในส่วนของ Coupling Coil ควรพันให้มีช่องว่างอากาศน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้หรือไม่มีช่องว่างอากาศเลย เพื่อประสิทธิภาพในการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศจะได้มีประสิทธิภาพสูง สามารถส่งได้ในระยะที่ไกลขึ้น

เอกสารอ้างอิง

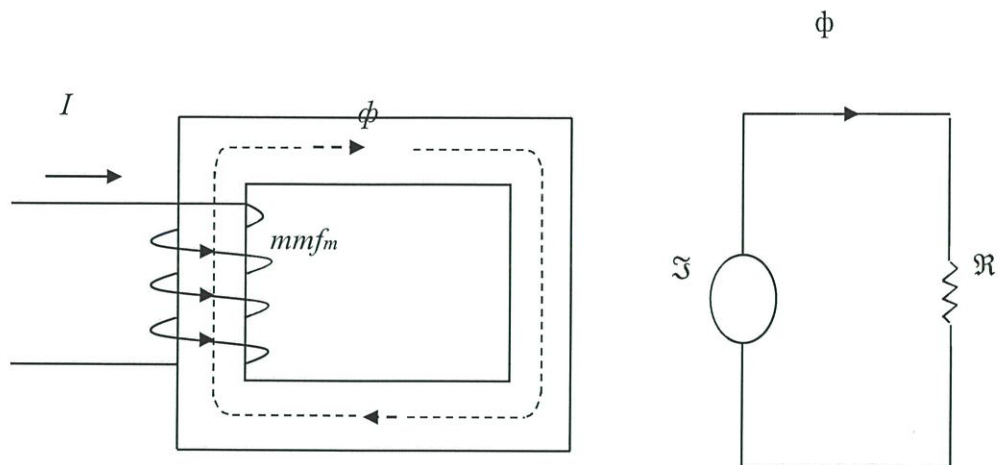
- [1] Werachet Khan-Ngern and Wutthiphol Tharateeraset, 9th published , 162 Moo 4 Ratphatthana Rd, Bangpakok Ratburana Bangkok 10140 : VJ Printing Limited part , 2009
- [2] S. Sheik Mohammed, K. Ramasamy and T. Shanmuganantham, “Wireless Power Transmission – A Next Generation Power Transmission System”, International Journal of Computer Applications (0975-8887), Vol. 1 No.13, 2012, pp. 100-103.
- [3] Hiroya Takanashi, Yukiya Sato, Yasuyoshi Kaneko, Shigeru Abe and Tomio Yasuda, “A large air gap 3 kW wireless power transfer system for electric vehicles”, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE., 2012, pp. 269-274.
- [4] Ki Young Kim, “ Wireless Power Transfer – Principles and Engineering Explorations ”, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, Intech, 2012.
- [5] H. Zenkner and W. Khan-ngern, “High Power Density and High Efficient Wireless Energy Transfer by Resonance Coupling”, Electrical Engineering /Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2010 International Conference on., 2010, pp. 1281-1284
- [6] Dr. Morris Kesler, “Highly Resonant Wireless Power Transfer : Safe, Efficient, and over Distance”, Witricity Corporation Magazine, 2013, pp. 1-32
- [7] B.-J. Jang, S. Lee, and H. Yoon, “HF-BAND WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM : CONCEPT, ISSUES, AND DESIGN”, Progress In Electromagnetics Research, Vol. 124, No.211-231, 2012, pp. 1-21
- [8] A. James Swart, H. Christo vZ. Pienaar and Mike J. Case, “A Radio Frequency Mosfet driver”, AFRICON, 2004. 7th AFRICON Conference in Africa, Vol. 1, 2004, pp. 543-546
- [9] Yanping Yao ; Hongyan Zhang ; Zheng Geng , “Wireless charger prototype based on strong coupled magnetic resonance”,Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011 International Conference , Vol.5 , 2011 , pp. 2252-2254
- [10] Kawamura , Y.; Shoyama, M., “Wireless power transmission using LC cancellation”, ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 IEEE., 2013, pp. 1041-1045

- [11] Moshfegh, J. ; Shahabadi, M. ; Rashed-Mohassel, J., “Conditions of maximum efficiency for wireless power transfer between two helical wires”, *Microwaves, Antennas & Propagation , IET*, Vol.5, 2011, pp. 545-550
- [12] Jiseong Kim ; Jonghoon Kim ; Sunkyu Kong ; Hongseok Kim ; In-Soo Suh ; Nam Pyo Suh ; Dong-Ho Cho ; Joungho Kim ; Seungyoung Ahn. “Coil Design and Shielding Methods for a Magnetic Resonant Wireless Power Transfer System”, *Proceedings of the IEEE*, Vol.101, 2013, pp. 1332-1342.
- [13] JinWook Kim ; Hyeon-Chang Son ; Kwan-Ho Kim ; Young-Jin Park, “Efficiency Analysis of Magnetic Resonance Wireless Power Transfer With Intermediate Resonant Coil”, *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, Vol.10, 2011, pp. 389-392.
- [14] Dukju Ahn ; Songcheol Hong , “A Transmitter or a Receiver Consisting of Two Strongly Coupled Resonators for Enhanced Resonant Coupling in Wireless Power Transfer”, *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, Vol.61, Issue 3, 2014, pp. 1193-1203.
- [15] Di Tommaso, A.O.; Genduso, F.; Miceli, R., “A small power transmission prototype for electric vehicle wireless battery charge applications”, *Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2012 International Conference, 2012, pp. 1-6.

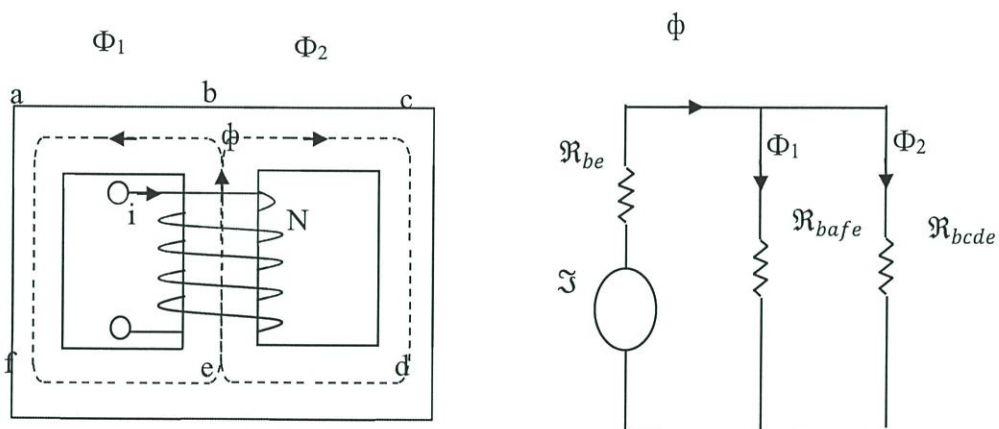
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

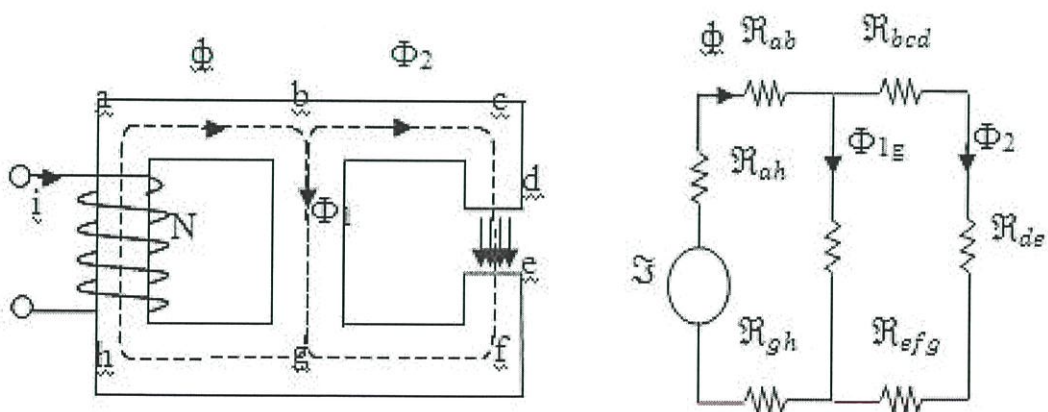
Wireless Power Transmission Circuit



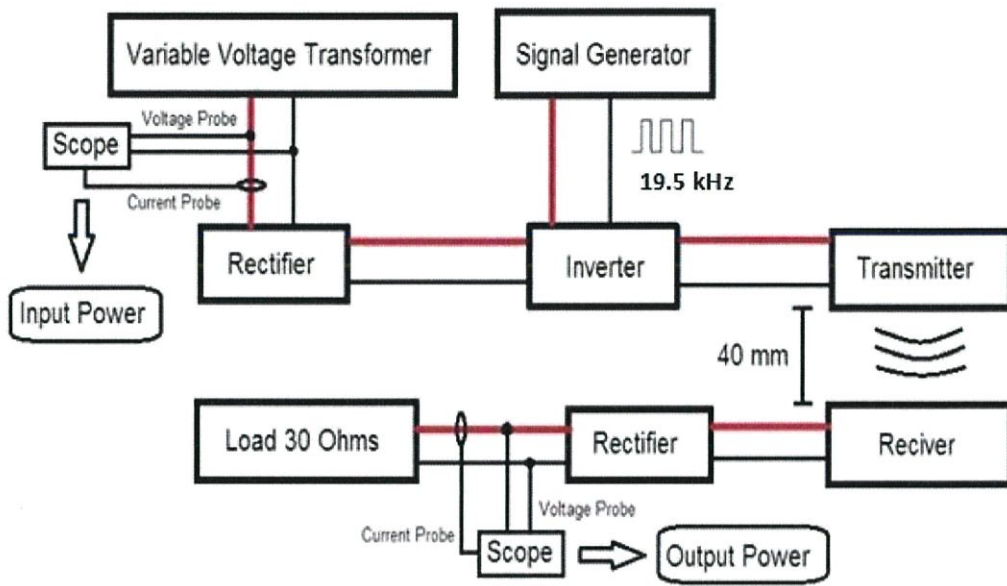
วงจรอนุกรมทางแม่เหล็ก และวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าวงจรแม่เหล็ก



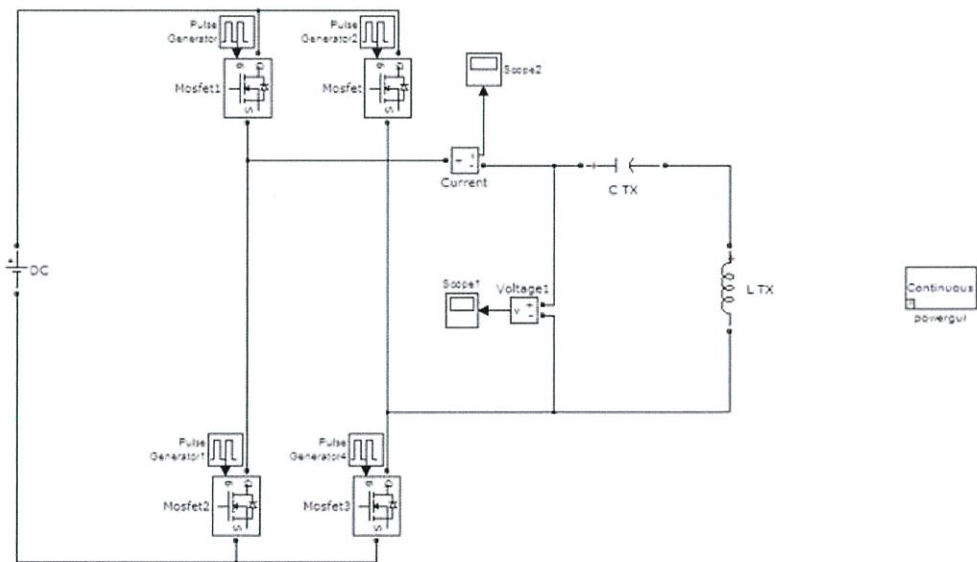
วงจรขนานทางแม่เหล็ก และวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าวงจรแม่เหล็ก



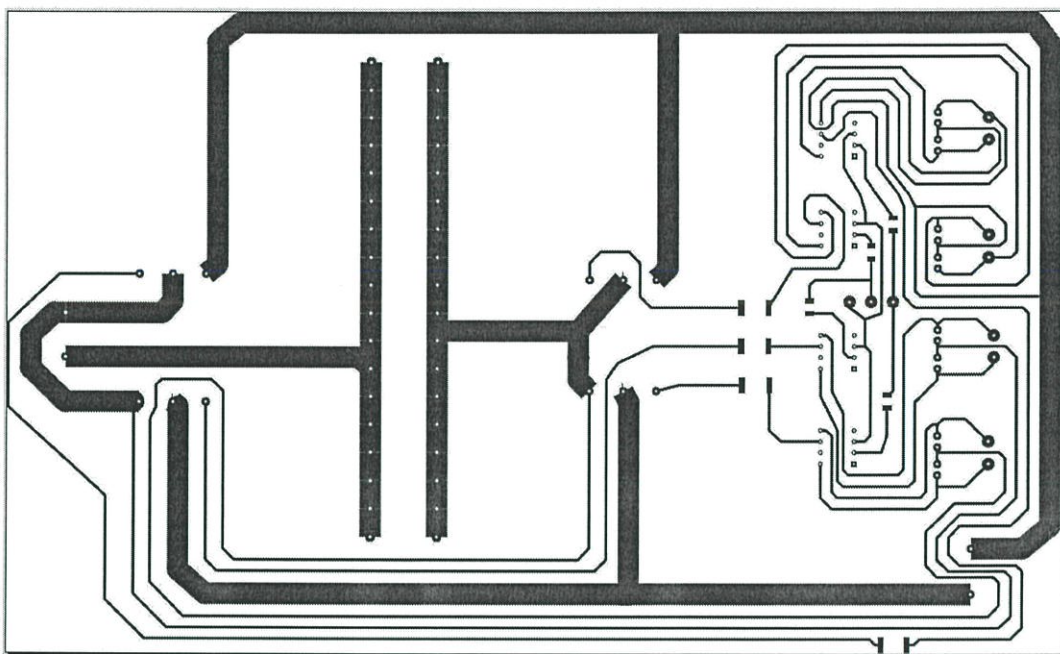
วงจรผสมทางแม่เหล็กและวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าวงจรแม่เหล็ก



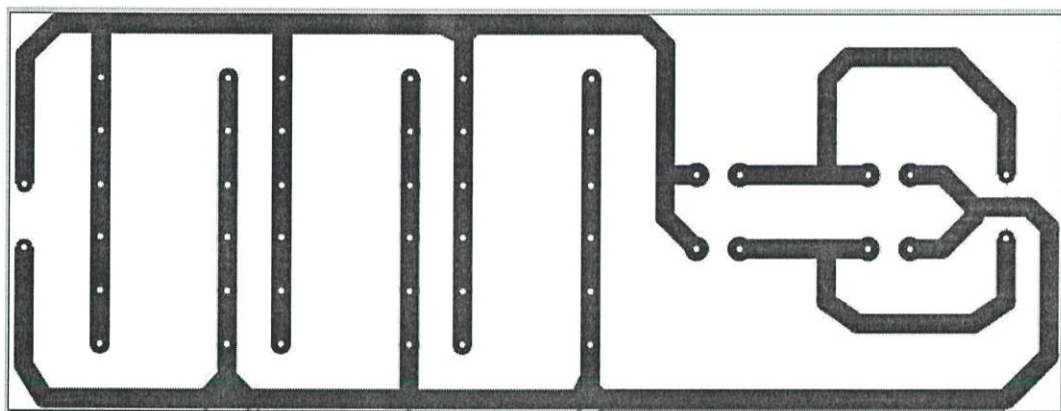
โครงสร้างของระบบการส่งกำลังไฟฟ้า



วงจร Simulation ใน MATLAB ของฝั่งส่งกำลังไฟฟ้า



ลายวงจรฝั่งส่ง



ลายวงจรฝั่งรับ

ภาคผนวก ข.

Source Code

```
/**
```

```
*****
```

```
* @file TIM/7PWM_Output/main.c
```

```
* @author MCD Application Team
```

```
* @version V3.5.0
```

```
* @date 08-April-2011
```

```
* @brief Main program body
```

```
*****
```

```
* @attention
```

```
*
```

```
* THE PRESENT FIRMWARE WHICH IS FOR GUIDANCE ONLY AIMS AT PROVIDING  
CUSTOMERS
```

```
* WITH CODING INFORMATION REGARDING THEIR PRODUCTS IN ORDER FOR THEM TO  
SAVE
```

```
* TIME. AS A RESULT, STMICROELECTRONICS SHALL NOT BE HELD LIABLE FOR ANY  
* DIRECT, INDIRECT OR CONSEQUENTIAL DAMAGES WITH RESPECT TO ANY CLAIMS  
ARISING
```

```
* FROM THE CONTENT OF SUCH FIRMWARE AND/OR THE USE MADE BY CUSTOMERS  
OF THE
```

```
* CODING INFORMATION CONTAINED HEREIN IN CONNECTION WITH THEIR  
PRODUCTS.
```

```
* Divider = Divider-2;CCR1_Val = CCR1_Val-1;
```

```
* <h2><center>&copy; COPYRIGHT 2011 STMicroelectronics</center></h2>
```

```

*****

*/

/* Includes -----*/

#include "stm32f10x.h"

/** @addtogroup STM32F10x_StdPeriph_Examples

* @{

*/

/** @addtogroup TIM_7PWM_Output

* @{

*/

/* Private typedef -----*/

/* Private define -----*/

/* Private macro -----*/

/* Private variables -----*/

TIM_TimeBaseInitTypeDef TIM_TimeBaseStructure;

TIM_OCInitTypeDef TIM_OCInitStructure;

TIM_BDTRInitTypeDef TIM_BDTRInitStructure;

GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;

uint16_t TimerPeriod = 0;

uint16_t PrescalerValue = 0;

/* Setting Frequency and DutyCycle*/

uint16_t Frequency=19500;

```

```
unsigned long i=-1;

uint16_t Divider;

uint16_t CCR1_Val;

uint16_t Deadtime = 10;

/* Private function prototypes -----*/

void RCC_Configuration(void);

void GPIO_Configuration(void);

/* Private functions -----*/

/**
 * @brief Main program
 * @param None
 * @retval None
 */

int main(void)

{

    Divider=24000000/Frequency;

    CCR1_Val=(Divider-2)/2;

    /* System Clocks Configuration */

    RCC_Configuration();

    /* GPIO Configuration */
```

```
GPIO_Configuration();

    PrescalerValue = (uint16_t) (SystemCoreClock / 24000000) - 1;

/* Time base configuration */

TIM_TimeBaseStructure.TIM_Period = Divider-1;

TIM_TimeBaseStructure.TIM_Prescaler = PrescalerValue;

TIM_TimeBaseStructure.TIM_ClockDivision = 0;

TIM_TimeBaseStructure.TIM_CounterMode = TIM_CounterMode_Down;

TIM_TimeBaseInit(TIM1, &TIM_TimeBaseStructure);

    TIM_OCInitStructure.TIM_OCMode = TIM_OCMode_PWM2;

TIM_OCInitStructure.TIM_OutputState = TIM_OutputState_Enable;

TIM_OCInitStructure.TIM_OutputNState = TIM_OutputNState_Enable;

TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR1_Val;

TIM_OCInitStructure.TIM_OCPolarity = TIM_OCPolarity_High;

TIM_OCInitStructure.TIM_OCNPolarity = TIM_OCNPolarity_High;

TIM_OCInitStructure.TIM_OCIdleState = TIM_OCIdleState_Set;

TIM_OCInitStructure.TIM_OCNIdleState = TIM_OCIdleState_Reset;

    .

TIM_OC1Init(TIM1, &TIM_OCInitStructure);

    /* Automatic Output enable, Break, dead time and lock configuration*/

TIM_BDTRInitStructure.TIM_OSSRState = TIM_OSSRState_Enable;

TIM_BDTRInitStructure.TIM_OSSIState = TIM_OSSIState_Enable;

TIM_BDTRInitStructure.TIM_LOCKLevel = TIM_LOCKLevel_1;
```

```

TIM_BDTRInitStructure.TIM_DeadTime = Deadtime;

TIM_BDTRInitStructure.TIM_Break = TIM_Break_Disable;

TIM_BDTRInitStructure.TIM_BreakPolarity = TIM_BreakPolarity_High;

TIM_BDTRInitStructure.TIM_AutomaticOutput = TIM_AutomaticOutput_Disable;

TIM_BDTRConfig(TIM1, &TIM_BDTRInitStructure);

TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR1_Val;

TIM_OC2Init(TIM1, &TIM_OCInitStructure);

/* TIM1 counter enable */

TIM_Cmd(TIM1, ENABLE);

/* TIM1 Main Output Enable */

TIM_CtrlPWMOutputs(TIM1, ENABLE);

////////////////////////////////////

while(1)

    while(i==0)

        {

if(Divider>960){i=30000;}

if(Divider>480&&Divider<=1200){i=200000;}

if(Divider<480){i=200000;}

        Divider=Divider-2;

        CCR1_Val=(Divider-2)/2;

TIM_TimeBaseStructure.TIM_Period = Divider-1;

```

```

TIM_TimeBaseInit(TIM1, &TIM_TimeBaseStructure);

TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR1_Val;

TIM_OC2Init(TIM1, &TIM_OCInitStructure);

}

i=i-0.0001;

}

}

/**
 * @brief Configures the different system clocks.
 * @param None
 * @retval None
 */

void RCC_Configuration(void)
{
    /* TIM1, GPIOA, GPIOB, GPIOE and AFIO clocks enable */

    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_TIM1, ENABLE);

        RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_GPIOA, ENABLE);
        RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_GPIOB, ENABLE);
        RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_GPIOC, ENABLE);
}

void GPIO_Configuration(void)
{

```

```
#ifndef STM32F10X_CL

    /* GPIOE Configuration: Channel 1/1N, 2/2N, 3/3N and 4 as alternate function push-
    pull */

#else

    /* GPIOA Configuration: Channel 1, 2 and 3 as alternate function push-pull */

    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_9 ;

    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF_PP;

    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;

    GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStructure);

    /* GPIOB Configuration: Channel 1N, 2N and 3N as alternate function push-pull */

    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_14 ;

        GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF_PP;

    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;

    GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStructure);

#endif

}
```

ภาคผนวก ค.

Paper Project

การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

Wireless Power Transmission for Electric Vehicle

ภัทรธร เผ่าจินดา ภาณุ มัทธวรรตน์ ภูธร สุขวณิช และ ราชการ สุวสุวรรณ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย คลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: ir4max@me.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้จะนำเสนอระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า ด้วยหลักการวงจรเรโซแนนซ์ และ ทฤษฎีการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ วงจรถูกออกแบบมาให้ทำการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นฟลักซ์แม่เหล็ก และ ส่งมัน ไปยังขดลวดรับ จากนั้นขดลวดรับก็จะเปลี่ยนฟลักซ์แม่เหล็กกลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ หลังจากที่ได้มีการพัฒนาระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสิ่งที่เป็นความท้าทายก็คือ การออกแบบให้ระบบนี้ ใช้งานได้ง่าย ปลอดภัย และได้มาตรฐานตามข้อกำหนดทางแม่เหล็กไฟฟ้า

คำสำคัญ : การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ , เรโซแนนซ์ , การเหนี่ยวนำ

Abstract

This paper presents to the Wireless Power Transmission for Electric Vehicle by using a basic principle of Faraday's Induction theory and resonance circuit. The developed prototype would convert the electricity energy to magnetic flux and it will travel to the receiver coil. Then receiver coil would convert the magnetic flux back to the electrical energy for charging battery. Since the wireless power transmission is applied to the developed prototype, the advantages of simple configuration and user friendly interface can be gained. In addition, safety and electromagnetic emission are considered in the proposed design.[4]

Keywords : Wireless Power Transmission ,Resonance Inductive Coupling

1.บทนำ

ทุกวันนี้ รถยนต์ไฟฟ้า(EV Car) เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับอนาคต เพราะว่ามันไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียมในการขับเคลื่อน

รถยนต์ไฟฟ้าทุกวันนี้เริ่มมีการใช้งานในเชิงพาณิชย์มากขึ้นจากปัญหาราคาน้ำมันที่สูงขึ้น และ รถยนต์ไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สะอาด โดยมันจะใช้พลังงานไฟฟ้ามาจากแบตเตอรี่ที่ต้องการการชาร์จด้วยการต่อสายไฟ ปัญหาที่มันไม่สะดวก และ ไม่สามารถชาร์จพลังงานขณะขับได้ เพื่อแก้ไขปัญหา เราได้พัฒนาระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายขึ้นมาเพื่อที่จะชาร์จแบตเตอรี่โดยไม่ต้องต่อสาย

หยานปิง เหยา, ฮองยาน ซาง, เซง เกง ทีมนักวิจัยจากCAS ปักกิ่ง, ประเทศจีน ประกาศว่าพวกเขาสามารถพัฒนาต้นแบบการชาร์จพลังงานไฟฟ้าไร้สาย ด้วยหลักการของ ควบคู่ทางแม่เหล็กที่สภาวะเรโซแนนซ์ พวกเขาสามารถชาร์จแบตเตอรี่ โทรศัพท์มือถือแบบไร้สาย แสดงถึงความเป็นไปได้ในการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายบนทฤษฎี ควบคู่ทางแม่เหล็กที่สภาวะเรโซแนนซ์ เขาสามารถชาร์จแบตเตอรี่ โทรศัพท์ โนเกีย 5130 แต่อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ของโทรศัพท์ที่มีขนาดเล็กกว่าแบตเตอรี่ของรถยนต์มาก ถ้าเราใช้การออกแบบแบบเดียวกันนี้มาใช้กับรถยนต์ ก็จะต้องใช้เวลานานมากในการชาร์จกว่าจะเต็ม

ปีเตอร์ฟิชเชอร์, โรเบิร์ตมอฟเฟตต์, มาริน โซลจาซิก, อังเดรย์เคอส์, จอห์น โจนโนโมปูลอสและ อริสทิดิส คาราลิส ทีมนักวิจัยจาก MIT ประกาศว่า พวกเขาประสบความสำเร็จในการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายผ่านอากาศไปยังโหนดที่ห่างออกไปไกล 2 เมตร ซึ่งเป็นหลอดไฟขนาด 60 วัตต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณ 60% หลักการที่พวกเขาใช้ก็คือ การกลับปลิงที่สภาวะเรโซแนนซ์ ระหว่างขดลวด 2 ขด ที่ความถี่เรโซแนนซ์ประมาณ 10 เมกะเฮิรตซ์ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ก็ยังไม่มีความสามารถเพียงพอที่จะนำไปใช้กับรถยนต์ไฟฟ้าได้

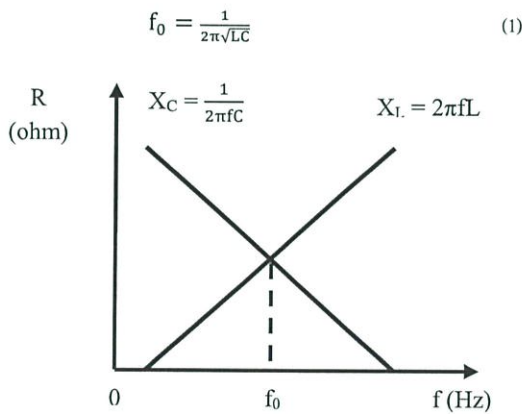
นากาซูกะ, อารา, คานะโกะ, อาเบะ และยาซูกะ ทีมนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยไซตามะ ประเทศญี่ปุ่น ประกาศว่า พวกเขาประสบความสำเร็จในการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายไปยังโหนดด้วยกำลังไฟฟ้า 1500 วัตต์ พวกเขามีเทคโนโลยีสองอย่างที่นำมาใช้ เทคโนโลยีแรกคือ การกำหนดค่าตัวเก็บประจุที่สภาวะเรโซแนนซ์ โดยตัวเก็บประจุที่ฝั่งส่งจะต่อแบบอนุกรม ส่วนตัวเก็บประจุที่ฝั่งรับจะต่อแบบขนาน ส่วนเทคโนโลยีที่สองคือ หม้อแปลงที่ขดลวดทั้งสองขดพันรอบแกนสี่เหลี่ยม

เพราะฉะนั้นจุดประสงค์ของเราคือ การพัฒนาให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นจนสามารถนำไปใช้กับรถยนต์ไฟฟ้าได้ เพื่อการลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเรโซแนนซ์ระหว่างด้านส่งและด้านรับ

วงจรเรโซแนนซ์ประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุกับขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งมีผลต่อไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจรเรโซแนนซ์ ไม่ว่าจะจรจะคอบแบบอนุกรมหรือขนาน ผลก็คือถ้าค่าความถี่สูงค่า X_C จะมากและค่า X_L จะต่ำ ซึ่งสวนทางกัน ดังนั้นค่าความถี่ที่ทำให้ X_L และ X_C มีค่าเท่ากัน ค่าความถี่นั้นคือค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_0) [1]

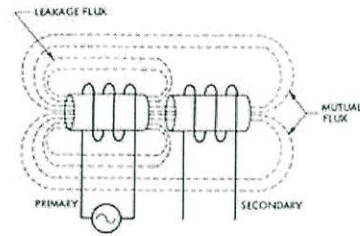


รูปที่ 1 ผลของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่อกระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ

เมื่อความถี่เรโซแนนซ์ของด้านส่งและฝั่งรับนั้นมีค่าเท่ากัน จะเกิดการถ่ายเทพลังงานจากฝั่งส่งไปยังฝั่งรับผ่านอากาศโดยผ่านการเหนี่ยวนำของขดลวด

2.2 การเหนี่ยวนำของขดลวดในการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ

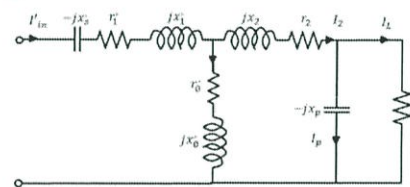
ในการเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสจ่ายให้กับขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด เกิดเป็นพลังงานแม่เหล็ก ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กก็จะคล้องผ่านขดลวดอีกฝั่ง คือเกิดฟลักซ์เกี่ยวคล้องกันทำให้สามารถเหนี่ยวนำให้อีกฝั่งเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นมาไหลไปยังโหลดที่เราต้องการหรือสามารถนำไปประจุให้กับแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าได้



รูปที่ 2 การเกิดฟลักซ์เกี่ยวคล้องในขดลวด

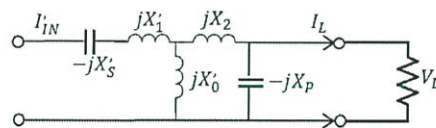
สำหรับแกนของขดลวดนั้นมีอยู่หลายประเภท เช่น แกนอากาศ แกนเฟอร์ไรท์ถ้าเป็นแกนอากาศ จะเกิดการเหนี่ยวนำน้อยกว่าชนิดอื่นเนื่องจากค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กมีน้อยจึงใช้แกนชนิดที่มีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กมากกว่า เช่น แกนเฟอร์ไรท์

2.3 วงจรสมมูลของวงจรส่ง และ วงจรรับ



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของระบบส่งไฟฟ้าแบบไร้สาย

จากรูปที่ 3 แสดงถึงวงจรสมมูลของระบบที่ความถี่เรโซแนนท์และพบว่า ความต้านทานขดลวด r_1 , r_2 และ ความต้านทานสูญเสียในแกนเฟอร์ไรท์มีค่าน้อยกว่า ความต้านทานร่วม x_0 และ ความต้านทานรั่วไหล x_2 ดังนั้นเราจึงวาดวงจรสมมูลขึ้นมาใหม่แบบง่ายๆตามรูปที่ 4 [9]



รูปที่ 4 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

ประสิทธิภาพของวงจร (η) คือ [3],[11],[13]

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + \frac{r_1'}{b^2} + r_2 \left[1 + \left(\frac{R_L}{x_p} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

และจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อ $R_L = R_{Lmax}$ [3],[11],[13]

$$R_{Lmax} = x_p \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r_1'}{r_2} + 1} \quad (3)$$

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{2r_2}{x_p} \sqrt{\frac{1}{b^2 r_2^2} + 1}} \quad (4)$$

$$b = \frac{x'_0}{x'_0 + x_2} \quad (5)$$

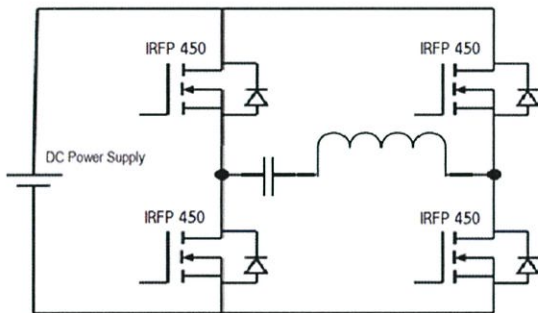
3. การออกแบบการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ

3.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

เราทำการแปลงกระแสไฟฟ้าสลับ 220 โวลท์ ไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งประกอบไปด้วย บริดจ์ไดโอด กับ ตัวเก็บประจุ 2200 ไมโครฟารัด

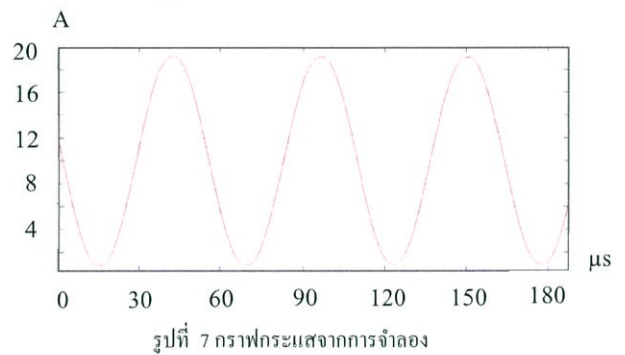
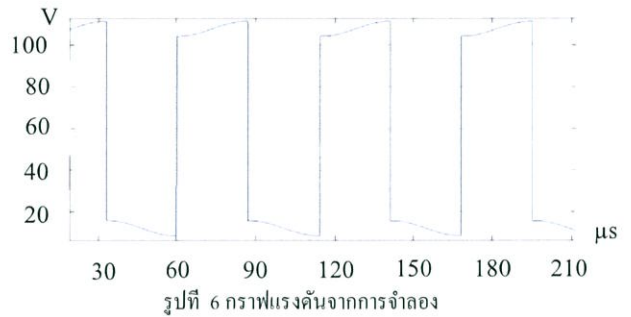
3.2 อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

เราใช้มอสเฟตจำนวน 4 ตัว เพื่อที่จะแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง เพื่อที่จะจ่ายให้กับขดลวดส่ง ในรูปแบบของกราฟรูปคลื่นสี่เหลี่ยม [6],[7],[8]



รูปที่ 5 วงจรอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 5 หลักการที่ใช้ในการออกแบบอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ประกอบไปด้วยการใช้หม้อแปลง 220/18 โวลท์ ไอซีเบอร์ 7815 สำหรับเรกูเลเตอร์แรงดัน 5 โวลท์ สำหรับจ่ายให้ออฟโต ที่แอลพี 250 และ ไอซีเบอร์ 7905 จะเรกูเลเตอร์ แรงดัน -5 โวลท์ สำหรับจ่ายให้ออฟโต ที่แอลพี 250 และ มอสเฟตเบอร์ ไออาร์เอฟพี 450 สำหรับสวิทซ์ความถี่สูง ออฟโต ที่แอลพี 250 สำหรับขับเกต และ อาร์เอ็ม เอสทีเอ็ม 32วีแอลคิสคัพเวอร์รี่ สำหรับสร้างสัญญาณ พีคดับลิวเอ็ม ผลการจำลองอยู่ในรูปที่ 6 และ 7



3.3 การออกแบบขดลวดฝั่งรับ และ ส่ง

สำหรับขดลวดฝั่งส่ง ขดลวดจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นมาเพื่อส่งพลังงานไปยังขดลวดรับโดยใช้แกนเฟอร์ไรท์ และ เราเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 0.19 มิลลิเฮนรี่ ต่อแบบอนุกรม และ ตัวเก็บประจุขนาด 180 นาโนฟารัด [12]

และสำหรับขดลวดฝั่งรับ ขดลวดจะได้รับเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจำนวนมากจากขดลวดอีกอัน และ มันจะทำการเปลี่ยนเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานไฟฟ้า [12]

จาก

$$L = \frac{(NR)^2}{8R + 11W} \mu H \quad (6)$$

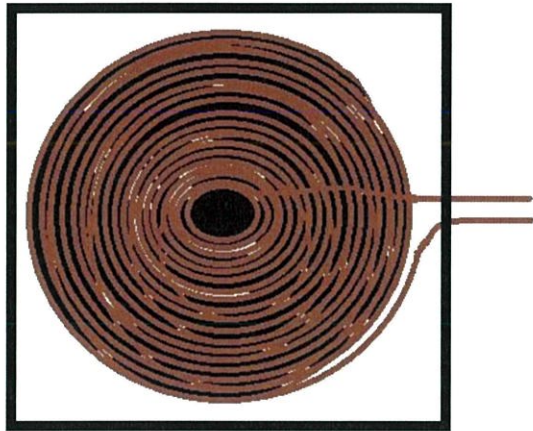
โดย

L = ความเหนี่ยวนำของขดลวด มีหน่วยเป็น ไมโครเฮนรี่

R = รัศมีของขดลวด มีหน่วยเป็นนิ้ว

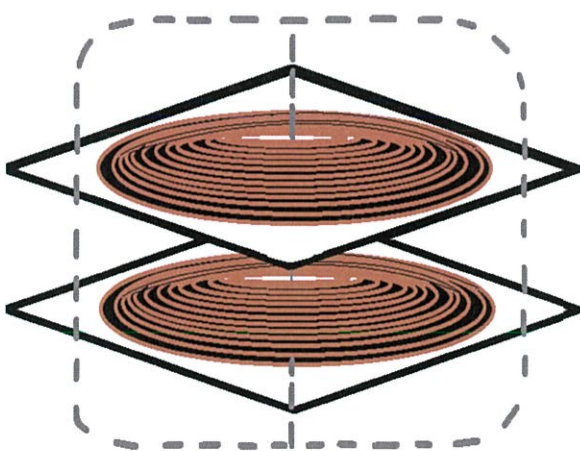
N = จำนวนรอบ

W = ความกว้างของขดลวด มีหน่วยเป็นนิ้ว

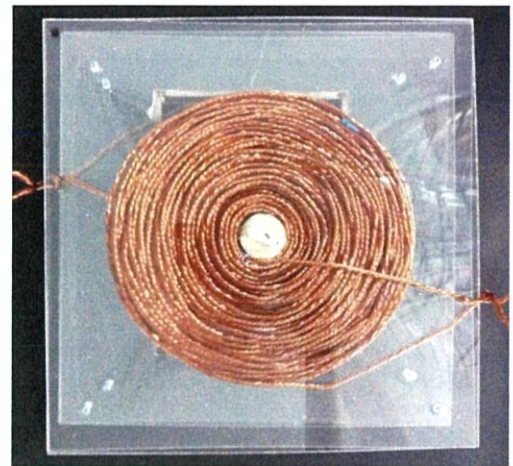


รูปที่ 8 ขดลวดฝั่งรับ และ ส่ง ที่ออกแบบ

เราได้ออกแบบขดลวดทั้งสองฝั่งในรูปแบบของกันหอยรวมทั้งมีการใช้แกนเฟอร์ไรท์เพื่อลดฟลักซ์รั่วไหล(Leakage flux) ชนิดของตัวนำเราเลือกใช้ลวดทองแดงแบบตีเกลียวประกอบไปด้วย 10 วงจรขนาน เพื่อลดความสูญเสียจากความต้านทานในลวดตัวนำ[12],[14]



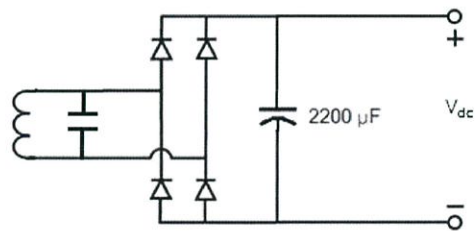
รูปที่ 9 การเคลื่อนที่ของฟลักซ์แม่เหล็กระหว่างขดลวดทั้งสองขด



รูปที่ 10 ขดลวดที่ประกอบไปด้วยแกนเฟอร์ไรท์

3.4 การชาร์จแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

วงจรเรียงกระแสถือเป็นส่วนต่อไปของวงจรฝั่งรับเพื่อที่จะเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้รับมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 11 ขดลวดฝั่งรับเมื่อต่อกับวงจรเรียงกระแส

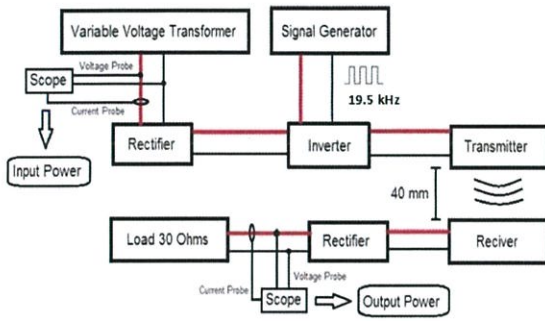
เนื่องจากที่ขดลวดฝั่งรับอาจมีแรงดันสูงถึง 400 โวลท์ หรือมากกว่า ซึ่งสูงเกินไปสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ จึงต้องถูกลดระดับแรงดันลงก่อนชาร์จเข้าแบตเตอรี่

4. ผลจากการทดลอง

ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายอาจจะหาได้จากประสิทธิภาพของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย จากระยะทางการส่งกำลังไฟฟ้า และ ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ส่งได้ ซึ่งระบบที่ได้ออกแบบมานั้นสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ถึง 504.18 วัตต์ ด้วยระยะทาง 4 เซนติเมตร ประสิทธิภาพ 72.98%

A.การติดตั้งการทดลอง

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายได้ถูกติดตั้งเพื่อทดสอบตามรูปที่ 12



รูปที่ 12 การติดตั้งจํวางอุปกรณ์เพื่อการทดสอบ

B.ผลการทดลอง

สำหรับการหาประสิทธิภาพของระบบ เราได้ใช้เพนเวอร์มิเตอร์ ที่ผ่านการเทียบวัดแล้ว กำลังไฟที่เราจ่ายเข้าจาก หม้อแปลงชนิดปรับ แท็บ ได้จำนวน 811.29 วัตต์ และ ได้รับพลังงานไฟฟ้าจากขดลวดรับ จำนวน 504.18 วัตต์ ที่ระยะทาง 4 เซนติเมตร

After warm up this system (20 mins) : Core 40 °C , Coil 50 °C

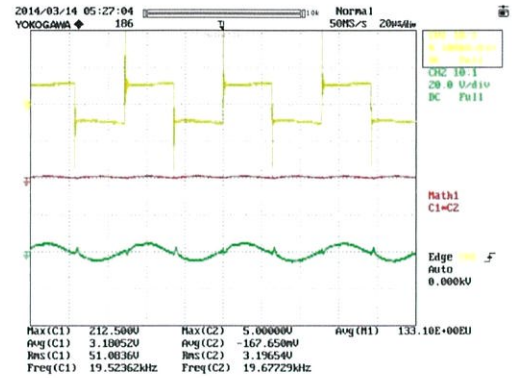
Vdc is monitored by Scope(500 W) : 512.2 V

$$\text{Efficiency (\%)} = P_{\text{out}} / P_{\text{in}} [13]$$

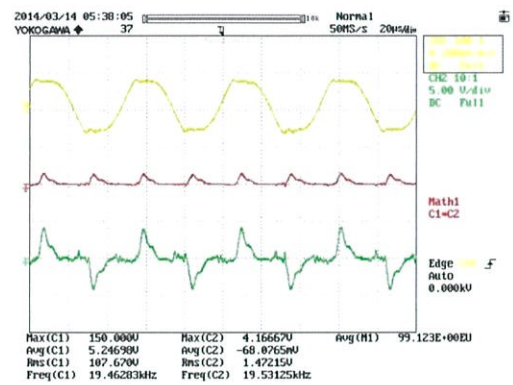
Input					
Power (W)	139.38	254.42	388.68	525.36	690.83
Output					
Power (W)	100.38	202.95	301.48	403.57	504.18
Efficiency					
(%)	72.02	79.77	77.57	76.82	72.98

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนกำลังไฟฟ้าขาเข้า กำลังไฟฟ้าที่ได้รับ ประสิทธิภาพ ที่ระยะทาง 4 เซนติเมตร

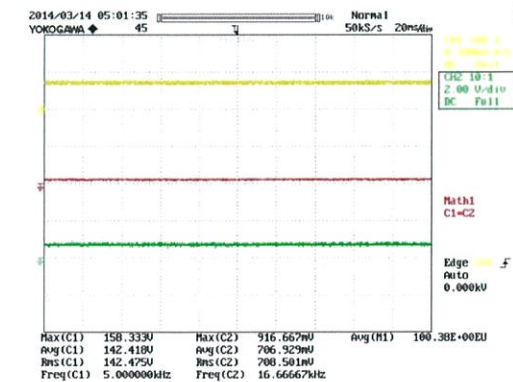
ตารางที่ 1 ได้มาจากการทดลอง โดยตารางนี้จะแสดง ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังไฟฟ้าขาเข้า กำลังไฟฟ้าที่ได้รับจาก ขดลวดรับ และ ประสิทธิภาพของระบบ ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้คือ 0.19 มิลลิ เฮนรี่ ตัวเก็บประจุ 180 นาโนฟารัด ความถี่เรโซแนนท์ที่ตัวเก็บประจุและ ตัวเหนี่ยวนำคือ 19.5 กิโลเฮิร์ตซ์ ระยะห่างระหว่างขดลวดรับและส่งมี ระยะทาง4 เซนติเมตร



รูปที่ 13 รูปสัญญาณจากอินเวอร์เตอร์



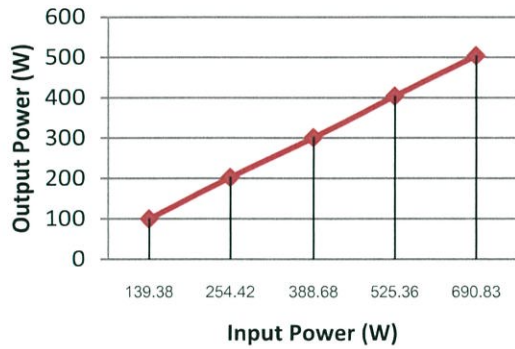
รูปที่ 14 รูปสัญญาณจากขดลวดฝั่งรับ



รูปที่ 15 รูปสัญญาณของโหลด 30 โอห์ม

รูปที่13-15 แสดงรูปแบบสัญญาณแต่ละอย่างของระบบ แกนเอ็กซ์ คือ เวลา แกนวาย ในรูปที่ 13 แสดงแรงดัน กระแส และ กำลังไฟฟ้าตกคร่อม ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ที่ขดลวดฝั่งส่ง ตามลำดับ รูปคลื่นสัญญาณของ

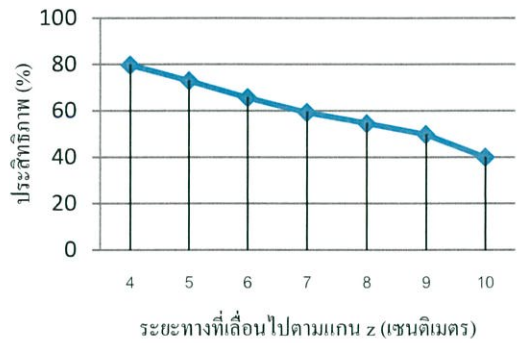
อินเวอร์เตอร์ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 14 แสดง แรงดัน กระแส และ กำลังไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดฝั่งรับ จะสังเกตได้ว่า รูปสัญญาณทุกอย่าง อยู่ในรูปแบบไซน์ซอซอคัล และ ในรูปที่ 15 แสดง แรงดัน กระแส และ กำลังไฟฟ้าตกคร่อมโหลดความต้านทาน 30 โอห์ม



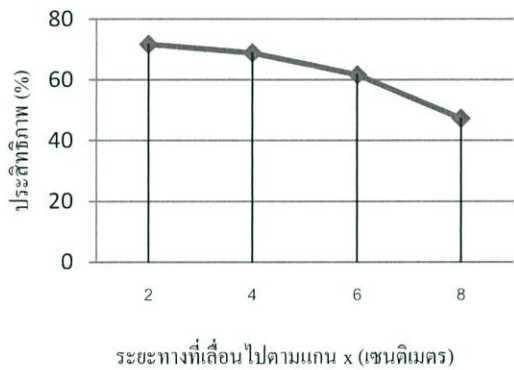
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังไฟฟ้าเข้า กับ กำลังไฟฟ้าออกที่ ระยะห่าง 4 เซนติเมตร



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าออก กับ ประสิทธิภาพ ที่ ระยะห่าง 4 เซนติเมตร



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างในแนวแกน Z กับ ประสิทธิภาพ



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างตามแนวแกน X กับ ประสิทธิภาพ

5.สรุปผลการทดลอง

ในอนาคตอันใกล้เชื้อเพลิงฟอสซิลแบบดั้งเดิมจะไม่เพียงพอสำหรับประชากร ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญ รถยนต์หลายคันได้มีการนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ในการขับเคลื่อน และ เราจะสามารถชาร์จรถยนต์เหล่านั้นด้วยระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย จากผลการทดลองของเราพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายผ่านอากาศไปยังแบตเตอรี่ของรถยนต์ โดยตัวแปรต่างๆในการทดลองได้แก่ความถี่,ตัวเหนี่ยวนำ,ตัวเก็บประจุ,การแมตชิงอิมพีแดนซ์,การเปลี่ยนแปลงของโหลด ประสิทธิภาพของระบบจะขึ้นอยู่กับวงจรเรโซแนนซ์ของขดลวด ประสิทธิภาพที่จุดสูงสุดมีค่า 79.77% ด้วยระยะแกน 4 เซนติเมตร แสดงว่า ผลการทดลองที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับทฤษฎีที่ใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Werachet Khan-Ngern and Wutthiphol Tharatceeraset, 9th published , 162 Moo 4 Ratphathana Rd, Bangpakok Ratburana Bangkok 10140 : VJ Printing Limited part , 2009
- [2] S. Sheik Mohammed, K. Ramasamy and T. Shanmuganatham, "Wireless Power Transmission – A Next Generation Power Transmission System", International Journal of Computer Applications (0975-8887), Vol. 1 No.13, 2012, pp. 100-103.
- [3] Hiroya Takanashi, Yukiya Sato, Yasuyoshi Kaneko, Shigeru Abe and Tomio Yasuda, "A large air gap 3 kW wireless power transfer system for electric vehicles", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE., 2012, pp. 269-274.
- [4] Ki Young Kim, " Wireless Power Transfer – Principles and Engineering Explorations ", Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, Intech, 2012.
- [5] H. Zenkner and W. Khan-ngern, "High Power Density and High Efficient Wireless Energy Transfer by Resonance Coupling", Electrical Engineering /Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2010 International Conference on., 2010, pp. 1281-1284
- [6] Dr. Morris Kesler, "Highly Resonant Wireless Power Transfer : Safe, Efficient, and over Distance", Witricity Corporation Magazine, 2013, pp. 1-32
- [7] B.-J. Jang, S. Lee, and H. Yoon, "HF-BAND WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM : CONCEPT, ISSUES, AND DESIGN", Progress In Electromagnetics Research, Vol. 124, No.211-231, 2012, pp. 1-21
- [8] A. James Swart, H. Christo vZ. Pienaar and Mike J. Case, "A Radio Frequency Mosfet driver", AFRICON, 2004. 7th AFRICON Conference in Africa, Vol. 1, 2004, pp. 543-546
- [9] Yanping Yao ; Hongyan Zhang ; Zheng Geng , "Wireless charger prototype based on strong coupled magnetic resonance",Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011 International Conference , Vol.5 , 2011 , pp. 2252-2254
- [10] Kawamura , Y.; Shoyama, M., "Wireless power transmission using LC cancellation", ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 IEEE., 2013, pp. 1041-1045
- [11] Moshfegh, J. ; Shahabadi, M. ; Rashed-Mohassel, J., "Conditions of maximum efficiency for wireless power transfer between two helical wires", Microwaves, Antennas & Propagation , IET, Vol.5, 2011, pp. 545-550
- [12] Jiseong Kim ; Jonghoon Kim ; Sunkyu Kong ; Hongseok Kim ; In-Soo Suh ; Nam Pyo Suh ; Dong-Ho Cho ; Joungho Kim ; Seungyoung AHn. "Coil Design and Shielding Methods for a Magnetic Resonant Wireless Power Transfer System", Proceedings of the IEEE, Vol.101, 2013, pp. 1332-1342.
- [13] JinWook Kim ; Hyeon-Chang Son ; Kwan-Ho Kim ; Young-Jin Park, "Efficiency Analysis of Magnetic Resonance Wireless Power Transfer With Intermediate Resonant Coil", Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, Vol.10, 2011, pp. 389-392.
- [14] Dukju Ahn ; Songcheol Hong , "A Transmitter or a Receiver Consisting of Two Strongly Coupled Resonators for Enhanced Resonant Coupling in Wireless Power Transfer", Industrial Electronics, IEEE Transactions, Vol.61, Issue 3, 2014, pp. 1193-1203.
- [15] Di Tommaso, A.O.; Genduso, F.; Miceli, R., "A small power transmission prototype for electric vehicle wireless battery charge applications", Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012 International Conference, 2012, pp. 1-6.

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ - นามสกุล นายภัทรธร เผ่าจินดา
 วันเดือนปีเกิด 31 มีนาคม พ.ศ. 2535
 ที่อยู่ 62 สุขุมวิท 62 แยก 7 แขวงบางจาก
 เขตพระโขนง กรุงเทพมหานคร 10260

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2552	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพระโขนงพิทยาลัย
ฝึกงานภาคฤดูร้อน	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2556 ถึง 31 พ.ค.2556

ประวัติผู้เขียน (ต่อ)



ชื่อ - นามสกุล นายภาณุ มัทธวรรค์

วันเดือนปีเกิด 11 ตุลาคม พ.ศ. 2534

ที่อยู่ 19/5 ม.1 ตำบลไม้งาม อำเภอมือง
จังหวัดตาก 63000

ประวัติการศึกษา

- | | |
|------------------|---|
| ปีการศึกษา 2556 | สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ปีการศึกษา 2552 | สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
โรงเรียนผดุงปัญญา |
| ฝึกงานภาคฤดูร้อน | การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2556 ถึง 31 พ.ค.2556 |

ประวัติผู้เขียน (ต่อ)



ชื่อ - นามสกุล นายภูธร สุขวณิช

วันเดือนปีเกิด 9 ตุลาคม พ.ศ. 2535

ที่อยู่ 701/22 ซอยกม.24 ถนนพหลโยธิน สายไหม
กรุงเทพมหานคร 10220

ประวัติการศึกษา

- | | |
|------------------|---|
| ปีการศึกษา 2556 | สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ปีการศึกษา 2552 | สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
โรงเรียนสารวิทยา |
| ฝึกงานภาคฤดูร้อน | การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2556 ถึง 31 พ.ค.2556 |

ประวัติผู้เขียน (ต่อ)



ชื่อ-นามสกุล นายราชการ สวจสุวรรณ

วัน เดือน ปีเกิด 15 ธันวาคม พ.ศ.2534

ที่อยู่ 25 ถนนสร้อยสุวรรณ

ตำบลวัดใหม่ อำเภอเมือง

จังหวัดจันทบุรี 22000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2552	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีมารดาพิทักษ์ จังหวัดจันทบุรี
ฝึกงานภาคฤดูร้อน	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ฝ่ายก่อสร้างระบบส่ง กองติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า ระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2556 ถึง 31 พ.ค.2556