

การศึกษาและพัฒนาเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก

DESIGN AND DEVELOPMENT OF WIRELESS CHARGERS FOR SMALL
ELECTRIC VEHICLES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND DEVELOPMENT OF WIRELESS CHARGERS FOR SMALL ELECTRIC VEHICLES

TREECHANON PANYACHUN

TINNAPOB WATTANAPANICH

TANTHAI THEPSATTRA

THANAPON KORANEEKIT



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT

FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2565

การศึกษาและพัฒนาเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก

DESIGN AND DEVELOPMENT OF WIRELESS CHARGERS FOR SMALL ELECTRIC VEHICLES



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สันฐิติ อยู่มาก

รองศาสตราจารย์ ดร. อรรถพล เเงาพิทักษ์กุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2565

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาและพัฒนาเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก

ผู้จัดทำ

1. นาย ตรีชนน ปัญญาชุณห
2. นาย ตินณภพ วัฒนพานิช
3. นาย แทนไท เทพศาสตรา
4. นาย ธนพล กรณีกิจ



สัณฐิติ อยู่มาก

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.สัณฐิติ อยู่มาก)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรรถพล เเงาพิทักษ์กุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและพัฒนาเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก

นาย ตรีชนน ปัญญาชนท์

นาย ดิณณภพ วัฒนพานิช

นาย แทนไท เทพศาสตรา

นาย ธนพล กรณีกิจ

ดร.สันฐิติ อยู่มาก อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาและพัฒนาเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับแบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 72 V โดยการอัดประจุของยานยนต์ไฟฟ้าขณะอยู่หนึ่งชั้นต้นจะทำการออกแบบและจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink โดยวงจรแบ่งการออกแบบเป็น 3 ส่วนสำคัญคือ 1. วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย (Transmitter Circuit) 2. วงจรรับกำลังและชาร์จประจุแบตเตอรี่ (Receiver and Charger Circuit) และ 3. การจำลองการเกิดความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดส่ง (Magnetic Circuit and Mutual Inductance) จากนั้นสร้างวงจรจริงตามทีออกแบบไว้ และทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการส่งกำลัง พบว่าระยะห่างระหว่างขดลวด 10 เซนติเมตร เป็นระยะที่เหมาะสมในการออกแบบเครื่องอัดประจุไร้สายเพื่อให้ยานยนต์ขนาดเล็กสามารถชาร์จได้และให้ประสิทธิภาพที่สูงโดยมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากต้นทางที่พิจารณา คือ DC link สู่ปลายทาง DC Charger อยู่ที่ 75.31 % การสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

Design and development of wireless chargers for small electric vehicles

Mr. Treechanon Panyachun

Mr. Tinnapob Wattanapanich

Mr. Tanthai Thepsattra

Mr. Thanapon Koraneeekit

Dr. Suntiti Youmak advisor

Assoc. Prof. Dr. Atthapol Ngaopitakkul Associate advisor

ABSTRACT

This thesis aims to study and develop a wireless charger for a small electric vehicle with a battery voltage of 72 V. Initially, charging of the electric vehicle while at a standstill will be designed and simulated using the MATLAB Simulink program. The circuit design is divided into 3 important parts: 1) the wireless power transmission circuit (transmitter circuit), 2) the receiver and charger circuit, and 3) simulation of mutual inductance between coils to analyze the transmission efficiency. After designing the transmitter (magnetic circuit and mutual inductance), the actual circuit will be built as designed, and the transmission efficiency will be analyzed. It was found that the distance between the coils of 10 centimeters is an appropriate distance to design a wireless charger for small vehicles to be able to charge and provide high efficiency with the efficiency of transmitting power from the considered source, which is the DC link to The DC Charger endpoint is at 75.31 %. Most of the power loss occurs in power electronic devices.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความเมตตาและการช่วยเหลือจากหลายท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล และ ดร. สันฐิติ อยู่มาก อาจารย์ที่ปรึกษา ที่อนุมติเห็นชอบให้จัดทำโครงการวิศวกรรมและได้กรุณาให้ความรู้ข้อแนะนำ รวมทั้งข้อคิดเห็นเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการวิจัยในครั้งนี้ด้วยดีตลอดมา ทั้งยังได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข ปริญญานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณนายสันติพนธ์ อนันต์วัฒนาพร และนายณัฐนนท์ พันธุ์นิล ที่คอยให้คำปรึกษาเรื่องการทำโครงการวิศวกรรมครั้งนี้ และคอยช่วยเหลือในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการทำโครงการวิศวกรรมครั้งนี้

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการให้ข้อมูลและความรู้ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หัวข้อที่	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	4
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	5
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	5
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	6
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	8
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 หลักการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า	10
2.1.1 สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation)	10
2.1.2 ขดลวดส่งกำลัง	11
2.1.3 ขดลวดรับกำลัง	12
2.1.4 การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศโดยใช้วงจรเรโซแนนซ์	13
2.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์	14
2.2.1 วงจรเรียงกระแสประเภทเรียงกระแสเต็มคลื่น	14
2.2.1.1 วงจรเรียงกระแสแบบไม่ใช้สัญญาณกระตุ้น (passive rectifier)	15
2.2.1.2 วงจรเรียงกระแสแบบใช้สัญญาณกระตุ้น (active rectifier)	15
2.2.2 วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์	18
2.2.2.1 หลักการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์	19
2.2.2.2 อัตราการขยายแรงดันของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์	21
2.2.2.3 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์	22
2.2.2.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก	23

2.2.3	วงจรอินเวอร์เตอร์	24
2.2.3.1	วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์	24
2.2.3.2	อินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสี่เหลี่ยม (The Square-Wave Inverter)	26
2.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย	29
2.3.1	การวิเคราะห์ความไวของความเหนี่ยวนำร่วม	31
2.3.2	การวิเคราะห์ความไวของความเร็วในการใช้งาน	31
2.3.3	การวิเคราะห์ความไวของความต้านทานโหลด	32
บทที่ 3	การออกแบบของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย	33
	ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink	
3.1	การออกแบบของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย	34
	ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink	
3.1.1	วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย	34
3.1.2	วงจรรับกำลังไฟฟ้าไร้สาย	35
3.1.3	ขดลวดส่งกำลังและขดลวดรับกำลัง	36
3.2	ผลการจำลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย	38
	โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink	
บทที่ 4	ผลการทดลอง	45
4.1	การสร้างวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย	45
4.1.1	การประกอบสร้างวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย	45
4.1.2	การประกอบสร้างวงจรรับกำลังไฟฟ้าและชาร์จประจุแบตเตอรี่	45
4.1.3	การประกอบสร้างขดลวดส่งและรับกำลังไฟฟ้า	47
4.2	ผลการทดลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย	49
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง	57
5.1	สรุปผลการทดลอง	57
5.1.1	การจำลองวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย	57
	ผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink	
5.1.2	การทดลองวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย	58
5.2	ข้อเสนอแนะ	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ค่าฝุ่นเกินขนาดมาตรฐานหลายจุดในกรุงเทพมหานคร	2
1.2 ตัวอย่างควันจากยานยนต์ซึ่งเป็นปัญหาหลักในการเกิด PM 2.5 ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศ	2
1.3 ยานยนต์ EV มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และประเทศที่เปลี่ยนมาใช้ยานยนต์ EV	3
1.4 คนกรุง 60 % ยอมรับยานยนต์ EV	3
2.1 แผนภาพการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	12
2.2 การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศโดยใช้วงจรเรโซแนนซ์	13
2.3 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นและสัญญาณแรงดันขาออก	14
2.4 วงจรเรียงกระแสแบบไม่ใช้สัญญาณกระตุ้น	15
2.5 อุปกรณ์สวิตซ์ SCR	15
2.6 วงจรเรียงกระแสโดยใช้ SCR	16
2.7 อุปกรณ์สวิตซ์ MOSFET	16
2.8 อุปกรณ์สวิตซ์ IGBT	16
2.9 วงจรเรียงกระแสโดยใช้ MOSFET	17
2.10 วงจรเรียงกระแสสามเฟสโดยใช้ IGBT	17
2.11 สัญญาณ PWM ในแต่ละค่าดิวิตีไซเคิล	18
2.12 วงจรบู้คคอนเวอร์เตอร์	19
2.13 วงจรสมมูลเมื่อสวิตซ์นำกระแส	19
2.14 วงจรสมมูลเมื่อสวิตซ์หยุดนำกระแส	20
2.15 รูปคลื่นการทำงานของบู้คคอนเวอร์เตอร์ แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ	22
2.16 กระแสตัวเก็บประจุและระลอกคลื่นแรงดันด้านออก	23
2.17 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์	24
2.18 (a) วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์, (b) S1 และ S2 ปิด; (c) S3 และ S4 ปิด; (d) S1 และ S3 ปิด; (e) S2 และ S4 ปิด	25
2.19 แรงดันเอาต์พุตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและรูปคลื่นกระแสโหลด RL ในสภาวะคงตัว	27
2.20 วงจรสมมูลระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย	29
2.21 องค์ประกอบทางไฟฟ้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย	39

3.1	แผนผังวงจรของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายและ การชาร์จประจุขณะยานยนต์หยุดนิ่ง	33
3.2	แผนผังวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย	34
3.3	วงจร AC-DC-AC Converter	34
3.4	วงจรรับกำลังไฟฟ้าไร้สาย	35
3.5	คลื่นแม่เหล็กความถี่สูงโดยใช้วงจรเรโซแนนซ์	36
3.6	วงจรสมมุติระบบชาร์จไร้สาย	37
3.7	การจำลองการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ	38
3.8	พารามิเตอร์ในการจำลองที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 5 เซนติเมตร	38
3.9	พารามิเตอร์ในการจำลองที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 10 เซนติเมตร	39
3.10	พารามิเตอร์ในการจำลองที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 15 เซนติเมตร	40
3.11	พารามิเตอร์ในการจำลองที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 20 เซนติเมตร	41
3.12	กราฟระหว่างประสิทธิภาพในการส่งกำลังไฟฟ้าที่ระยะต่างๆ	42
3.13	รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน 3-phase source 50Hz 380 V	43
3.14	รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน DC link	43
3.15	รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน LC Resonance Transmitter Coil	43
3.16	รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน LC Resonance Receiver Coil	44
3.17	รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน DC Charger	44
4.1	วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย	45
4.2	วงจร LC เรโซแนนซ์สำหรับส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ	46
4.3	วงจรรับกำลังไฟฟ้า	46
4.4	วงจร LC เรโซแนนซ์สำหรับรับกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ	47
4.5	ค่า L ของขดลวดส่ง (Transmitter Coil)	47
4.6	ค่า L ของขดลวดรับ (Receiver Coil)	48
4.7	การประกบขดลวดส่งและรับกำลังไฟฟ้า	48
4.8	การเกิดความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดส่งและรับกำลังไฟฟ้า	49
4.9	การทดลองวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 5 เซนติเมตร	50
4.10	การทดลองวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 10 เซนติเมตร	51
4.11	การทดลองวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 15 เซนติเมตร	52
4.12	การทดลองวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 20 เซนติเมตร	53
4.13	กราฟระหว่างประสิทธิภาพในการส่งกำลังไฟฟ้าที่ระยะต่างๆ	54
4.14	Variac ปรับแรงดันตั้งแต่ 0-70 V เข้าสู่วงจรทดสอบ	54
4.15	การทดสอบวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย	55

4.16	แผงหลอดไฟที่ต่อเข้ากับวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายขณะทดสอบ	55
4.17	กราฟแรงดันและกระแสของขดลวดส่งกำลัง ขนาดกระแส 0.320 A _{p-p}	56
4.18	กราฟแรงดันและกระแสของขดลวดส่งกำลัง ขนาดกระแส 0.576 A _{p-p}	56
4.19	กราฟกระแสของขดลวดส่งกำลัง ขนาดกระแส 2.14 A _{p-p}	56



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ลำดับการปฏิบัติงานวิจัย	8
2.1 แรงดันเอาต์พุตของการทำงานร่วมกันของสวิตช์แต่ละตัว	25
3.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 380 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 5 เซนติเมตร	39
3.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 380 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 10 เซนติเมตร	40
3.3 ผลการจำลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 380 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 15 เซนติเมตร	41
3.4 ผลการจำลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 380 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 20 เซนติเมตร	42
4.1 ผลการทดลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย ที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 0-70 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 5 เซนติเมตร	50
4.2 ผลการทดลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย ที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 0-70 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 10 เซนติเมตร	51
4.3 ผลการทดลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย ที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 0-70 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 15 เซนติเมตร	52
4.4 ผลการทดลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย ที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 0-70 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 20 เซนติเมตร	53

บทที่ 1

บทนำ

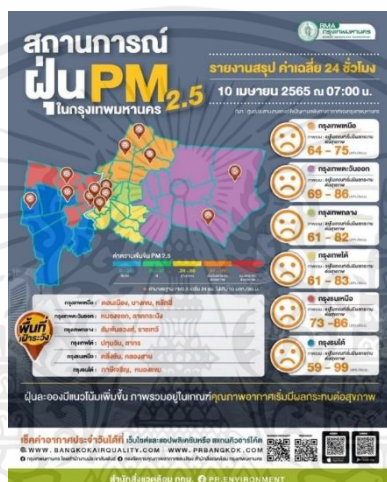
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันราคาน้ำมันที่แพงขึ้นเรื่อย ๆ และยานยนต์ไฟฟ้ารุ่นใหม่จากหลายแบรนด์ที่ทยอยเปิดตัวมา ช่วยกระตุ้นกระแสการตอบรับยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยให้ค่อยๆ พัฒนาจากยานยนต์ทางเลือกกลายเป็นยานยนต์ที่อยู่ในกระแสหลักแบบเร็วกว่าที่คิด และประเทศไทยเริ่มมีนโยบายส่งเสริมการพัฒนาของยานยนต์ไฟฟ้าอย่างเป็นรูปธรรม ในปี พ.ศ. 2558 โดยมีการเสนอให้ภาครัฐกำหนดนโยบายที่ชัดเจนในการสนับสนุนให้เกิดยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ให้แพร่หลายในอนาคต เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงภายในประเทศและนำเข้าจากต่างประเทศ เป็นการเพิ่มทางเลือกการใช้พลังงานให้แก่ประชาชนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [1]

หนึ่งในข้อดีของการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของยานยนต์ไฟฟ้านั้น คือ การเปลี่ยนแหล่งพลังงาน จากการใช้น้ำมันของรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine: ICE) กลายมาเป็นยานยนต์ที่ใช้พลังงานจากไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) และเมื่อเปรียบเทียบราคาของน้ำมันต่อกิโลเมตรแล้วนั้นมีความมากกว่าค่าไฟในการชาร์จอยู่เกือบ 2 - 3 เท่า นอกจากนี้ถ้ายานยนต์ไม่มีการใช้น้ำมันในการขับเคลื่อนก็ยังส่งผลดีต่อการลดการปล่อยมลพิษทางอากาศ ที่ส่งผลต่อการเกิดก๊าซเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุของการเกิดภาวะโลกร้อนอีกด้วย

อีกหนึ่งข้อดีที่สำคัญก็คือช่วยลดฝุ่น PM 2.5 ที่เป็นมลพิษทางอากาศสาเหตุหลักมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ ฝุ่น PM 2.5 ถือเป็นมลพิษต่อสุขภาพของมนุษย์ตามที่องค์การอนามัยโลกให้ความสำคัญและออกมาแจ้งเตือนให้ทราบ เพราะเป็นฝุ่นที่มีขนาดเล็กมาก ฝุ่น PM2.5 ยังเล็กกว่าเส้นผมถึง 20 เท่า ทำให้เล็ดลอดผ่านขนจมูกเข้าสู่ปอด และหลอดเลือดได้ง่าย ความอันตรายของฝุ่น PM 2.5 คือ กระตุ้นให้เกิดสารอนุมูลอิสระ ลดระบบแอนติออกซิแดนซ์ รบกวนสมดุลต่างๆ ของร่างกาย และกระตุ้นยีนที่เกี่ยวข้องกับการหลั่งสารอักเสบซึ่งมีอันตรายต่อเนื่องในในร่างกายของเราแล้วส่งผลกระทบต่อสุขภาพต่างๆ ตามมา

โดยที่ผ่านมามาประเทศไทยยังประสบปัญหาเกี่ยวกับฝุ่น PM 2.5 อยู่ โดยในช่วง สงกรานต์ปี พ.ศ. 2565 ปริมาณฝุ่น PM 2.5 ของเขตกรุงเทพฯ ตะวันออกพุ่งสูงถึง 69-86 มคก./ลบ.ม. (ค่ามาตรฐานไม่เกิน 50 มคก./ลบ.ม.) โดยมีการสำรวจว่า ค่าฝุ่น PM 2.5 (ใน กทม.) มี แหล่งกำเนิดมาจากการขนส่งทางถนน 72.5% ประกอบด้วย รถบรรทุก 28 % รถกระบะ 21% รถ บัส 7% รถยนต์นั่ง 10% รถมอเตอร์ไซด์ 5% รถตู้ 1.5 % และอื่นๆ 27.5 % ซึ่งสาเหตุหลักมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ [2]



รูปที่ 1.1 ค่าฝุ่นเกินขนาดมาตรฐานหลายจุดในกรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 10 เมษายน พ.ศ. 2565
ที่มา : ศูนย์ประสานงานและแก้ไขปัญหามลพิษทางอากาศของกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างควันจากยานยนต์ซึ่งเป็นปัญหาหลักในการเกิด PM_{2.5} ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 ยานยนต์ EV มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและประเทศที่เปลี่ยนมาใช้ยานยนต์ EV

จากปัญหาดังกล่าวทางออกหนึ่งในการช่วยแก้ไขปัญหานี้อย่างยิ่งย่นซึ่งมีการนำมาใช้แล้วในหลายประเทศ ก็คือ ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle : EV) โดยมีผลการสำรวจพบว่าอัตราการยอมรับรถประเภท EV มีอยู่ที่ร้อยละ 60 (ที่มา : งานวิจัยโครงการประเมินมาตรการส่งเสริมการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าต่อการยอมรับของผู้บริโภคจาก สกว.) แสดงให้เห็นว่าผู้ที่ใช้รถยนต์ทั่วไปมีการยินดีที่จะเปลี่ยนมาใช้ยานยนต์ไฟฟ้า [3]



รูปที่ 1.4 คนกรุง 60 % ยอมรับยานยนต์ EV

ปัจจุบันรถมอเตอร์ไซค์ในกรุงเทพฯ มีทั้งสิ้นกว่า 3 ล้านคัน และเนื่องจากทั่วโลกให้ความสนใจเรื่องพลังงานสะอาด ประกอบกับแนวโน้มความต้องการที่เพิ่มขึ้นในทุกๆ ปี ยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กจึงเป็นที่สนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศแถบยุโรปที่ผู้คนให้ความสนใจจนทำให้เกิดแบรนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถพลังงานไฟฟ้าเกิดขึ้นมากมาย ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยผู้คนเริ่มให้ความสนใจมากขึ้น โดยเฉพาะยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กที่ออกแบบให้มีรูปทรงที่โฉบเฉี่ยว กระทัดรัด ไม่ต่างจากรถมอเตอร์ไซด์พลังงานเชื้อเพลิง ประกอบกับการจราจรบนท้องถนนที่คับคั่ง และความเร่งรีบในการใช้ชีวิต ซึ่งสามารถลดเลาะ ได้อย่างคล่องแคล่ว ไม่ว่าจะเส้นทางนั้นจะเป็นทางชัน หรือพื้นผิวถนนขรุขระ ก็สามารถตอบโจทย์ชีวิตคนเมืองได้อย่างดี และยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กเหมาะสำหรับวินและไรเดอร์อย่าง แกรป ไลน์ แมนหรือฟูดแพนด้า ในช่วงระหว่างที่รอลูกค้าหรือรอออเดอร์ เป็นช่วงที่ยานยนต์ไฟฟ้าจอดอยู่กับที่ ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์จากเครื่องอัดประจุไร้สายได้ [4]

ดังนั้นเป้าหมายหลักในการทำโครงการครั้งนี้คือการศึกษาและออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้า ไร้สายให้สามารถส่งกำลังผ่านอากาศได้และพัฒนาเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กขณะอยู่หนึ่งให้มีประสิทธิภาพสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพาหะส่งกำลัง
2. เพื่อออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายให้สามารถส่งกำลังผ่านอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. เพื่อพัฒนาเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการงาน

ศึกษาและพัฒนาเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับแบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 72 V โดยการอัดประจุของยานยนต์ไฟฟ้าขณะอยู่หนึ่ง

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

1. ศึกษาวิธีการทำงานและหลักการของการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า
2. ศึกษาและเรียนรู้โปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อใช้ในการจำลองผลและออกแบบวงจรของเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก
3. ศึกษาองค์ประกอบและองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก
4. ออกแบบวงจรของเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กและจำลองผลผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพตามที่ต้องการ
5. นำวงจรที่ออกแบบผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink มาสร้างเป็นวงจรจริงที่ใช้สำหรับเครื่องอัดประจุสำหรับแบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 72 V
6. ทดสอบและทดลองวงจรที่สร้างขึ้นโดยแบ่งเป็น วงจรส่งกำลังไฟฟ้า วงจรรับกำลังไฟฟ้าและชาร์จประจุแบตเตอรี่
7. วิเคราะห์และประเมินผลการทดลอง ปรับปรุงแก้ไขการทดลอง
8. สรุปผลการดำเนินโครงการงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2565

1. ปรึกษากับอาจารย์เพื่อกำหนดหัวข้อและขอบเขตในการทำโครงการ

เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2565

1. สืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวกับเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก
2. ศึกษาวิธีการทำงานและหลักการของการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า

เดือนกันยายน พ.ศ. 2565

1. ศึกษาและเรียนรู้โปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อใช้ในการจำลองผลและออกแบบวงจรของเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก
2. อาจารย์ให้ข้อเสนอแนะในเรื่องการใช้โปรแกรมในการทำวิจัย

เดือนตุลาคม พ.ศ. 2565

1. สืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวกับวงจรส่งกำลังไฟฟ้า
2. ออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink
3. วิเคราะห์และประเมินผลการจำลอง ปรับปรุงแก้ไขวงจรเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพตามที่ต้องการ

เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2565

1. สืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวกับวงจรรับกำลังไฟฟ้าและชาร์จประจุแบตเตอรี่
2. ออกแบบวงจรรับกำลังไฟฟ้าและชาร์จประจุแบตเตอรี่ผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink
3. วิเคราะห์และประเมินผลการจำลอง ปรับปรุงแก้ไขวงจรเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพตามที่ต้องการ

เดือนธันวาคม พ.ศ. 2565

1. จำลองการเกิดความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิเคราะห์และประเมินผลการจำลอง ปรับปรุงแก้ไขวงจรเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพตามที่ต้องการ

เดือนมกราคม พ.ศ. 2566

1. ศึกษาสเปคของอุปกรณ์เพื่อจะนำมาสร้างเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก
2. สั่งอุปกรณ์

เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566

1. สร้างวงจรส่งกำลังไฟฟ้าจริงตามทีออกแบบไว้
2. วิเคราะห์และทำการแก้ไขในบางกรณีที่ไม่ได้ผลตามที่ศึกษาไว้

เดือนมีนาคม พ.ศ. 2566

1. สร้างวงจรรับกำลังไฟฟ้าและชาร์จประจุแบตเตอรี่จริงตามทีออกแบบไว้
2. วิเคราะห์และทำการแก้ไขในบางกรณีที่ไม่ได้ผลตามที่ศึกษาไว้

เดือนเมษายน พ.ศ. 2566

1. สร้างขดส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพาหะส่งกำลัง
2. วิเคราะห์และทำการแก้ไขในบางกรณีที่ไม่ได้ผลตามที่ศึกษาไว้

เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2566

1. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
2. จัดทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 ลำดับการปฏิบัติงานวิจัย

กำหนดการดำเนินการ	ระยะเวลา											
	ก.ค. 65	ส.ค. 65	ก.ย. 65	ต.ค. 65	พ.ย. 65	ธ.ค. 65	ม.ค. 66	ก.พ. 66	มี.ค. 66	เม.ย. 66	พ.ค. 66	
1.กำหนดหัวข้อและขอบเขตในการทำโครงการ	←→											
2.สืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		←→	←→									
3.ศึกษาโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อใช้ในการจำลอง			←→	←→								
4.ออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้า				←→	←→							
5.ออกแบบวงจรรับกำลังไฟฟ้าและชาร์จประจุแบตเตอรี่					←→	←→						
6.จำลองการเกิดความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวด						←→	←→					
7.ศึกษาสเปคของอุปกรณ์และสั่งอุปกรณ์							←→	←→				
8.สร้างวงจรส่งกำลังไฟฟ้าจริงตามที่ออกแบบไว้								←→	←→			
9.สร้างวงจรรับกำลังไฟฟ้าและชาร์จประจุแบตเตอรี่จริงตามที่ออกแบบไว้									←→	←→		
10.สร้างขดส่งกำลังไฟฟ้า										←→	←→	
11.วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง											←→	←→

←→ ระยะเวลาที่วางแผน ←→ ระยะเวลาที่ปฏิบัติงาน

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

จากการทำโครงการวิจัยนี้ ประโยชน์ที่ได้รับ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ประโยชน์ในด้านการประหยัดพลังงานภายในประเทศ ด้านการพัฒนาเทคโนโลยี และในด้านของโครงการวิจัย

ประโยชน์ที่ได้รับด้านการประหยัดพลังงานภายในประเทศ

- ส่งเสริมการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าทำให้ลดการพึ่งพาการใช้เชื้อเพลิงภายในประเทศและนำเข้าจากต่างประเทศ
- ยานยนต์ไฟฟ้าไม่มีการใช้น้ำมันในการขับเคลื่อนก็ยังส่งผลดีต่อการลดการปล่อยมลพิษทางอากาศ ที่ส่งผลต่อการเกิดก๊าซเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุของการเกิดภาวะโลกร้อน

ประโยชน์ที่ได้รับด้านการพัฒนาเทคโนโลยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าแบบไร้สาย โดยบูรณาการความรู้ทางวิศวกรรมเข้ากับความรู้ทางเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผู้ใช้ยานยนต์ไฟฟ้าได้
2. การชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าแบบไร้สายจะเป็นปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนทิศทางของอุตสาหกรรมยานยนต์และจะเพิ่มประสิทธิภาพในการชาร์จ แม้ว่าขั้นตอนการเสียบชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า ในปัจจุบันจะเป็นเรื่องง่าย แต่การชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าแบบไร้สายทำได้ง่ายกว่า ทำให้ผู้ใช้สามารถชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องออกจากรถ

ประโยชน์ที่ได้รับด้านของโครงการวิจัย

1. สามารถออกแบบวงจรของเครื่องอัดประจุสำหรับแบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 72 V และจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญได้แก่ วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย (Transmitter Circuit) วงจรรับกำลังและชาร์จประจุแบตเตอรี่ (Receiver and Charger Circuit) และ การจำลองการเกิดความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดส่ง (Magnetic Circuit and Mutual Inductance)
2. สามารถนำวงจรที่ออกแบบมาสร้างเป็นวงจรที่ใช้สำหรับเครื่องอัดประจุสำหรับแบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 72 V ได้จริง และได้ค่าตามที่ต้องการ
3. ในการออกแบบและจำลองผลวงจรของเครื่องอัดประจุสำหรับแบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 72 V ทำให้ผู้ทดลองมีความรู้ความเข้าใจในปัญหามากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

การส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดส่งกำลัง (Transmitter Coil) เป็นการใช้แหล่งจ่ายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านตัวกลางอากาศ เข้าขดลวดรับกำลัง (Receiver Coil) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำ (Induced Current) และแรงดันตกคร่อมขั้วขดลวดเมื่อต่อโหนด (Induced Voltage) ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าขึ้นที่วงจรรับกำลัง สามารถอธิบายการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและกระแสเหนี่ยวนำของขดลวดรับกำลังโดยใช้กฎทางฟิสิกส์ได้ดังนี้

2.1.1 สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) [5]

อธิบายปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยในที่นี้จะยกมาแต่เทอมของสมการอนุพันธ์

2.1.1.1 กฎสนามไฟฟ้าของเกาส์ (Gauss's Law) สนามไฟฟ้าเกิดจากประจุไฟฟ้า

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

2.1.1.2 กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก (Gauss's Law for Magnetic Field) สนามแม่เหล็กโรบวงปิดมีค่าเป็นศูนย์ กฎข้อนี้หมายถึงการไม่มีอยู่ของสนามแม่เหล็กขั้วเดียว

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.2)$$

2.1.1.3 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดสนามไฟฟ้า หมุนรอบๆเส้นแรงแม่เหล็ก

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.4 กฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) ความหนาแน่นกระแสและการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไหลรอบๆเส้นแรงไฟฟ้า

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \quad (2.4)$$

โดยที่	\mathbf{E}	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
	\mathbf{B}	คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (T)
	\mathbf{J}	คือ ความหนาแน่นกระแส (A/m ²)
	ρ	คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า (C/m ³)
	ϵ_0	คือ ค่าสภาพยอมของตัวกลางสุญญากาศ $8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{m}^2/\text{N}$
	μ_0	คือ ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กในสุญญากาศ $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A}\cdot\text{m}$

2.1.2 ขดลวดส่งกำลัง

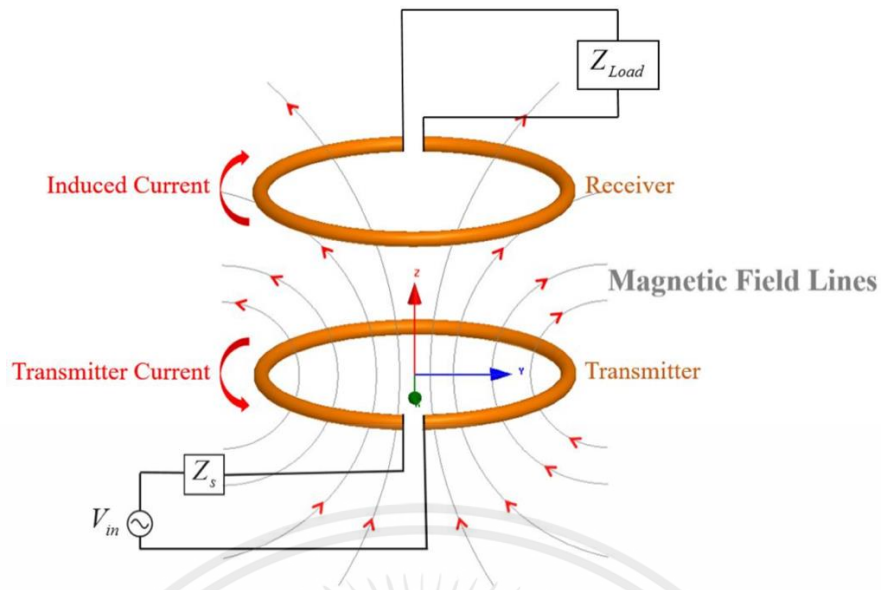
ขดลวดส่งกำลังทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าขดลวดเป็นสนามแม่เหล็กเป็นพาหะของการส่งกำลังในอากาศ โดยมีหลักการเปลี่ยนจากกระแสไฟฟ้าสร้างสนามแม่เหล็กดังนี้

พิจารณาที่กฎข้อที่ 4 ในหัวข้อ 2.1.1 โดยพิจารณาเฉพาะเทอมของสนามแม่เหล็ก $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{J})$ ความหนาแน่นกระแสทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไหลวนรอบๆเส้นทางการไหลของกระแส เมื่อมีการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (i_1) เข้าขดลวดที่มีจำนวนรอบ N_1 รอบ ขนาดของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในปริภูมิรอบๆขดลวดหรือตัวกลางอากาศคือ [6]

$$\mathbf{B} = \mu_0 (N_1 \mathbf{i}_1) \quad (2.5)$$

โดยที่	\mathbf{B}	คือ ความเข้มแม่เหล็ก (T)
	N_1	คือ จำนวนรอบขดลวดเหนี่ยวนำฝั่งส่งกำลัง (turn)
	\mathbf{i}_1	คือ กระแสไหลที่เข้าขดลวดเหนี่ยวนำ (A)

กล่าวโดยสรุปคือขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะทำให้เกิดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง



รูปที่ 2.1 แผนภาพการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.1.3 ขดลวดรับกำลัง

ทำหน้าที่เปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับเข้ามาเป็นกระแสไฟฟ้าจ่ายเข้าวงจรโหลด เมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็ก (Φ_B) จากแหล่งกำเนิดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในที่นี้คือจากขดลวดส่งกำลัง ฟลักซ์แม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเกี่ยวคล้องขดลวดรับ N_2 รอบ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตกคร่อมขดลวด เมื่อมีการต่อโหลดคนละวงจรจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลบ่อนเข้าวงจรแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำหาได้โดยสมการ [7]

$$\mathcal{E} = -N_2 \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.6)$$

โดยที่ \mathcal{E} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V)

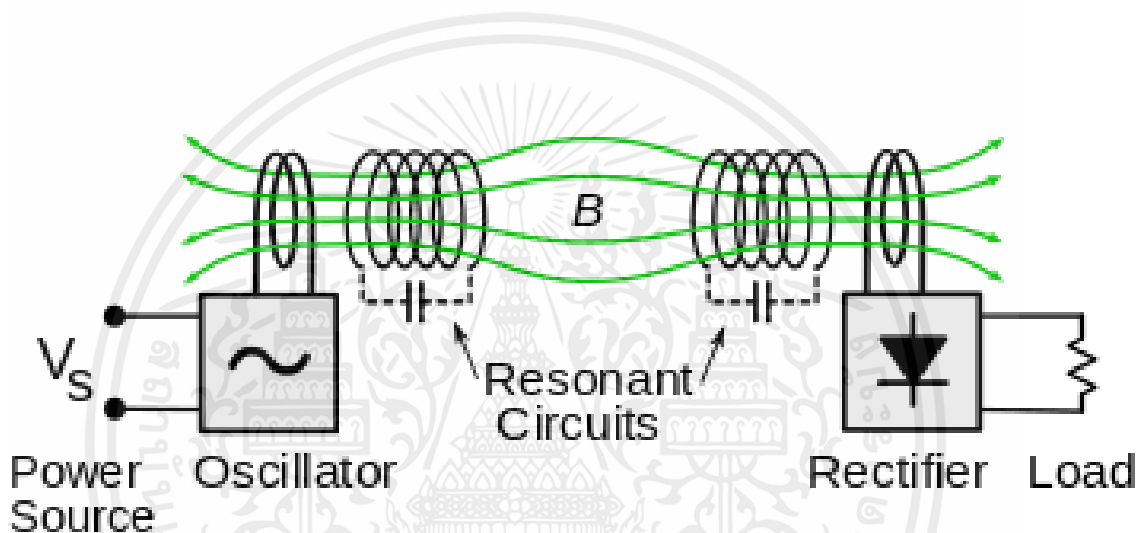
N_2 คือ จำนวนรอบขดลวดเหนี่ยวนำฝั่งรับกำลัง (turn)

Φ_B คือ ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเหนี่ยวนำส่งกำลัง (Wb)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศโดยใช้วงจรเรโซแนนซ์

ในการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศให้มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องส่งกำลังผ่านสนามแม่เหล็กความถี่สูงโดยสร้างจาก วงจรอนุกรม LC resonance โดยที่ต่อตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับขดลวดส่งและรับกำลัง เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าความถี่เท่ากับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรอนุกรม LC resonance จะมีค่าต่ำที่สุดจึงทำให้กระแสสามารถไหลเข้าขดลวดส่งและรับได้มาก วงจรเรโซแนนซ์จะสามารถทำให้เกิดสนามแม่เหล็กความถี่สูงกว่าการจ่ายกระแสเข้าขดลวดเหนี่ยวนำโดยตรง [8]



รูปที่ 2.2 การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศโดยใช้วงจรเรโซแนนซ์

ความถี่ของสัญญาณแรงดันที่ต้องป้อนให้วงจรอนุกรม LC เรโซแนนซ์ สามารถคำนวณหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.7)$$

โดยที่ f_s คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Hz)

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (H)

C คือ ค่าความจุไฟฟ้า (F)

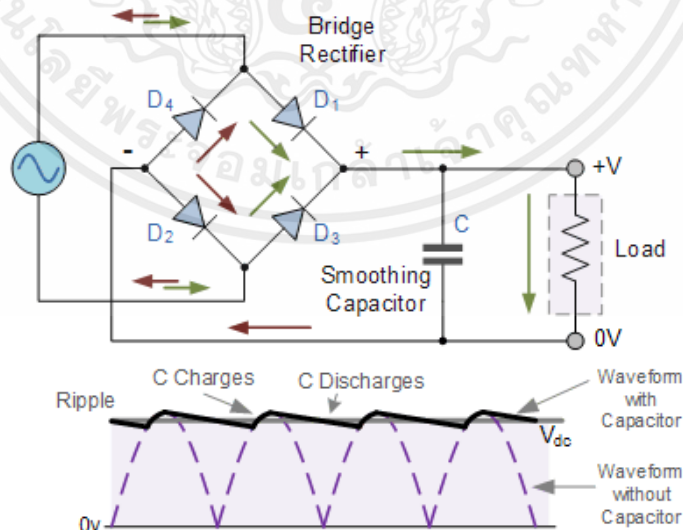
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์

วงจรคอนเวอร์เตอร์ คือวงจรแปลงผันกำลัง เป็นหนึ่งในวงจรระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทำหน้าที่ปรับระดับขนาดแรงดัน กระแส สามารถปรับได้ทั้งกระแสสลับและกระแสตรงและควบคุมให้คงที่, เปลี่ยนแปลงรูปสัญญาณไฟฟ้าเช่น จากกระแสสลับเป็นกระแสตรง AC-DC หรือเรกติไฟเออร์ (rectifier) กระแสสลับเป็นกระแสสลับ AC-AC หรือไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (cycloconverter) กระแสตรงเป็นกระแสสลับ DC-AC หรืออินเวอร์เตอร์ (inverter) โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ทำงานผสมผสานกันทั้ง อุปกรณ์สวิตชิง ไดโอด ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ เพื่อทำหน้าที่แปลงผันกำลังไฟฟ้าหลายรูปแบบ โดยในวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายในโครงงานนี้จะใช้คอนเวอร์เตอร์สามประเภทดังนี้ [9]

2.2.1 วงจรเรียงกระแสประเภทเรียงกระแสเต็มคลื่น

วงจรเรียงกระแสประเภทเรียงกระแสเต็มคลื่น (full bridge rectifier) เป็นวงจรแปลงจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงโดยเรียงกระแสทั้งแรงดันรูปไซน์ครึ่งไซเคิลบวกและครึ่งไซเคิลลบให้เป็นรูปคลื่นแรงดันบวกและทำการกรองสัญญาณแรงดันให้เรียบโดยใช้ตัวเก็บประจุ (C filter) หรือทำการกรองทั้งสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสให้เรียบโดยใช้ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ (LC filter) เทคนิคการเรียงกระแสเต็มคลื่นแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้ [10]



รูปที่ 2.3 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นและสัญญาณแรงดันขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.1 วงจรเรียงกระแสแบบไม่ใช้สัญญาณกระตุ้น (passive rectifier)

วงจรเรียงกระแสแบบไม่ใช้สัญญาณกระตุ้น คือวงจรเรียงกระแสที่ใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทไดโอด วงจรเรียงกระแสประเภทนี้สามารถทำงานได้เองตามทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด โดยจะยอมให้กระแสไหลผ่านเฉพาะทิศไบอัสไปข้างหน้า (forward bias) หรือไหลจากขั้วแอโนดไปขั้วแคโทด [11]

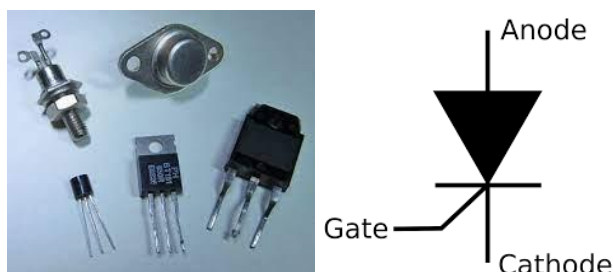


รูปที่ 2.4 วงจรเรียงกระแสแบบไม่ใช้สัญญาณกระตุ้น

2.2.1.2 วงจรเรียงกระแสแบบใช้สัญญาณกระตุ้น (active rectifier)

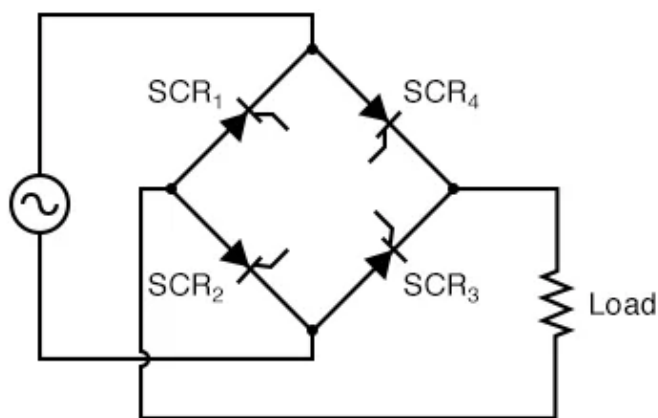
วงจรเรียงกระแสแบบใช้สัญญาณกระตุ้น คือวงจรเรียงกระแสที่ใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสวิตชิง ซึ่งนำกระแสได้ก็ต่อเมื่อมีสัญญาณกระตุ้นเข้าควบคุมอุปกรณ์ โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ [12]

- 1) อุปกรณ์สวิตชิงที่ใช้สัญญาณกระแสกระตุ้น เช่น SCRs (Thyristor) [13]



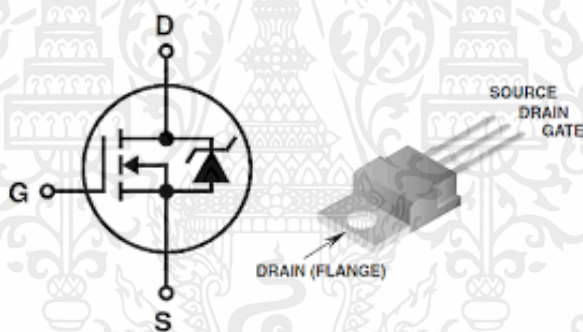
รูปที่ 2.5 อุปกรณ์สวิตชิง SCRs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 วงจรเรียงกระแสโดยใช้ SCRs

2) อุปกรณ์สวิตชิงที่ใช้สัญญาณแรงดันกระตุ้น เช่น MOSFET IGBT [14]

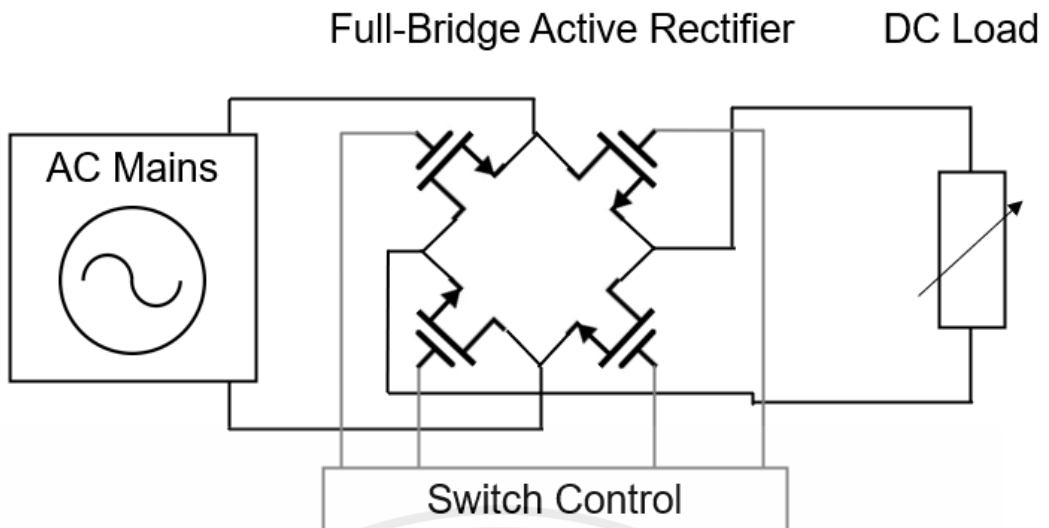


รูปที่ 2.7 อุปกรณ์สวิตชิง MOSFET

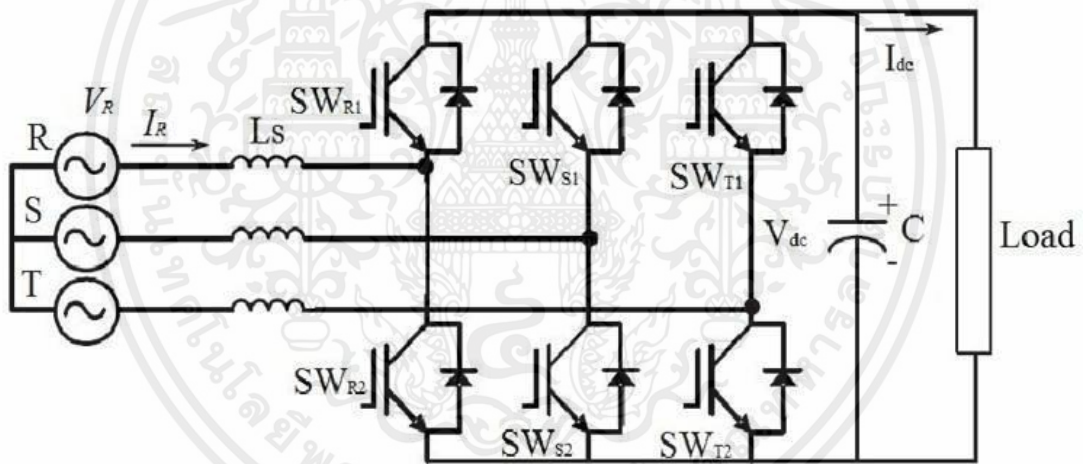


รูปที่ 2.8 อุปกรณ์สวิตชิง IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 วงจรเรียงกระแสโดยใช้ MOSFET



รูปที่ 2.10 วงจรเรียงกระแสสามเฟสโดยใช้ IGBT

วงจรเรียงกระแสแบบใช้สัญญาณกระตุ้นสามารถควบคุมขนาดของแรงดันและกระแสของไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกจากวงจรเรียงกระแสโดยควบคุมจากช่วงเวลาหรือมุมเฟสของการนำกระแส โดยจ่ายสัญญาณกระตุ้นเข้าขาเกตของอุปกรณ์สวิตชิง นอกจากนี้วงจรเรียงกระแสแบบใช้สัญญาณกระตุ้นยังสามารถนำกระแสได้ทั้งสองทิศทาง จึงเป็นคอนเวอร์เตอร์ประเภทกำลังไฟฟ้าไหลได้สองทิศทาง (Bidirectional Power Flow) จึงสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างมากในการควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

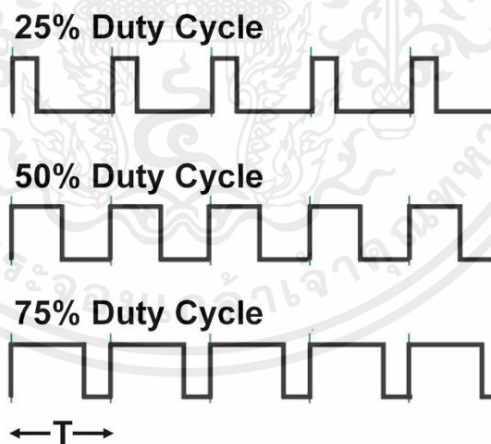
[16] วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) หรืออีกชื่อคือ DC Chopper เป็นวงจรประเภท DC-DC Converter ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันกระแสตรงและควบคุมให้คงที่ ทำงานโดยใช้อุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงโดยใช้สัญญาณกระตุ้น PWM (Pulse Width Modulation) ควบคุมช่วงเวลาการนำกระแสในแต่ละคาบของสัญญาณกระตุ้น โดยอัตราส่วนช่วงเวลาการนำกระแสต่อช่วงเวลาหยุดนำกระแสเรียกว่าค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle หรือ Duty ratio : D) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.8)

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.8)$$

โดยที่ t_{on} คือ ช่วงเวลาการนำกระแส

t_{off} คือ ช่วงเวลาการหยุดนำกระแส

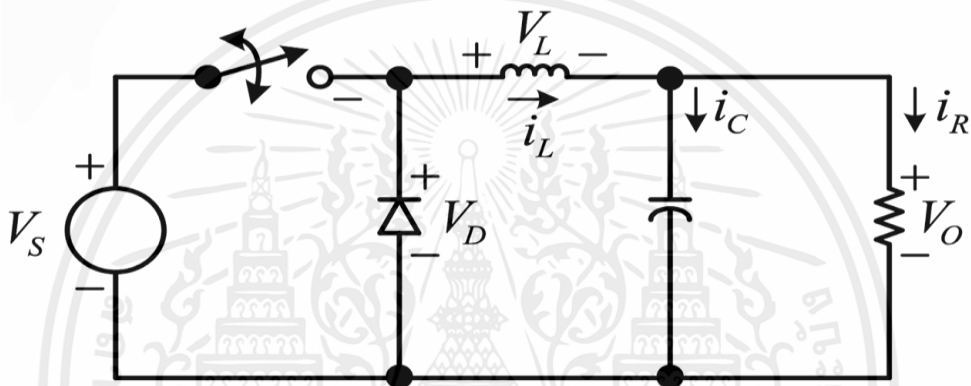
T คือ คาบของสัญญาณ PWM



รูปที่ 2.11 สัญญาณ PWM ในแต่ละค่าดิวตี้ไซเคิล

2.2.2.1 หลักการทำงานของบักคอนเวอร์เตอร์

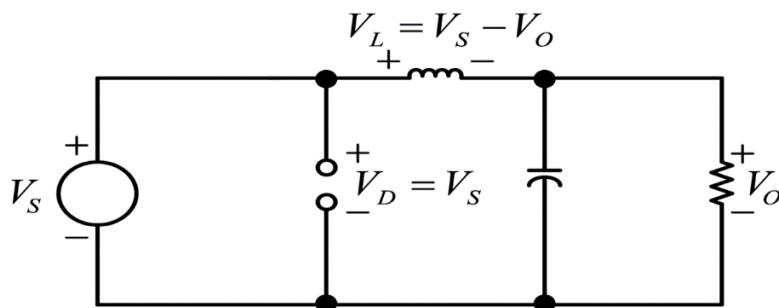
เพื่อจะออกแบบให้ได้แรงดันด้านออกตามที่ต้องการต้องเริ่มจากเงื่อนไขที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นก็จะสามารถหา กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ การวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมดจะพิจารณาเฉพาะ สภาวะอยู่ตัว (steady state) และให้ถือว่าอุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ยังไม่พิจารณาการสูญเสียกำลัง เนื่องจากการทำงานของวงจร [17]



รูปที่ 2.12 วงจรบักคอนเวอร์เตอร์

1) ขณะสวิตช์นำกระแส t_{on}

กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านสวิตช์ ผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด โดยที่กระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะไปเก็บที่ตัวเก็บประจุ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ สามารถเขียนเป็น สมการของแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_L = V_S - V_O \quad (2.9)$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.10)$$

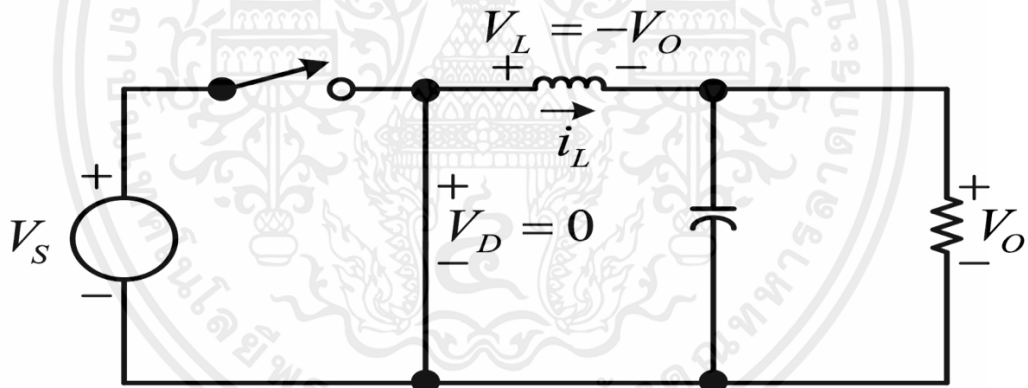
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (2.11)$$

dt ในกรณีอยู่ในช่วงเวลานำกระแส คือ $dt = DT$

$$\Delta i_{L,on} = \left(\frac{V_S - V_O}{L} \right) DT \quad (2.12)$$

2) ขณะสวิตช์หยุดนำกระแส t_{off}

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส ไดโอดจะถูกไบอัสไปข้างหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง และจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์หยุดนำกระแส

$$V_L = -V_O \quad (2.13)$$

$$V_L = -V_O = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.14)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_{L,off}}{\Delta t} = \frac{V_O}{L} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายของสมการที่ (2.15) คือ กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะค่อยๆ ลดลง เพราะการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต่อเวลามีค่าเป็นลบ

dt ในกรณีอยู่ในช่วงเวลาหยุดนำกระแส คือ $dt = (1-D)T$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.15) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\Delta i_{L,off} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (2.16)$$

2.2.2.2 อัตราการขยายแรงดันของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

ในช่วงสภาวะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะที่ สวิตช์นำกระแส จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเท่ากับการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหล ผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะที่สวิตช์หยุดนำกระแส หรืออาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหล ผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ (2.12) และสมการที่ (1.16) จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.17)$$

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT - \left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T = 0 \quad (2.18)$$

จึงได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกและแรงดันด้านเข้าดังนี้

$$\frac{V_o}{V_s} = D \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.19) อัตราการขยายแรงดันของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์จึงมีค่าสูงสุดได้ไม่เกิน 100% ตามค่า D กล่าวคือแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำให้แรงดันด้านออกมีขนาดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าได้เมื่อปรับค่า $D = 1$ เนื่องจากค่าแรงดันตกจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสวิตช์ ตัวเหนี่ยวนำ และไดโอด ขึ้นกับ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่นำมาใช้เป็นองค์ประกอบในวงจร

2.2.2.3 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

เพื่อให้กระแสที่ไหลจากคอนเวอร์เตอร์เข้าโหลดมีค่าต่อเนื่องหรือไม่มีช่วงที่กำลงไฟฟ้าตกลงไปเป็นศูนย์ชั่วขณะ ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำในวงจรที่เหมาะสมจะทำให้วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง โดยเริ่มต้นจากการหาค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำซึ่งเท่ากับกระแสเฉลี่ยที่ไหลเข้าโหลด เนื่องจากขณะที่ทำงานอยู่ในสภาวะอยู่ตัว กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้

$$I_L = I_O = \frac{V_O}{R} \quad (2.20)$$

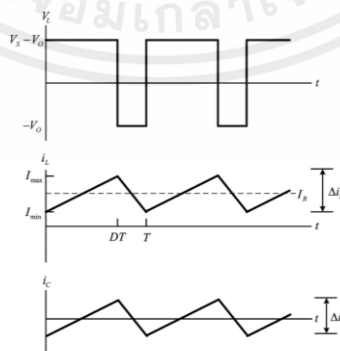
จากรูปที่ 2.15 จะสามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าต่ำที่สุดได้จากสมการในช่วงที่สวิตช์หยุดนำกระแสได้ดังนี้

$$I_{L,min} = \frac{V_O}{R} - \frac{1}{2} \left[\frac{V_O}{L} (1-D)T \right] \quad (2.21)$$

$$I_{L,min} = V_O \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.22) ค่าความเหนี่ยวนำเล็กที่สุดหาได้โดย

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.15 รูปคลื่นการทำงานของบัคคอนเวอร์เตอร์ แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

2.2.2.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก

การคำนวณหาค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้า (voltage ripple) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสของตัวเก็บประจุดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุหาได้จาก

$$i_C = i_L - i_R \quad (2.24)$$

เมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเป็นบวก ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวตัวเก็บประจุสะสมประจุ โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$Q = CV_O \quad (2.25)$$

$$\Delta V_O = \frac{\Delta Q}{C} \quad (2.26)$$

โดยที่ ΔQ คือ ค่าประจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง

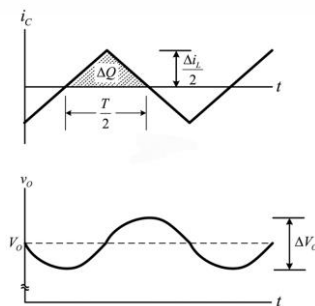
ΔV_O คือ ค่าระลอกแรงดันนับจากยอดสูงสุดถึงยอดต่ำที่สุด

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} \right) \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T \Delta i_L}{8} \quad (2.27)$$

$$\Delta V_O = \frac{T \Delta i_L}{8C} \quad (2.28)$$

แทนค่าสมการที่ 2.16 ลงในสมการที่ 2.28 จะได้ค่าระลอกแรงดันดังนี้

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (2.29)$$



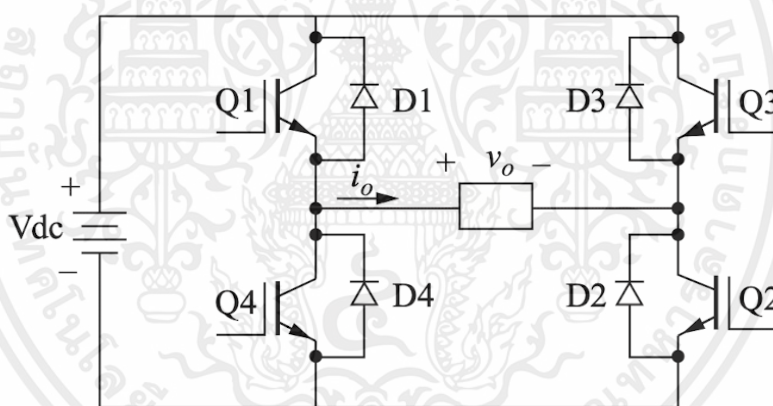
รูปที่ 2.16 กระแสตัวเก็บประจุและระลอกคลื่นแรงดันด้านออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์ [18]

วงจรอินเวอร์เตอร์ (inverter) มีหน้าที่แปลงรูปสัญญาณไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกระแสตรงแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหรือเรียกว่า DC to AC converter โดยความถี่ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการควบคุมการสวิตซ์ขาเกต ควบคุมการนำกระแส นอกจากนี้วิธีในการควบคุมขาเกตยังเป็นตัวกำหนดรูปคลื่นของสัญญาณด้านออก วงจรอินเวอร์เตอร์ถูกใช้งานทั่วไปในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการสร้างแรงดันหรือกระแสที่สามารถปรับความถี่ได้เช่น ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับ (AC motor drive) ระบบจ่ายไฟสำรองที่มีแหล่งกักเก็บพลังงานจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเช่นอุปกรณ์ UPS (Uninterruptible Power Supplies)

2.2.3.1 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

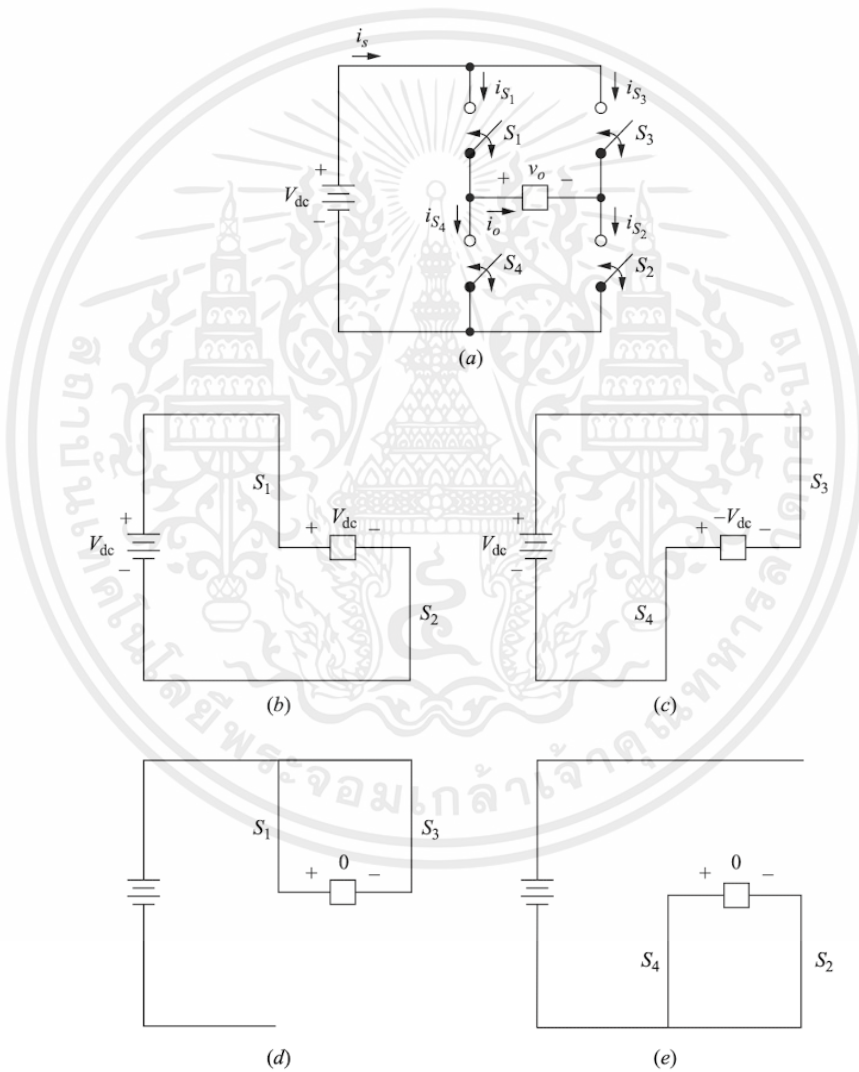


รูปที่ 2.17 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.18a เป็นวงจรพื้นฐานใช้แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยทั่วไปวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ถูกนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ในกรณีนี้ ไฟฟ้ากระแสสลับเอาต์พุตถูกสร้างจากไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตโดยการปิดและเปิดสวิตซ์ตามลำดับที่เหมาะสม แรงดันเอาต์พุต V_o สามารถเป็นได้ทั้ง $+V_{dc}$, $-V_{dc}$ หรือ ศูนย์ ขึ้นอยู่กับว่าสวิตซ์ใดปิดอยู่ รูปที่ 2.18b ถึง 2.18e แสดงวงจรสมมูลการทำงานร่วมกันของสวิตซ์แต่ละตัว

ตารางที่ 2.1 แรงดันเอาต์พุตของการทำงานร่วมกันของสวิตช์แต่ละตัว

Switches Closed	Output Voltage V_o
S_1 และ S_2	$+V_{dc}$
S_3 และ S_4	$-V_{dc}$
S_1 และ S_3	0
S_2 และ S_4	0



รูปที่ 2.18 (a) วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์, (b) S_1 และ S_2 ปิด; (c) S_3 และ S_4 ปิด;

(d) S_1 และ S_3 ปิด; (e) S_2 และ S_4 ปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สวิตช์ S_1 และ S_4 ไม่ควรที่จะปิดพร้อมกัน สวิตช์ S_2 และ S_3 ก็เช่นเดียวกัน มิฉะนั้น จะเกิดการลัดวงจรภายในแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สวิตช์จึงจะไม่เปิดหรือปิดพร้อมกันในทันที ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมเวลาในการทำงานของสวิตช์ เมื่อมีการเปิดสวิตช์ที่ทับซ้อนกันจะทำให้เกิดการลัดวงจร บางครั้งอาจเรียกรูปการลัดวงจรนี้ว่า *shoot-through fault* เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์เรียกว่า *blanking time*

2.2.3.2 อินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสี่เหลี่ยม (The Square-Wave Inverter) [19]

รูปแบบสวิตซ์ที่ง่ายที่สุดสำหรับวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะสร้างแรงดันเอาต์พุตรูปคลื่นสี่เหลี่ยม สวิตซ์ที่เชื่อมกับโพลดจะเป็น $+V_{dc}$ เมื่อ S_1 และ S_2 ทำงานและจะเป็น $-V_{dc}$ เมื่อ S_3 และ S_4 ทำงาน การสลับเป็นระยะระหว่าง $+V_{dc}$ และ $-V_{dc}$ จะสร้างแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมตกคร่อมโพลด ถึงแม้ว่าเอาต์พุตกระแสสลับนี้จะไม่ใช่สัญญาณรูปคลื่นไซน์ แต่อาจจะเป็นรูปคลื่นกระแสสลับที่เหมาะสมกับการใช้งานอย่างอื่น

รูปคลื่นกระแสในโพลดขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของโพลด สำหรับโพลดตัวต้านทาน รูปคลื่นกระแสจะตรงกับรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต สำหรับโพลดตัวเหนี่ยวนำจะมีรูปคลื่นกระแสที่เป็นรูปคลื่นไซน์มากกว่ารูปคลื่นแรงดันเนื่องจากคุณสมบัติการกรองของตัวเหนี่ยวนำ การออกแบบสวิตซ์ในวงจรฟูลบริดจ์ควรพิจารณาโพลดตัวเหนี่ยวนำ เนื่องจากกระแสของสวิตซ์ต้องเป็นแบบสองทิศทาง

สำหรับโพลด RL แบบอนุกรมและแรงดันเอาต์พุตรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ให้ถือว่าสวิตซ์ S_1 และ S_2 ในรูปที่ 2.18a ปิดที่เวลา $t = 0$ แรงดันตกคร่อมที่โพลดคือ $+V_{dc}$ และกระแสเริ่มเพิ่มขึ้นทั้งในโพลดและในสวิตซ์ S_1 และ S_2 ค่ากระแสเป็นผลรวมของผลตอบสนองบังคับ (Forced Responses) และผลตอบสนองทางธรรมชาติ (Natural Responses)

$$\begin{aligned} i_o(t) &= i_f(t) + i_n(t) \\ &= \frac{V_{dc}}{R} + Ae^{-t/\tau} \quad \text{for } 0 \leq t \leq T/2 \end{aligned} \quad (2.30)$$

โดยที่ A คือค่าคงที่จากสถานะเริ่มต้นและ $\tau = L/R$ ที่เวลา $t = T/2$ S_1 และ S_2 เปิดและ S_3 และ S_4 ปิด แรงดันตกคร่อมโพลด RL จะเป็น $-V_{dc}$ และค่ากระแสจะเป็นดังนี้

$$i_o(t) = \frac{-V_{dc}}{R} + Be^{-(t-T/2)/\tau} \quad \text{for } T/2 \leq t \leq T \quad (2.31)$$

โดยที่ B คือค่าคงที่จากสถานะเริ่มต้น

เมื่อวงจรได้รับแรงดันครั้งแรกและค่ากระแสเหนี่ยวนำเริ่มต้นเป็นศูนย์ สถานะทราน

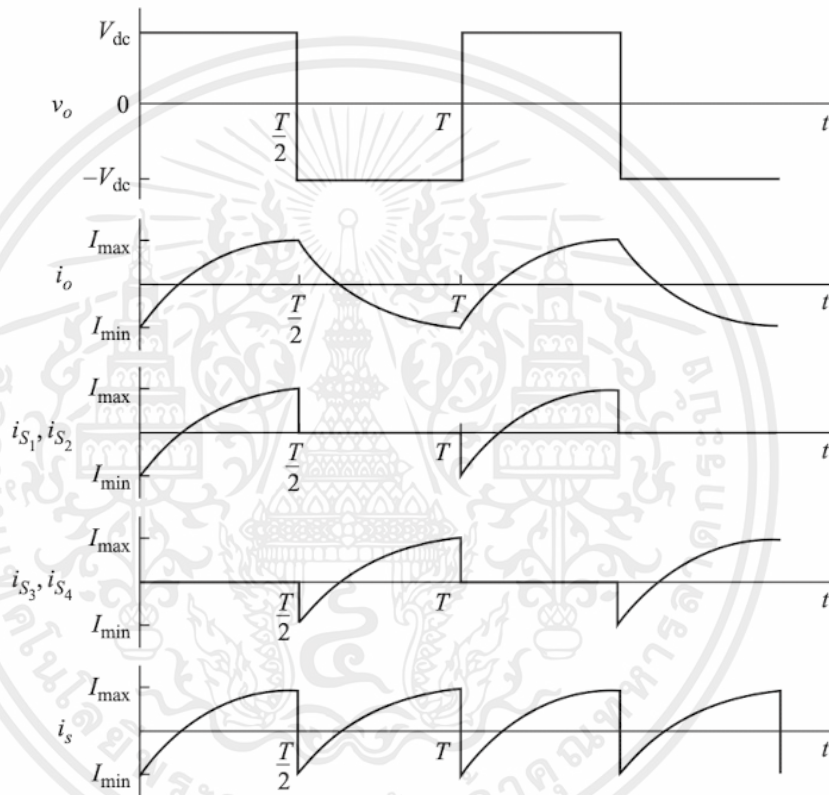
เซียนต์ (Transient) เกิดขึ้นก่อนที่กระแสโพลดจะถึงสถานะคงตัว (Steady-state condition) i_o เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปคลื่นเชิงคาบและสมการระหว่างศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ให้สถานะเริ่มต้นของกระแสที่อธิบายไว้ในสมการที่ 2.30 เป็น I_{min} และให้สถานะเริ่มต้นของกระแสที่อธิบายไว้ในสมการที่ 2.31 เป็น I_{max} และในสมการที่ 2.30 ให้ $t = 0$

$$i_o(0) = \frac{V_{dc}}{R} + Ae^0 = I_{min}$$

หรือ

$$A = I_{min} - \frac{V_{dc}}{R} \quad (2.32)$$



รูปที่ 2.19 แรงดันเอาต์พุตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและรูปคลื่นกระแสโหลด RL ในสภาวะคงตัว

ให้ในสมการที่ 2.31 $t = T/2$

$$i_o(T/2) = \frac{-V_{dc}}{R} + Be^0 = I_{max}$$

หรือ

$$B = I_{max} + \frac{V_{dc}}{R} \quad (2.33)$$

ในสภาวะคงตัว รูปคลื่นกระแสจะถูกอธิบายโดยสมการที่ 2.30 และ 2.31 จะเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_o(t) = f(x) = \begin{cases} \frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{min} - \frac{V_{dc}}{R}\right) e^{-\frac{t}{\tau}} & \text{for } 0 < t < \frac{T}{2} \\ \frac{-V_{dc}}{R} + \left(I_{max} + \frac{V_{dc}}{R}\right) e^{-\frac{t-\frac{T}{2}}{\tau}} & \text{for } \frac{T}{2} < t < T \end{cases} \quad (2.34)$$

หาค่า I_{max} จากส่วนแรกของสมการที่ 2.34 โดยให้ $t = T/2$

$$i(T/2) = I_{max} = \frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{min} - \frac{V_{dc}}{R}\right) e^{-(T/2\tau)} \quad (2.35)$$

โดยที่

$$I_{min} = -I_{max} \quad (2.36)$$

แทนที่ I_{max} ด้วย $-I_{min}$ ในสมการที่ 2.35 เพื่อคำนวณหา I_{max}

$$I_{max} = -I_{min} = \frac{V_{dc}}{R} \left(\frac{1 - e^{-T/2\tau}}{1 + e^{-T/2\tau}} \right) \quad (2.37)$$

ดังนั้นสมการที่ 2.34 และ 2.35 สามารถอธิบายกระแสในโหลด RL ในสภาวะคงตัวเมื่อใช้แรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม รูปที่ 2.19 แสดงกระแสในโหลด แหล่งจ่าย และสวิตช์

กำลังที่ถูกดูดซับโดยโหลดสามารถหาได้จาก $I_{rms}^2 R$ การอินทิเกรตอาจง่ายขึ้นโดยการใช้ประโยชน์จากความสมมาตรของรูปคลื่น เนื่องจากกำลังสองของครึ่งคาบของกระแสเท่ากัน มีแค่เฉพาะครึ่งคาบแรกเท่านั้นที่ต้องคำนวณ

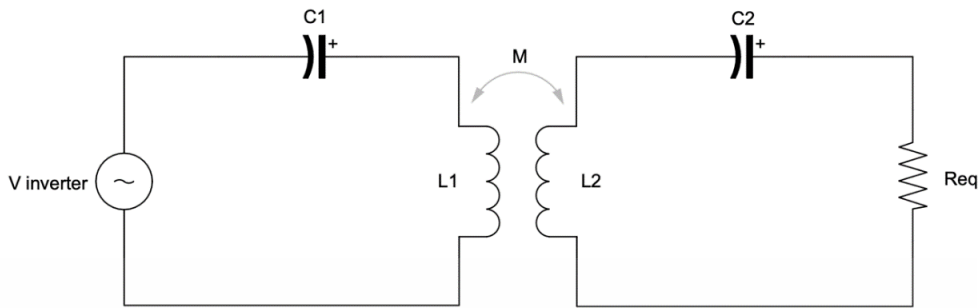
$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left[\frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{min} - \frac{V_{dc}}{R}\right) e^{-t/\tau} \right]^2 dt} \quad (2.38)$$

หากสวิตช์เป็นแบบในอุดมคติ กำลังที่ได้รับจากแหล่งจ่ายจะต้องเท่ากับที่โหลดดูดซับไว้ กำลังที่มาจากแหล่งจ่ายกระแสตรงหาได้จาก

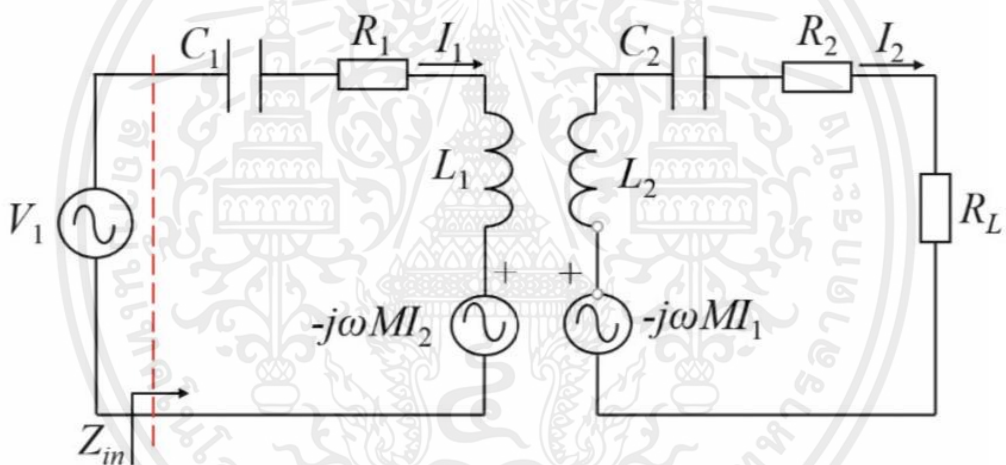
$$P_{dc} = V_{dc} I_s \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย [20]



รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย



รูปที่ 2.21 องค์ประกอบทางไฟฟ้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

ในทางปฏิบัติ วงจรปฐมภูมิได้รับกำลังจากอินเวอร์เตอร์สองระดับซึ่งสร้างแรงดัน square-wave ไปยังแก๊สเรโซแนนซ์ปฐมภูมิ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของวงจรจะใช้ The First Harmonic approximation (FHA) โดยสมมติว่าฮาร์มอนิกส์ลำดับที่สูงกว่าถูกรองโดยวงจรเรโซแนนซ์ โดยใช้ Kirchoff's voltage laws (KVL) สูตรเมทริกซ์จะถูกแสดงออกมาดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) & -j\omega M \\ -j\omega M & R_L + R_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ V_1 คือค่าแรงดันอินพุต RMS (Root Mean Square) I_1 และ I_2 คือค่ากระแสเฟเซอร์ RMS ปฐมภูมิและทุติยภูมิ เมื่ออินเวอร์เตอร์ที่ 2.40 กระแสในด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิจะถูกแสดง ดังนี้

$$I_1 = \frac{R_2 + R_L + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})}{[R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})][R_2 + R_L + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})] + \omega^2 M^2} V_1 \quad (2.41)$$

$$I_2 = \frac{-j\omega M}{[R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})][R_2 + R_L + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})] + \omega^2 M^2} V_1 \quad (2.42)$$

อิมพีแดนซ์สมมูล $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$ ที่เห็นได้จากเครื่องกำเนิดแรงดัน V_1 คือ

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} = R_1 + j\omega L_1 - \frac{j}{\omega C_1} + \frac{M^2 \omega^2}{j\omega L_2 - \frac{j}{\omega C_2} + R_2 + R_L} \quad (2.43)$$

เพื่อกำจัดส่วนจินตภาพของ X_{in} ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ω_0 และเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและการถ่ายโอนกำลังสูงสุด ค่าของความจุของตัวเก็บประจุปฐมภูมิและทุติยภูมิต้องเป็น

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_1}, C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2} \quad (2.44)$$

ประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังจะถูกแสดง ดังนี้

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R_2 + \frac{R_1}{\omega^2 M^2} [(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})^2 + (R_2 + R_L)^2]} \quad (2.45)$$

หากระบบทำงานภายใต้สถานะเรโซแนนซ์ นั่นคือ $\omega = \omega_0$ และค่าความจุของตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 จะถูกปรับตามสมการที่ (2.44) และ (2.45) ให้เป็นรูปอย่างง่าย ดังนี้

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R_2 + \frac{R_1}{\omega^2 M^2} (R_2 + R_L)^2} \quad (2.46)$$

และกำลังที่ถ่ายโอนไปยังโหลดคือ

$$P_0 = R_L I_2^2 = R_L \left(\frac{V_1 \omega M}{R_1 (R_2 + R_L) + \omega^2 M^2} \right)^2 \quad (2.47)$$

หาก R_1 และ R_2 ไม่ถูกนำมาพิจารณา กำลังเอาต์พุตจะเป็น $P_0 = R_L V_i^2 / (\omega_0 M)^2$ ดังนั้น องค์ประกอบทางไฟฟ้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า และกำลังเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นเมื่อความต้านทานโหลด (R_L) เพิ่มขึ้น

2.3.1 การวิเคราะห์ความไวของความเหนี่ยวนำร่วม

เมื่อทำการอนุพันธ์สมการที่ 2.46 เป็นไปได้ที่จะศึกษาว่าประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังได้รับผลกระทบจากการเหนี่ยวนำร่วมอย่างไร

$$\frac{\partial \eta}{\partial M} = \frac{2MR_1R_L\omega^2(R_2+R_L)^2}{\{(R_2+R_L)\omega^2M^2\}+[R_1(R_2+R_L)]^2} \quad (2.48)$$

จากสมการ 2.48 อนุพันธ์จะเป็นบวกเสมอ ประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเหนี่ยวนำร่วมเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงจำเป็นต้องมีจำนวนรอบในการพันขดลวดสูง วิธีการเดียวกันนี้ใช้เพื่อใช้ประโยชน์จากการพึ่งพากำลังเอาต์พุตบนตัวเหนี่ยวนำร่วมกัน จากสมการ 2.47 กำลังเอาต์พุต (P_0) จะมีค่าสูงสุดเมื่อกระแสหตุติภูมิ (I_2) ถูกเพิ่มให้สูงสุดตาม M ดังนั้น

$$\frac{\partial I_2}{\partial M} = \frac{V_1\omega R_1(R_2+R_L)-V_1\omega^3M^2}{\{[R_1(R_2+R_L)+\omega^2M^2]\}^2} \quad (2.49)$$

จากสมการที่ 2.49 ค่าของตัวเหนี่ยวนำร่วมกันซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังสูงสุดจะถูกแสดง ดังนี้

$$M^{P_0} = \sqrt{\frac{R_1(R_2+R_L)}{\omega^2}} \quad (2.50)$$

2.3.2 การวิเคราะห์ความไวของควมถี่ในการใช้งาน

จากสมการ 2.45 ประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังจะถูกจัดเรียงใหม่ ดังนี้

$$\eta(\omega) = \frac{N(\omega)}{D(\omega)} = \frac{\omega^4 C_2^2 M^2 R_L}{\omega^4 C_2^2 [M^2 R + L_2^2 R_1] + \omega^2 R_1 [C_2^2 R^2 - 2L_2 C_2] + R_1} \quad (2.51)$$

เพื่อทำความเข้าใจค่า ω ที่ทำให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังมีค่าสูงสุด จึงมีการศึกษาอนุพันธ์ของมัน ดังนี้

$$\frac{\partial \eta(\omega)}{\partial \omega} = \frac{N'(\omega)D(\omega) - N(\omega)D'(\omega)}{D^2(\omega)} = \frac{2\omega^3 C_2^2 M^2 R_1 R_L [\omega^2 [C_2^2 R^2 - 2L_2 C_2] + 2]}{D^2(\omega)} \quad (2.52)$$

สมมติว่าค่าความจุของตัวเก็บประจุหตุติภูมิ C_2 ออกแบบมาเพื่อสะท้อนตัวเหนี่ยวนำหตุติภูมิ L_2 ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ω_0 ความถี่เชิงมุม ω^n ที่ทำให้ประสิทธิภาพการส่งกำลังมีค่าสูงสุด คือ

$$\omega^{\eta_{max}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\omega_0^2} - \frac{1}{2}R^2C_2^2}} \quad (2.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\frac{1}{\omega_0^2} \gg \frac{1}{2} R^2 C_2^2$;

$$\omega^{\eta_{max}} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (2.54)$$

นี่เป็นการยืนยันว่าประโยชน์หลักๆที่ได้จากการใช้ความถี่ที่ความถี่เรโซแนนซ์คือจะได้ประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังสูงสุด เมื่อนำสมการ 2.47 อนุพันธ์เทียบกับ ω ความถี่เชิงมุมที่จะทำให้กำลังเอาต์พุตมีค่าสูงสุดคือ

$$\omega^{P_0} = \sqrt{\frac{R_1(R_2+R_L)}{M^2}} \quad (2.55)$$

2.3.3 การวิเคราะห์ความไวของความต้านทานโหลด

กำหนดให้ $\delta = M^2 R_2 + L_2^2 R_1$ และ $\psi = C_2 R_2^2 - 2L_2$ ประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังเป็นฟังก์ชันของความต้านทานโหลด ดังนี้

$$\eta(R_L) = \frac{\omega^2 M^2 C_2^2 R_L}{C_2^2 R_1 R_L + C_2^2 [\omega^2 M^2 + 2R_1 R_2] R_L + \omega^2 C_2^2 \delta + C_2 R_1 \psi + \frac{R_1}{\omega^2}} \quad (2.56)$$

เมื่อนำสมการ 2.56 อนุพันธ์เทียบกับ R_L จะได้

$$\frac{\partial \eta}{\partial R_L} = \frac{\omega^4 M^2 C_2^4 \delta + \omega^2 M^2 C_2^3 R_1 \psi + M^2 C_2^2 R_1}{D^2(R_L)} \quad (2.57)$$

จากสมการ 2.57 ความต้านทานโหลดซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังจะเป็นดังนี้

$$R_L^\eta = \sqrt{\frac{\omega^4 C_2^2 [M^2 R_2 + L_2^2 R_1] + \omega^2 C_2 R_1 [C_2 R_2^2 - 2L_2] + R_1}{\omega^2 C_2^2 R_1}} \quad (2.58)$$

ถ้าระบบทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ $\omega = \omega_0$ และค่าความจุของตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ถูกออกแบบมาตามสมการ 2.44 ทำให้สมการ 2.58 เป็นดังนี้

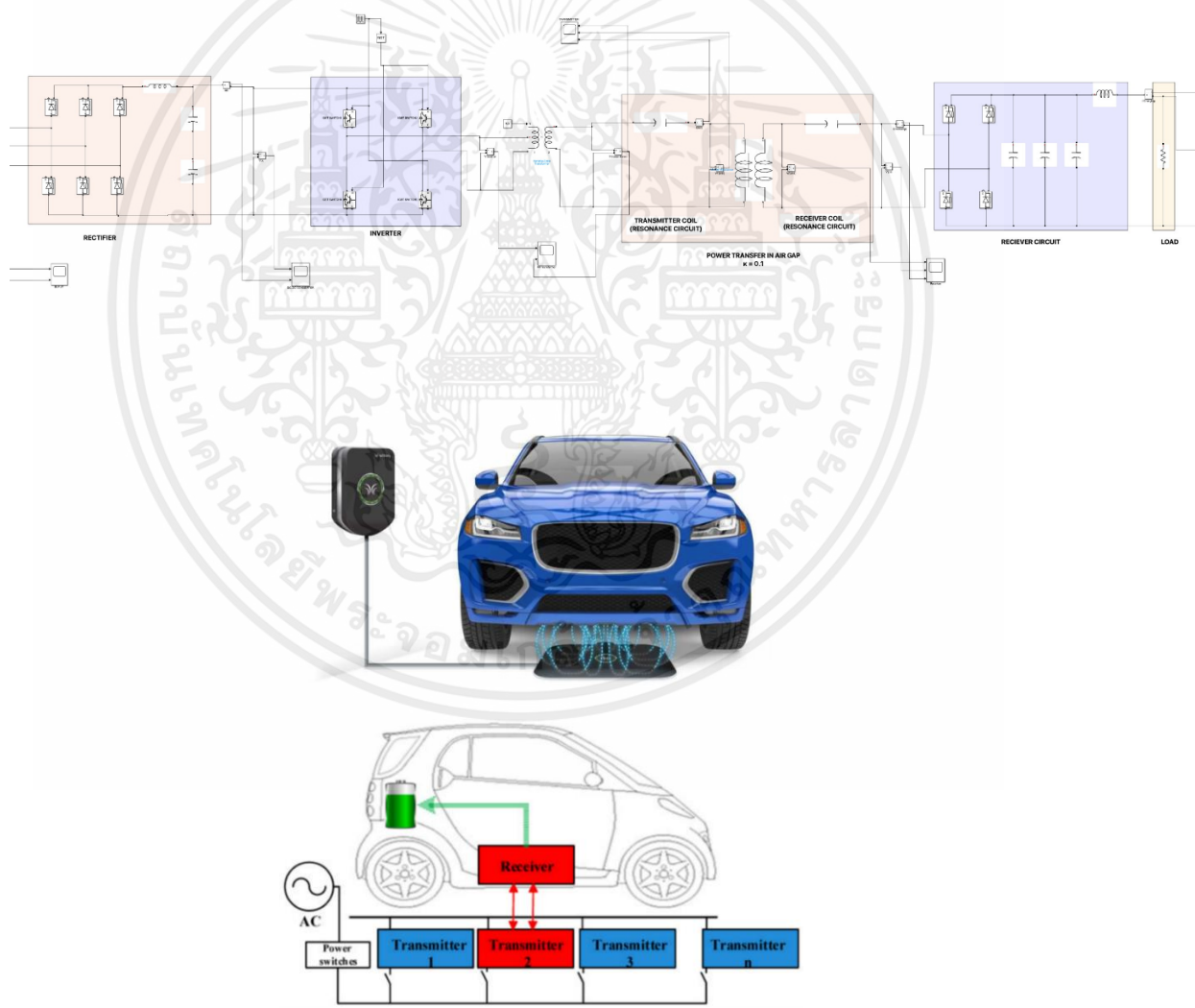
$$R_L^\eta = R_2 \sqrt{1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_1 R_2}} \quad (2.59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาและพัฒนาเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับแบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 72 V โดยจะออกแบบจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink และประกอบสร้างวงจรซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1. วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย (Transmitter Circuit) 2. วงจรรับกำลังไฟฟ้าและชาร์จประจุแบตเตอรี่ (Receiver and Charger Circuit) และ 3. การจำลองการเกิดความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดส่งกำลังไฟฟ้า (Magnetic Circuit and Mutual Inductance)



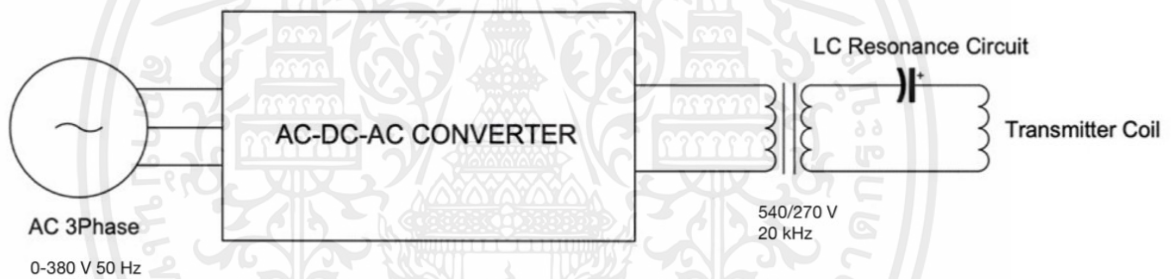
รูปที่ 3.1 แผนผังวงจรของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายและการชาร์จประจุขณะยานยนต์หยุดนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

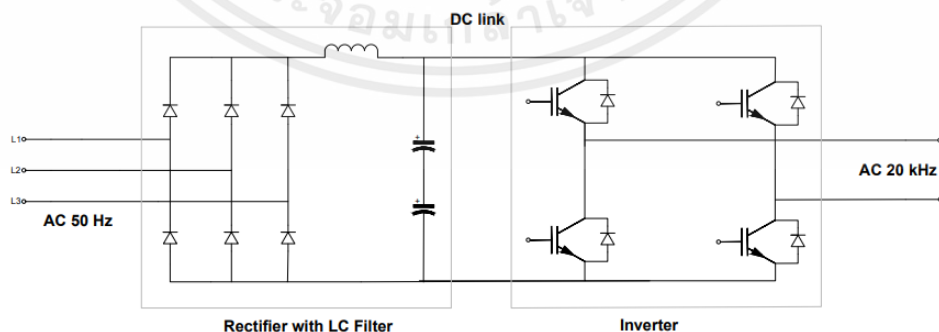
3.1 การออกแบบของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

3.1.1 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายจะมีหน้าที่แปลงปริมาณทางไฟฟ้า (Converting) โดยรับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายสามเฟส $0-380\text{ V}_{\text{rms}}$ 50 Hz แปลงเป็นระบบไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อประสิทธิภาพในการส่งกำลังผ่านอากาศ ความถี่ที่เลือกใช้คือ 20 kHz และปรับระดับแรงดันและกระแสที่ต้องการจ่ายเข้าหม้อแปลงลดระดับแรงดัน $540/270\text{ V}$ เพื่อให้มีกระแสไหลในวงจรคอนเวอร์เตอร์ต่ำกว่ากระแสของขดลวดส่งกำลัง ลดความร้อนและกำลังสูญเสียในวงจรเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์จากนั้นวงจร LC เรโซแนนซ์จะสร้างกระแสสูงความถี่สูงไหลเข้าขดลวดส่งกำลัง (Transmitter Coil) ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเป็นพาหะในการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ



รูปที่ 3.2 แผนผังวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย



รูปที่ 3.3 วงจร AC-DC-AC Converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดการออกแบบวงจรส่ง กำลังพิกัดของวงจรส่งกำลัง 1.5 kW ความถี่ส่งกำลัง 20 kHz โดยวงจรส่งกำลังประกอบด้วยวงจร 2 ส่วนดังนี้

1. วงจร AC-DC-AC คอนเวอร์เตอร์

1.1 วงจรไดโอดเรียงกระแส (Diode Full Bridge Rectifier) ต่อเข้ากับวงจร LC Filter เปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสสลับ 0-380 V 50 Hz แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 0-540 V

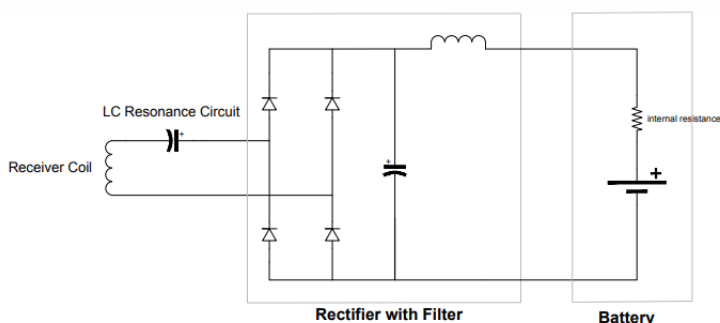
1.2 วงจร Buck Converter ลดระดับแรงดันจาก 0-540 V_{DC} เป็นระดับพิกัดแรงดันที่ต้องการจ่ายเข้าอินเวอร์เตอร์ในช่วง 0-540 V_{DC} โดยใช้ IGBT เป็นอุปกรณ์ switching ความถี่สัญญาณ PWM ขับขา gate ที่ 20kHz

1.3 วงจร High Frequency Inverter เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงแปลงเป็นกระแสสลับความถี่ 20 kHz โดยใช้ IGBT Ultrafast เป็นอุปกรณ์ switching เพื่อแปลงกระแสตรง 0-540 V_{DC} เป็นกระแสสลับ 0-380 V_{AC} ความถี่ 20 kHz เพื่อป้อนให้ชุดวงจรเรโซแนนซ์ส่งกำลัง

2. ขดลวดส่งกำลัง โดยมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับชุดขดลวดเพื่อสร้างสัญญาณเรโซแนนซ์ทำให้เกิดกระแสสูงความถี่สูง

3.1.2 วงจรรับกำลังไฟฟ้าไร้สาย

วงจรรับกำลังทำหน้าที่รับกำลังไฟฟ้าที่ส่งมาโดยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงจากขดลวดส่งกำลัง สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Electromotive Force) ตกคร่อมขดลวดและกระแสเหนี่ยวนำ (Induced Current) จากแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเข้าวงจรชาร์จประจุ



รูปที่ 3.4 วงจรรับกำลังไฟฟ้า

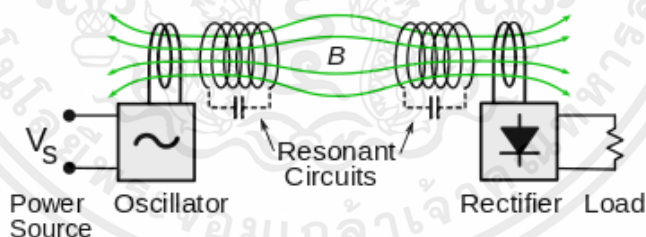
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรรับกำลังในโครงงานนี้ออกแบบวงจรอัดประจุสำหรับอัดประจุแบตเตอรี่ 72 V พิกัดแรงดันชาร์จจิ้ง 84 V_{DC} พิกัดกระแสชาร์จจิ้ง 18A โดยวงจรรับกำลังประกอบด้วยวงจร 2 ส่วน ดังนี้

1. วงจรชุดขดลวดรับกำลัง (Receiver Coil) ขดลวดต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุเพื่อสร้างสัญญาณเรโซแนนซ์ที่ตรงกับความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งมาจากชุดขดลวดส่ง
2. วงจรเรียงกระแสและฟิลเตอร์ (Rectifier and Filter Circuit) แปลงกระแสสลับความถี่สูงเป็นกระแสตรงและกรองรูปสัญญาณให้เรียบ

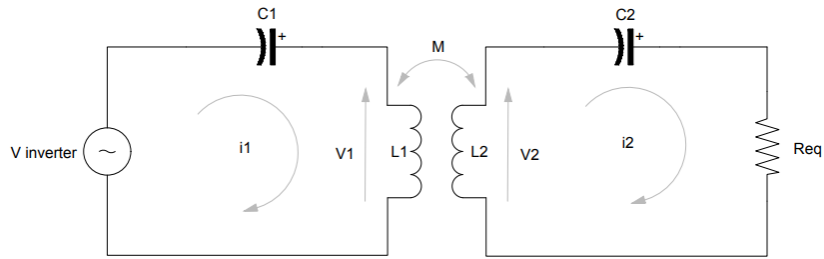
3.1.3 ขดลวดส่งกำลังและขดลวดรับกำลัง

การออกแบบขดลวดรับและส่งจะทำการพันขดลวดเป็นวงกลมเพื่อทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอ (Uniform Field) แต่กระแสสูง พิกัดกระแสขดลวดส่งกำลังและกระแสขดลวดรับ 20 A ใช้สายไฟแบบ Litz Wire มาพันเป็นขดลวดส่งและขดลวดรับกำลัง ซึ่งเป็นสายไฟแบบแกนฝอยเพื่อลดผลจากการปรากฏการณ์กระแสไหลตามผิว (Skin Effect) เมื่อกระแสมีความถี่สูง ลดกำลังสูญเสียในขดลวด



รูปที่ 3.5 คลื่นแม่เหล็กความถี่สูงโดยใช้วงจรเรโซแนนซ์

การส่งกำลังผ่านอากาศโดยใช้สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ สามารถอธิบายโดยใช้หลักการเดียวกันกับหม้อแปลงแกนอากาศ กระแสความถี่สูงที่ไหลผ่านขดลวดส่งสร้างสนามแม่เหล็กที่ขนาดเปลี่ยนแปลงและเหนี่ยวนำขดลวดรับให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสเหนี่ยวนำ ฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องทั้งสองขดลวดทำให้เกิดความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ ดังนี้



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลระบบชาร์จไร้สาย

ความเหนี่ยวนำร่วม (M) ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าอธิบายได้ดังสมการ

V_{L1} คือ แรงดันขดลวดส่งกำลังไฟฟ้า, V_{L2} คือ แรงดันขดลวดรับกำลังไฟฟ้า

$$\text{โดย } V_{L2} = \frac{M di_1}{dt}, i_1 = \frac{I_1(p-p)}{2} \cos(2\pi ft), f = 20 \text{ kHz} \quad (3.1)$$

$$= \frac{M I_1(p-p)}{2} \sin(2\pi f) \cdot 2\pi f \quad (3.2)$$

$$|V_{L2}| = \frac{M I_1(p-p)}{2} 2\pi f \quad (3.3)$$

$$M = \frac{2V_{L2} \cdot (2\pi f)}{I_1(p-p)} = \frac{V_{L2} \cdot (4\pi f)}{I_1(p-p)} \text{ (H)} \quad (3.4)$$

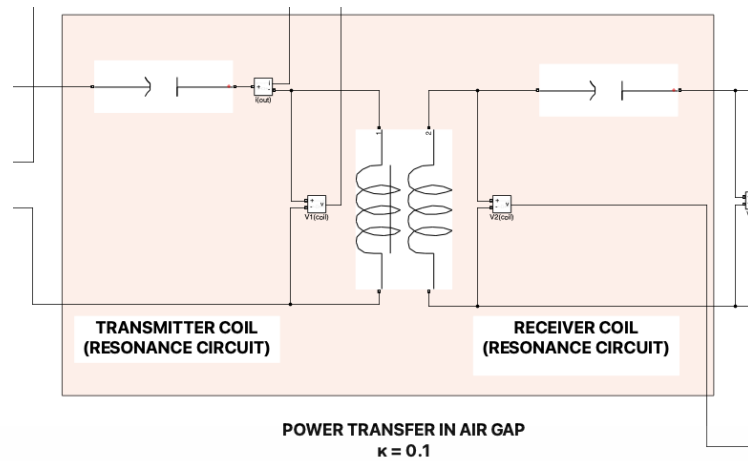
โดยค่า Coupling Coefficient (k) ขึ้นกับระยะห่างระหว่างขดลวดส่งและขดลวดรับ สามารถหาได้จากการทดลอง โดยการลัดวงจรขดลวดรับและจ่ายกระแสค่าต่ำเข้าขดลวดส่งเพื่อสร้างฟลักซ์แม่เหล็ก จากนั้นวัดค่าความเหนี่ยวนำที่ขดลวดรับที่ทำการลัดวงจร และนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์ความเหนี่ยวนำร่วม

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (3.5)$$

$$k = \frac{V_{L2} \cdot (4\pi f)}{(\sqrt{L_1 L_2}) I_1(p-p)} \quad (3.6)$$

โดยที่ M ได้จากการทดลอง และ $\sqrt{L_1 L_2}$ ได้จากการวัดในการจำลอง MATLAB Simulink จะเลือกใช้ค่าในการจำลองการส่งกำลังผ่านอากาศ ดังนี้ L_1 (Transmitter Coil) = 100 μH , L_2 (Receiver Coil) = 30 μH Coupling Coefficient $k = 0.1$, $M = 10 \mu\text{H}$ ซึ่งจากการจำลองสามารถส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศได้

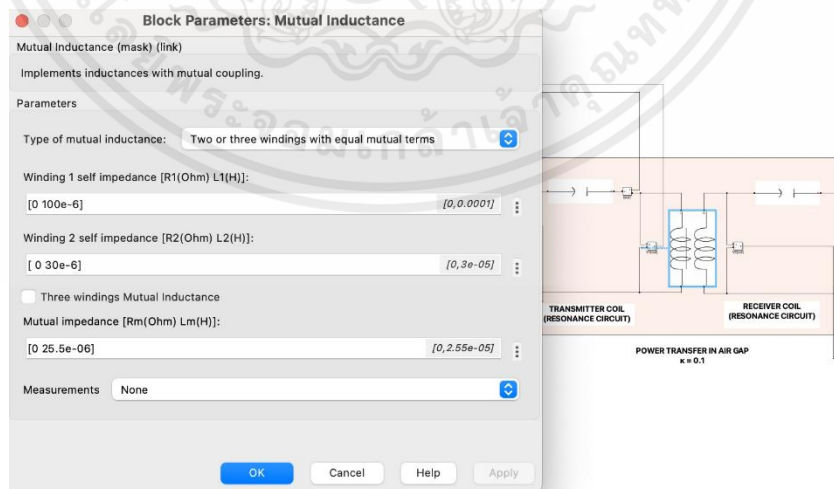
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การจำลองการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ

3.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink

จำลองโดยจ่ายไฟฟ้าสามเฟสแรงดัน 380 V เข้าวงจรส่งกำลังโดยกำหนดระยะห่างระหว่างขดลวดส่งกำลังและขดลวดรับกำลัง 5-20 เซนติเมตร จากนั้นวัดค่าแรงดัน กระแส และรูปคลื่นสัญญาณ โดยจะทำการแสดงค่าจาก 4 ส่วนของวงจรได้แก่ 1. กระแสและแรงดันหลังผ่านวงจรเรียงกระแส 2. กระแสและแรงดันของวงจรเรโซแนนซ์ของขดลวดส่ง 3. กระแสและแรงดันของวงจรเรโซแนนซ์ ของขดลวดรับ และ 4. กระแสและแรงดันเข้าแบตเตอรี่ แสดงดังตารางที่ 3.1-3.4



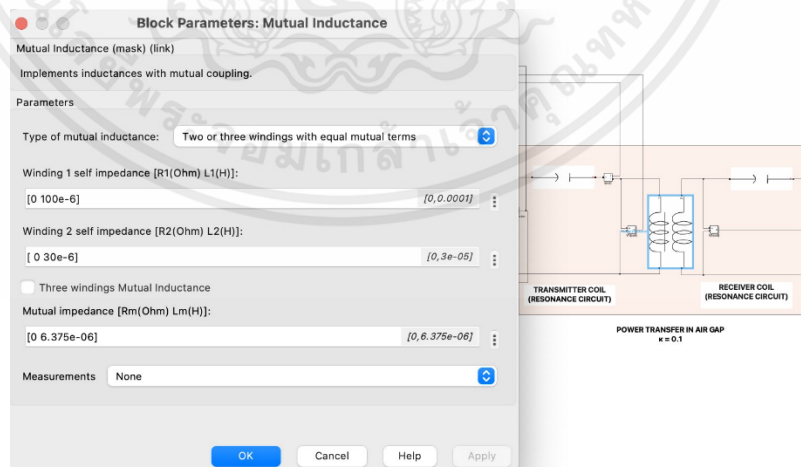
รูปที่ 3.8 พารามิเตอร์ในการจำลองที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 380 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 5 เซนติเมตร

Location	แรงดัน (V)	กระแส (A)
3-phase source 50Hz	380	14.7
DC link	511.5	19.14
LC Resonance Transmitter Coil	255.8	35.91
LC Resonance Receiver Coil	127.8	70.71
DC Charger	126.2	63.08

จากตารางที่ 3.1 วงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่ออกแบบในโปรแกรม MATLAB Simulink จะมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากต้นทางที่พิจารณา คือ DC link สู่ปลายทาง DC Charger เท่ากับ 81.31 % และประสิทธิภาพในการส่งกำลังผ่านอากาศเท่ากับ 98.37 % จะเห็นว่าจากการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink การสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



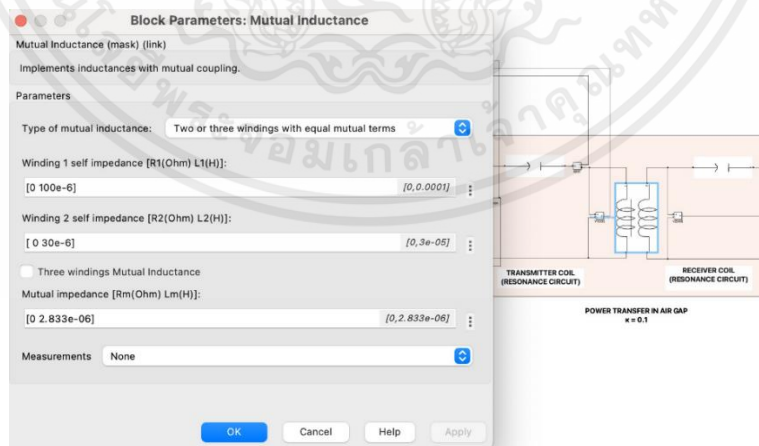
รูปที่ 3.9 พารามิเตอร์ในการจำลองที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 10 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 380 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 10 เซนติเมตร

Location	แรงดัน (V)	กระแส (A)
3-phase source 50Hz	380	3.68
DC link	511.5	4.79
LC Resonance Transmitter Coil	256.5	8.98
LC Resonance Receiver Coil	126.7	17.68
DC Charger	124.8	15.77

จากตารางที่ 3.2 วงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่ออกแบบในโปรแกรม MATLAB Simulink จะมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากต้นทางที่พิจารณา คือ DC link สู่ปลายทาง DC Charger เท่ากับ 80.33 % และประสิทธิภาพในการส่งกำลังผ่านอากาศเท่ากับ 9.725 % จะเห็นว่าจากผลการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink การสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



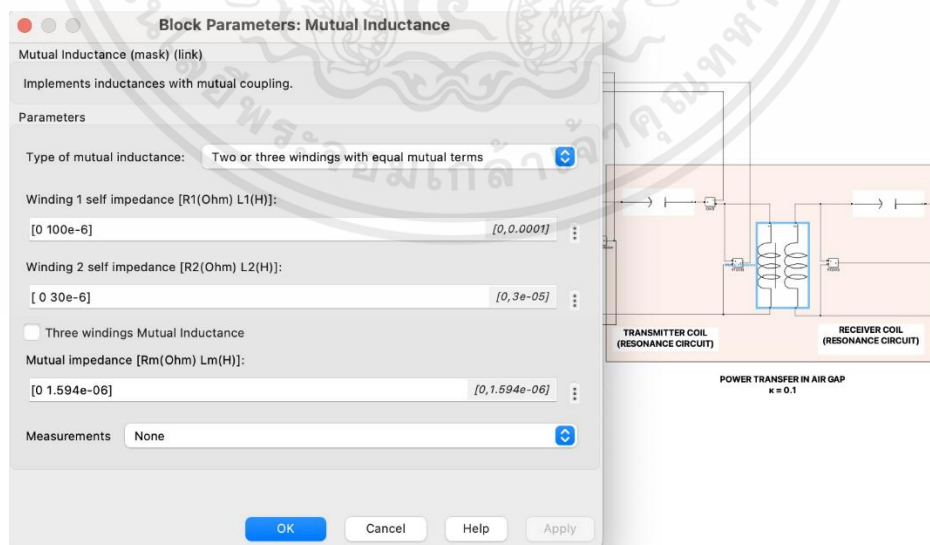
รูปที่ 3.10 พารามิเตอร์ในการจำลองที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 15 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ผลการจำลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 380 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 15 เซนติเมตร

Location	แรงดัน (V)	กระแส (A)
3-phase source 50Hz	380	1.63
DC link	511.5	2.13
LC Resonance Transmitter Coil	253.8	3.99
LC Resonance Receiver Coil	126.1	7.86
DC Charger	123.5	7.01

จากตารางที่ 3.3 วงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่ออกแบบในโปรแกรม MATLAB Simulink จะมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากต้นทางที่พิจารณา คือ DC link สู่ปลายทาง DC Charger เท่ากับ 79.46 % และประสิทธิภาพในการส่งกำลังผ่านอากาศเท่ากับ 97.88 % จะเห็นว่าจากการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink การสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



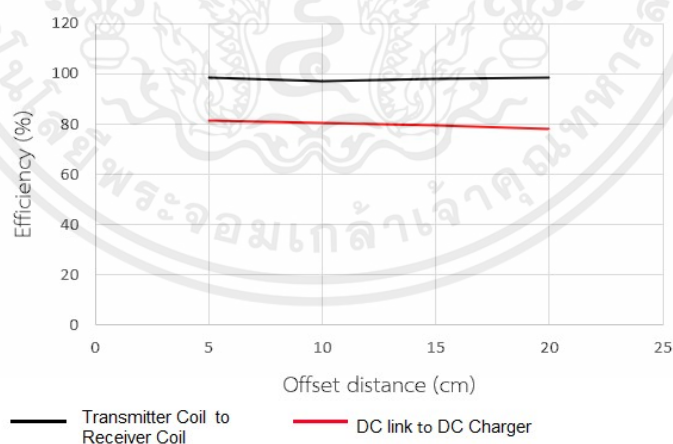
รูปที่ 3.11 พารามิเตอร์ในการจำลองที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 20 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ผลการจำลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 380 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 20 เซนติเมตร

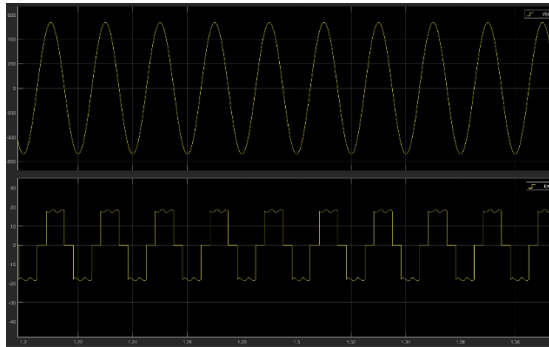
Location	แรงดัน (V)	กระแส (A)
3-phase source 50Hz	380	0.92
DC link	511.5	1.21
LC Resonance Transmitter Coil	251.2	2.24
LC Resonance Receiver Coil	125.4	4.42
DC Charger	122.5	3.94

จากตารางที่ 3.4 วงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่ออกแบบในโปรแกรม MATLAB Simulink จะมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากต้นทางที่พิจารณา คือ DC link สู่ปลายทาง DC Charger เท่ากับ 77.98 % และประสิทธิภาพในการส่งกำลังผ่านอากาศเท่ากับ 98.51% จะเห็นว่าจากการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink การสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



รูปที่ 3.12 กราฟระหว่างประสิทธิภาพในการส่งกำลังไฟฟ้าที่ระยะต่างๆ

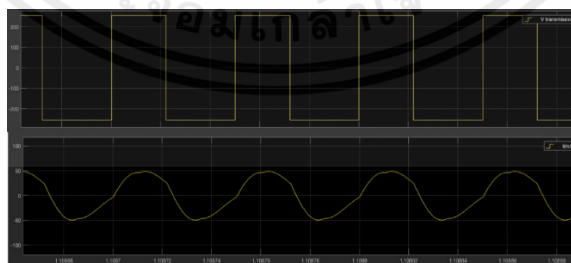
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส 3-phase source 50Hz 380 V (กราฟด้านบนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างรูปคลื่นขนาดแรงดันและเวลา/กราฟด้านล่างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างรูปคลื่นขนาดกระแสและเวลา)

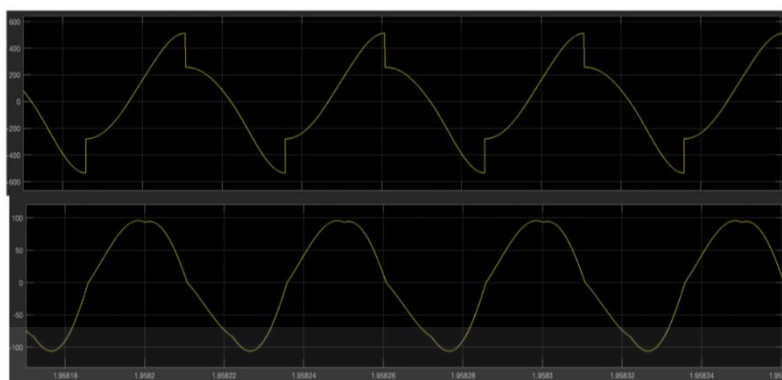


รูปที่ 3.14 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน DC link (กราฟด้านบนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างรูปคลื่นขนาดกระแส DC link และเวลา/กราฟด้านล่างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างรูปคลื่นขนาดแรงดัน DC link และเวลา)



รูปที่ 3.15 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน LC Resonance Transmitter Coil (กราฟด้านบนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างรูปคลื่นขนาดกระแส LC Resonance Transmitter Coil และเวลา/กราฟด้านล่างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างรูปคลื่นขนาดแรงดัน LC Resonance Transmitter Coil และเวลา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน LC Resonance Receiver Coil (กราฟด้านบนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างรูปคลื่นขนาดกระแส LC Receiver Coil และเวลา/กราฟด้านล่างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างรูปคลื่นขนาดแรงดัน LC Resonance Receiver Coil และเวลา)



รูปที่ 3.17 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน DC Charger (กราฟด้านบนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างรูปคลื่นขนาดกระแส DC Charger และเวลา/กราฟด้านล่างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างรูปคลื่นขนาดแรงดัน DC Charger และเวลา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

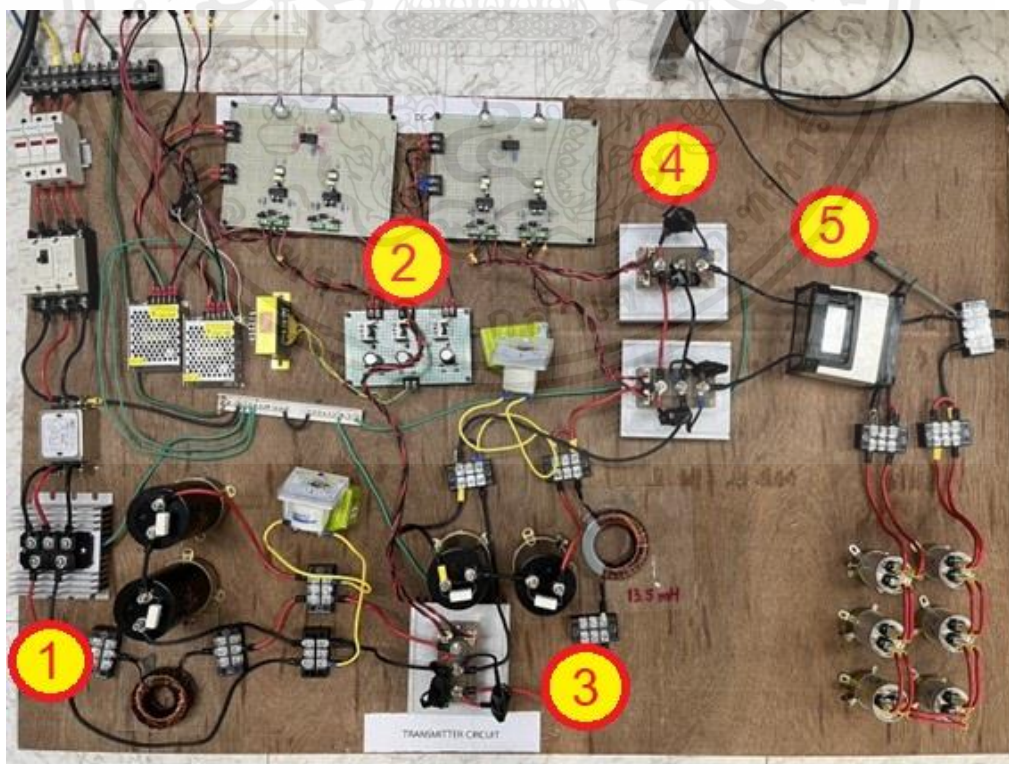
การออกแบบและทดลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย

จากการศึกษาและพัฒนาออกแบบเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับแบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 72 V และทำการทดลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายจริงที่สร้างขึ้น เพื่อทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลพร้อมกับวิเคราะห์ผลการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ

4.1 การสร้างวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย

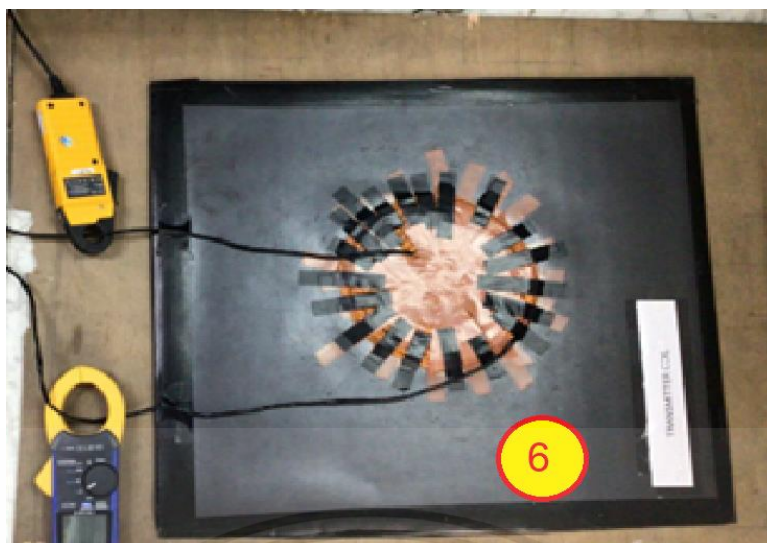
4.1.1 การประกอบสร้างวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

จากการจำลองวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink ต่อมา จะประกอบสร้างวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายที่ใช้งานจริง ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งจะประกอบด้วย 1) วงจร Rectifier, 2) วงจร IGBT Controller and Gate driver, 3) วงจร Converter, 4) วงจร Inverter, 5) หม้อแปลงความถี่สูง และ 6) วงจร LC เรโซแนนซ์สำหรับส่งกำลังผ่านอากาศ



รูปที่ 4.1 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

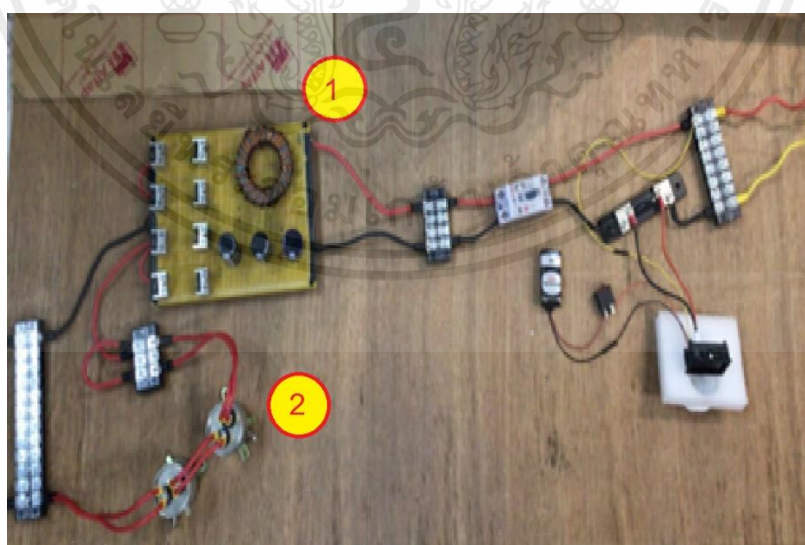
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 วงจร LC เรโซแนนซ์สำหรับส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ

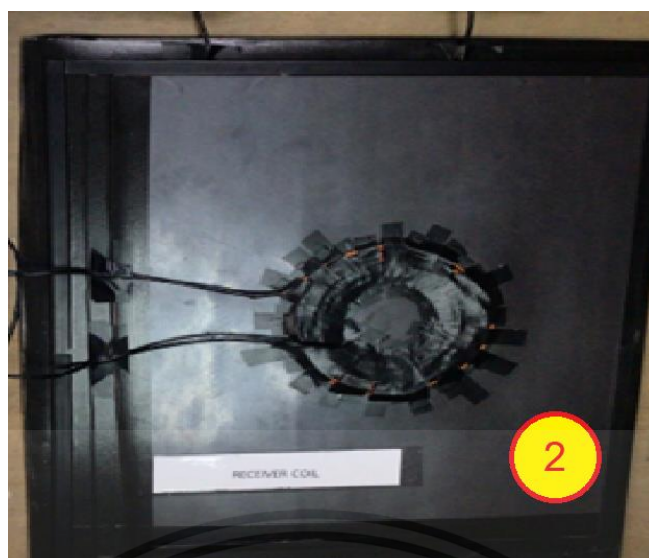
4.1.2 การประกอบสร้างวงจรรับกำลังไฟฟ้าและชาร์จประจุแบตเตอรี่

จากการจำลองวงจรรับกำลังไฟฟ้าและชาร์จประจุแบตเตอรี่ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink ต่อมาจะประกอบสร้างวงจรรับกำลังไฟฟ้าและชาร์จประจุแบตเตอรี่ที่ใช้งานจริง ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งจะประกอบด้วย 1) วงจร Rectifier HYPER Fast Diode และ 2) วงจร LC เรโซแนนซ์สำหรับรับกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ



รูปที่ 4.3 วงจรรับกำลังไฟฟ้า

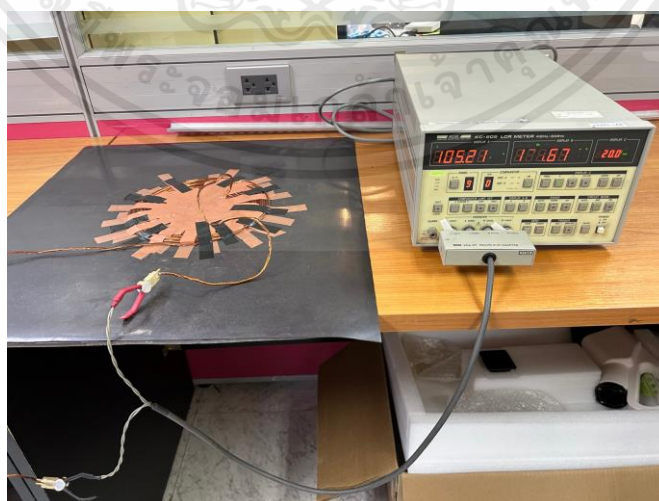
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 วงจร LC เรโซแนนซ์สำหรับรับกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ

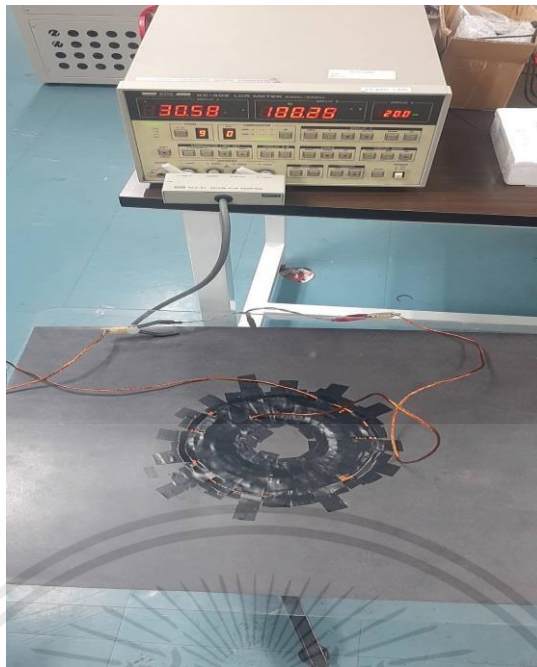
4.1.3 การประกอบสร้างขดลวดส่งและรับกำลังไฟฟ้า

ทำการพันขดลวดรับและส่งเป็นวงกลมเพื่อให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอ (Uniform Field) พิกัดกระแสขดลวดส่งกำลังและกระแสขดลวดรับ 20 A ใช้สายไฟแบบ Litz Wire มาพันเป็นขดลวดส่งและขดลวดรับกำลัง ซึ่งเป็นสายไฟแบบแกนฝอยเพื่อลดผลจากการปรากฏการณ์กระแสไหลตามผิว (Skin Effect) เมื่อกระแสมีความถี่สูง ลดกำลังสูญเสียในขดลวด ซึ่งค่า L ของขดลวดส่ง (Transmitter Coil) = 100 μH , ค่า L ของขดลวดรับ (Receiver Coil) = 30 μH ทำการวัดค่า L ด้วยเครื่อง LCR Meter

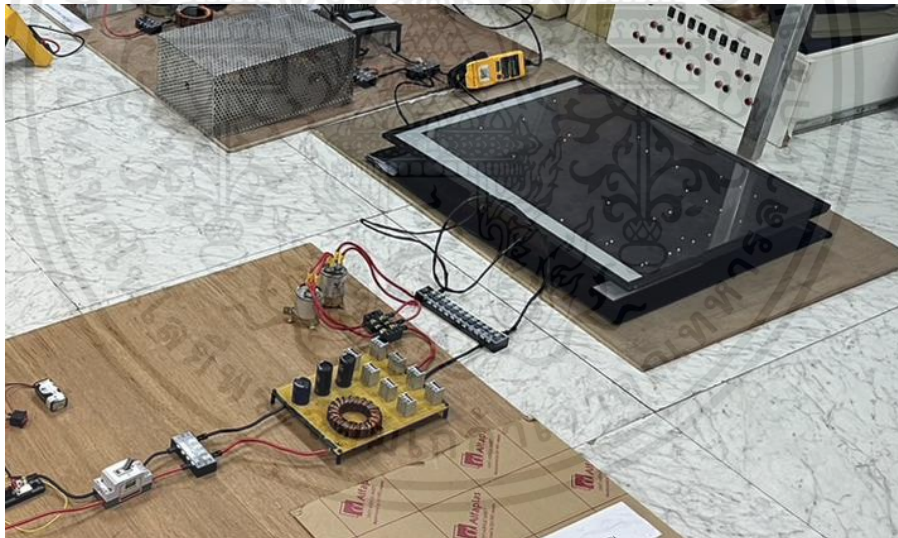


รูปที่ 4.5 ค่า L ของขดลวดส่ง (Transmitter Coil)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

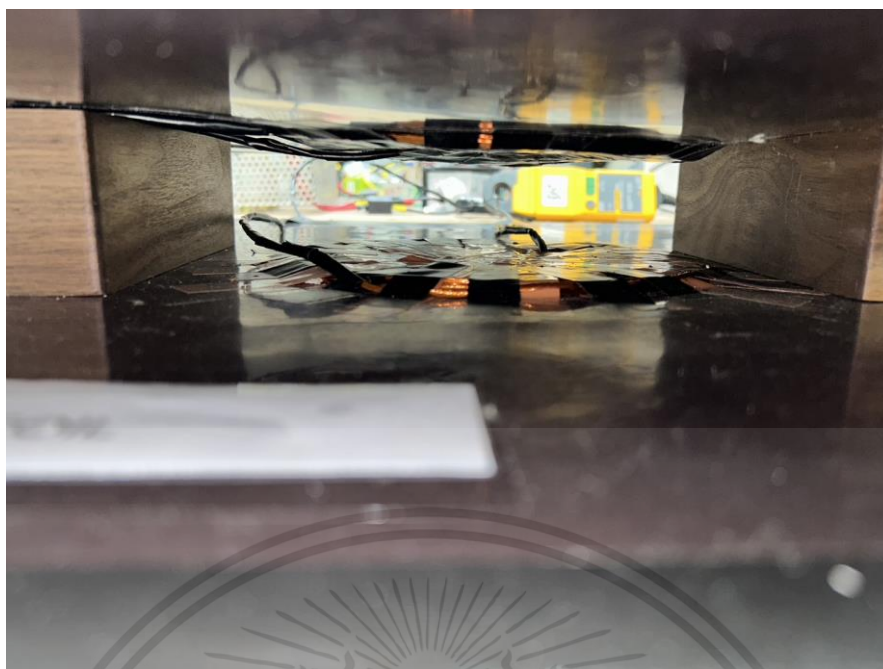


รูปที่ 4.6 ค่า L ของขดลวดรับ (Receiver Coil)



รูปที่ 4.7 การประกบขดลวดส่งและรับกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 การเกิดความเหนียวร่วมระหว่างขดลวดส่งและรับกำลังไฟฟ้า

4.2 ผลการทดลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย

ทดสอบโดยจ่ายไฟฟ้าสามเฟสแรงดัน 0-70 V ปรับด้วย Variac เข้าวงจรส่งกำลังที่ต่อแผงหลอดไฟเป็นโหลดปลายทางโดยกำหนดระยะห่างระหว่างขดลวดส่งกำลังและขดลวดรับกำลัง 5-20 เซนติเมตร จากนั้นวัดค่าแรงดัน กระแส และรูปคลื่นสัญญาณ โดยจะทำการแสดงค่าจาก 2 ส่วนของวงจรได้แก่ 1. กระแสและแรงดันหลังผ่านวงจรเรียงกระแส 2. กระแสและแรงดันเข้าโหลดปลายทาง แสดงได้ดังตารางที่ 4.1-4.4



รูปที่ 4.9 การทดลองวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 5 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 0-70 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 5 เซนติเมตร

3-phase source 50Hz (V)	Vin(DC) (V)	Iin(DC) (A)	Vout(DC) (V)	Iout(DC) (A)
10	12.01	0.663	2.95	1.47
20	25.41	1.159	6.32	3.12
30	39.33	1.674	9.69	4.85
40	52.99	2.179	13.1	6.53
50	66.6	2.685	16.4	8.21
60	80.3	3.199	19.8	9.90
70	94.1	3.697	23.2	11.6

จากตารางที่ 4.1 วงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายจริงที่สร้างขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากต้นทางที่พิจารณา คือ DC link สู่ปลายทาง DC Charger สูงสุดเท่ากับ 77.36 % จะเห็นจากผลการทดสอบ การสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



รูปที่ 4.10 การทดลองวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 10 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 0-70 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 10 เซนติเมตร

3-phase source 50Hz (V)	Vin(DC) (V)	Iin(DC) (A)	Vout(DC) (V)	Iout(DC) (A)
10	12.01	0.166	2.81	0.37
20	25.41	0.291	6.17	0.78
30	39.33	0.419	9.42	1.21
40	52.99	0.545	12.5	1.63
50	66.6	0.671	15.7	2.05
60	80.3	0.801	19.1	2.48
70	94.1	0.924	22.5	2.91

จากตารางที่ 4.2 วงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายจริงที่สร้างขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากต้นทางที่พิจารณา คือ DC link สู่ปลายทาง DC Charger สูงสุดเท่ากับ 75.31 % จะเห็นจากผลการทดสอบ การสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



รูปที่ 4.11 การทดลองวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 0-70 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 15 เซนติเมตร

3-phase source 50Hz (V)	Vin(DC) (V)	Iin(DC) (A)	Vout(DC) (V)	Iout(DC) (A)
10	12.01	0.074	2.24	0.16
20	25.41	0.129	5.51	0.35
30	39.33	0.186	8.71	0.54
40	52.99	0.242	12.3	0.73
50	66.6	0.298	15.3	0.91
60	80.3	0.355	18.7	1.11
70	94.1	0.411	22.1	1.29

จากตารางที่ 4.3 วงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายจริงที่สร้างขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากต้นทางที่พิจารณา คือ DC link สู่ปลายทาง DC Charger สูงสุดเท่ากับ 73.71 % จะเห็นจากผลการทดสอบ การสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

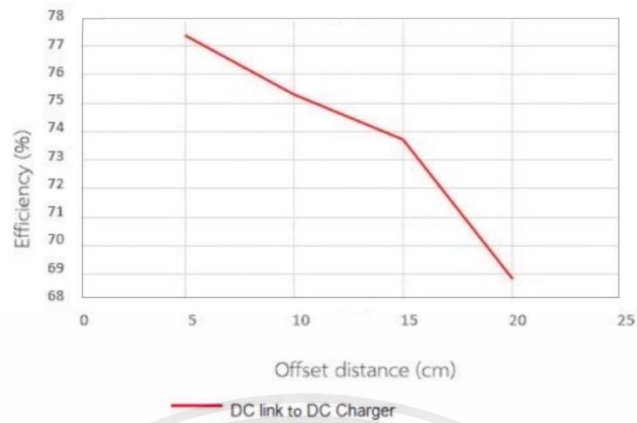


รูปที่ 4.12 การทดลองวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 20 เซนติเมตร

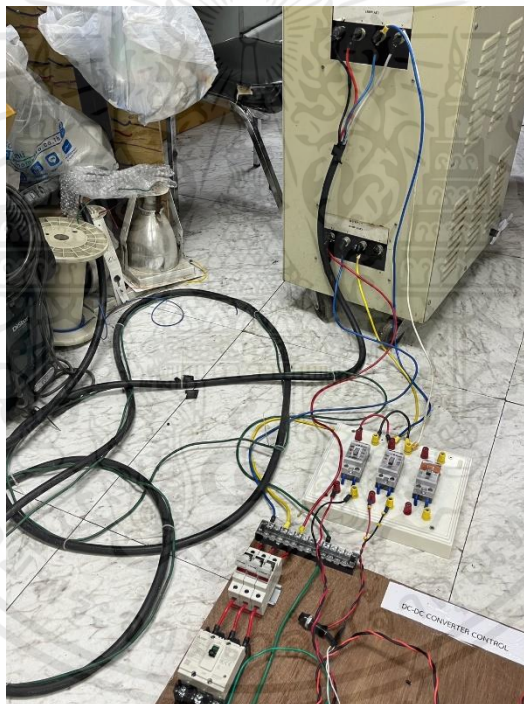
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส 0-70 V ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 20 เซนติเมตร

3-phase source 50Hz (V)	Vin(DC) (V)	Iin(DC) (A)	Vout(DC) (V)	Iout(DC) (A)
10	12.01	0.041	2.1	0.09
20	25.41	0.072	5.45	0.20
30	39.33	0.105	8.65	0.31
40	52.99	0.136	11.9	0.41
50	66.6	0.168	14.8	0.51
60	80.3	0.199	18.2	0.62
70	94.1	0.231	20.5	0.73

จากตารางที่ 4.4 วงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายจริงที่สร้างขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากต้นทางที่พิจารณา คือ DC link สู่ปลายทาง DC Charger สูงสุดเท่ากับ 68.85 % จะเห็นจากผลการทดสอบ การสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

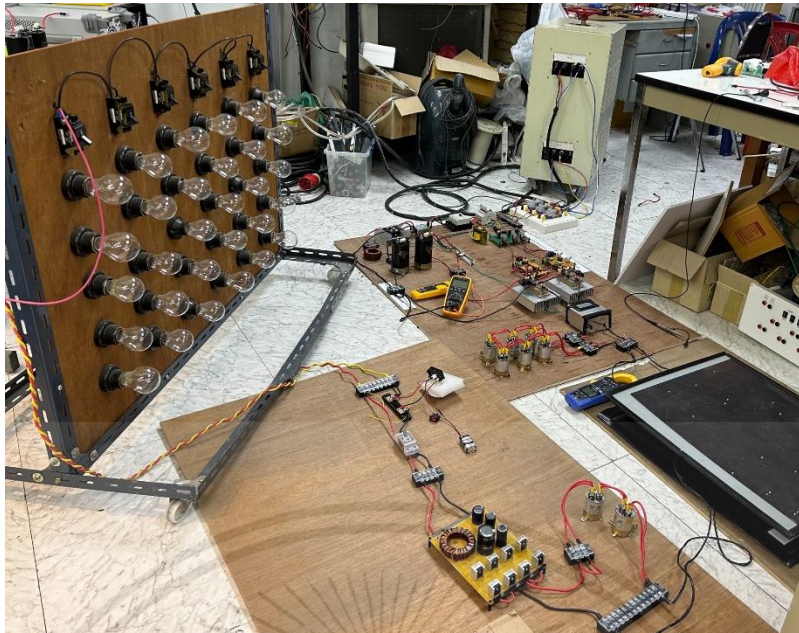


รูปที่ 4.13 กราฟระหว่างประสิทธิภาพในการส่งกำลังไฟฟ้าที่ระยะต่างๆ

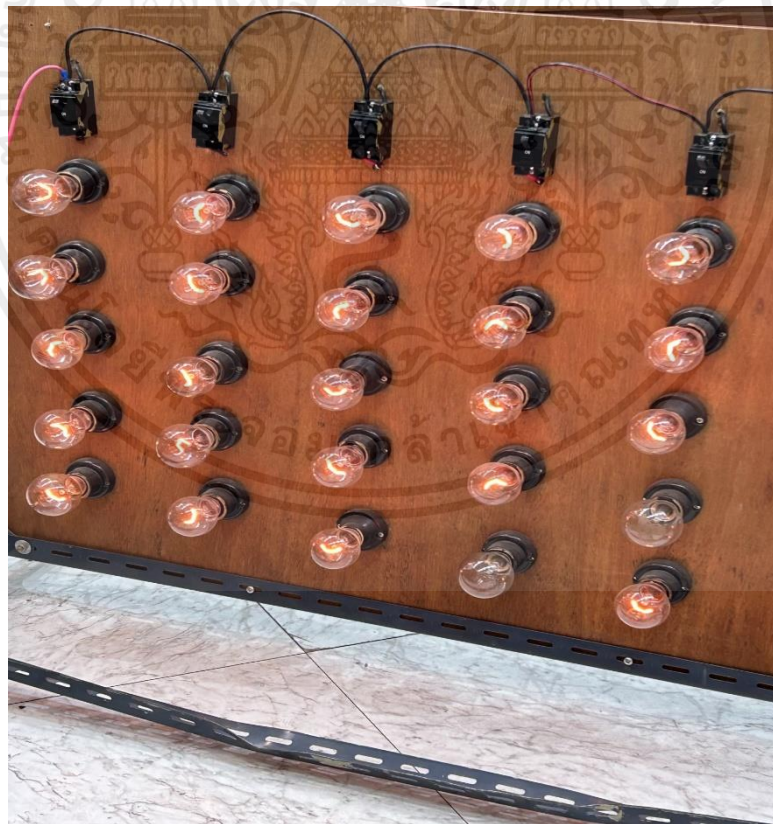


รูปที่ 4.14 Variac ปรับแรงดันตั้งแต่ 0-70 V เข้าสู่วงจรทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 การทดสอบวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย

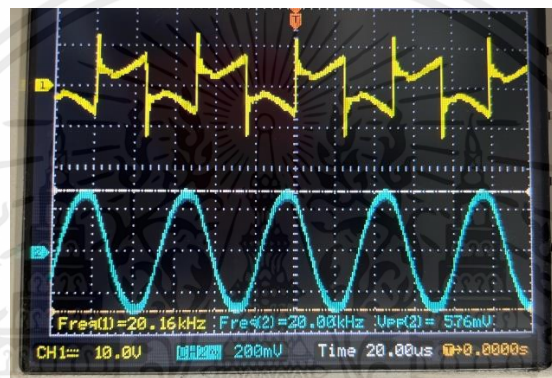


รูปที่ 4.16 แผงหลอดไฟที่ต่อเข้ากับวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายขณะทดสอบ

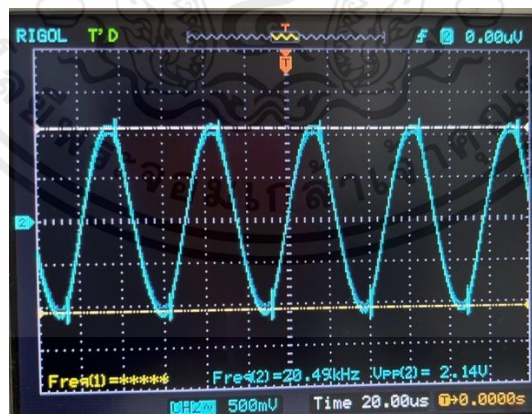
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟแรงดันและกระแสของขดลวดส่งกำลัง ขนาดกระแส 0.320 A_{p-p}



รูปที่ 4.18 กราฟแรงดันและกระแสของขดลวดส่งกำลัง ขนาดกระแส 0.576 A_{p-p}



รูปที่ 4.19 กราฟกระแสของขดลวดส่งกำลัง ขนาดกระแส 2.14 A_{p-p}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาและพัฒนาเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับแบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 72 V โดยจะทำการจำลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink และการทดลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายจริงที่สร้างขึ้น เพื่อทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลพร้อมกับวิเคราะห์ผลการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ โดยคณะผู้จัดทำได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการพัฒนาเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อการอำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าให้สามารถชาร์จประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ได้ทุกที่ที่มีการติดตั้งระบบการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายเป็นตัวเลือกเพิ่มเติมนอกเหนือจากการชาร์จประจุไฟฟ้าที่สถานีอัดประจุไฟฟ้าแบบเสียบสายไฟเข้ากับตัวรถ

เนื่องจากเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น โครงการนี้จึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อศึกษาและออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink และทำการสร้างวงจรขึ้นมาทดลองจริง

5.1.1 การจำลองวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink

การออกแบบวงจรอัดประจุไร้สายผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายให้สามารถส่งกำลังผ่านอากาศได้จริง พบว่าวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่ออกแบบในโปรแกรม MATLAB Simulink จะมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากต้นทางที่พิจารณาคือ DC link สู่ปลายทาง DC Charger ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 5,10,15 และ 20 เซนติเมตร เท่ากับ 81.31 %, 80.33 %, 79.46 % และ 77.98 % ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการส่งกำลังผ่านอากาศเท่ากับ 98.37 % , 97.25 % , 97.88 % และ 98.51 % จะเห็นว่าจากผลการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink การสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจากการสูญเสียกำลังที่มีค่าสูงมาจากอุปกรณ์ Power Electronic ทำให้ต้องปรับปรุงวงจร Converter ให้มีการสูญเสียน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 การทดลองวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย

เมื่อทำการทดลองวงจรอัดประจุไร้สายที่สร้างขึ้นมา พบว่าวงจรที่ออกแบบสามารถส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศได้โดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพาหะส่งกำลัง วงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายจริงที่สร้างขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากต้นทางที่พิจารณา คือ DC link สู่ปลายทาง DC Charger ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 5,10,15 และ 20 เซนติเมตร เท่ากับ 77.36 % , 75.31 % , 73.71 % และ 68.85 % ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 10 เซนติเมตร เป็นระยะที่เหมาะสมในการออกแบบเครื่องอัดประจุไร้สายเพื่อให้ยานยนต์ขนาดเล็กสามารถชาร์จได้และให้ประสิทธิภาพที่สูง จะเห็นว่าจากผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองวงจรอัดประจุไร้สายผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink วงจรอัดประจุไร้สายที่สร้างขึ้นมามีประสิทธิภาพต่ำกว่า เนื่องจากมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มากกว่า และในการทดลองนี้สามารถป้อนแรงดันอินพุตได้แค่ 70 V เนื่องจากข้อจำกัดทางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เมื่อเริ่มป้อนแรงดันอินพุตสูงขึ้น วงจรจะเกิดความร้อนสูงและเกิดความเสียหาย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 สามารถพัฒนางจรอัดประจุไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยแก้ไขวงจร LC เรโซแนนซ์สำหรับส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศและวงจรอินเวอร์เตอร์ให้สามารถปรับความถี่ของระบบได้สูงขึ้น

5.2.2 พัฒนางจรคอนโทรลให้สามารถปรับค่าแรงดันได้อัตโนมัติ โดยใช้ระบบควบคุมแบบปิดเป็นระบบควบคุมที่มีการป้อนอินพุตและมีการนำสัญญาณเอาต์พุตป้อนกลับเข้าสู่ระบบเพื่อเปรียบเทียบผลตอนสองหรือสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ

5.2.3 เพิ่มระบบระบายความร้อนในวงจร ด้วยการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1.] Bin Wu. (2017). High-Power Converters and AC Drives: Wiley-IEEE Press.
- [2.] Electrical and Electronics Systems Research Division, Power Electronics and Electric Machinery Group. (2016). A High-Power Wireless Charging System Development and Integration for a Toyota RAV4 Electric Vehicle: Oak Ridge National Laboratory.
- [3.] energies. (2020) . A Secondary-Side Controlled Electric Vehicle Wireless Charger.
- [4.] IOPscience. (2016). Study on High Efficient Electric Vehicle Wireless Charging System. สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2565 จาก <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/40/1/012009/pdf>
- [5.] นกสิทธิ์ คุวัฒนาชัย. 2551. รถไฮบริดและรถยนต์ไฟฟ้า. ประชาคมวิจัย. 14(12).
- [6.] Papadopoulos, P., Cipcigan, L.M., Jenkins, N.and Grau, I. 2009. Distribution networks with electric vehicles. Universities Power Engineering Conference (UPEC), Proceedings of the 44th International, Sept. 1-4, 2009: 1-5.
- [7.] Soares, F.J., Rocha Almeida, P.M. and Pecas Lopes, J.A. 2004. Quasi-real-time management of electric vehicles charging. Electric Power Systems Research. vol. 108(2014), pp. 293-303.
- [8.] Richardson, P.; Flynn, D.; Keane, A. 2012. Optimal charging of electric vehicles in low voltage distribution systems. IEEE Trans. Power Syst. vol. 27, pp. 268-279
- [9.] Pecas Lopes, J.A., Soares, F.J., Almeida, P.M. and Moreira da Silva, M. 2009. Smart charging strategies for electric vehicles: Enhancing grid performance and maximizing the use of variable renewable energy resources. Proceedings of EVS-24, Stavanger, Norway, May. 13-16, 2009: 2680-2690.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10.] Monica, A., Hortensia, A., Jean, G.G. and Juan M.G. 2014. Optimal charging scheduling of electric vehicles in smart grids by heuristic algorithms. *Energies*. vol. 7: 2449-2475.
- [11.] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และวุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์. (2550). อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. (พิมพ์ครั้งที่ 7). สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พรีนติ้ง: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [12.] Theodore, F. B., Jeffrey , S. B. & Guillermo, R. (2003). *Electronic Devices And Circuits* (6th ed.). New York: Prentice Hall.
- [13.] Ma, Z. Callaway, D. and Hiskens, I. 2010. Decentralized charging control for large populations of plug-in electric vehicles. 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pp. 206-212.
- [14.] Laplante, P.A. 2004. *Real-time systems design and analysis*, John Wiley & Sons, 3rd ed.
- [15.] IEC 61851-1 Standard for electric vehicle conductive charging system part 1 : general requirements.
- [16.] กองแผนงานระบบไฟฟ้ากองวิจัยกองพัฒนาระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, รายงานผลการตรวจวัดรถยนต์ไฟฟ้า สิงหาคม 2555.
- [17.] BU-1203: Electric Vehicle. [Internet] 2014. [cited: 2022 Sep 9]. http://batteryuniversity.com/learn/article/electric_vehicle.
- [18.] *Optimization Toolbox User's Guide for MATLAB*. 2009. Version 1, Mathworks.
- [19.] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กระทรวงมหาดไทย. 2555. แผนพัฒนาระบบไฟฟ้าในช่วงแผนพัฒนาเศรษฐกิจ และสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11 ปี พ.ศ. 2555-2559.

- [20.] Park, J.Y., Sohan, J.M. and Park, J.K. 2009. Optimal capacitor allocation in a distribution system considering operation costs. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.24, No.1, pp.462-468.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและพัฒนาเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก

Design and development of wireless chargers for small electric vehicles

ตรีชนน ปัญญาชนม์ ดิณณภพ วัฒนพานิช แทนไท เทพศาสตรา และ ธนพล กรณ์กิจ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซอย นลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-80000 ต่อ 33925

E-Mail : 62010305@kmitl.ac.th 62010310@kmitl.ac.th 62010328@kmitl.ac.th 62010305@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาและพัฒนาเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับแบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 72 V โดยการอัดประจุของยานยนต์ไฟฟ้าขณะอยู่นิ่ง ขั้นตอนจะทำการออกแบบและจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink โดยวงจรแบ่งการออกแบบเป็น 3 ส่วนสำคัญคือ 1. วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย (Transmitter Circuit) 2. วงจรรับกำลังและชาร์จประจุแบตเตอรี่ (Receiver and Charger Circuit) และ 3. การจำลองการเกิดความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดส่ง (Magnetic Circuit and Mutual Inductance) จากนั้นสร้างวงจรจริงตามที่ออกแบบไว้และทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการส่งกำลังพบว่าระยะห่างระหว่างขดลวด 10 เซนติเมตร เป็นระยะที่เหมาะสมในการออกแบบเครื่องอัดประจุไร้สายเพื่อให้ยานยนต์ขนาดเล็กสามารถชาร์จได้และให้ประสิทธิภาพที่สูงโดยมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากต้นทางที่พิจารณาคือ DC link สู่ปลายทาง DC Charger อยู่ที่ 75.31 % การสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

Abstract

This thesis aims to study and develop a wireless charger for a small electric vehicle with a battery voltage of 72 V. Initially, charging of the electric vehicle while at a standstill will be designed and simulated using the MATLAB Simulink program. The circuit design is divided

into 3 important parts: 1) the wireless power transmission circuit (transmitter circuit), 2) the receiver and charger circuit, and 3) simulation of mutual inductance between coils to analyze the transmission efficiency. After designing the transmitter (magnetic circuit and mutual inductance), the actual circuit will be built as designed, and the transmission efficiency will be analyzed. It was found that the distance between the coils of 10 centimeters is an appropriate distance to design a wireless charger for small vehicles to be able to charge and provide high efficiency with the efficiency of transmitting power from the considered source, which is the DC link to The DC Charger endpoint is at 75.31 %. Most of the power loss occurs in power electronic devices.

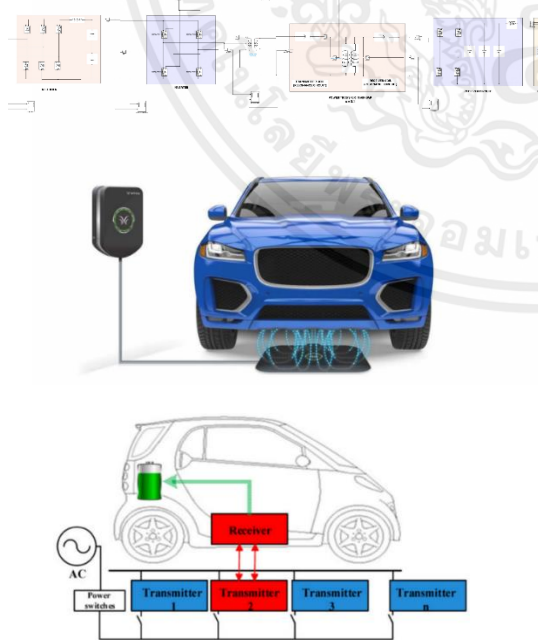
บทนำ

ปัจจุบันรถยนต์ไร้สายในกรุงเทพฯ มีทั้งสิ้นกว่า 3 ล้านคัน และเนื่องจากทั่วโลกให้ความสนใจเรื่องพลังงานสะอาด ประกอบกับแนวโน้มความต้องการที่เพิ่มขึ้นในทุกๆ ปี ยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กจึงเป็นที่สนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศแถบยุโรปที่ผู้คนให้ความสนใจจนทำให้เกิดแบรนด์รถพลังงานไฟฟ้าเกิดขึ้นมากมาย ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยผู้คนเริ่มให้ความสนใจมากขึ้น โดยเฉพาะยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กที่ออกแบบให้มีรูปทรงที่โฉบเฉี่ยว กระทัดรัด ไม่ต่างจากรถยนต์ไร้สายพลังงานเชื้อเพลิง ประกอบกับ

การจราจรบนท้องถนนที่คับคั่ง และความเร่งรีบในการใช้ชีวิต ซึ่งสามารถลดละ ได้อย่างคล่องแคล่ว ไม่ว่าจะเส้นทางนั้นจะเป็นทางชั้น หรือพื้นผิวถนนขรุขระ ก็สามารถตอบโจทย์ชีวิตคนเมืองได้อย่างดี และยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กเหมาะสำหรับวินและไรเดอร์อย่าง แกรป โลนแมนหรือฟูดแพนด้า ในช่วงระหว่างที่รอลูกค้าหรือรอออเดอร์ เป็นช่วงที่ยานยนต์ไฟฟ้าจอดอยู่กับที่ ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์จากเครื่องอัดประจุไร้สายได้

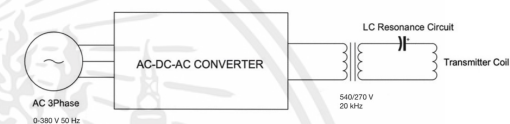
การออกแบบของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาและพัฒนาเครื่องอัดประจุไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับแบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 72 V โดยจะออกแบบจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink และประกอบสร้างวงจรซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1. วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย (Transmitter Circuit) 2. วงจรรับกำลังไฟฟ้าและชาร์จประจุแบตเตอรี่ (Receiver and Charger Circuit) และ 3. การจำลองการเกิดความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดส่งกำลังไฟฟ้า (Magnetic Circuit and Mutual Inductance)

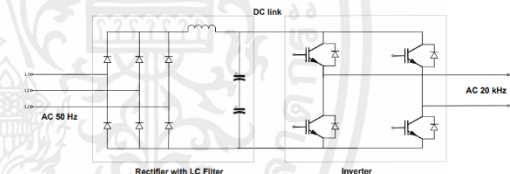


รูปที่ 1 แผนผังวงจรของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายและการชาร์จประจุขณะยานยนต์หยุดนิ่ง

วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายจะมีหน้าที่แปลงปริมาณทางไฟฟ้า (Converting) โดยรับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายสามเฟส 0-380 Vrms 50 Hz แปลงเป็นระบบไฟฟ้าย่านความถี่สูงเพื่อประสิทธิภาพในการส่งกำลังผ่านอากาศ ความถี่ที่เลือกใช้คือ 20 kHz และปรับระดับแรงดันและกระแสที่ต้องการจ่ายเข้ามือแปลงลดระดับแรงดัน 540/270 V เพื่อทำให้มีกระแสไหลในวงจรคอนเวอร์เตอร์ต่ำกว่ากระแสของขดลวดส่งกำลัง ลดความร้อนและกำลังสูญเสียในวงจรเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์จากนั้นวงจร LC เรโซแนนซ์จะสร้างกระแสสูงความถี่สูงไหลเข้าขดลวดส่งกำลัง (Transmitter Coil) ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเป็นพาหะในการส่งกำลังกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ

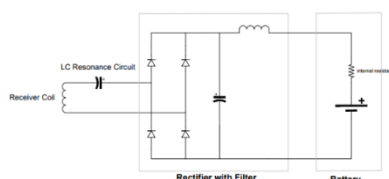


รูปที่ 2 แผนผังวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย



รูปที่ 3 วงจร AC-DC-AC Converter

วงจรรับกำลังทำหน้าที่รับกำลังไฟฟ้าที่ส่งมาโดยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงจากขดลวดส่งกำลัง สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Electromotive Force) ตกคร่อมขดลวดและกระแสเหนี่ยวนำ (Induced Current) จากแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเข้าวงจรชาร์จประจุ

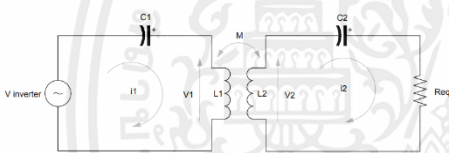


รูปที่ 4 วงจรรับกำลังไฟฟ้า

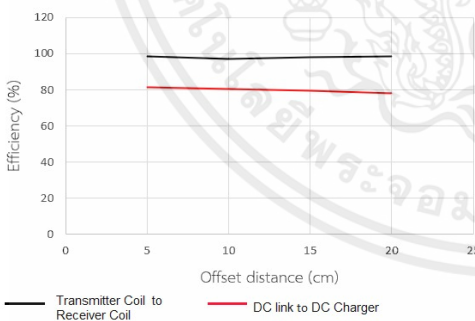
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบขดลวดรับและส่งจะทำการพันขดลวดเป็นวงกลมเพื่อให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอ (Uniform Field) แต่กระแสสูง พิกัดกระแสขดลวดส่งกำลังและกระแสขดลวดรับ 20 A ใช้สายไฟแบบ Litz Wire มาพันเป็นขดลวดส่งและขดลวดรับกำลัง ซึ่งเป็นสายไฟแบบแกนฝอยเพื่อลดผลจากการปรากฏการณ์กระแสไหลตามผิว (Skin Effect) เมื่อกระแสมีความถี่สูง ลดกำลังสูญเสียในขดลวด

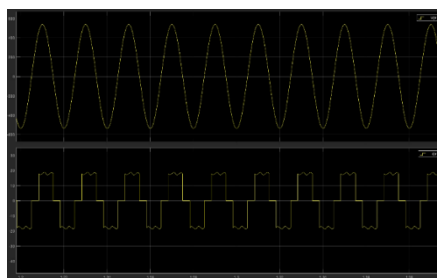
การส่งกำลังผ่านอากาศโดยใช้สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ สามารถอธิบายโดยใช้หลักการเดียวกันกับหม้อแปลงแกนอากาศ กระแสความถี่สูงที่ไหลผ่านขดลวดส่งสร้างสนามแม่เหล็กที่ขนาดเปลี่ยนแปลงและเหนี่ยวนำขดลวดรับให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสเหนี่ยวนำ ฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องทั้งสองขดลวดทำให้เกิดความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ ดังนี้



รูปที่ 5 วงจรสมมูลระบบชาร์จไร้สาย

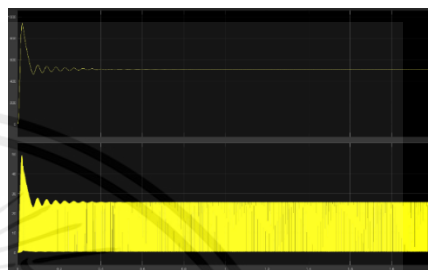


รูปที่ 6 กราฟประสิทธิภาพในการส่งกำลังไฟฟ้าที่ระยะต่างๆ

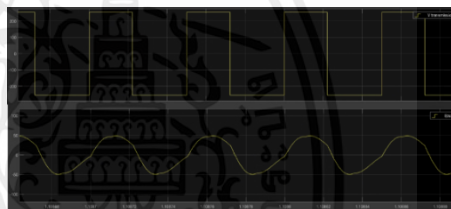


รูปที่ 7 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน

3-phase source 50Hz 380 V

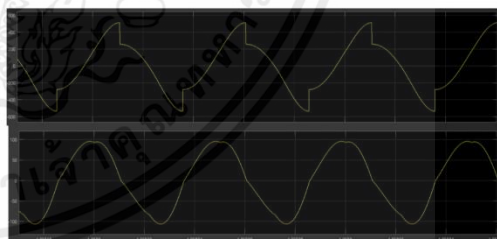


รูปที่ 8 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน DC link



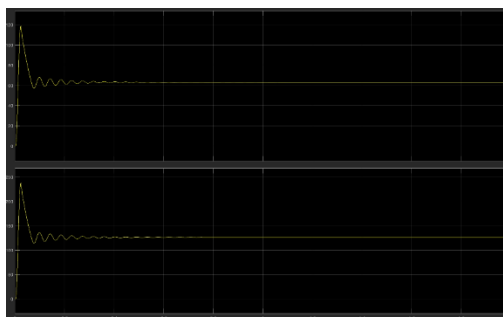
รูปที่ 9 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน

LC Resonance Transmitter Coil



รูปที่ 10 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน

LC Resonance Receiver Coil

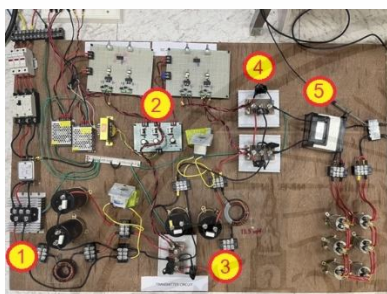


รูปที่ 11 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน DC Charger

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและทดลองการทำงานของวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สาย

จากการจำลองวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink ต่อมาจะประกอบสร้างวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายที่ใช้งานจริง ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งจะประกอบด้วย 1) วงจร Rectifier, 2) วงจร IGBT Controller and Gate driver, 3) วงจร Converter, 4) วงจร Inverter, 5) หม้อแปลงความถี่สูง และ 6) วงจร LC เรโซแนนซ์สำหรับส่งกำลังผ่านอากาศ

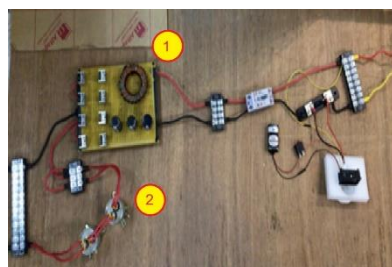


รูปที่ 12 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

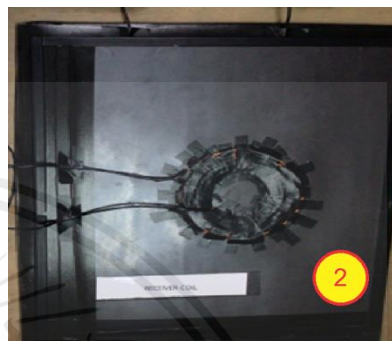


รูปที่ 13 วงจร LC เรโซแนนซ์สำหรับส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ

จากการจำลองวงจรรับกำลังไฟฟ้าและชาร์จประจุแบตเตอรี่ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink ต่อมาจะประกอบสร้างวงจรรับกำลังไฟฟ้าและชาร์จประจุแบตเตอรี่ที่ใช้งานจริง ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งจะประกอบด้วย 1) วงจร Rectifier HYPER Fast Diode และ 2) วงจร LC เรโซแนนซ์สำหรับรับกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ

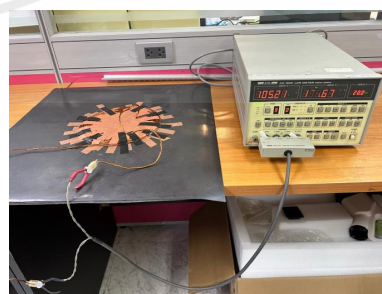


รูปที่ 14 วงจรรับกำลังไฟฟ้า



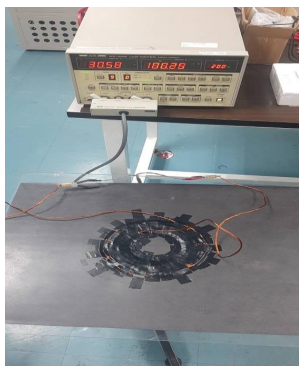
รูปที่ 15 วงจร LC เรโซแนนซ์สำหรับรับกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ

ทำการพันขดลวดรับและส่งเป็นวงกลมเพื่อทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอ (Uniform Field) ทักัดกระแสขดลวดส่งกำลังและกระแสขดลวดรับ 20 A ใช้สายไฟแบบ Litz Wire มาพันเป็นขดลวดส่งและขดลวดรับกำลัง ซึ่งเป็นสายไฟแบบแกนฝอยเพื่อลดผลจากการปรากฏการณ์กระแสแผลตามผิว (Skin Effect) เมื่อกระแสมีความถี่สูง ลดกำลังสูญเสียในขดลวด ซึ่ง ค่า L ของขดลวดส่ง (Transmitter Coil) = 100 μH , ค่า L ของขดลวดรับ (Receiver Coil) = 30 μH ทำการวัดค่า L ด้วยเครื่อง LCR Meter

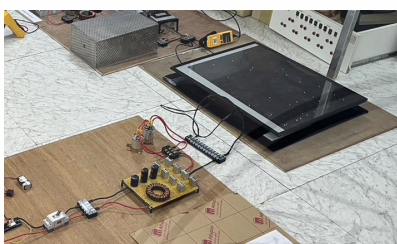


รูปที่ 16 ค่า L ของขดลวดส่ง (Transmitter Coil)

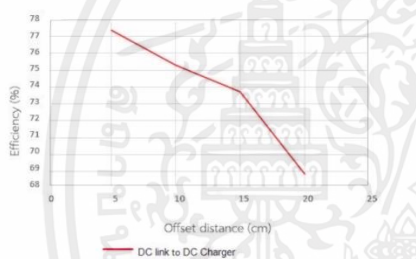
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17 ค่า L ของขดลวดรับ (Receiver Coil)



รูปที่ 18 การประกอบขดลวดส่งและรับกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 19 กราฟระหว่างประสิทธิภาพในการส่งกำลังไฟฟ้าที่
ระยะต่างๆ

สรุป

การออกแบบวงจรอัดประจุไร้สายผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายให้สามารถส่งกำลังผ่านอากาศได้จริง พบว่าวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายที่ออกแบบในโปรแกรม MATLAB Simulink จะมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากต้นทางที่พิจารณา คือ DC link สู่ปลายทาง DC Charger ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 5,10,15 และ 20 เซนติเมตร เท่ากับ 81.31 %, 80.33 %, 79.46 % และ 77.98 % ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการส่งกำลังผ่านอากาศเท่ากับ 98.37 %, 97.25 %, 97.88 % และ 98.51 % จะเห็นว่าจากผลการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink การสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง จากการ

สูญเสียกำลังที่มีค่าสูงมาจากอุปกรณ์ Power Electronic ทำให้ต้องปรับปรุงวงจร Converter ให้มีการสูญเสียน้อยลง

เมื่อทำการทดลองวงจรอัดประจุไร้สายที่สร้างขึ้นมา พบว่าวงจรที่ออกแบบสามารถส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศได้โดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพาหะส่งกำลังวงจรอัดประจุไฟฟ้าไร้สายจริงที่สร้างขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากต้นทางที่พิจารณา คือ DC link สู่ปลายทาง DC Charger ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 5,10,15 และ 20 เซนติเมตร เท่ากับ 77.36 %, 75.31 %, 73.71 % และ 68.85 % ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 10 เซนติเมตร เป็นระยะที่เหมาะสมในการออกแบบเครื่องอัดประจุไร้สายเพื่อให้ยานยนต์ขนาดเล็กสามารถชาร์จได้และให้ประสิทธิภาพที่สูงจะเห็นว่าจากผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองวงจรอัดประจุไร้สายผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink วงจรอัดประจุไร้สายที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเนื่องจากการสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มากกว่า และในการทดลองนี้สามารถบ่อนแรงดันอินพุตได้แค่ 70 V เนื่องจากข้อจำกัดทางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เมื่อเริ่มบ่อนแรงดันอินพุตสูงขึ้น วงจรจะเกิดความร้อนสูงและเกิดความเสียหาย

เอกสารอ้างอิง

- [1.] Bin Wu. (2017). High-Power Converters and AC Drives: Wiley-IEEE Press.
- [2.] Electrical and Electronics Systems Research Division, Power Electronics and Electric Machinery Group. (2016). A High-Power Wireless Charging System Development and Integration for a Toyota RAV4 Electric Vehicle: Oak Ridge National Laboratory.
- [3.] energies. (2020) . A Secondary-Side Controlled Electric Vehicle Wireless Charger.
- [4.] IOPscience. (2016). Study on High Efficient Electric Vehicle Wireless Charging System.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2565 จาก
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/40/1/012009/pdf>
- [5.] นักสิทธิ์ กูวัฒนาชัย. 2551. รถไฮบริดและรถยนต์ไฟฟ้า. ประชาคมวิจัย. 14(12).
- [6.] Papadopoulos, P., Cipcigan, L.M., Jenkins, N. and Grau, I. 2009. Distribution networks with electric vehicles. Universities Power Engineering Conference (UPEC), Proceedings of the 44th International, Sept. 1-4, 2009: 1-5.
- [7.] Soares, F.J., Rocha Almeida, P.M. and Pecos Lopes, J.A. 2004. Quasi-real-time management of electric vehicles charging. Electric Power Systems Research. vol. 108(2014), pp. 293-303.
- [8.] Richardson, P.; Flynn, D.; Keane, A. 2012. Optimal charging of electric vehicles in low voltage distribution systems. IEEE Trans. Power Syst. vol. 27, pp. 268-279
- [9.] Pecos Lopes, J.A., Soares, F.J., Almeida, P.M. and Moreira da Silva, M. 2009. Smart charging strategies for electric vehicles: Enhancing grid performance and maximizing the use of variable renewable energy resources. Proceedings of EVS-24, Stavanger, Norway, May. 13-16, 2009: 2680-2690.
- [10.] Monica, A., Hortensia, A., Jean, G.G. and Juan M.G. 2014. Optimal charging scheduling of electric vehicles in smart grids by heuristic algorithms. Energies. vol. 7: 2449-2475.
- [11.] วีระเชษฐ ชันเงิน และวุฒิปด ธาราธิรเศรษฐ์. (2550). อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. (พิมพ์ครั้งที่ 7). สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พรินติ้ง: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [12.] Theodore, F. B., Jeffrey, S. B. & Guillermo, R. (2003). Electronic Devices And Circuits (6th ed.). New York: Prentice Hall.
- [13.] Ma, Z. Callaway, D. and Hiskens, I. 2010. Decentralized charging control for large populations of plug-in electric vehicles. 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pp. 206-212.
- [14.] Laplante, P.A. 2004. Real-time systems design and analysis, John Wiley & Sons, 3rd ed.
- [15.] IEC 61851-1 Standard for electric vehicle conductive charging system part 1 : general requirements.
- [16.] กองแผนงานระบบไฟฟ้ากองวิจัยและพัฒนา ระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, รายงานผลการตรวจวัดรถยนต์ไฟฟ้า สิงหาคม 2555.
- [17.] BU-1203: Electric Vehicle. [Internet] 2014. [cited: 2022 Sep 9]. http://batteryuniversity.com/learn/article/electric_vehicle.
- [18.] Optimization Toolbox User's Guide for MATLAB. 2009. Version 1, Mathworks.
- [19.] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กระทรวงมหาดไทย. 2555. แผนพัฒนาระบบไฟฟ้าในช่วงแผนพัฒนาเศรษฐกิจ และสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11 ปี พ.ศ. 2555-2559.
- [20.] Park, J.Y., Sohan, J.M. and Park, J.K. 2009. Optimal capacitor allocation in a distribution system considering operation costs. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.24, No.1, pp.462-468.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล : นายตรีชนน ปัญญาชนน

วัน เดือน ปีเกิด : 7 มกราคม 2539

สถานที่อยู่ปัจจุบัน : 114 ม.10 ต.หาดขาม อ.กุยบุรี

จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77150

ประวัติการศึกษา :

ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มัธยมศึกษา โรงเรียนเตรียมทหาร นครนายก



ชื่อ-นามสกุล : นายติณณภพ วัฒนพานิช

วัน เดือน ปีเกิด : 7 พฤศจิกายน 2543

สถานที่อยู่ปัจจุบัน : บ้านเลขที่ 5 ถ.ผดุงดอนยอ ซ.1

ต.คูหาสวรรค์ อ.เมือง จ.พัทลุง 93000

ประวัติการศึกษา :

ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มัธยมศึกษา โรงเรียนพัทลุง พัทลุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ-นามสกุล : นายแทนไท เทพศาสตร์

วัน เดือน ปีเกิด : 25 ตุลาคม 2543

สถานที่อยู่ปัจจุบัน : 9/2 ถ.เมืองใหม่มาบตาพุดสาย 2

ต.ห้วยโป่ง อ.เมืองระยอง จ.ระยอง 21150

ประวัติการศึกษา :

ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มัธยมศึกษา โรงเรียนระยองวิทยาคม ระยอง



ชื่อ-นามสกุล : นายธนพล กรณีกิจ

วัน เดือน ปีเกิด : 25 ธันวาคม 2543

สถานที่อยู่ปัจจุบัน : 236 หมู่ 1 ต.หนองใหญ่

อ.หนองใหญ่ จ.ชลบุรี 20190

ประวัติการศึกษา : ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มัธยมศึกษา โรงเรียนมกุฎเมืองราชวิทยาลัย ระยอง