



EE04-แบบขอสอบป้องกัน

นักศึกษา ☒ ปกติ ☐ สมทบ

การสอบป้องกันโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้า
หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

รหัสโครงงาน : S1-663-PE1

ชื่อโครงการ

ชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
The Demonstration Set of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle

ผู้จัดทำ

นายพีรณัย บัวโท รหัสนักศึกษา 164404130024 โทร. 0916439160
นางสาวโชติรัตน์ จันทภาโส รหัสนักศึกษา 164404130070 โทร. 0848629930

ความเห็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ได้ตรวจโครงงานและรายงานฉบับสมบูรณ์แล้ว เห็นควร ☐ อนุมัติให้สอบได้ ☐ ปรับปรุงเนื้อหาหรือรูปแบบใหม่ ลงชื่อ (.....)	ความเห็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ได้ตรวจโครงงานและรายงานฉบับสมบูรณ์แล้ว เห็นควร ☐ อนุมัติให้สอบได้ ☐ ปรับปรุงเนื้อหาหรือรูปแบบใหม่ ลงชื่อ (ผศ.ชาญณรงค์ พงศ์วัชรธรรม)
---	--

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย



ชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
The Demonstration Set of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle

พีรदनย์ บัวโท
Peeradon Buato
โชติรัตน์ จันทภาโส
Chootitat Chantapaso

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

A PROJECT REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY SRIVIJAYA

2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
The Demonstration Set of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle

พีรदनย์ บัวโท
Peeradon Buato

โชติรัตน์ จันทภาโส
Chootitat Chantapaso

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

A PROJECT REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY SRIVIJAYA

2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ปริญญานิพนธ์ : ชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
ชื่อ : นายพีรดนัย บัวโท
: นางสาวโชติรัตน์ จันทภาโส
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

ประธานที่ปรึกษา

กรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาญณรงค์ พงศ์รักธรรม)

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.พิทักษ์ บุญนุ่น)

.....กรรมการ
(อาจารย์คุณไช ปานทองคำ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีระพงษ์ ฉิมเพชร)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาญณรงค์ พงศ์รักธรรม)
หัวหน้าหลักสูตร/ประธานหลักสูตร

Project Report Title : The Demonstration Set of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle

Name : Mr. Peeradon Buato
: Miss Chootirat Chantapaso

Major Field : Electrical Engineering

Major Advisor

.....
(Asst.Prof. Channarong Phongraktham)

Examining Committee

.....Chairperson
(Asst.Prof. Dr.Pituk Bunnoon)

.....Committee
(Lecturer Konto Pantongkum)

.....Committee
(Asst.Prof. Teerapong Chimphet)

Accepted by the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Srivijaya in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Bachelor of
Electrical Engineering.

.....
(Asst.Prof. Channarong Phongraktham)
Chief Curriculum/Head of Curriculum

หัวข้อปริญญานิพนธ์ : ชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
โดย : นายพีรดนัย บัวโท
นางสาวโชติรัตน์ จันทภาโส
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาญณรงค์ พงศ์รักธรรม
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

จากปัญหาภาวะโลกร้อนและมลภาวะทางอากาศที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในภาคขนส่ง ทำให้แนวคิดการใช้พลังงานสะอาด โดยเฉพาะยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หนึ่งในประเด็นสำคัญของการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าคือการชาร์จพลังงาน ซึ่งในปัจจุบันส่วนใหญ่ยังเป็นการชาร์จแบบใช้สาย ซึ่งอาจก่อให้เกิดความยุ่งยากและความเสี่ยงในบางสถานการณ์

โครงการนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อออกแบบและสร้างชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Induction) ระหว่างขดลวดสองชุด โดยออกแบบให้สามารถถ่ายโอนพลังงานได้ในระยะไม่เกิน 10 เซนติเมตร ภายใต้ช่วงความถี่มาตรฐาน SAE J2954 ทั้งนี้ได้มีการดัดแปลงรถสกู๊ตเตอร์ไฟฟ้ายี่ห้อ Free Rider ให้รองรับระบบชาร์จดังกล่าว พร้อมทั้งออกแบบวงจรควบคุม แสดงผลแรงดัน กระแส และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการชาร์จอย่างชัดเจน

ผลที่ได้จากโครงการคือ ต้นแบบระบบถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่สามารถใช้งานได้จริง เหมาะสำหรับการต่อยอดในเชิงวิจัย พัฒนา หรือการประยุกต์ใช้ในอนาคต โดยเฉพาะในยุคที่การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นสิ่งจำเป็น โครงการนี้จึงเป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยผลักดันแนวทางสู่เทคโนโลยีการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้ารูปแบบใหม่อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย, ยานยนต์ไฟฟ้า, ขดลวดเหนี่ยวนำ, การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า, ระบบชาร์จไร้สาย

(ปริญญานิพนธ์นี้มีจำนวนทั้งสิ้น 258 หน้า)

Project Report Title : The Demonstration Set of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle
By : Mr.Peeradon Buato
Miss.Chootirat Chantapaso
Project Report Advisor : Asst.Prof.Channarong Phongraktham
Department of : Electrical Engineering
Academic Year : 2024

Abstract

As concerns about global warming and air pollution from fossil-fueled transportation grow, electric vehicles (EVs) have emerged as a promising solution due to their clean energy consumption. However, one key challenge in EV usage lies in the charging process, which is commonly done via wired systems that can be inconvenient and potentially hazardous in certain environments.

This project aims to design and construct a wireless power transfer (WPT) demonstration system specifically for electric vehicles. The system operates on the principle of magnetic induction between two sets of coils and is designed to transfer power effectively within a 10-centimeter distance, following the SAE J2954 standard frequency range. A Free Rider electric scooter was modified to work with this wireless charging setup, and additional control circuits were developed to monitor and display charging voltage, current, and energy used in real-time.

The outcome of this project is a functional WPT prototype that can be further developed for research, commercial applications, or integration into future smart EV charging systems. By reducing the reliance on traditional plug-in methods, this system enhances safety, user convenience, and aligns with the global shift toward sustainable energy technologies.

Keyword : Wireless power transfer, Electric vehicles, Inductive coils, Electromagnetic induction, Wireless charging system

(Total 258 pages)

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จในการดำเนินงาน ผู้จัดทำขอโน้มแสดงความขอบพระคุณอย่างจริงใจมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาญณรงค์ พงศ์รักธรรม อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และแนะแนวทางในการดำเนินโครงการด้วยความเอาใจใส่และเมตตาอย่างยิ่ง ตลอดระยะเวลาในการจัดทำ ทั้งในด้านวิชาการและการวางแผนทางแก้ไขปัญหา อันเป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่ความสำเร็จของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.พิทักษ์ บุญนุ่น ประธานกรรมการสอบ อาจารย์คณิต ปานทองคำ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีระพงษ์ ฉิมเพชร กรรมการสอบ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะอันมีค่า และแนวทางในการปรับปรุงปริญญานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ด้วยความเอาใจใส่และการพิจารณาอย่างรอบคอบ ทำให้ผลงานมีคุณภาพและความน่าเชื่อถือตามมาตรฐานทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ธรรมรงค์ ทวีชื่น อาจารย์ผู้เชี่ยวชาญด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.เกียรติศักดิ์ เสงี่ยม อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา และอาจารย์ทศพร มากบรรจง อาจารย์ประจำแผนกวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยการอาชีพห้วยยอด จังหวัดตรัง ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่า ให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็น และแนวทางอันชาญฉลาดในการแก้ไขปัญหาทางเทคนิคต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน ด้วยความเมตตากรุณาและความเชี่ยวชาญในศาสตร์อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนาและปรับปรุงปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้บรรลุเป้าหมายตามที่กำหนดไว้ รวมทั้งการประสิทธิ์ประสาทความรู้และประสบการณ์อันมีค่าที่ทำให้ผู้จัดทำได้รับมุมมองใหม่ ๆ ในการแก้ไขปัญหาและการพัฒนาระบบงานให้มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

ขอแสดงความขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งต่อ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ คำปรึกษา และการสนับสนุนในทุกด้านมาโดยตลอด จนสามารถดำเนินการศึกษาและจัดทำปริญญานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงได้

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ เพื่อนนักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความร่วมมือ ให้คำแนะนำ และสนับสนุนข้อมูลต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการทำงาน รวมถึงคณาจารย์และบุคลากรในหลักสูตรทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา และแนะแนวทางในการพัฒนาโครงการให้มีความสมบูรณ์และครบถ้วนตามหลักวิชาการ

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุกแรงสนับสนุนจากญาติพี่น้อง คณาจารย์ เพื่อนร่วมรุ่น และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจสำคัญในทุกช่วงเวลา ขออนุญาตประกาศคุณความดีและความกรุณาของทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วยความซาบซึ้งใจอย่างยิ่ง

พีรดนัย บัวโท

โชติรัตน์ จันภาโส

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ถ
บทที่ 1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาหัวข้อโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขอบเขตของโครงการ	3
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการโครงการ	4
1.6 แผนการดำเนินงาน	5
บทที่ 2. ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎี	6
2.1 ทบทวนวรรณกรรม	6
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
บทที่ 3. วิธีการดำเนินงาน	19
3.1 การคำนวณเพื่อการออกแบบโครงสร้างชิ้นงาน	20
3.2 จำลองระบบการถ่ายโอนพลังงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink	22
3.3 การออกแบบชุดลดความเร็วไฟฟ้า และตัวเก็บประจุ	26
3.4 ต้นแบบชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	30
3.5 การออกแบบโครงสร้างชิ้นงาน	45
3.6 วงจรและการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	49
3.7 หลักการทำงาน	54
3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4. ผลการทดลองและวิจารณ์	75
4.1 ชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	75
4.2 ผลการทดลองการชาร์จแบตเตอรี่แบบไร้สาย	78
4.3 การทดสอบสมรรถนะระบบในการทำงานต่อเนื่อง	81
4.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบ	86
4.5 สรุปผลการทดลอง	89
บทที่ 5. สรุป วิเคราะห์ และข้อเสนอแนะ	91
5.1 สรุปผลที่ได้จากการทำโครงการ	91
5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางในการแก้ไขปัญหา	92
5.3 ข้อควรระวังและข้อเสนอแนะ	114
5.4 แนวทางในการพัฒนา	115
เอกสารอ้างอิง	117
ภาคผนวก ก งบประมาณ	120
ภาคผนวก ข การคำนวณและการออกแบบ	124
ภาคผนวก ค SOURCE CODE	133
ภาคผนวก ง ผลการจำลองจาก MATLAB/Simulink	139
ภาคผนวก จ ข้อมูลการทดลองแบบละเอียด	148
ภาคผนวก ฉ คู่มือแนะนำการใช้งาน	187
ภาคผนวก ช Datasheet รถสกู๊ตเตอร์ยี่ห้อ Freerider	193
ประวัติผู้จัดทำปริญญานิพนธ์	235

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	แผนการดำเนินงาน	5
2-1	เปรียบเทียบการชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ	10
3-1	ค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าและขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าในการจำลอง MATLAB/Simulink	24
3-2	เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณจากทฤษฎีและการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink	25
3-3	ค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรม MATLAB Simulink	26
3-4	เปรียบเทียบค่าขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่งกำลังไฟฟ้า และภาครับกำลังไฟฟ้า	28
3-5	รูปแบบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง	30
3-6	รูปแบบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับ	31
3-7	พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของขดลวดฝั่งส่งและฝั่งรับ	33
3-8	ตารางบันทึกผลการทดลองการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ความถี่ 80.43 kHz	34
3-9	ตารางบันทึกผลการทดลองการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ความถี่ 83.58 kHz	35
3-10	ตารางบันทึกผลการทดลองการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ความถี่ 86.50 kHz	36
3-11	ตารางบันทึกผลการทดลองการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ความถี่ 90.40 kHz	37
3-12	ตำแหน่งอุปกรณ์ชุดควบคุมการส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่ง	46
3-13	ตำแหน่งอุปกรณ์ชุดขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งกำลังไฟฟ้า และขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับกำลังไฟฟ้า	47
3-14	ตำแหน่งอุปกรณ์ชุดแสดงค่าพร้อมควบคุมขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับ	48
3-15	ข้อมูลจำเพาะ AC-DC 5 V 700 mA	57
3-16	ข้อมูลจำเพาะของ WEMOS D1 R2 WIFI ESP8266 Shield Arduino Compatible	58
3-17	ข้อมูลจำเพาะ MOSFET IRF540N	64
3-18	คุณสมบัติ MUR880E Power Diode	68
3-19	ข้อมูลจำเพาะของ MUR880E Power Diode	68

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3-20	ข้อมูลจำเพาะของHigh voltage and high current step-down converter	69
4-1	บันทึกผลการทดลองชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ระยะ 6 cm., 7 cm. และ 8 cm.	76
4-2	ผลการทดลองการชาร์จแบตเตอรี่ 24V 29.5Ah ด้วยระบบไร้สาย	78
4-3	การทดสอบความเสถียรในการทำงานต่อเนื่อง (Output)	81
4-4	การทดสอบความเสถียร INPUT AC	83
4-5	การทดสอบความเสถียร INPUT DC	85
4-6	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการชาร์จในแต่ละช่วง	87
4-7	พารามิเตอร์ระบบการชาร์จแบบไร้สาย	89
4-8	สรุปผลการทดลองการชาร์จแบตเตอรี่	89
5-1	การทดสอบเปลี่ยนค่า R11 เพื่อดูแนวโน้ม โดยให้ขนาด 5W ในการทดสอบ	93
ก-1	งบประมาณในการจัดทำชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	121
ง-1	ค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าและขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าในการจำลอง MATLAB/Simulink	143
จ-1	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 1 ที่ความถี่ 80.47 kHz	152
จ-2	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 1 ที่ความถี่ 83.69 kHz	152
จ-3	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 1 ที่ความถี่ 86.56 kHz	152
จ-4	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 1 ที่ความถี่ 90.73 kHz	153
จ-5	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 2 ที่ความถี่ 80.53 kHz	155
จ-6	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 2 ที่ความถี่ 83.61 kHz	155
จ-7	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 2 ที่ความถี่ 86.58 kHz	155
จ-8	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 2 ที่ความถี่ 90.45 kHz	156
จ-9	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3 ที่ความถี่ 80.35 kHz	158
จ-10	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3 ที่ความถี่ 83.60 kHz	158
จ-11	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3 ที่ความถี่ 86.68 kHz	158
จ-12	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3 ที่ความถี่ 90.65 kHz	159
จ-13	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4 ที่ความถี่ 80.36 kHz	161
จ-14	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4 ที่ความถี่ 83.54 kHz	161
จ-15	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4 ที่ความถี่ 86.33 kHz	161
จ-16	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4 ที่ความถี่ 90.43 kHz	162
จ-17	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 5 ที่ความถี่ 80.43 kHz	164

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
จ-18	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 5 ที่ความถี่ 83.58 kHz	164
จ-19	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 5 ที่ความถี่ 86.50 kHz	164
จ-20	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 5 ที่ความถี่ 90.40 kHz	165
จ-21	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 6 ที่ความถี่ 80.37 kHz	167
จ-22	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 6 ที่ความถี่ 83.33 kHz	167
จ-23	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 6 ที่ความถี่ 86.65 kHz	167
จ-24	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 6 ที่ความถี่ 90.00 kHz	168
จ-25	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7 ที่ความถี่ 80.37 kHz	170
จ-26	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7 ที่ความถี่ 83.34 kHz	170
จ-27	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7 ที่ความถี่ 86.81 kHz	170
จ-28	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7 ที่ความถี่ 90.05 kHz	171
จ-29	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 8 ที่ความถี่ 80.78 kHz	173
จ-30	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 8 ที่ความถี่ 83.56 kHz	173
จ-31	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 8 ที่ความถี่ 86.46 kHz	173
จ-32	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 8 ที่ความถี่ 90.05 kHz	174
จ-33	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 9 ที่ความถี่ 80.73 kHz	176
จ-34	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 9 ที่ความถี่ 83.70 kHz	176
จ-35	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 9 ที่ความถี่ 86.44 kHz	176
จ-36	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 9 ที่ความถี่ 90.43 kHz	177
จ-37	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 10 ที่ความถี่ 80.07 kHz	179
จ-38	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 10 ที่ความถี่ 83.45 kHz	179
จ-39	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 10 ที่ความถี่ 86.40 kHz	179
จ-40	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 10 ที่ความถี่ 90.33 kHz	180
จ-41	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 11 ที่ความถี่ 80.00 kHz	182
จ-42	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 11 ที่ความถี่ 83.72 kHz	182
จ-43	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 11 ที่ความถี่ 86.84 kHz	182
จ-44	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 11 ที่ความถี่ 90.70 kHz	183
จ-45	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 12 ที่ความถี่ 80.58 kHz	185
จ-46	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 12 ที่ความถี่ 83.41 kHz	185
จ-47	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 12 ที่ความถี่ 86.78 kHz	185
จ-48	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 12 ที่ความถี่ 90.21 kHz	186

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1-1	บล็อกไดอะแกรมทั่วไปของระบบไฟฟ้าไร้สาย	1
2-1	การอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวนำ (Conductive Charging)	9
2-2	การอัดประจุไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Battery Swapping)	10
2-3	การอัดประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Inductive Charging)	11
2-4	บล็อกจำแนกวิธีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย	11
2-5	วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม	13
2-6	เงื่อนไขของการเรโซแนนซ์แบบอนุกรม	13
2-7	สถานะเรโซแนนซ์ของวงจร RLC แบบอนุกรม	14
2-8	วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน	14
2-9	ลักษณะการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าและขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า	15
2-10	รูปทรงขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบดั้งเดิม	15
2-11	รูปทรงการจัดเรียงขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบหลายชุด	16
2-12	ระยะของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบวงกลม	16
2-13	วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น (Rectifier Circuit)	17
2-14	วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์เต็มคลื่น (Inverter Circuit)	17
3-1	แผนผังขั้นตอนการดำเนินการโครงการ	19
3-2	ข้อมูลสเปกของรถสกู๊ตเตอร์ ยี่ห้อ Free Rider	20
3-3	แบตเตอรี่แห่ง ยี่ห้อ Lion ชนิดตะกั่วกรด 12 V.DC 26 Ah	20
3-4	Datasheet แบตเตอรี่แห่ง ชนิดตะกั่วกรด 12 V.DC 26 Ah	20
3-5	วงจรที่จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink	22
3-6	Pulse Generator ขั้วขา Gate Mosfet	22
3-7	Output เมื่อผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์	23
3-8	การต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าอนุกรมกันกับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าทั้งภาคส่งและภาครับ	23
3-9	รูปคลื่นแรงดันฝั่งส่ง	24
3-10	รูปคลื่นแรงดันฝั่งรับ	24
3-11	ผลลัพธ์ของแรงดันและกระแสที่ได้จากการจำลองผ่านโปรแกรม Matlab Simulink	25
3-12	หน้าเว็บ Flat spiral coil inductor calculator	26
3-13	หน้าเว็บ Multi Layer air core inductor calculator	27
3-14	multilayer planar spiral inductors	27
3-15	เครื่อง LCR Meter ยี่ห้อ Digicom รุ่น LCR-841	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3-16	ผลของ L และ C ที่มีผลต่อสัญญาณกระแสลับความถี่ต่างๆ	29
3-17	ตัวเก็บประจุ	29
3-18	กราฟแสดงแรงดันขาออกของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย	38
3-19	กราฟแสดงกระแสขาออกของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย	39
3-20	กราฟแสดงกำลังขาออกของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย	40
3-21	กราฟแสดงประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าขาเข้า DC ต่อ กำลังไฟฟ้าขาออก DC ของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย	41
3-22	กราฟแสดงประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าขาเข้า AC ต่อ กำลังไฟฟ้าขาออก DC ของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย	42
3-23	โครงสร้างชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ ไฟฟ้า	45
3-24	ชุดควบคุมการส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่ง	45
3-25	ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งกำลังไฟฟ้า และขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับ กำลังไฟฟ้า	47
3-26	ชุดแสดงค่าพร้อมควบคุมขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับ	48
3-27	วงจรเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า	49
3-28	วงจรชุดควบคุมการส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่ง	50
3-29	วงจรอินเวอร์เตอร์ภายในแผ่น PCB ที่ส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า	50
3-30	ลาย PCB และ 3D ของวงจรอินเวอร์เตอร์ภายในแผ่น PCB ที่ส่งกำลังให้กับ ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยโปรแกรม EasyEDA	50
3-31	วงจรชุดแสดงค่าพร้อมควบคุมขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับ	51
3-32	ลาย PCB และ 3D ของวงจร Rectifier โดยโปรแกรม EasyEDA	51
3-33	วงจรแสดงการต่อใช้งานของอุปกรณ์จริง	52
3-34	วงจรแสดงการต่อใช้งานของอุปกรณ์จริงภาคส่งกำลังไฟฟ้า	53
3-35	วงจรแสดงการต่อใช้งานของอุปกรณ์จริงภาครับกำลังไฟฟ้า	53
3-36	บล็อกไดอะแกรมการทำงานของชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบ ไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	54
3-37	แผนผัง Flowchart การทำงาน	55
3-38	Safety Breaker 220 V 15 A 2 Pole	56
3-39	Switching Power Supply 24 VDC 10 A	56
3-40	AC-DC 5V 700mA	57
3-41	WEMOS D1 R2 WIFI ESP8266 Shield Arduino Compatible	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3-42	2 Channel 5V Optical Isolated Relay Module	59
3-43	แสดงขาต่างของ 2 Channel 5V Optical Isolated Relay Module	59
3-44	Limit Switch Z-15GW-B	60
3-45	DC Watt Meter 60V 150A (DC วัดต์มิเตอร์)	61
3-46	ข้อมูลจำเพาะ DC Watt Meter 60V 150A	61
3-47	PZEM-022 100A AC Digital Power Meter มิเตอร์วัดการใช้พลังงาน	62
3-48	โมดูล วงจร SG3525 + LM358	62
3-49	IC IR2110PBF	63
3-50	MOSFET IRF540N	63
3-51	IC Voltage Regulator 7812	64
3-52	WIMA Film Capacitor	65
3-53	Pilot Lamp	66
3-54	Push Button Switch	66
3-55	Buzzer 5 V	67
3-56	MUR880E Power Diode	67
3-57	High voltage and high current step-down converter	69
3-58	Battery Charger Control Module XH-M604 DC 6-60V	70
3-59	แบตเตอรี่แห้ง ยี่ห้อ Lion ชนิดตะกั่วกรด 12 V.DC 7 Ah	71
3-60	โวลต์มิเตอร์วัดความจุแบตเตอรี่ DC	71
3-61	ON-OFF Switch	72
3-62	PC817 (Optocoupler)	72
3-63	ESP32	73
3-64	ข้อมูลจำเพาะของ ESP32	73
3-65	Power Bank 50000 mAh	74
4-1	ชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	75
4-2	ระยะห่างของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับ	75
4-3	กราฟแสดงผลการทดลองของชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ที่ระยะ 6 cm. ,7 cm. และ 8 cm.	77
4-4	กราฟแสดงผลแรงดันแบตเตอรี่	79
4-5	กราฟแสดงผลกระแสชาร์จแบตเตอรี่	79
4-6	กราฟแสดงผลพลังงานสะสม	79
4-7	กราฟแสดงผลระดับประจุแบตเตอรี่	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-8 กราฟแสดงผลอุณหภูมิแบตเตอรี่ (°C)	80
4-9 กราฟแสดงผลแรงดันขาออก Output	81
4-10 กราฟแสดงผลกระแสขาออก Output	82
4-11 กราฟแสดงผลกำลังไฟฟ้า Output	82
4-12 กราฟแสดงผลแรงดันขาเข้า AC	83
4-13 กราฟแสดงผลกระแสขาเข้า AC	83
4-14 กราฟแสดงผลกำลังไฟฟ้าขาเข้า AC	84
4-15 กราฟแสดงผลพลังงานสะสม Input AC	84
4-16 กราฟแสดงผลแรงดันขาเข้า DC	85
4-17 กราฟแสดงผลกระแสขาเข้า DC	85
4-18 กราฟแสดงผลกำลังไฟฟ้าขาเข้า DC	86
4-19 กราฟแสดงผลพลังงานสะสม Input DC	86
4-20 กราฟแสดงผลพลังงานป้อนเข้า	87
4-21 กราฟแสดงผลพลังงานเข้าแบตเตอรี่	87
4-22 กราฟแสดงผลการสูญเสียระหว่างการชาร์จแบตเตอรี่	88
4-23 กราฟแสดงผลประสิทธิภาพการชาร์จแบตเตอรี่	88
5-1 ตำแหน่ง R11 ในวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง	92
5-2 แผ่น PCB ต้นแบบแบบกัดลายปรินต์	92
5-3 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 1k Ω	94
5-4 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 100 Ω	94
5-5 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 120 Ω	94
5-6 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 130 Ω	95
5-7 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 150 Ω	95
5-8 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 160 Ω	95
5-9 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 180 Ω	95
5-10 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 220 Ω	96
5-11 MODULE SG3525 สำเร็จสำหรับปรับความถี่	97
5-12 แผ่น PCB แบบกัดลายปรินต์ที่มีการหลุดลอก	98
5-13 แผ่น PCB ใหม่ก่อนติดตั้งอุปกรณ์	98
5-14 แผ่น PCB ใหม่หลังติดตั้งอุปกรณ์	99
5-15 MOSFET ที่เกิดความเสียหายจาก Thermal Runaway	99
5-16 การวัดสัญญาณที่ออกจาก Gate Driver	100

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
5-17	รูปคลื่นสัญญาณที่ออกจาก Gate Driver ที่ผิดเพี้ยนไป	100
5-18	จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง Gate Driver	101
5-19	สูตรพื้นฐานกฎของโอห์ม	102
5-20	ตัวต้านทาน (R) ขนาด 0.1Ω 20W ใช้เป็น Current Shunt	102
5-21	การต่อค่า R ที่จุดวัด เพื่อวัดกระแสที่ไหลไปยังชุดขดลวดฝั่งส่ง	102
5-22	Data Sheet ของ Power MOSFET เบอร์ IRF640N	103
5-23	Data Sheet ของ Power MOSFET เบอร์ IRF540N	104
5-24	การวัดกระแสที่ไหลไปยังชุดขดลวดฝั่งส่ง เมื่อเปลี่ยน Power MOSFET	104
5-25	ตำแหน่ง C14 ในวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง	105
5-26	การวัดค่ากระแสที่ไหลผ่าน C14	105
5-27	การอนุกรมตัวเก็บประจุ 3 ตัว ให้ได้ขนาด เพื่อต่อที่ C14	107
5-28	ตัวเก็บประจุฝั่งรับที่เกิดความเสียหาย	107
5-29	ตัวเก็บประจุขนาด $1.0\ \mu\text{F}$ มาอนุกรมกัน 3 ตัวเพื่อให้ได้ขนาด $0.334\ \mu\text{F}$	108
5-30	ค่าตัวเก็บประจุขนาด $0.334\ \mu\text{F}$ จำนวน 1 ตัว	108
5-31	ตัวเก็บประจุ WIMA FKP	109
5-32	KBPC5010	110
5-33	วงจรบริดจ์แบบ Schottky Diode	110
5-34	Datasheet Ultrafast Rectifiers MUR880E	111
5-35	วงจร Rectifier ที่ใช้ MUR880E	111
5-36	DC MPPT Controller 5A DC-DC Step Down	112
5-37	DC MPPT Controller 5A DC-DC Step Down ที่เกิดการระเบิด	112
5-38	DC-DC Step Down Module	113
ข-1	หน้าเว็บ Flat spiral coil inductor calculator	126
ข-2	แสดงการคำนวณหน้าเว็บ Flat spiral coil inductor calculator	126
ข-3	หน้าเว็บ Multi Layer air core inductor calculator	128
ข-4	แสดงการคำนวณหน้าเว็บ Multi Layer air core inductor calculator	128
ง-1	วงจรที่จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink	140
ง-2	สัญญาณ Input ของวงจร	141
ง-3	การตั้งค่า Pulse Generator	141
ง-4	สัญญาณ Pulse Generator ขับขา Gate Mosfet	142
ง-5	สัญญาณ Voltage Output เมื่อผ่านวงจร Inverter	142
ง-6	การตั้งค่าพารามิเตอร์ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า	143

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ง-7	สัญญาณแรงดันและกระแสก่อนเข้าขดลวด	143
ง-8	สัญญาณแรงดันฝั่งส่ง	144
ง-9	สัญญาณแรงดันฝั่งรับ	144
ง-10	สัญญาณแรงดันและกระแสหลังออกจากขดลวด	144
ง-11	การตั้งค่า Diode ที่วงจร Rectifier	145
ง-12	กระแสและแรงดันหลังจากเข้าวงจร Rectifier	145
ง-13	การตั้งค่าแบตเตอรี่	146
ง-14	ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองชาร์จแบตเตอรี่	146
ง-15	กระแสและแรงดันจากการจำลองชาร์จแบตเตอรี่	146
จ-1	รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 1	151
จ-2	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 1	151
จ-3	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 1	151
จ-4	กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 1	153
จ-5	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 1	153
จ-6	รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 2	154
จ-7	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 2	154
จ-8	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 2	154
จ-9	กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 2	156
จ-10	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 2	156
จ-11	รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 3	157
จ-12	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 3	157
จ-13	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 3	157
จ-14	กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 3	159
จ-15	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 3	159
จ-16	รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 4	160
จ-17	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 4	160
จ-18	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 4	160
จ-19	กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 4	162
จ-20	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 4	162
จ-21	รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 5	163
จ-22	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 5	163
จ-23	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 5	163

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
จ-24	กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 5	165
จ-25	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 5	165
จ-26	รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 6	166
จ-27	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 6	166
จ-28	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 6	166
จ-29	กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 6	168
จ-30	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 6	168
จ-31	รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 7	169
จ-32	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 7	169
จ-33	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 7	169
จ-34	กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 7	171
จ-35	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 7	171
จ-36	รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 8	172
จ-37	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 8	172
จ-38	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 8	172
จ-39	กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 8	174
จ-40	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 8	174
จ-41	รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 9	175
จ-42	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 9	175
จ-43	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 9	175
จ-44	กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 9	177
จ-45	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 9	177
จ-46	รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 10	178
จ-47	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 10	178
จ-48	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 10	178
จ-49	กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 10	180
จ-50	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 10	180
จ-51	รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 11	181
จ-52	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 11	181
จ-53	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 11	181
จ-54	กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 11	183
จ-55	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 11	183

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
จ-56	รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 12	184
จ-57	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 12	184
จ-58	รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 12	184
จ-59	กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 12	186
จ-60	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 12	186
ฉ-1	เสียบปลั๊กไฟฟ้ากระแสสลับ 220V เข้าตู้ควบคุม	188
ฉ-2	เปิดสวิตช์ Safety Breaker	188
ฉ-3	Pilot Lamp สีแดงติด	188
ฉ-4	หน้าจوميเตอร์ PZEM-022 ด้านหน้าตู้ควบคุม	189
ฉ-5	ล๊อตทั้งสองข้างกดสวิตช์ Limit Switch	189
ฉ-6	Pilot Lamp สีน้ำเงินติด	189
ฉ-7	วงจรทำงาน LED ที่แผงวงจรจะติดขึ้น	190
ฉ-8	Pilot Lamp สีเหลืองติด	190
ฉ-9	มิเตอร์ที่ตู้ควบคุม	191
ฉ-10	มิเตอร์ที่ตัวรถ	191
ฉ-11	ไฟสีเขียวบนตัวรถจะติด	191
ฉ-12	Pilot Lamp สีแดงติด กลับเข้าสู่สถานะเริ่มต้น	192

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

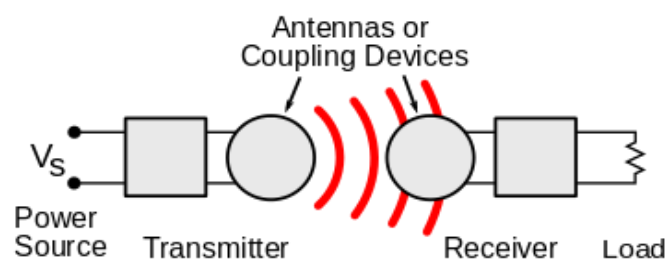
WPT	=	Wireless Power Transfer
EV	=	Electric Vehicle
IPT	=	Inductive Power Transfer
CPT	=	Capacitive Power Transfer
NR-IPT	=	Non-Resonant Inductive Power Transfer
R-IPT	=	Resonant Inductive Power Transfer
X_L	=	ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า
X_C	=	ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า
DD	=	Double D
DDQ	=	Double D Quadrature
BP	=	Bipolar
QDQ	=	Quad D Quadrature
C_1	=	ค่าตัวเก็บประจุฝั่งส่ง
C_2	=	ค่าตัวเก็บประจุฝั่งรับ
L_1	=	ค่าขดลวดเหนี่ยวนำฝั่งส่ง
L_2	=	ค่าขดลวดเหนี่ยวนำฝั่งรับ
L	=	ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (μH)
N	=	จำนวนรอบ (Number of Turns)
D_i	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (Coil inner diameter)
D_o	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (Coil Outer diameter)
w	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดลวด (Wire Diameter)
s	=	ความกว้างระหว่างขดลวดแต่ละรอบ (Spacing between turns)
W_L	=	ความยาวของลวด (Wire lenght)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาหัวข้อโครงการ

ทุกวันนี้เราอยู่อาศัยในเมืองที่อัดแน่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าปีละ 300 ล้านตันจาก การใช้ยานพาหนะบนท้องถนน เมื่อผนวกรวมกับคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมหาศาลจาก ภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือนด้วยแล้ว จึงส่งผลให้อุณหภูมิของโลกผันแปรและเกิดปัญหามลภาวะ ทาง อากาศชั้นรุนแรง ทั่วโลก เริ่มต้นตัวและออกมาตราการรวมถึงความร่วมมือต่าง ๆ อย่างจริงจังในการ ช่วยลดปัญหาข้างต้น เรียกได้ว่าเป็นการจับมือพร้อมใจก้าวไปในทิศทางเดียวกัน ในการรักษาโลก ให้หายป่วย เปลี่ยนบรรยากาศของโลกใบนี้ให้บริสุทธิ์ ซึ่งทางเลือกหนึ่งในการช่วยลดปัญหา คือ ช่วยกันรณรงค์การใช้ยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งใช้เป็น “พลังงานสะอาด” จึงเป็นที่กล่าวถึงกันมากทั่วโลกใน ฐานะทางเลือกในการจัดปัญหาดังกล่าว และเนื่องด้วยปริมาณเชื้อเพลิงปิโตรเลียมที่มีอยู่จำกัดและ กำลังหมดไปเรื่อย ๆ หลายประเทศรวมถึงประเทศไทยพยายามพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าให้มี ประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น เช่น การลดความดังเสียงเครื่องยนต์สตาร์ทเครื่องได้ง่ายขึ้น ระยะการเดินทาง ยาวไกลขึ้น ต้นทุนที่ลดลง ตลอดจนการร่วมมือกันส่งเสริมการวิจัย พัฒนาและลงทุนในอุตสาหกรรม ยานยนต์ไฟฟ้า และการเพิ่มจำนวนสถานีชาร์จไฟฟ้า ฯลฯ เหนือสิ่งอื่นใด สิ่งที่จะต้องเตรียมพร้อม อย่างมากที่สุด คือการสร้างความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้าให้กับสาธารณชน ซึ่งใน ปัจจุบันยานยนต์เริ่มมีการจัดจำหน่ายกันอย่างแพร่หลาย แต่รูปแบบการชาร์จยังเป็นการชาร์จแบบ ปลั๊ก-อินไฮบริด (Plug-in Hybrid) [1] คือการชาร์จพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธีการเสียบ ปลั๊กชาร์จพลังงาน ซึ่งในปัจจุบันมีการนำเสนอเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่ช่วยในการชาร์จพลังงานของ ยานยนต์ไฟฟ้ารวมถึงเทคโนโลยีการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless Power Transfer : WPT) [29]



ภาพที่ 1-1 บล็อกไดอะแกรมทั่วไปของระบบไฟฟ้าไร้สาย

การส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย หรือระบบถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย (Wireless Power Transfer: WPT) [4] เป็นเทคโนโลยีที่ส่งพลังงานจากเครือข่ายไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกเครือข่ายหนึ่ง หรือจากอุปกรณ์หนึ่งไปสู่อีกอุปกรณ์หนึ่ง โดยไม่ต้องใช้สายไฟ หรือสายนำสัญญาณเป็นตัวเชื่อมต่อ ซึ่งคุณลักษณะดังกล่าวนี้ ก่อให้เกิดความสะดวกและยืดหยุ่นเป็นประโยชน์อย่างมากในการใช้งาน ปัจจุบันจะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีไร้สายได้เข้ามามีบทบาทสำคัญ ต่อการพัฒนาอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ มากมาย มีอัตราการความต้องการที่เพิ่มขึ้น และพร้อมที่จะมีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ทั่วโลก ดังนั้นความรู้ในด้านการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าไร้สาย จึงมีความสำคัญมากขึ้นสำหรับวิศวกรไฟฟ้ายุคใหม่ โดยเทคโนโลยีในการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายได้มีการพัฒนามายาวนานตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 เริ่มต้นจากเทคโนโลยีการเหนี่ยวนำโดย สถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ ต่อจากนั้นก็มีการพัฒนาการมาเป็น ลำดับ โดยนวัตกรรมเทคโนโลยีพลังงานไร้สาย (WPT) มีรูปแบบการพัฒนาที่แตกต่างกัน เช่น การส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency) การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic field induction) การส่งแบบรีโซแนนซ์ (Resonant transmission) เป็นต้น โดยในปัจจุบันจะพบเห็นการนำเทคโนโลยีการส่งพลังงานแบบไร้สายไปใช้งานกับอุปกรณ์พกพา อุปกรณ์ทางการแพทย์ อุปกรณ์สื่อสาร เครื่องใช้ในบ้าน อุปกรณ์สำนักงาน และในอุตสาหกรรมยานยนต์ สำหรับแอปพลิเคชันรถยนต์ไฟฟ้า (EV) เป็นต้น

จากรายละเอียดข้างต้นผู้จัดทำปริญญานิพนธ์จึงมีแนวคิดในการออกแบบชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (The Demonstration Set of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle) ขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายขึ้น ซึ่งเป็นแนวคิดในการพัฒนาการเทคโนโลยีทางด้านยานยนต์ไฟฟ้า และลดปัญหาความยุ่งยากในการเสียบปลั๊ก

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการการออกแบบขดลวดของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำกันระหว่างขดลวดสองชุด

1.2.2 เพื่อสร้างชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าจำนวน 1 ชุด

1.2.3 เพื่อเป็นองค์ความรู้ในการนำไปพัฒนาต่อยอดในอนาคต และในเชิงพาณิชย์ได้

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 มีความรู้ความเข้าใจในพื้นฐานในการศึกษาการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายผ่านอากาศ โดยอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำกันระหว่างขดลวดสองชุด

1.3.2 สามารถออกแบบขดลวดและสร้างชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าจำนวนได้ 1 ชุด

1.3.4 ได้ต้นแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายและต่อยอดในเชิงพาณิชย์ได้

1.4 ขอบเขตของโครงการ

1.4.1 ออกแบบชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าจำนวน 1 ชุด

1.4.2 สามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าด้วยหลักการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กผ่านช่องว่างอากาศที่ระยะห่างระหว่างขดลวดไม่เกิน 10 เซนติเมตร ด้วยความถี่ตามมาตรฐาน SAE J2954

1.4.3 ดัดแปลงรถสกู๊ตเตอร์ ยี่ห้อ Free Rider ให้สามารถชาร์จกับโครงการนี้ได้ ในระยะเวลาไม่เกิน 10 ชั่วโมงต่อการชาร์จ

1.4.4 แสดงผลแรงดันและกระแสขณะชาร์จ พร้อมทั้งพลังงาน (wh) ที่ใช้ในชาร์จ

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการโครงการ

- 1.5.1 จัดหาหัวข้อโครงการ
- 1.5.2 ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับโครงการ
- 1.5.3 เข้าปรึกษาและพูดคุยกับอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
- 1.5.4 ออกแบบโครงสร้างชิ้นงาน
- 1.5.5 สอบหัวข้อโครงการ
- 1.5.6 ต่อบรรจุชุดสไลด์ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
- 1.5.7 เขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์
- 1.5.8 ทดสอบการทำงาน
- 1.5.9 รายงานความก้าวหน้า
- 1.5.10 ปรับปรุงและทดสอบการทำงานอีกครั้ง
- 1.5.11 จัดทำปริญญานิพนธ์
- 1.5.12 สอบจบโครงการ

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎี

2.1 ทบทวนวรรณกรรม

2.1.1 ชัยปดินทร์ อัครเวฬุกุล และ สายชล หน่อชาย. (2557). **การส่งพลังงานไฟฟ้าโดยหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก**. ได้ศึกษาการส่งพลังงานไฟฟ้าโดยหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำพื้นฐานของวงจรเรโซแนนซ์ (Resonance) แบบขนาน มีจุดประสงค์หลักเพื่อส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านอากาศไปยังหลอดไฟแอลอีดีขนาด 3 โวลต์ ให้ส่องสว่าง ซึ่งการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านอากาศถือเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังถูกนำมาใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน เช่น การชาร์จแบตเตอรี่โทรศัพท์หรือแปรงสีฟันไฟฟ้า โดยไม่จำเป็นต้องต่อสายไฟโดยตรง เพื่อความสะดวกและปลอดภัยจากการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลตามสายไฟ โดยวงจรต้นแบบที่พัฒนาจะเปลี่ยนรูปแบบของพลังงาน จากพลังงานไฟฟ้าที่ภาคส่งเป็นพลังงานแม่เหล็กด้วยวงจรกำเนิดความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ต่อกับวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานและส่งไปยังภาครับซึ่งเป็นวงจรเรกติไฟเออร์แบบซันบันได ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กกลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งเพื่อจ่ายให้กระแสไฟฟ้ากับหลอดไฟแอลอีดีขนาด 3 โวลต์

จากผลการทดลองที่ได้จะพบว่า เมื่ออุปกรณ์ภาคส่งและอุปกรณ์ภาครับออกห่างจากกันจะเกิดการสูญเสียพลังงาน โดยจะเห็นได้จากการลดลงของแรงดันและกระแสที่คร่อมหลอด เมื่อทำการเพิ่มระยะห่าง หลอดแอลอีดีจะส่องสว่างลดลง ซึ่งระยะที่หลอดแอลอีดียังคงส่องสว่างได้ดีอยู่ที่ระยะ 5 เซนติเมตร และเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นหลอดแอลอีดีจะส่องสว่างลดลงจนกระทั่งไม่มีกระแสพอที่จะทำให้หลอดแอลอีดีส่องสว่าง [2]

2.1.2 ธนพล ตรีธรรมานุรักษ์, จิรณัฐ ทัดจำปา, ศุภวิชญ์หลักบุญ, สรอรจ เทียมศรีทัศนกร, ภมร ศิลาพันธ์ และ วินัย ใจกล้า. (2564). **การสร้างและทดสอบเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย**. บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพและสร้างระบบเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรสร้างความถี่สูงและวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ในการทดลองใช้ความถี่ เรโซแนนซ์จากการคำนวณคือ 49.2kHz โดยการต่อ Load เป็นหลอดไฟ LED 2 ขนาด คือ LED 12W/12V และ LED 4W/12V ซึ่งผลการทดลองแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ทำให้หลอดไฟ LED 12W/12V ส่องสว่างอยู่คือ 7.08V และ 0.01A ตามลำดับ ที่ระยะ 19cm ส่วนหลอดไฟ LED 4W/12V แรงดันไฟฟ้า 7.40V และ กระแสไฟฟ้า 0.01A ที่ระยะ 20cm ประสิทธิภาพของเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายขึ้นอยู่กับระยะห่างของขดลวด โดยที่ช่วงความถี่ที่ให้ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าได้ดีที่สุดคือช่วงความถี่เรโซแนนซ์

จากผลการทดลองพบว่า เครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ออกแบบโดยใช้หลักการทางแม่เหล็กและเรโซแนนซ์ประกอบไปด้วยวงจรสร้างความถี่สูง และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ ในการทดลองเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย โดยทำการต่อ Load หลอดไฟ LED 2 ขนาด ซึ่งผลการทดลองหลอดไฟ LED 12W/12V ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด 7.08V และกระแส 0.01A ที่ระยะ 19cm ส่วน หลอดไฟ LED 4W/12V ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด 7.40V และ กระแส 0.01A ที่ระยะ 20cm ประสิทธิภาพของเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายขึ้นอยู่กับความถี่และระยะห่างของขดลวด ซึ่งความถี่ที่ประสิทธิภาพได้ดีที่สุดคือความถี่เรโซแนนซ์ (49.2kHz) [6]

2.1.3 ขาญณรงค์ เรืองขจร. (2562). **แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า**. นำเสนอการออกแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำพื้นฐานของฟาราเดย์ และหลักการเหนี่ยวนำวงจรเรโซแนนซ์ โดยจะเปลี่ยนรูปแบบพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานแม่เหล็กและส่งไปยังตัวรับพลังงานผ่านอากาศ ซึ่งตัวรับพลังงานจะเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กกลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อมาประจุให้กับแบตเตอรี่ ซึ่งจะให้หลักการนี้ออกแบบและสร้างวงจรประจุแบตเตอรี่ไร้สายให้กับยานยนต์ไฟฟ้า มีข้อดีคือทำให้เกิดความสะดวกสบายแก่ผู้ใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต

ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ไฟฟ้าของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ระยะตั้งแต่ 2 – 12 เซนติเมตร พบว่าที่ระยะ 10 เซนติเมตร ให้แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า รวมถึงกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 104.84 โวลต์ กระแสเอาต์พุต 10.48 แอมป์ กำลังไฟฟ้า 1,098.72 วัตต์ แต่ประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำอยู่ที่ร้อยละ 35.5 ซึ่งระยะที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดอยู่ที่ 2 เซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 26.37 โวลต์ กระแสเอาต์พุต 2.63 แอมป์ กำลังไฟฟ้า 69.35 วัตต์ [3]

2.1.4 บุญทัน สนั่นน้ำหนัก, อติสร นวลอ่อน, สรายุทธ์ สวัสดิ์วงศ์ชัย, วันทนา สุขุมณี, บุญยัง สิงห์เจริญ, สันติ साแก้ว และพงศกร ตอกรมย์. (2566). **ชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย**. ชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย และทดลองหา ประสิทธิภาพของชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ซึ่งใช้หลอดไฟขนาด 220 โวลต์ 100 วัตต์ ในการทดลอง หลักการทำงานของชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย คือการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากขดลวดภาคส่งไปยังขดลวดภาครับเพื่อจ่ายพลังงานให้กับหลอดไฟฟ้า

ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้า แบบไร้สายของชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายปรากฏว่า ประสิทธิภาพสูงสุดของชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า แบบไร้สาย ระยะที่ 9 เซนติเมตร บรรลุประสิทธิภาพร้อยละ 56.33 ได้กำลังไฟฟ้า 318.99 วัตต์ และประสิทธิภาพต่ำสุดของชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายระยะที่ 40 เซนติเมตร บรรลุประสิทธิภาพร้อยละ 0.12 กำลังไฟฟ้า 0.78 วัตต์ [8]

2.1.5 พิชษฐ์ วิสารทพงศ์. (2564). **การถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย.** การถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย (WPT) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถถ่ายโอนพลังงานจากเครือข่ายไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกเครือข่ายหนึ่งโดยไม่ต้องใช้สายไฟเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ ซึ่งกำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบัน ในบทความนี้จึงได้นำเสนอการทบทวนเทคโนโลยีการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย (Wireless Power Transfer : WPT) ประกอบด้วยหลักการ ประเภท มาตรฐาน และการประยุกต์ใช้งานในปัจจุบัน เพื่อแสดงถึงพัฒนาการและความก้าวหน้าของเทคโนโลยีนี้ที่ได้นำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เช่น อุปกรณ์สื่อสาร การชาร์จประจุแบตเตอรี่ของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ การชาร์จประจุแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้า อุปกรณ์ทางการแพทย์เครื่องใช้ในบ้าน เป็นต้น

ข้อดี: เทคโนโลยีการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าผ่านอากาศนี้ จะช่วยจัดการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าแบบเดิมที่ใช้สายเคเบิลหรือสายไฟ เชื่อมโยงระหว่างเสา และสถานีย่อยระหว่างโรงไฟฟ้ากับผู้บริโภค เนื่องจากสะดวกกว่าและมีอิสระในการใช้ไฟฟ้ามากขึ้น ต้นทุนและการบำรุงรักษาการส่งไฟฟ้าจากสถานีไปยังสถานีย่อยจะกลายเป็นต้นทุนที่เหมาะสม และค่าไฟฟ้าสำหรับผู้บริโภคก็จะลดลงด้วย เทคโนโลยีนี้ยังมีประโยชน์ในการถ่ายโอนกระแสไฟฟ้าไปยังสถานที่ที่ไม่สามารถส่งไฟฟ้าผ่านสายได้

ข้อเสีย : ในระยะเริ่มแรกนั้นอาจมีต้นทุนเรื่องเงินทุนในการดำเนินการช่วงเริ่มต้นสูง ส่วนทางด้านเทคนิคการส่งผ่านพลังงานด้วยเลเซอร์ยังคงมีเรื่องการสูญเสียจากการแผ่รังสี การสูญเสียการลดทอน ฯลฯ เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ข้อเสียอีกประการหนึ่งของเทคโนโลยีไมโครเวฟ คือ การรบกวนเทคโนโลยีการสื่อสารอื่นๆ ในปัจจุบัน และอาจส่งผลให้เกิดผลกระทบทางชีวภาพต่อมนุษย์ และสัตว์ เพราะการส่งในระบบไมโครเวฟนั้นต้องใช้ความถี่และกำลังส่งสัญญาณสูง ดังนั้นการนำไปใช้งานต้องมีความระมัดระวังอย่างมาก [26]

2.1.6 กริดา จีบกล้า. (2563). **การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัตด้วยความถี่เรโซแนนซ์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก.** นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัต ด้วยวิธีความถี่เรโซแนนซ์ โดยใช้ภาคส่งกำลังไฟฟ้าหลายชุดขนานกับวงจรอินเวอร์เตอร์ชุดเดียว สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อหาประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัต ระหว่างภาคส่งกำลังไฟฟ้ากับภาครับกำลังไฟฟ้า และระหว่างภาคส่งกำลังไฟฟ้ากับชุดอัดประจุไฟฟ้า รวมถึงการออกแบบระบบควบคุมการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัตด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทำการทดลองและเปรียบเทียบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัต โดยปรับระยะห่างระหว่าง ภาคส่งและภาครับกำลังไฟฟ้า และความเร็วในการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้าที่ความถี่เรโซแนนซ์

จากผลการทดลองพบว่า ระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัตที่ออกแบบและพัฒนา มีประสิทธิภาพการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด 98.13% ที่ระยะห่างระหว่างภาคส่งกำลังไฟฟ้า และภาครับกำลังไฟฟ้า 0.05 m โดยเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.17 m/s [10]

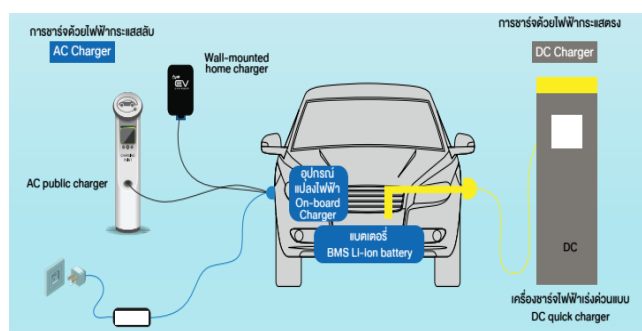
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ยานยนต์ไฟฟ้า คือ ยานยนต์ที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อน ทำให้ยานยนต์ไฟฟ้า มีประสิทธิภาพมากกว่ายานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน สามารถแบ่งได้เป็น 3 พิกัด กำลังไฟฟ้า คือ 1) ยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก พิกัดมอเตอร์ไฟฟ้าไม่เกิน 10 kW เช่น รถจักรยาน รถกอล์ฟ 2) ยานยนต์ไฟฟ้าขนาดกลาง พิกัดมอเตอร์ไฟฟ้า 10-30 kW เช่น รถยนต์ส่วนบุคคล และ 3) ยานยนต์ไฟฟ้าขนาดใหญ่ พิกัดมอเตอร์ไฟฟ้าเกินกว่า 30 kW เช่น รถโดยสาร รถบรรทุก ยานยนต์ไฟฟ้าที่นิยมใช้งานในปัจจุบันเป็นยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก การขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า จำเป็นต้องใช้พลังงานที่ถูกเก็บไว้ในแบตเตอรี่ เมื่อระดับพลังงานลดลงต้องมีการอัดประจุแบตเตอรี่ [10]

2.2.1 การอัดประจุไฟฟ้า

เทคโนโลยีการอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ 1) การอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวนำ (Conductive Charging) หรือการอัดประจุไฟฟ้าแบบใช้สายไฟฟ้า (Wire Charging) 2) การอัดประจุไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Battery Swapping) และ 3) การอัดประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Inductive Charging) หรือการอัดประจุไฟฟ้า แบบไร้สาย (Wireless Charging หรือ Wireless Power Transfer) [10]

2.2.1.1 การอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวนำ (Conductive Charging) หรือการอัดประจุไฟฟ้าแบบใช้สายไฟฟ้า (Wire Charging) หรือการชาร์จผ่านเต้ารับ-เต้าเสียบทั่วไป เป็นวิธีใช้ทั่วไป สะดวกลงทุนต่ำและมีประสิทธิภาพที่สุดเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่น ซึ่งการอัดประจุไฟฟ้าแบบใช้สายไฟฟ้ามีความไม่ปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน เมื่อฉนวนของสายไฟฟ้า เสื่อมสภาพหรือถูกของมีคมบาดอาจเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลและเป็นอันตรายได้ อีกทั้งการอัดประจุไฟฟ้า ต้องใช้เวลานานและต้องจอดอยู่กับที่ตลอดการอัดประจุไฟฟ้า โดยสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทตามประเภทกระแสไฟฟ้า ได้แก่ การชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Charger) และการชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (DC Charger) [9]

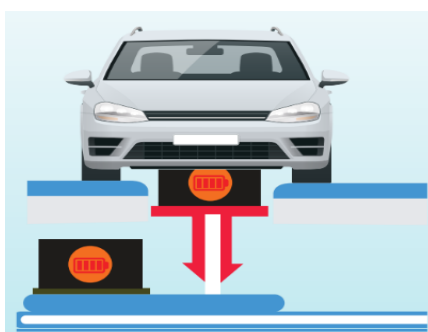


ภาพที่ 2-1 การอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวนำ (Conductive Charging)

ตารางที่ 2-1 เปรียบเทียบการชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ

ชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ แบ่งเป็น 2 ระดับ	ชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรง
● แบบ 1 เฟส 230 โวลต์ จะให้กำลังไฟฟ้าประมาณ 3.3-3.7 กิโลวัตต์ ใช้เวลาในการอัดประจุประมาณ 3-7 ชั่วโมง จึงเหมาะกับการอัดประจุไฟฟ้าข้ามคืน ● แบบ 3 เฟส 400 โวลต์ ซึ่งกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นอีกระดับไปจนถึง 43 กิโลวัตต์ ทำให้ระยะเวลาการชาร์จลดลงเหลือเพียง 0.5-2 ชั่วโมง ซึ่งลักษณะนี้พบตามสถานีชาร์จสาธารณะหรือจุดพักรถ	ไม่จำเป็นต้องผ่านอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า เนื่องจากอุปกรณ์นั้นติดตั้งที่สถานีชาร์จแล้ว (Off Board Charger) ทำให้สถานีชาร์จค่อนข้างใหญ่ เป็นการชาร์จด้วย แรงดันและกระแสไฟฟ้าสูงทำให้สามารถชาร์จไฟได้สูงกว่า 50 กิโลวัตต์ และใช้เวลาไม่เกิน 30 นาที (จากระดับต่ำสุด ถึงที่ระดับ 80% ของความจุ) พบมากตามจุดพักรถตาม ทางหลวงหรือสถานีบริการน้ำมัน

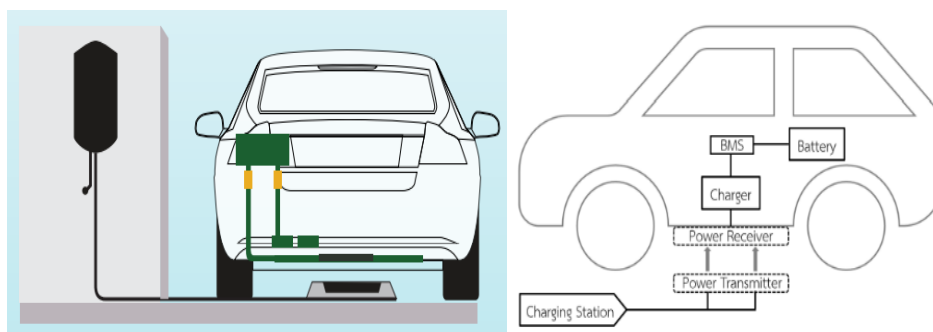
2.2.1.2 การอัดประจุไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Battery Swapping) เป็นวิธีการชาร์จพลังงานที่เร็วที่สุด เหมาะกับการเดินทางไกล แต่ต้องลงทุนสูงมาก และ อาศัยการบริหารจัดการที่ค่อนข้างซับซ้อน และ รถยนต์ที่สามารถเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้นั้น ต้องมีดีไซน์ที่เฉพาะ ทั้งนี้ Tesla ได้หยุดการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ เนื่องจากไม่ได้รับความนิยมและเห็นว่ามี Supercharger ก็เพียงพอแล้ว [9]



ภาพที่ 2-2 การอัดประจุไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Battery Swapping)

2.2.1.3 การอัดประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Inductive Charging) หรือการอัดประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless Charging หรือ Wireless Power Transfer) แบตเตอรี่ภายในรถสามารถชาร์จไฟได้ โดยไม่ต้องใช้สายชาร์จ อาศัยหลักการเหนี่ยวนำของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างจุดชาร์จกับจูดรับบนตัวรถ ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกสบายและมีค่าบำรุง รัักษาน้อย การอัดประจุไฟฟ้าแบบไร้สายสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ 1) การอัดประจุไฟฟ้าไร้สายแบบอยู่กับที่ เป็นวิธีการอัดประจุ

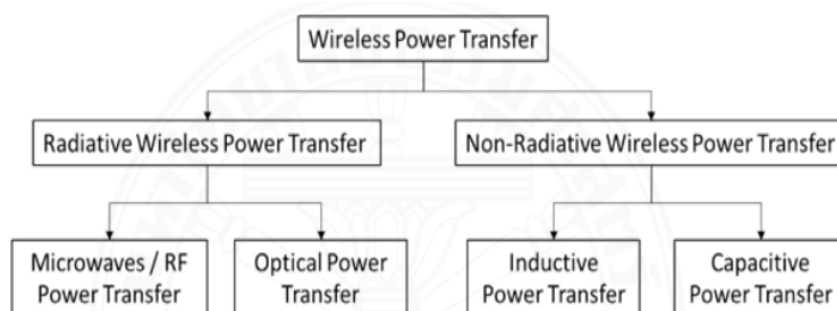
ไฟฟ้าในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้าจอดอยู่กับที่ตลอดการอัดประจุไฟฟ้า ซึ่งข้อด้อยที่สำคัญของการอัดประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย คือ มีประสิทธิภาพต่ำซึ่งทำให้เวลาที่ใช้ในการอัดประจุไฟฟ้ายังคงมีมากกว่าหรือเท่ากับการอัดประจุไฟฟ้าแบบใช้สายไฟฟ้า จึงเกิดเป็นเทคโนโลยีการอัดประจุไฟฟ้าไร้สายแบบกึ่งพลวัตและแบบพลวัต 2) การอัดประจุไฟฟ้าไร้สายแบบกึ่งพลวัต เป็นวิธีการอัดประจุไฟฟ้าในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้าจอดรับ-ส่ง ผู้โดยสารหรือจอดติดสัญญาณไฟจราจรซึ่งคล้ายกับการอัดประจุไฟฟ้าไร้สายแบบอยู่กับที่แต่อัดประจุไฟฟ้า ในช่วงเวลาและระยะทางสั้นๆ ในบางครั้งอาจทำให้ไม่สามารถอัดประจุไฟฟ้าได้จึงเกิดเป็นเทคโนโลยี 3) การอัดประจุไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัตเป็นวิธีการอัดประจุไฟฟ้าในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้า กำลังเคลื่อนที่ซึ่งสามารถลดความเสี่ยงของอันตรายที่เกิดจากการอัดประจุไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องจอดยานยนต์ไฟฟ้าอยู่กับที่ตลอดการอัดประจุไฟฟ้าและสามารถลดเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าได้ [9,10]



ภาพที่ 2-3 การอัดประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Inductive Charging)

2.2.2 วิธีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

โดยสามารถจำแนกออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ การส่งพลังงานแบบแผ่รังสี (Radiative WPT) และการส่งพลังงานแบบไม่แผ่รังสี (Non-Radiative WPT)



ภาพที่ ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของสไลด์ที่ระบุในเอกสาร-1 บล็อกจำแนกวิธีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

2.2.2.1 การส่งพลังงานแบบแผ่รังสี (Radiative WPT) เป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) ผ่านทางสายอากาศ (Antenna) ส่งต่อไปยังตัวกลาง เช่น อากาศ หรือ สุญญากาศ โดยที่ปลายทางอีกด้านจะมีสายอากาศรับและแปลงกลับไปเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกทอดหนึ่ง ลักษณะเด่นของการส่งแบบไร้สายชนิดนี้คือ สามารถส่งพลังงานได้ระยะไกล และมีความหนาแน่นกำลังงานสูง จึงนิยมใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีอวกาศและกองทัพโดยเฉพาะ แต่เนื่องจากลักษณะการส่งพลังงานดังกล่าวมีการแผ่รังสีที่มีความหนาแน่นกำลังงานสูง จึงไม่นิยมใช้ในชุมชน [5]

2.2.2.2 การส่งพลังงานแบบไม่แผ่รังสี (Non-Radiative WPT) เป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าในลักษณะการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ๆ ซึ่งระยะส่งพลังงานดังกล่าวจะสั้นกว่าการส่งพลังงานแบบแผ่รังสี โดยที่เทคโนโลยีการส่งพลังงานแบบไม่แผ่รังสีนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ดังต่อไปนี้ [5]

1. การส่งพลังงานไร้สายแบบสนามแม่เหล็ก (Inductive Power Transfer: IPT)
2. การส่งพลังงานไร้สายแบบสนามไฟฟ้า (Capacitive Power Transfer: CPT)

2.2.3 การส่งพลังงานไร้สายแบบสนามแม่เหล็ก (Inductive Power Transfer)

การส่งพลังงานแบบ IPT สามารถจำแนกออกเป็น 2 ชนิด คือ

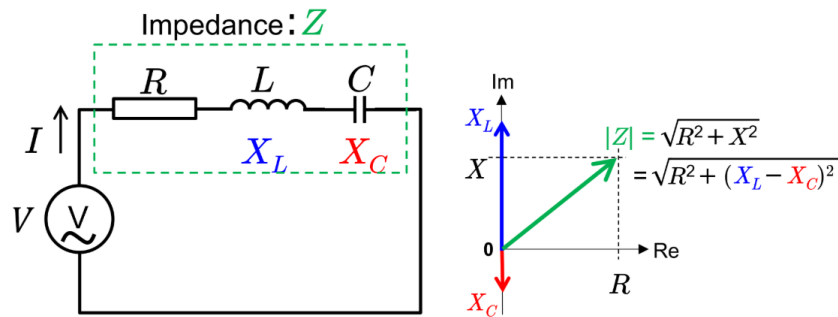
2.2.3.1 การส่งพลังงานแบบ IPT ชนิดไม่อาศัยการกำธ (Non-Resonant IPT) การส่งพลังงานแบบ NR-IPT เป็นการส่งพลังงานไร้สายเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กขั้นพื้นฐานที่สุด อาศัยหลักการคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) ต่างเพียงแต่ไม่มีแกนแม่เหล็กระหว่างขดลวดส่ง ซึ่งลักษณะเช่นนี้ทำให้ค่าการเหนี่ยวนำรั่วไหลสูง ระบบส่งพลังงานแบบ NR-IPT มีโครงสร้างการทำงานเรียบง่าย จะใช้งานเมื่อมีแรงดันตกคร่อมไม่สูงมาก และการส่งกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลด (R_o) ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [5]

2.2.3.2 การส่งพลังงานแบบ IPT ชนิดอาศัยการกำธ (Resonant IPT) เป็นการส่งพลังงานไร้สายเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กที่อาศัยหลักการกำธ (Resonance) ในระบบเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบได้ดีขึ้น โดยเฉพาะด้านกำลังและพลังงานในการรับส่ง ซึ่งทำได้โดยเพิ่มขดลวด (Inductors) และตัวเก็บประจุ (Capacitors) เข้าไปในชุดวงจร แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แบบอนุกรม (Series Resonant) และแบบขนาน (Parallel Resonant) เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจรเรโซแนนซ์ ผลที่จะเกิดขึ้นขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อของวงจรเรโซแนนซ์ว่าเป็นแบบอนุกรมหรือขนานแต่ผลที่เหมือนกัน คือ เมื่อความถี่สูงค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า (X_L) จะมากและค่าอิมพีแดนซ์ ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (X_C) จะต่ำ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะมีค่าที่สวนทางกัน ดังนั้น หากมีค่าความถี่ที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ ของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน จะทำให้ค่ารีแอคแตนซ์ หักล้างกันหมดจึงเหลือเฉพาะค่าความต้านทาน [10,5]

2.2.4 วงจรเรโซแนนซ์

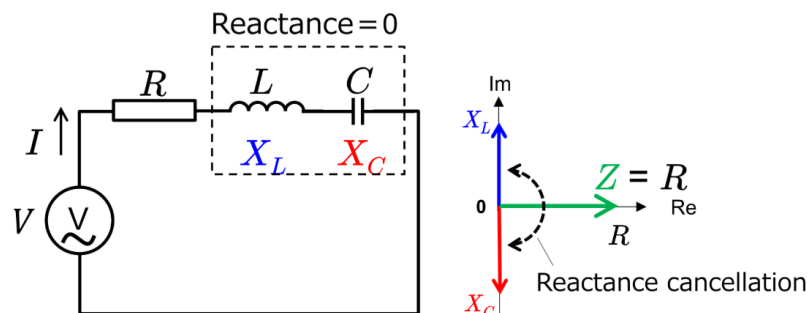
หมายถึงวงจรไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบของวง R, L, C เพื่อทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่เฉพาะ มักจะมีคุณสมบัติพิเศษที่มีประโยชน์ในการทำงานหลายอย่าง วงจรเรโซแนนซ์มี 2 ประเภท คือ

2.2.4.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม



ภาพที่ 2-5 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

เงื่อนไขของการเรโซแนนซ์คือ เมื่อรีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและความจุเท่ากัน ดังนี้



ภาพที่ 2-6 เงื่อนไขของการเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

ซึ่งผลของการเรโซแนนซ์ทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าน้อยที่สุด และเหลือเพียงค่าความต้านทานเท่านั้น สามารถพิจารณาได้จาก (2-1) และความถี่เรโซแนนซ์จะสามารถหาได้จาก (2-2)

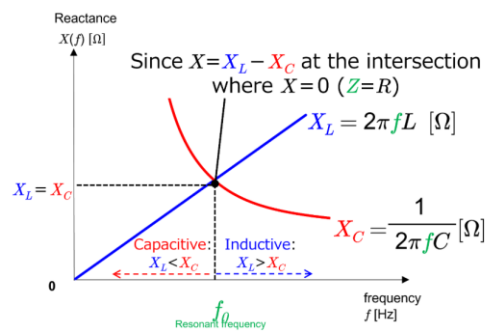
$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2-1)$$

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

สรุปได้ว่า ในสถานะเรโซแนนซ์ของวงจร RLC แบบอนุกรม อิมพีแดนซ์ (Z) จะเป็นดังนี้ :

$$|Z| = \sqrt{R^2 + 0^2}$$

$$Z = R$$

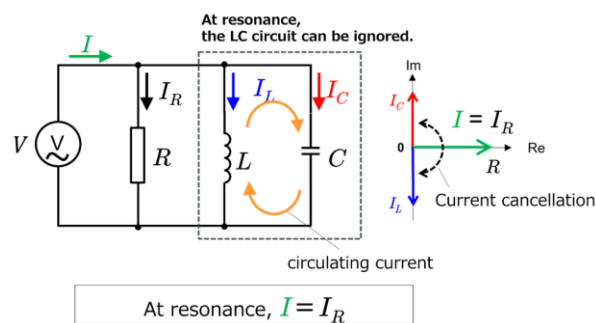


ภาพที่ 2-7 สถานะเรโซแนนซ์ของวงจร RLC แบบอนุกรม

ส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ลดลง และกระแสไฟภายในวงจรจะถึงค่าสูงสุด

$$I = \frac{V}{R}$$

2.2.4.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน



ภาพที่ 2-8 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรนี้จะได้จากสูตร (2-3) ดังนี้

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C = \frac{1}{R} + \frac{-j}{\omega L} + j\omega C = \frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \quad (2-3)$$

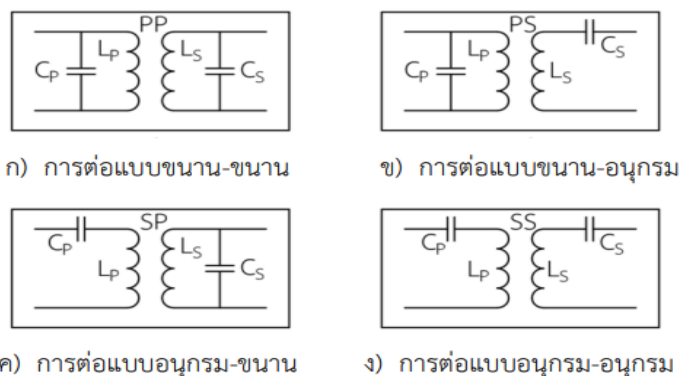
ในวงจรเรโซแนนซ์ RLC แบบขนาน คล้ายกับวงจรเรโซแนนซ์ RLC แบบอนุกรม ที่เรโซแนนซ์รีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุหักล้างกันออกไป

$$\frac{1}{Z} = j\left(\frac{\sqrt{C}}{\sqrt{L}} - \frac{\sqrt{C}}{\sqrt{L}}\right) = \frac{1}{R}$$

$$Z = R$$

ผลของค่าความต้านทานรวมจะสูงขึ้นมากที่ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งการกระตุ้นของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานมีผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงตกคร่อมอิมพีแดนซ์และกระแสที่ไหลภายในวงจรมีค่าต่ำสุด (ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล ทำให้คล้ายกับวงจรเปิด)

ซึ่งอาจจำแนกลักษณะการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าและขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่งกำลังไฟฟ้า และภาครับกำลังไฟฟ้าในวงจรเรโซแนนซ์มี 4 รูปแบบ [9]

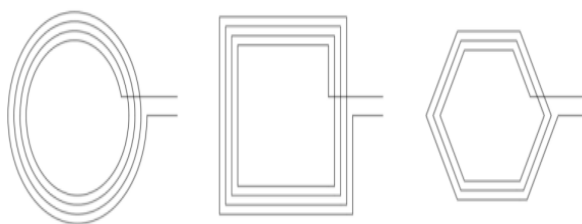


ภาพที่ 2-9 ลักษณะการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าและขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า

2.2.5 ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า

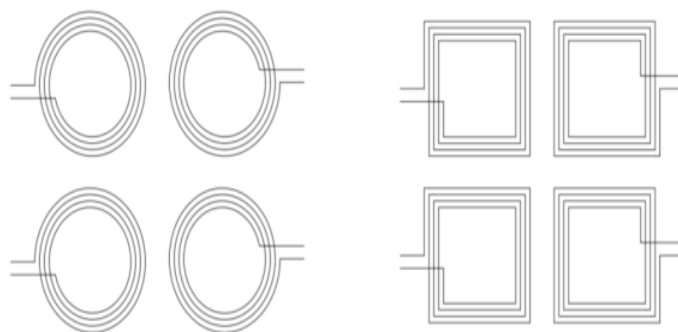
รูปทรงขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้ในวงจรเรโซแนนซ์ สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท

2.2.5.1 รูปทรงแบบดั้งเดิม โดยปกติจะใช้แบบภาคส่งกำลังไฟฟ้า 1 ชุด ต่อภาครับกำลังไฟฟ้า 1 ชุด ซึ่งขนาดของภาคส่งกำลังไฟฟ้าและภาครับกำลังไฟฟ้าอาจมีขนาดเท่ากัน หรือต่างกันก็ได้



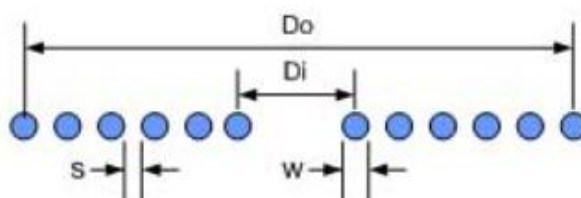
ภาพที่ 2-10 รูปทรงขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบดั้งเดิม

2.2.5.2 รูปทรงการจัดเรียงแบบหลายชุด เช่น รูปแบบ Solenoidal Coil รูปแบบ Double D (DD) รูปแบบ Double D Quadrature (DDQ) รูปแบบ Bipolar (BP) และรูปแบบ Quad D Quadrature (QDQ) การใช้ภาคส่งกำลังไฟฟ้าหลายชุด ต่อภาครับกำลังไฟฟ้า 1 ชุด สามารถปรับปรุงให้ประสิทธิภาพมีค่าสูงขึ้นได้ และการจัดตำแหน่งของภาคส่งและภาครับ กำลังไฟฟ้าทำได้ง่าย [10]



ภาพที่ 2-11 รูปทรงการจัดเรียงขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบหลายขด

โครงการนี้เลือกใช้ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบวงกลม ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1-1) และเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1-2) [10]



ภาพที่ 2-12 ระยะของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบวงกลม

$$L = \frac{N^2 \times A^2}{30A - 11D_i} \quad (1-1)$$

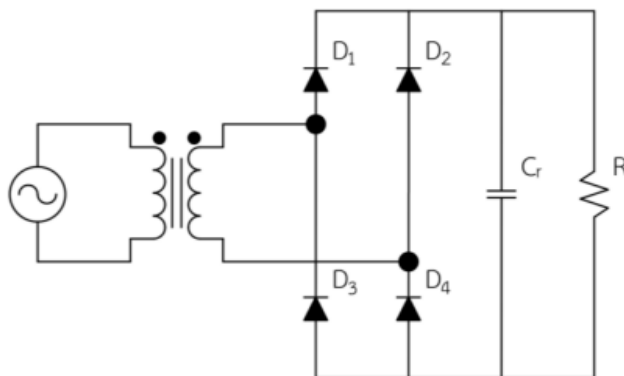
$$A = \frac{D_i + N(W + S)}{2} \quad (1-2)$$

เมื่อ

- L คือ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (μH)
- N คือ จำนวนรอบ
- D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (mm)
- w คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดลวด (mm)
- s คือ ความกว้างระหว่างขดลวดแต่ละรอบ (mm)
- D_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (mm)

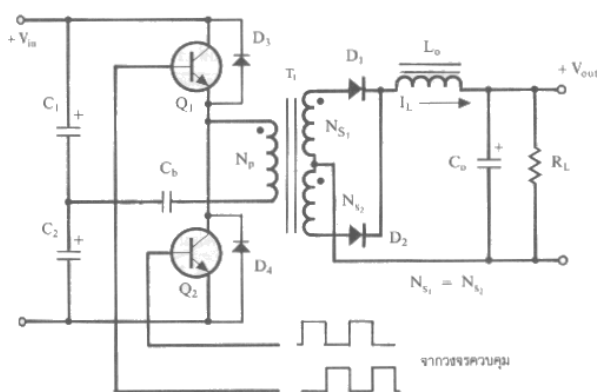
2.2.6 วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

2.2.6.1 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้า (Rectifier Circuit) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยมี ไดโอดจะเป็นตัวเรียงกระแสไฟฟ้าสลับ ซึ่งมีคลื่นด้านบวกและลบให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีเฉพาะคลื่นด้านบวกหรือลบเพียงด้านเดียว [10]



ภาพที่ 2-13 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น (Rectifier Circuit)

2.2.6.2 วงจรอินเวอร์เตอร์กำลัง (Inverter Circuit) เป็นวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC to AC Converter) ตามขนาดและความถี่ที่ต้องการ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสามารถตั้งค่าให้คงที่หรือปรับค่าได้ตามต้องการที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งหรือเปลี่ยนความถี่ได้ [10]



ภาพที่ 2-14 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์เต็มคลื่น (Inverter Circuit)

2.2.6.3 ระบบควบคุมการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าโดยใช้ Limit Switch ทำหน้าที่ เป็นสวิตช์ เช็คตำแหน่งทางกล เพื่อ ON-OFF การจ่ายไฟไปยังวงจร Inverter ซึ่งมีหลักการคือ เมื่อ Limit Switch ถูกกดหรือทับด้วยล้อของรถสปีดเตอร์ทั้ง 2 ตำแหน่งเท่านั้น จะปิดวงจรกระแสไฟฟ้าจะไหลไปยังวงจร Inverter เพื่อสั่งการให้วงจรเรโซแนนซ์ภาคส่งกำลังไฟฟ้าทำงาน

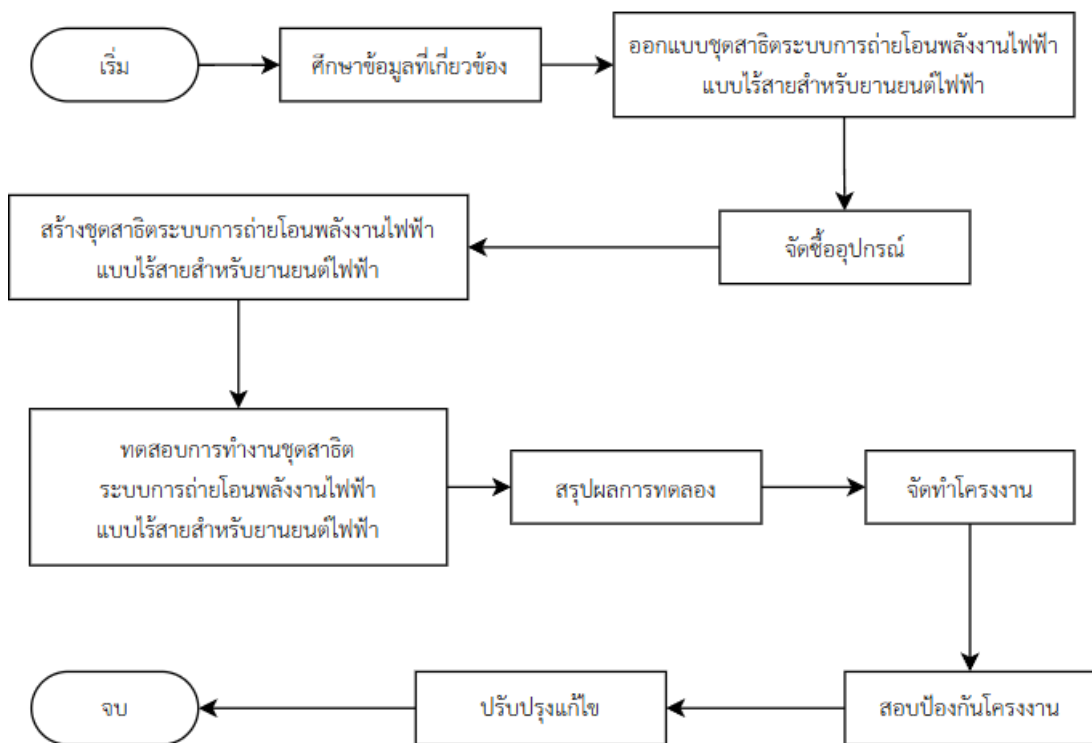
2.2.6.4 ระบบอัดประจุแบตเตอรี่ ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าที่ลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้า ให้มีค่าเหมาะสมสำหรับการอัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ โครงงานนี้ใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 VDC 26 AH จำนวน 2 ลูกอนุกรมกัน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการ

จากการศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายในบทที่ 2 ได้ข้อมูลพื้นฐานและแนวทางที่สำคัญสำหรับการออกแบบและพัฒนาระบบ ในบทนี้จะนำเสนอกระบวนการดำเนินงานอย่างละเอียดตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบเชิงทฤษฎี การจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ไปจนถึงการสร้างชิ้นงาน การเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับประกอบชิ้นงาน วงจรการทำงาน รวมไปถึงการประกอบโครงสร้างของชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า และทดสอบชิ้นงานจริง เพื่อให้เป็นไปตามขอบเขตของโครงการที่ได้กำหนดไว้

สามารถเขียนเป็นแผนผังการดำเนินงานของโครงการได้ ดังนี้



ภาพที่ 3-1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการโครงการ

3.1 การคำนวณเพื่อการออกแบบโครงสร้างชิ้นงาน

3.1.1 การคำนวณกระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่รถสกูเตอร์ ยี่ห้อ Free Rider จากข้อมูลสเปกของรถสกูเตอร์ ยี่ห้อ Free Rider



SPECIFICATION:

Overall length	120cm/47inches
Overall width	58cm/23inches
Ground clearance	6.5cm/2.5inches
Maximum load	136kgs/300lbs
Range up to	32km/20ml(26Amp batteries)
Total weight(excl.batteries)	53.5kgs/118 lbs
Heaviest port	21kgs/46 lbs
Wall to wall turning radius	104.5cm/42inches
Maximum Speed	8.8km/5.5mph(10 inches rear tires)
Battery	26Amp/36Amp/50Amp

ภาพที่ 3-2 ข้อมูลสเปกของรถสกูเตอร์ ยี่ห้อ Free Rider

จากข้อมูลของรถสกูเตอร์ ใช้แบตเตอรี่ขนาด 24 V.DC 26 Ah เป็นแหล่งพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ DC 24 V จึงได้ออกแบบการชาร์จแบตเตอรี่เป็นขนาด 24 V.DC 26 Ah โดยจะใช้แบตเตอรี่แห้ง ชนิดตะกั่วกรด ขนาด 12 V.DC 26 Ah จำนวน 2 ลูก



Specifications

Nominal Voltage		12 V
Rated Capacity (20 hours rate)		26Ah
Dimensions (± 2mm)	Total Height (with terminals)	179mm
	Length	165mm
	Width	125mm
	Height	174 mm
Approx. Weight		9.0 kg
Terminal	Standard	F1
	Optional	F2

ภาพที่ 3-3 แบตเตอรี่แห้ง ยี่ห้อ Lion ชนิดตะกั่วกรด 12 V.DC 26 Ah

Characteristics

Capacity (25°C)	10 hour rate (2.42A)	24.2AH
	5 hour rate (4.42A)	22.1AH
	1 hour rate (15.6A)	15.6AH
	15 min rate (45.52A)	11.38AH
Internal Resistance	Fully charged Battery 25°C	Approx. 10m
Capacity affected by temperature (20 hour rate)	40°C	102%
	25°C	100%
	0°C	85%
	-15°C	65%
Self Discharge (25°C)	Capacity after 3 months storage	1%
	Capacity after 6 months storage	82%
	Capacity after 12 months storage	64%
Charge Method (Constant Voltage)	Cycle use	Initial Current 7.20A or smaller
		Control Voltage 14.4 to 15.0V (25°C)
	Standby use	Initial Current 7.20A or smaller
		Control Voltage 13.5 to 13.8V (25°C)

ภาพที่ 3-4 Datasheet แบตเตอรี่แห้ง ชนิดตะกั่วกรด 12 V.DC 26 Ah

3.1.2 หลักการชาร์จแบตเตอรี่

ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงประกอบด้วย

3.1.2.1 ขนาดความจุแบตเตอรี่ Ah

โดยปกติแบตเตอรี่ 12V จะใช้กระแสชาร์จที่ 10-15 % ของความจุแบตเตอรี่ (Ah)

วิธีคำนวณ

กระแสที่ควรชาร์จ = 10-15 % x ขนาดความจุแบตเตอรี่ (Ah)
 จะได้ กระแสที่ควรชาร์จ = 10-15 % x 26.0 (Ah)
 = 2.6-3.9 A

3.1.2.2 ความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ก่อนชาร์จครั้งต่อไป

ส่วนใหญ่เมื่อแบตเตอรี่หมดประจุ จะเหลือความจุแบตเตอรี่ Ah ประมาณ 40% ดังนั้นจึงต้องชาร์จเพิ่มอีก 60% เพื่อให้แบตเตอรี่เต็ม

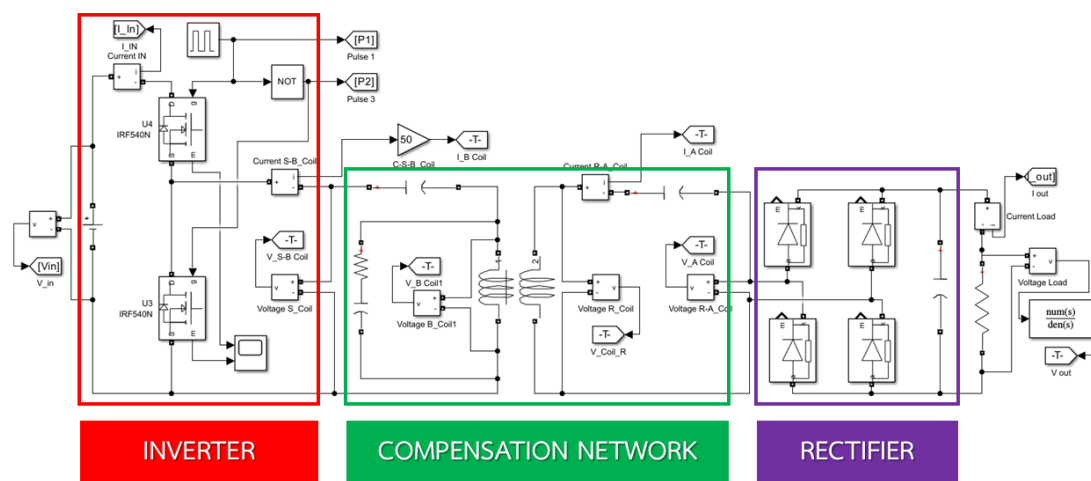
วิธีคำนวณ

จำนวน Ah ที่ต้องชาร์จเพิ่ม = 60% x ขนาดแบตเตอรี่ (Ah)
 จะได้ จำนวน Ah ที่ต้องชาร์จเพิ่ม = 60% x 26 (Ah)
 = 15.60 Ah
 จำนวนชั่วโมงชาร์จ = จำนวน Ah ที่ต้องชาร์จเพิ่ม x กระแสที่ควรชาร์จ
 จะได้ จำนวนชั่วโมงชาร์จ = 15.60 Ah x 2.6-3.9 A
 ประมาณ 4-6 ชม.

3.1.2.3 ขนาดแรงดันที่ควรชาร์จ

โหมดการชาร์จของแบตเตอรี่ 12 V มี 2 แบบ ซึ่งมีทั้ง Float charge (stand-by use) คือการชาร์จที่แรงดัน 13.6-13.8 V และ Equal charge (cycle use) คือการชาร์จที่แรงดัน 14.2-14.9 V แต่สำหรับแบตเตอรี่รถสกูเตอร์ ยี่ห้อ Free Rider จะใช้แรงดันใช้งานอยู่ที่ 24 V โดยขนาดแรงดันที่ควรชาร์จจะอยู่ในช่วง 26.4-27.4 V เพื่อยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่

3.2 จำลองระบบการถ่ายโอนพลังงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

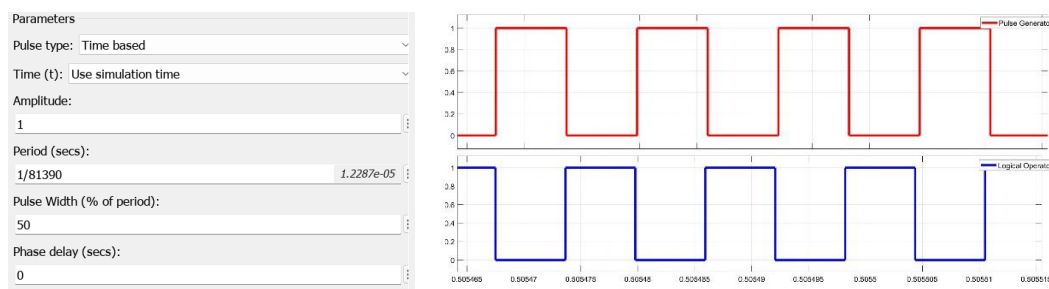


ภาพที่ 3-5 วงจรที่จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

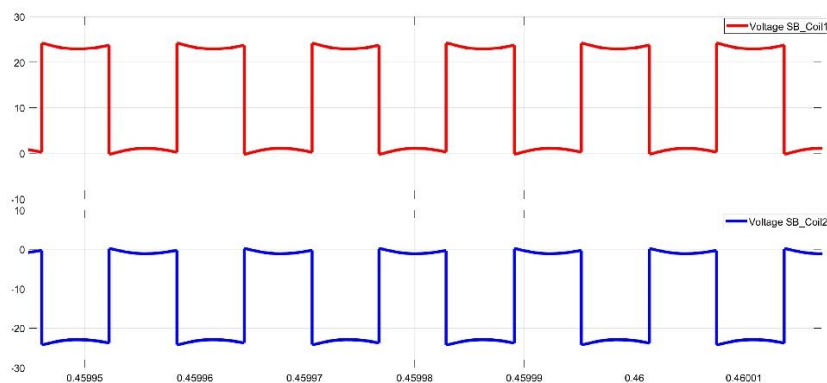
3.2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

คือ วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ที่จะแปลงแรงดันไฟฟ้าและความถี่ให้ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยใช้หลักการ Pulse Width Modulation (PWM) ไปควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์

การตั้งค่า Pulse Generator ที่คาบเวลา 1/81390 secs แปลงเป็นความถี่จะได้เท่ากับ 81.39 kHz จะได้ผลลัพธ์ที่ไปขับขา Gate ของ Mosfet และ Output หลังจากออกวงจรอินเวอร์เตอร์ ดังรูป



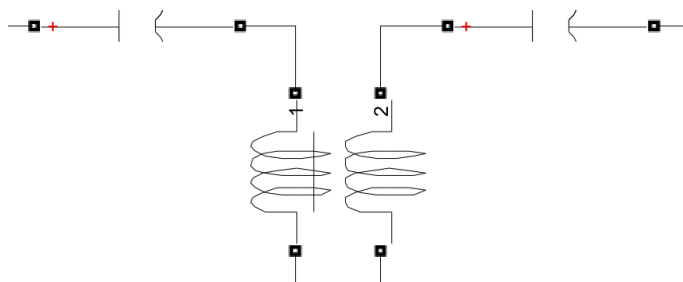
ภาพที่ 3-6 Pulse Generator ขับขา Gate Mosfet



ภาพที่ 3-7 Output เมื่อผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์

3.2.2 วงจร Compensation Network

จากข้อมูลลักษณะการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าและขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่งกำลังไฟฟ้า และภาครับกำลังไฟฟ้าในวงจรเรโซแนนซ์มี 4 รูปแบบ ซึ่งจากพิจารณาจากแหล่งข้อมูลพบว่า รูปแบบที่เหมาะสมและดีที่สุด จะเป็นการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าอนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าทั้งภาคส่งและภาครับ

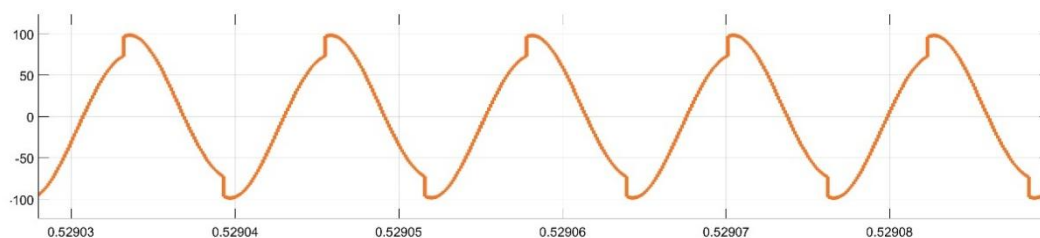


ภาพที่ 3-8 การต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าอนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าทั้งภาคส่งและภาครับ

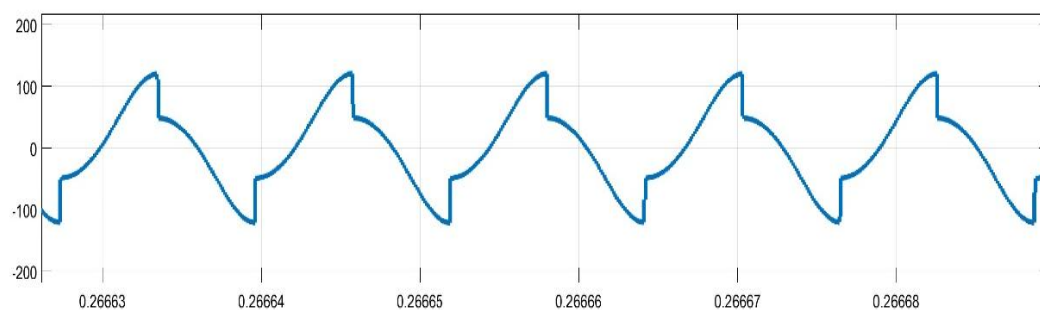
การตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าและขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่งกำลังไฟฟ้า และภาครับกำลังไฟฟ้า ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าและขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าในการจำลอง MATLAB/Simulink

ค่าตัวเก็บประจุฝั่งส่ง (C_1)	ค่าขดลวดเหนี่ยวนำ		ค่าตัวเก็บประจุฝั่งรับ (C_2)
	Winding 1: ฝั่งส่ง (L_1)	Winding 2: ฝั่งรับ (L_2)	
Parameters Branch type: C Capacitance (F): $3.34\text{e-}7$	Parameters Type of mutual inductance: Two or three windings with equal mutual terms Winding 1 self impedance [R1(Ohm) L1(H)]: $[.01\ 1.2\text{e-}5]$ $[0.01, 1.2\text{e-}05]$ Winding 2 self impedance [R2(Ohm) L2(H)]: $[.01\ 3.713\text{e-}5]$ $[0.01, 3.713\text{e-}05]$		Parameters Branch type: C Capacitance (F): $1.027\text{e-}7$
$C_1=0.334\mu\text{F}$	$L_1=12\mu\text{H}$	$L_2=37\mu\text{H}$	$C_2=0.102\mu\text{F}$



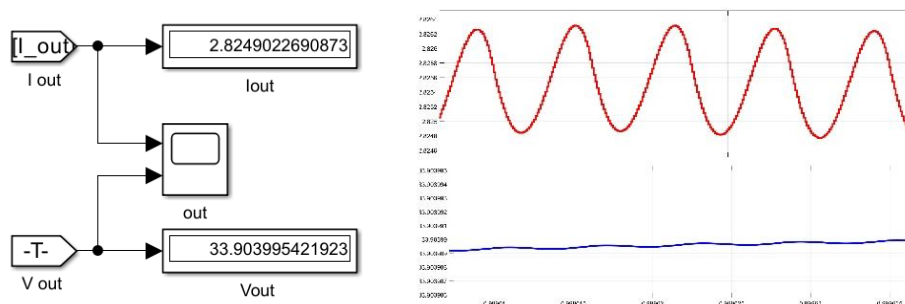
ภาพที่ 3-9 รูปคลื่นแรงดันฝั่งส่ง



ภาพที่ 3-10 รูปคลื่นแรงดันฝั่งรับ

3.2.3 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

คือ วงจรที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากขดลวดฝั่งรับที่เกิดจากการถ่ายโอนพลังงานมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อชาร์จเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ที่แบตเตอรี่ แต่ในวงจรที่จำลองใน MATLAB Simulink จะจำลองโดยใช้โหลดค่าความต้านทาน ขนาด 12 Ω ได้ผลลัพธ์ ดังรูป



ภาพที่ 3-11 ผลลัพธ์ของแรงดันและกระแสที่ได้จากการจำลองผ่านโปรแกรม Matlab Simulink

จะได้ว่าหากนำค่าแรงดันและค่ากระแสที่ได้จากการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink ไปพิจารณากับปัจจัยที่ต้องคำนึงในการชาร์จแบตเตอรี่ก่อนหน้านี้ คือ

ตารางที่ 3-2 เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณจากทฤษฎีและการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink

ข้อมูล \ ปัจจัยที่ต้องคำนึง	กระแสที่ควรชาร์จ (ค่ากระแส)	ขนาดแรงดันที่ควรชาร์จ (ค่าแรงดัน)
การคำนวณจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	2.6-3.9 A	26.4-27.4 V
การจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink	2.6-2.8 A	27.0-27.3 V

ดังนั้น จากข้อมูลข้างต้นที่ได้จากการคำนวณจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และจากการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink แล้ว พบว่าผลที่ได้ออกมานั้นมีความใกล้เคียงกัน โดยสามารถใช้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว มาอ้างอิงในการทำวงจรจริง เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของโครงการ

จากการทดสอบและคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในระบบการถ่ายโอนพลังงาน สรุปพารามิเตอร์ที่ใช้ได้ ดังนี้

ตารางที่ 3-3 ค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรม MATLAB Simulink

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
แรงดันที่แหล่งจ่ายวงจรอินเวอร์เตอร์	24 V. DC
Duty cycle (Inverter)	50 %
PWM Switching Frequency	81.39 kHz
L_1	12 μ H
C_1	0.334 μ F
L_2	37 μ H
C_2	0.102 μ F

3.3 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า และตัวเก็บประจุ

3.3.1 การคำนวณค่าขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่งกำลังไฟฟ้า และภาครับกำลังไฟฟ้า

จากพารามิเตอร์ดังกล่าวค่าขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่งกำลังไฟฟ้า มีค่าประมาณ 12 μ H และขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับกำลังไฟฟ้า มีค่าประมาณ 37 μ H

จะออกแบบผ่านเว็บ Flat spiral coil inductor calculator และเว็บ Multi-Layer air core inductor calculator

ภาพที่ 3-12 หน้าเว็บ Flat spiral coil inductor calculator

Multi layer air core inductor calculator
 Formula used in this calculation is from Wheelers approximations which is accurate to <1% if the cross section is near square shaped.:

$$L(uH) = 31.6 * N^2 * r1^2 / 6 * r1 + 9 * L + 10 * (r2 - r1)$$

 where....
 L(uH)= Inductance in microHenries
 N = Total Number of turns
 r1 = Radius of the inside of the coil in meters
 r2 = Radius of the outside of the coil in meters
 L = Length of the coil in meters
 This formula applies at 'low' frequencies (<3MHz) using enameled copper wire tightly wound.

Inductance (L): mH mm
 Coil Inner Diameter (d): mm
 Coil Length (l): mm
 Wire Gauge: 18 AWG
 Number of Turns (N):
 Turns per Layer:
 Number of Layers:
 Coil Outer Diameter (D): mm
 Wire Diameter: mm
 Wire Length: meters
 DC Resistance (R): Ohms (at 20°C)

Calculate Clear

ภาพที่ 3-13 หน้าเว็บ Multi Layer air core inductor calculator

ซึ่งจะเป็นสมการเว็บ Flat spiral coil inductor calculator จะเป็นสมการเดียวกันกับสมการที่ (2-4) และ (2-5) ค่าที่ได้ของขดลวดฝังส่งจะเป็นดังนี้

ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่งกำลังไฟฟ้า ใช้สาย THW ขนาด 6 Sq.mm. ตัวนำทองแดงหลายแกน ปลอกฉนวน

L เท่ากับ 11.00 μ H

N เท่ากับ 8 รอบ

D_i เท่ากับ 65 mm.

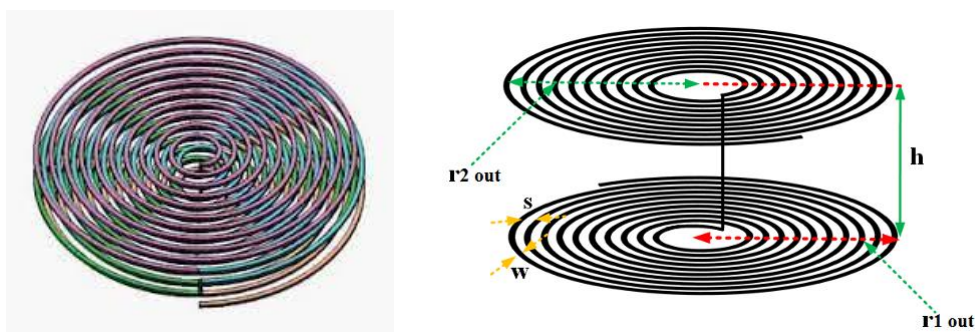
D_o เท่ากับ 33.64 mm.

w เท่ากับ 2.54 mm.

s เท่ากับ 14.25 mm.

W_l เท่ากับ 5.01 m.

ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับกำลังไฟฟ้า ในส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับกำลังไฟฟ้าจะเป็นแบบ multilayer planar spiral inductors คือ ตัวเหนี่ยวนำแบบขดลวดเกลียวแบนเช่นกัน แต่มีการเพิ่มชั้นขึ้นขึ้นมาดังรูป



ภาพที่ 3-14 multilayer planar spiral inductors

โดยทางผู้จัดทำได้ทำตัวเหนี่ยวนำแบบขดลวดเกลียวแบนจำนวน 2 ชั้น มา 2 ชุด แล้วนำมาขนานกัน เพื่อให้ได้กระแสจากการถ่ายโอนพลังงานมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นสมการเว็บ Multi-Layer air core inductor calculator จะมีสมการดังนี้

$$L(\mu H) = \frac{31.6 \times r_1^2 \times N^2}{(6 \times r_1) + (9 \times L) + (10 \times (r_2 - r_1))} \quad (3-1)$$

ใช้สาย THW ขนาด 4 Sq.mm. ตัวนำทองแดงแกนเดี่ยว ไม่ปลอกฉนวน

Number of Turns (N)	เท่ากับ 16 รอบ	Coil Outer Diameter (D)	เท่ากับ 86.37 mm.
Turns per Layers	เท่ากับ 8 รอบ	Wire Diameter	เท่ากับ 1.06 mm.
Number of Layers	เท่ากับ 2 ชั้น	Wire Length	เท่ากับ 4.34 m.

และจะตรวจสอบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter ยี่ห้อ Digicom รุ่น LCR-841 เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของชิ้นงานที่ได้ทำ



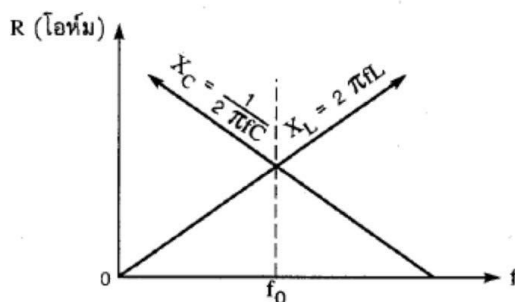
ภาพที่ 3-15 เครื่อง LCR Meter ยี่ห้อ Digicom รุ่น LCR-841

ตารางที่ 3-4 เปรียบเทียบค่าขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่งกำลังไฟฟ้า และภาครับกำลังไฟฟ้า

พารามิเตอร์ ข้อมูล	ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า ของภาคส่งกำลังไฟฟ้า	ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า ของภาครับกำลังไฟฟ้า
ค่าจากโปรแกรม MATLAB Simulink	12 μH	37 μH
ค่าจากการคำนวณผ่านเว็บ - Flat spiral coil inductor calculator - Multi Layer air core inductor calculator	11.00 μH	35.25 μH
ค่าจากการทดสอบด้วยเครื่อง LCR Meter	11.48 μH	32.61 μH

3.3.2 การคำนวณค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า

ที่สภาวะเรโซแนนซ์ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า (X_L) จะมาก และค่าอิมพีแดนซ์ ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (X_C) จะต่ำ ที่ค่าความถี่ค่าหนึ่งที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน จะทำให้ค่ารีแอคแตนซ์ หักล้างกันหมดจึงเหลือเฉพาะค่าความต้านทาน



ภาพที่ 3-16 ผลของ L และ C ที่มีผลต่อสัญญาณกระแสสลับความถี่ต่างๆ

จากพารามิเตอร์ดังกล่าวค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าของภาคส่งกำลังไฟฟ้า มีค่าประมาณ 0.334 μF และค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าของภาครับกำลังไฟฟ้า มีค่าประมาณ 0.102 μH ซึ่งทางผู้จัดทำได้เลือกใช้ Capacitor ชนิด Film ยี่ห้อ WIMA ดังนี้

- 1.) ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าของภาคส่งกำลังไฟฟ้า ใช้ 0.334 μF 630 V
- 2.) ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าของภาครับกำลังไฟฟ้า ใช้ 0.1 μF 630 V



ภาพที่ 3-17 ตัวเก็บประจุ

3.4 ต้นแบบชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

3.4.1 สร้างต้นแบบชุดลดของชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

3.4.1.1 ชุดลดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง มี 3 รูปแบบ คือ

ตารางที่ 3-5 รูปแบบชุดลดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง

รูปแบบชุดลดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง		
แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
ใช้สาย THW เบอร์ 4 Sq.mm ตัวนำทองแดงแกนเดียว (ปลอกฉนวน) 8 รอบ	ใช้สาย THW เบอร์ 6 Sq.mm ตัวนำทองแดงหลายแกน (ปลอกฉนวน) 8 รอบ	ใช้ชุดลดสำเร็จของเตา Induction 3500 W
		

3.4.1.2 ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับ มี 4 รูปแบบ คือ

ตารางที่ 3-6 รูปแบบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับ

รูปแบบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับ	
แบบที่ 1	แบบที่ 2
ใช้สาย THW ขนาด 4 Sq.mm. ตัวนำทองแดง แกนเดียว (ไม่ปลอกฉนวน) อนุกรม 2 ชั้น จำนวน 2 ชุด แล้วขนานกันทั้ง 2 ชุด 8 รอบ	ใช้สาย THW ขนาด 6 Sq.mm. ตัวนำทองแดง หลายแกน (ไม่ปลอกฉนวน) 24 รอบ
	
แบบที่ 3	แบบที่ 4
ใช้ขดลวดสำเร็จของเตา Induction 3500 W	ใช้ขดลวดสำเร็จของเตา Induction 2000 W
	

3.4.2 ทดลองต้นแบบชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

การทดลองต้นแบบชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า จะทดลองที่ความถี่ต่างกันจำนวน 4 ช่วงความถี่ คือ

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 1 ช่วงความถี่ 80.00 kHz | 2 ช่วงความถี่ 83.00 kHz |
| 3 ช่วงความถี่ 86.00 kHz | 4 ช่วงความถี่ 90.00 kHz |

เพื่อดูประสิทธิภาพของการถ่ายโอนพลังงานที่ความถี่ต่างๆ โดยจะสามารถพิจารณาได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดจากการคำนวณของค่าขดลวดเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุจะเป็นไปตามทฤษฎี หรือการทดลองถ่ายโอนพลังงานที่ความถี่อื่นจะเกิดความถี่เรโซแนนซ์มากกว่า ซึ่งการทดลองจะใช้โหลดค่าความต้านทานขนาด 12 Ω 15 W แทนแบตเตอรี่ เพื่อดึงพลังงานภายในวงจร

จากการทดลองตามค่าพารามิเตอร์ของ MATLAB Simulink พบว่า ถ้าใช้แหล่งจ่ายเป็น 24 V.DC ให้กับวงจร Inverter ในส่วนของ IC Voltage Regulator 7812 เพื่อลดระดับแรงดันให้เหลือ 12 V.DC ใช้สำหรับจ่ายให้กับ IC SG3525, พัดลม DC และ Gate Driver (IR2110) แล้วจ่าย 24 V.DC ให้ Power MOSFET จะทำให้ Power MOSFET ทั้ง 2 ตัวทำงานไม่สอดคล้องกัน จนเกิดสถานะที่ตัวหนึ่งเกิดความร้อนเกิน หรือเรียกว่าสถานะ Thermal Runaway ซึ่ง MOSFET ก็เสียหายถาวร ถ้ายังจ่ายกระแสไฟฟ้าในลักษณะนี้ วงจร Inverter ก็จะไม่สามารถทำงานได้

จึงทำการศึกษาข้อมูลของ Gate Driver ว่าในตระกูลของมันมีตัวใดบ้างที่สามารถทนพิกัดแรงดันได้เกิน 24 V.DC พบว่าในตระกูลเดียวกันและที่จำนวนพิน (Pin) เท่ากันนั้นมีเพียง IR2113 และ IR2213 แต่พิกัดแรงดัน VCC ของทั้งสองตัวนั้นก็ยังคงเท่ากับ 20 V.DC

ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหาจึงทดลองจ่ายแรงดันที่ไม่เกินพิกัดของ Gate Driver (0-20 V) ให้กับ Gate Driver (IR2110) โดยไม่ผ่าน IC Voltage Regulator 7812 และจ่ายแรงดันเดียวกันให้กับ Power MOSFET ซึ่งในที่นี้ เลือกปรับระดับแรงดันให้อยู่ที่ 19.3 V.DC เพื่อรักษา Gate Driver (IR2110) ให้ไม่เกินพิกัดแรงดันที่รับได้ และวงจรยังสามารถใช้งานได้ แม้ประสิทธิภาพจะลดลงก็ตาม เมื่อทดลองกับรูปแบบของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง และรูปแบบของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับ ดังกล่าว

วิเคราะห์ ได้ว่ารูปแบบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งแบบที่ 2 กับรูปแบบของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับแบบที่ 1 คือ ชุดต้นแบบของขดลวดที่ถ่ายโอนพลังงานได้ดี และเหมาะสมที่สุด โดยมีผลการทดลอง ดังนี้

ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ขดลวดฝังส่งเป็นสายไฟชนิด THW ขนาด 6 Sq.mm. ตัวนำทองแดงหลายแกน ปลอกฉนวนนอก พันเป็นวงกลมกันหอย จำนวน 8 รอบ ซึ่งมีระยะห่างในแต่ละรอบ 14.25 มม. และขดลวดฝังรับใช้สายไฟชนิด THW 4 Sq.mm. ตัวนำทองแดงแกนเดียว ไม่ปลอกฉนวนนอก พันเป็นวงกลมกันหอย จำนวน 8 รอบ ซึ่งมีระยะห่างในแต่ละรอบ 10 มม. พันซ้อนกัน 2 ชั้นแบบอนุกรม จำนวน 2 ชุด แล้วนำทั้ง 2 ชุดมาต่อกันแบบขนาน (Series-Parallel Configuration) เพื่อใช้ในระบบถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายผ่านการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็ก

(Magnetic Resonant Coupling) และคำนวณค่าความเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 81.40 kHz โดยมีการออกแบบพารามิเตอร์ทั้งในฝั่งส่ง (Transmitter) และฝั่งรับ (Receiver) ดังรายละเอียดในตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-7 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของขดลวดฝั่งส่งและฝั่งรับ

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
แรงดันที่แหล่งจ่าย (V.AC)	220 V.AC 50 Hz
Duty Cycle	0.5
แรงดันที่ Switching Power Supply	19.30 V.DC
ค่าความเหนี่ยวนำฝั่งส่ง (Tx)	11.688 μ H
ค่าความเหนี่ยวนำฝั่งรับ (Rx)	37.13 μ H
ค่าความต้านทานภายในของ L ฝั่งส่ง	0.136 Ω
ค่าความต้านทานภายในของ L ฝั่งรับ	0.247 Ω
ค่าตัวเก็บประจุที่คำนวณได้ฝั่งส่ง (Tx)	327.08 nF
ค่าตัวเก็บประจุที่คำนวณได้ฝั่งรับ (Rx)	102.96 nF
ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้จริงฝั่งส่ง (Tx)	341.2 nF
ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้จริงฝั่งรับ (Rx)	102.70 nF
ค่าความต้านทานภายในของ C ฝั่งส่ง	0.271 Ω
ค่าความต้านทานภายในของ C ฝั่งรับ	0.043 Ω
ความถี่เรโซแนนซ์ที่คำนวณได้จากค่า LC ที่ใช้จริงฝั่งส่ง (Tx)	79.70 kHz
ความถี่เรโซแนนซ์ที่คำนวณได้จากค่า LC ที่ใช้จริงฝั่งรับ (Rx)	81.50 kHz
ระยะห่างระหว่างขดลวด	1-10 cm.

ตารางที่ 3-8 ตารางบันทึกผลการทดลองการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ความถี่ 80.43 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			η→EFF (ประสิทธิภาพ) DC	η→EFF (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{out}	I _{out}	P _{out}		
1	224	0.36	41.9	19.30	1.43	27.60	14.73	1.2	17.68	64.05	42.19
2	224	0.45	54.8	19.28	2.01	38.75	17.51	1.4	24.51	63.26	44.73
3	224	0.52	64.0	19.28	2.45	47.24	19.08	1.5	28.62	60.59	44.72
4	224	0.62	76.4	19.27	3.03	58.39	20.60	1.6	32.96	56.45	43.14
5	224	0.69	86.9	19.28	3.51	67.67	21.43	1.6	34.29	50.67	39.46
6	226	0.76	97.0	19.26	3.96	76.27	21.65	1.7	36.81	48.26	37.94
7	225	0.81	102.7	19.26	4.23	81.47	21.16	1.7	35.97	44.15	35.03
8	225	0.83	105.3	19.26	4.34	83.59	20.70	1.7	35.19	42.10	33.42
9	225	0.88	112.4	19.26	4.67	89.94	19.50	1.5	29.25	32.52	26.02
10	225	0.90	117.4	19.26	4.86	93.60	19.10	1.4	26.74	28.57	22.78

ตารางที่ 3-9 ตารางบันทึกผลการทดลองการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ความถี่ 83.58 kHz

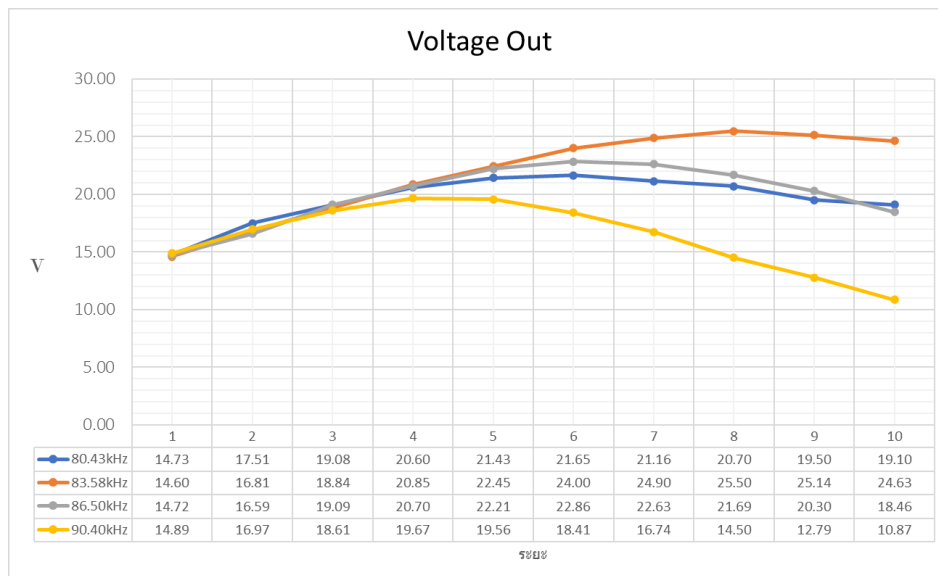
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			η→EFF (ประสิทธิภาพ) DC	η→EFF (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{out}	I _{out}	P _{out}		
1	225	0.36	41.3	19.30	1.39	26.83	14.60	1.2	17.52	65.31	42.42
2	224	0.43	50.4	19.29	1.81	34.91	16.81	1.3	21.85	62.59	43.36
3	225	0.51	61.0	19.28	2.30	44.34	18.84	1.5	28.26	63.73	46.33
4	224	0.61	73.7	19.27	2.91	56.08	20.85	1.7	35.45	63.21	48.09
5	224	0.71	87.3	19.27	3.54	68.22	22.45	1.8	40.41	59.24	46.29
6	224	0.85	105.5	19.28	4.37	84.25	24.00	2.0	48.00	56.97	45.50
7	224	0.99	124.6	19.25	5.24	100.87	24.90	2.0	49.80	49.37	39.97
8	225	1.10	140.6	19.24	5.94	114.29	25.50	2.0	51.00	44.63	36.27
9	224	1.23	158.4	19.22	6.74	129.54	25.14	2.0	50.28	38.81	31.74
10	224	1.31	174.5	19.20	7.43	142.66	24.63	1.9	46.80	32.80	26.82

ตารางที่ 3-10 ตารางบันทึกผลการทดลองการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ความถี่ 86.50 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			η→EFF (ประสิทธิภาพ) DC	η→EFF (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{out}	I _{out}	P _{out}		
1	225	0.37	41.9	19.30	1.43	27.60	14.72	1.2	17.66	64.00	42.16
2	225	0.42	49.4	19.30	1.76	33.97	16.59	1.2	19.91	58.61	40.30
3	225	0.51	61.4	19.27	2.32	44.71	19.09	1.5	28.64	64.05	46.64
4	224	0.59	71.5	19.28	2.81	54.18	20.70	1.6	33.12	61.13	46.32
5	224	0.70	85.4	19.27	3.45	66.48	22.21	1.7	37.76	56.79	44.21
6	224	0.79	97.4	19.26	3.99	76.85	22.86	1.8	41.15	53.55	42.25
7	224	0.85	105.2	19.25	4.34	83.55	22.63	1.7	38.47	46.05	36.57
8	224	0.88	109.8	19.25	4.54	87.40	21.69	1.7	36.87	42.19	33.58
9	224	0.89	110.9	19.26	4.62	88.98	20.30	1.6	32.48	36.50	29.29
10	225	0.87	109.8	19.25	4.53	87.20	18.46	1.4	25.84	29.64	23.54

ตารางที่ 3-11 ตารางบันทึกผลการทดลองการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ความถี่ 90.40 kHz

ระยะห่างของ ขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow$ EFF (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow$ EFF (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			ก่อนเข้า Switching (AC)				
	V _{in}	I _{in}	V _{in}	I _{in}	V _{in}	I _{in}	V _{out}	I _{out}	P _{out}		
1	224	0.37	42.3	19.30	1.44	27.79	14.89	1.1	16.38	58.93	38.72
2	224	0.43	50.8	19.28	1.83	35.28	16.97	1.2	20.36	57.72	40.09
3	224	0.49	59.6	19.29	2.23	43.02	18.61	1.4	26.05	60.57	43.71
4	224	0.56	67.7	19.27	2.60	50.10	19.67	1.5	29.51	58.89	43.58
5	223	0.58	70.8	19.28	2.76	53.21	19.56	1.5	29.34	55.14	41.44
6	223	0.57	69.9	19.28	2.72	52.44	18.41	1.4	25.77	49.15	36.87
7	223	0.54	65.9	19.28	2.53	48.78	16.74	1.3	21.76	44.61	33.02
8	224	0.50	60.3	19.29	2.27	43.79	14.50	1.1	15.95	36.43	26.45
9	223	0.46	55.7	19.30	2.06	39.76	12.79	0.9	11.51	28.95	20.67
10	223	0.43	51.1	19.29	1.84	35.49	10.87	0.8	8.70	24.50	17.02



ภาพที่ 3-18 กราฟแสดงแรงดันขาออกของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

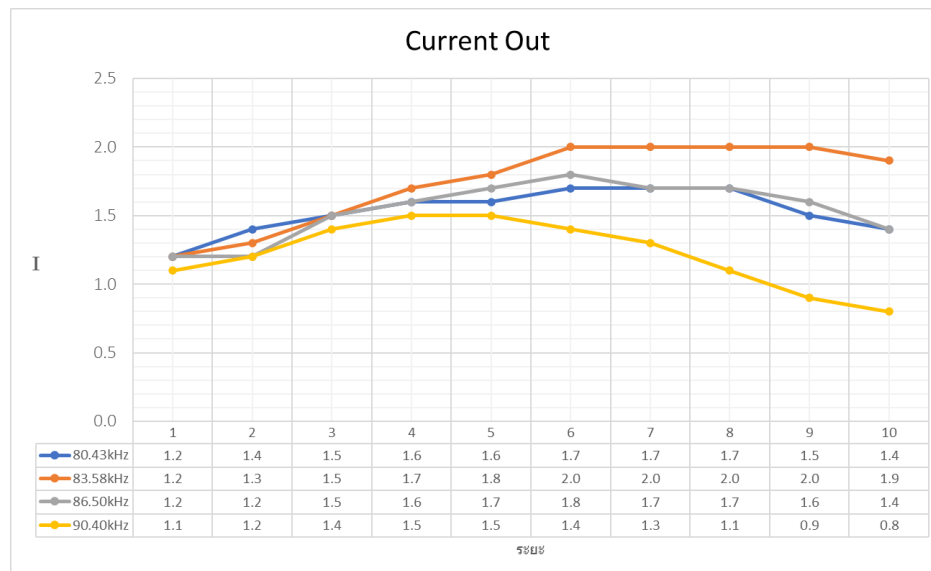
ที่ความถี่ 80.43 kHz พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตั้งแต่ระยะที่ 1 (14.73 V) ไปจนถึงระยะที่ 8 ซึ่งค่าแรงดันสูงสุดอยู่ที่ 25.14 V ก่อนจะเริ่มลดลงเล็กน้อยในระยะที่ 9 และ 10 เป็น 24.63 V และ 24.03 V ตามลำดับ โดยการลดลงนี้ค่อนข้างช้าและมีลักษณะเสถียร

ที่ความถี่ 83.58 kHz มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยเริ่มต้นที่ค่าแรงดัน 14.60 V และเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนถึงจุดสูงสุดที่ระยะที่ 8 เช่นกัน ค่าแรงดันสูงสุดอยู่ที่ 25.50 V ซึ่งสูงที่สุดในกลุ่มข้อมูลที่ทดลอง และลดลงอย่างช้า ๆ ในระยะท้าย ทำให้ความถี่นี้มีการส่งค่าแรงดันที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

ที่ความถี่ 86.50 kHz ค่าแรงดันในช่วงต้นจะเพิ่มขึ้นเหมือนกัน แต่จุดสูงสุดเกิดขึ้นเร็วกว่าความถี่ก่อนหน้านี้ ที่ระยะที่ 7 จะมีค่าแรงดันสูงสุดอยู่ที่ 22.86 V หลังจากนั้นเริ่มลดลงเรื่อย ๆ จนถึงระยะที่ 10 เหลือเพียง 18.46 V แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียที่เพิ่มมากขึ้นในช่วงระยะหลัง

ที่ความถี่ 90.40 kHz พบว่าค่าแรงดันเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดที่ระยะที่ 4 ซึ่งค่าแรงดันสูงสุดอยู่ที่ 19.67 V เท่านั้น และจากนั้นมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจนถึงระยะสุดท้ายที่ค่าแรงดันเหลือเพียง 10.87 V ซึ่งต่ำที่สุดในบรรดาความถี่ทั้งหมด สะท้อนให้เห็นว่าเมื่อใช้ความถี่สูงมากเกินไป ประสิทธิภาพการส่งค่าแรงดันจะลดลง

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์กราฟ สามารถสรุปได้ว่าความถี่มีผลสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงาน โดยความถี่ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ 83.58 kHz ซึ่งสามารถรักษาระดับค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่สูงได้อย่างต่อเนื่องแม้ในระยะห่างที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความถี่ที่สูงเกินไป (90.40 kHz) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลดลง โดยเฉพาะในระยะห่างที่มากขึ้น



ภาพที่ 3-19 กราฟแสดงกระแสขาออกของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

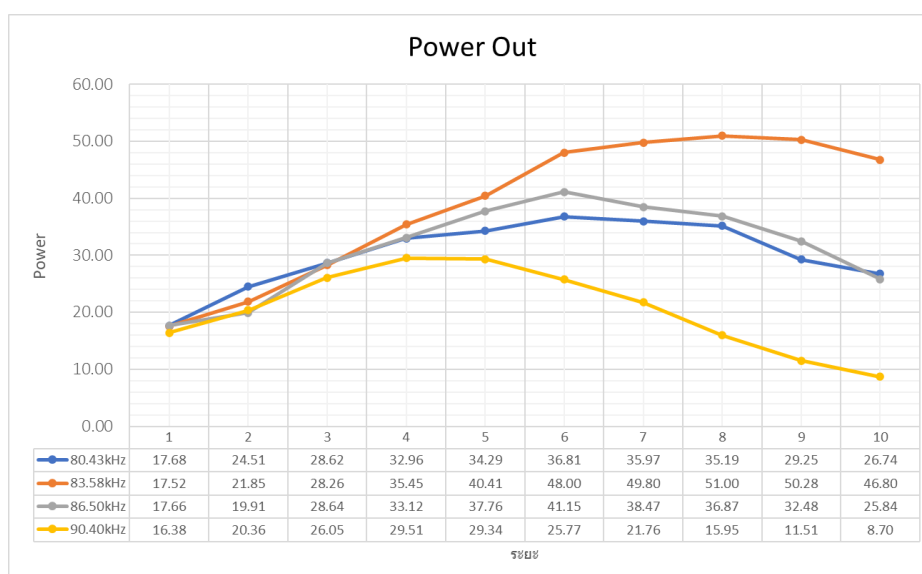
ที่ความถี่ 80.43 kHz พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 1.2 A และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปจนถึงจุดสูงสุดที่ 1.7 A ที่ระยะที่ 6-8 จากนั้นค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มลดลงเหลือ 1.5 A ที่ระยะที่ 9 และ 1.4 A ที่ระยะที่ 10 ลักษณะกราฟแสดงให้เห็นถึงความเสถียรที่ค่อนข้างดีในช่วงกลาง โดยสามารถรักษาระดับค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ในช่วงกว้าง (ระยะที่ 6-8) ก่อนที่จะลดลงในระยะท้าย

ที่ความถี่ 83.58 kHz พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 1.2 A และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าสูงสุดที่ 2.0 A ที่ระยะที่ 6 และสามารถรักษาระดับค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดนี้ได้อย่างเสถียรเป็นระยะเวลายาวนาน (ระยะที่ 6-9) ก่อนที่จะลดลงเพียงเล็กน้อยเป็น 1.9 A ที่ระยะที่ 10 ลักษณะกราฟแสดงให้เห็นถึงความเสถียรที่สูงมากและประสิทธิภาพการทำงานที่ดีเยี่ยมแม้ในระยะไกล

ที่ความถี่ 86.50 kHz พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าคล้ายคลึงกับความถี่ 80.43 kHz โดยเริ่มต้นที่ 1.2 A และเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ 1.8 A ที่ระยะที่ 6 จากนั้นค่ากระแสไฟฟ้าลดลงเล็กน้อยเป็น 1.7 A ที่ระยะที่ 7-8 และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 1.4 A ที่ระยะที่ 10 แม้ว่าความถี่นี้จะแสดงประสิทธิภาพที่ดีในระยะกลาง แต่ก็เริ่มเสื่อมประสิทธิภาพในระยะไกล

ที่ความถี่ 90.40 kHz แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของการใช้ความถี่สูงเกินไป โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 1.1 A ซึ่งต่ำกว่าความถี่อื่นๆ และเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนถึงจุดสูงสุดที่ 1.5 A ที่ระยะที่ 4-5 จากนั้นค่ากระแสไฟฟ้าลดลงอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วจนถึงระดับต่ำสุดที่ 0.8 A ที่ระยะที่ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเสื่อมประสิทธิภาพ

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์กราฟ สามารถสรุปได้ว่าความถี่ 83.58 kHz แสดงประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุดในการรักษาระดับค่ากระแสไฟฟ้าขาออกให้สูงและเสถียรแม้ในระยะไกล โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 2.0 A ซึ่งสูงกว่าความถี่อื่นๆ อย่างชัดเจน และสามารถรักษาระดับค่ากระแสไฟฟ้าสูงได้เป็นระยะเวลายาวนาน (ระยะที่ 6-9) ในทางกลับกัน ความถี่ 90.40 kHz แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของการใช้ความถี่สูงเกินไป โดยเฉพาะในระยะไกล โดยมีการลดลงของกระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็วหลังจากระยะที่ 5 และลดลงต่ำกว่า 1.0 A ที่ระยะที่ 9-10 ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการใช้งานในบางสถานการณ์



ภาพที่ 3-20 กราฟแสดงกำลังขาออกของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

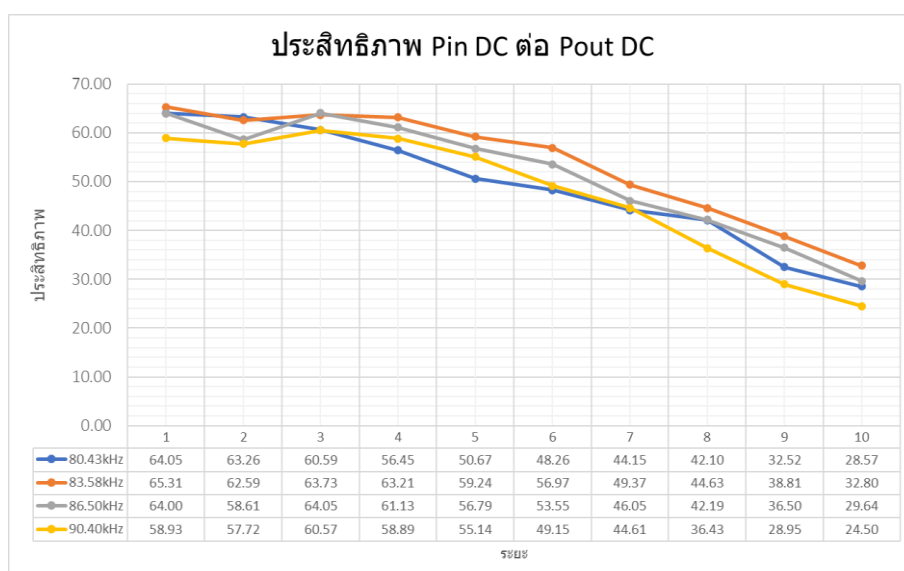
ที่ความถี่ 80.43 kHz พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าขาออกที่มีลักษณะเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และลดลงในช่วงหลัง โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 17.68 W และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดสูงสุดที่ 36.81 W ที่ระยะที่ 6 หลังจากนั้นกำลังไฟฟ้าเริ่มลดลงไปจนถึง 26.74 W ที่ระยะที่ 10

ที่ความถี่ 83.58 kHz พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 17.52 W ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่อื่นๆ แต่มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจนถึงจุดสูงสุดที่ 51.00 W ที่ระยะที่ 8 ซึ่งสูงกว่าความถี่อื่นๆ นอกจากนี้ ยังสามารถรักษาระดับค่ากำลังไฟฟ้าสูงได้เป็นช่วงกว้าง (ระยะที่ 6-9) ถึงระยะที่ 10 ค่ากำลังไฟฟ้าจะลดลงเหลือแค่ 46.80 W แต่ยังคงสูงกว่าค่าสูงสุดของความถี่อื่นๆ

ที่ความถี่ 86.50 kHz พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 17.66 W และเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ 41.15 W ที่ระยะที่ 6 หลังจากนั้นกำลังไฟฟาลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 25.84 W ที่ระยะที่ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการลดลงของประสิทธิภาพที่ชัดเจนในระยะไกล ถึงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่นี้จะสูงกว่าความถี่ 80.43 kHz แต่การลดลงของกำลังไฟฟ้าในระยะไกลเกิดขึ้นเร็วกว่า ซึ่งบ่งชี้ถึงข้อจำกัดในการใช้งานที่ความถี่นี้ในระยะไกล

ที่ความถี่ 90.40 kHz พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 16.38 W ซึ่งต่ำกว่าความถี่อื่นๆ และเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดเพียง 29.51 W ที่ระยะที่ 4 ซึ่งต่ำกว่าค่าสูงสุดของความถี่อื่นๆ หลังจากนั้น กำลังไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจนเหลือเพียง 8.70 W ที่ระยะที่ 10 ซึ่งต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของค่าเริ่มต้น

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์กราฟ สามารถสรุปได้ว่า ความถี่ 83.58 kHz มีประสิทธิภาพสูงสุดของค่ากำลังไฟฟ้าขาออก โดยมีค่าสูงสุดที่ 51.00 W ซึ่งสูงกว่าความถี่อื่นๆ มีความเสถียรที่ดีเยี่ยมในระยะไกล โดยรักษาระดับค่ากำลังไฟฟ้าสูงได้แม้ในระยะที่ 10 (46.80 W) ในขณะที่ความถี่อื่นๆ ค่ากำลังไฟฟ้าลดลงในระยะไกล โดยเฉพาะความถี่ 90.40 kHz ซึ่งลดลงเหลือเพียง 8.70 W ที่ระยะที่ 10



ภาพที่ 3-21 กราฟแสดงประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าขาเข้า DC ต่อ กำลังไฟฟ้าขาออก DC ของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

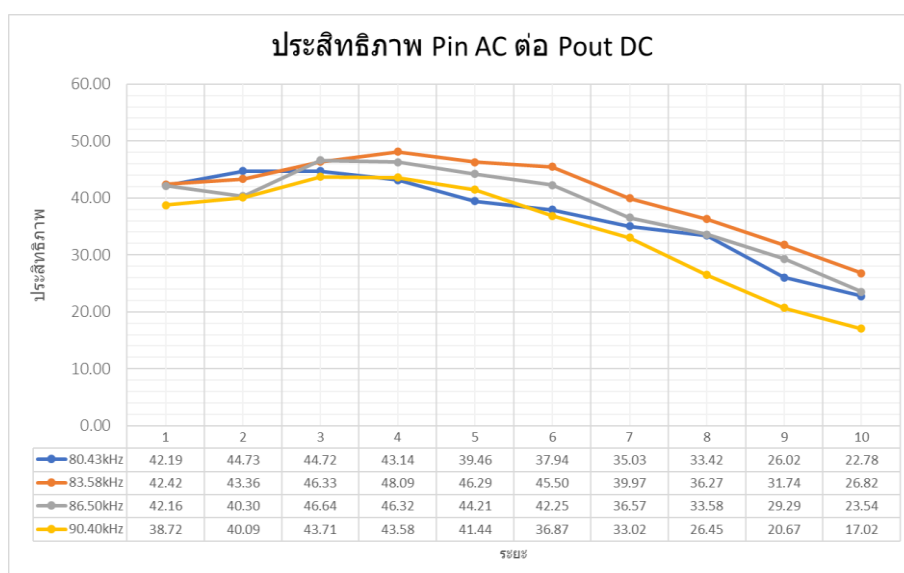
ที่ความถี่ 80.43 kHz พบว่าค่าประสิทธิภาพมีลักษณะค่อนข้างคงที่ในช่วงแรก (ระยะที่ 1-3) และลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงหลัง โดยมีค่าประสิทธิภาพเริ่มต้นที่ 64.05 % และคงอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันจนถึงระยะที่ 3 (60.59 %) หลังจากนั้นประสิทธิภาพเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 28.57 % ที่ระยะที่ 10 การลดลงของค่าประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่องในระยะไกลบ่งชี้ถึงข้อจำกัดของการใช้งานที่ความถี่นี้ในระยะไกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งระยะที่ 7-10 ที่ค่าประสิทธิภาพลดลงต่ำกว่า 50% อย่างชัดเจน

ที่ความถี่ 83.58 kHz พบว่าค่าประสิทธิภาพเริ่มต้นที่ 65.31 % ซึ่งสูงกว่าความถี่อื่นๆ และสามารถรักษาระดับประสิทธิภาพสูงกว่า 60% ได้ถึงระยะที่ 4 (63.21 %) นอกจากนี้ ยังรักษาระดับประสิทธิภาพได้ดีกว่าความถี่อื่นๆ ในทุกระยะการทดลอง โดยในระยะที่ 10 ยังคงมีประสิทธิภาพที่ 32.80 % ซึ่งสูงกว่าความถี่อื่นๆ

ที่ความถี่ 86.50 kHz พบว่าค่าประสิทธิภาพเริ่มต้นที่ 64.00 % แต่มีความไม่สม่ำเสมอที่ระยะที่ 2 ลดลงเป็น 58.61 % ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นเป็น 64.05 % ที่ระยะที่ 3 หลังจากนั้นประสิทธิภาพลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 29.64 % ระยะที่ 10 แต่ระยะการทดลองที่ 3-6 ความถี่นี้ยังคงมีค่าประสิทธิภาพที่ดี แต่เริ่มลดลงอย่างชัดเจนที่ระยะที่ 7-10 ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงข้อจำกัดในการใช้งานในระยะไกล

ที่ความถี่ 90.40 kHz พบว่าค่าประสิทธิภาพเริ่มต้นที่ 58.93 % ซึ่งต่ำกว่าความถี่อื่นๆ และมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในระยะที่ 3 (60.57 %) ก่อนที่จะลดลงอย่างต่อเนื่องจนเหลือเพียง 24.50 % ที่ระยะที่ 10 ซึ่งต่ำที่สุดในบรรดาความถี่ที่ทดสอบทั้งหมดโดยค่าประสิทธิภาพลดลงต่ำกว่า 50% ตั้งแต่ระยะที่ 6 เป็นต้นไป และลดลงอย่างมากที่ระยะที่ 7-10 ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการความเสถียรและประสิทธิภาพสูงในการส่งผ่านพลังงานในระยะไกล

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์กราฟ สามารถสรุปได้ว่า ความถี่ 83.58 kHz มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดในเกือบทุกระยะการทดลอง โดยมีค่าสูงสุดที่ 65.31 % ที่ระยะที่ 1 ซึ่งสูงกว่าความถี่อื่นๆ และสามารถรักษาระดับค่าประสิทธิภาพสูงได้ในทุกระยะการทดลอง และยังมีความเสถียรที่ดีเยี่ยมในระยะไกล โดยมีค่าประสิทธิภาพ 32.80 % ที่ระยะที่ 10 ซึ่งสูงกว่าความถี่อื่นๆ ในขณะที่ความถี่ 90.40 kHz แสดงประสิทธิภาพเพียง 24.50 % ในระยะเดียวกัน



ภาพที่ 3-22 กราฟแสดงประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าขาเข้า AC ต่อ กำลังไฟฟ้าขาออก DC ของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

ที่ความถี่ 80.43 kHz พบว่าค่าประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าขาออกเริ่มต้นที่ค่าประสิทธิภาพ 42.19 % และเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด 44.73 % ที่ระยะที่ 2 จากนั้นค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 22.78 % ที่ระยะที่ 10 ลักษณะเด่นของความถี่นี้คือมีการรักษาระดับประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูงในช่วงระยะที่ 1-3 แต่มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากนั้น

ที่ความถี่ 83.58 kHz พบว่าประสิทธิภาพเริ่มต้นที่ 42.42 % ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่อื่นๆ แต่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ 48.09 % ที่ระยะที่ 4 และรักษาระดับประสิทธิภาพสูงได้อย่างยาวนานกว่าความถี่อื่นๆ แม้ในระยะที่ 10 ก็ยังคงมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 26.82 % ซึ่งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่อื่นๆ ทั้งหมด

ที่ความถี่ 86.50 kHz พบว่าค่าประสิทธิภาพเริ่มต้นที่ 42.16 % และมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ 46.64 % ที่ระยะที่ 3 หลังจากนั้นค่าประสิทธิภาพลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 23.54 % ที่ระยะที่ 10 ความถี่นี้คือมีการตอบสนองที่ดีในระยะใกล้เคียงปานกลาง (ระยะที่ 1-5) แต่แสดงการลดลงของค่าประสิทธิภาพที่ชัดเจนในระยะไกล แม้ว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดจะสูงกว่าความถี่ 80.43 kHz แต่อัตราการลดลงของค่าประสิทธิภาพในระยะไกลค่อนข้างรวดเร็ว ซึ่งบ่งชี้ถึงข้อจำกัดในการใช้งานที่ระยะไกล

ที่ความถี่ 90.40 kHz พบว่าค่าประสิทธิภาพเริ่มต้นที่เพียง 38.72 % ซึ่งต่ำกว่าความถี่อื่นๆ ถึงแม้จะมีการเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ 43.71 % ที่ระยะที่ 3 แต่หลังจากนั้นลดลงอย่างรวดเร็วจนเหลือเพียง 17.02 % ที่ระยะที่ 10 ความถี่นี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเพิ่มความถี่ไม่ได้นำไปสู่การเพิ่มค่าประสิทธิภาพเสมอไป แต่อาจนำไปสู่การลดลงของค่าประสิทธิภาพในบางสถานการณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการส่งผ่านพลังงานในระยะไกล

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์กราฟ สามารถสรุปได้ว่า ความถี่ 83.58 kHz มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดในเกือบทุกระยะการทดลอง โดยมีค่าสูงสุดที่ 48.09 % ที่ระยะที่ 4 ซึ่งสูงกว่าความถี่อื่นๆ และสามารถรักษาระดับค่าประสิทธิภาพสูงได้ในทุกระยะการทดลอง และยังมีประสิทธิภาพที่ดีเยี่ยมในระยะไกล โดยมีค่าประสิทธิภาพ 26.82 % ที่ระยะที่ 10 ซึ่งสูงกว่าความถี่อื่นๆ ในขณะที่ความถี่ 90.40 kHz แสดงประสิทธิภาพเพียง 17.02 % ในระยะเดียวกัน

เมื่อพิจารณาจากกระแสและแรงดันที่มากที่สุดจากการทดลองชุดต้นแบบสามารถถ่ายโอนพลังงาน นำกระแสชาร์จที่ได้มาคำนวณความเหมาะสมกับระยะเวลาการชาร์จอีกครั้ง จะได้ว่า

ความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ก่อนชาร์จครั้งต่อไป ส่วนใหญ่เมื่อแบตเตอรี่หมดประจุ จะเหลือความจุแบตเตอรี่ Ah ประมาณ 40% ดังนั้นจึงต้องชาร์จเพิ่มอีก 60% เพื่อให้แบตเตอรี่เต็ม

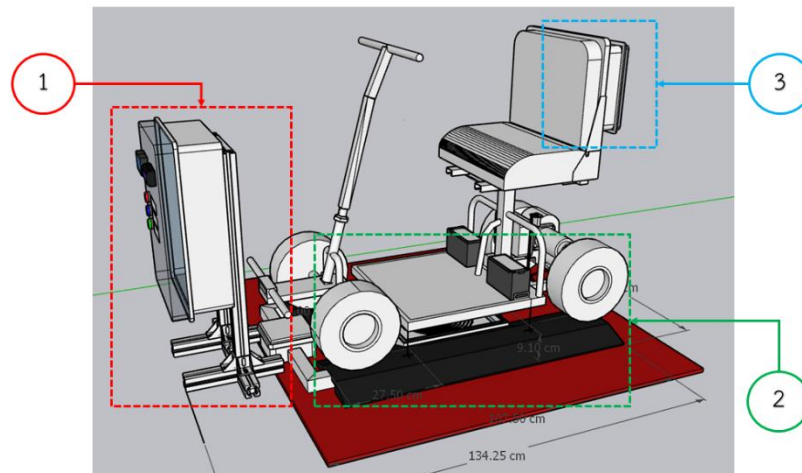
วิธีคำนวณ

จะได้ จำนวน Ah ที่ต้องชาร์จเพิ่ม = 60% x ขนาดแบตเตอรี่ (Ah)
 จำนวน Ah ที่ต้องชาร์จเพิ่ม = 60% x 26 (Ah) = 15.60 Ah
 จำนวนชั่วโมงชาร์จ = จำนวน Ah ที่ต้องชาร์จเพิ่ม x กระแสชาร์จ
 จำนวนชั่วโมงชาร์จ = 15.60 Ah x 2 A
 ประมาณ = 8 ชม.

ดังนั้น จากการวิเคราะห์รูปแบบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งแบบที่ 2 กับรูปแบบของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับแบบที่ 1 ในด้านค่าแรงดัน ค่ากระแส ค่ากำลังไฟฟ้า และค่าประสิทธิภาพ ช่วงความถี่ที่ดีที่สุดอยู่ในช่วง 80.00 – 83.00 kHz และระยะการถ่ายโอนพลังงานที่ดีอยู่ที่ระยะ 5-8 cm. และเมื่อพิจารณาความเหมาะสมของกระแสชาร์จกับระยะเวลาในการชาร์จ ยังคงอยู่ในระยะเวลา 10 ชม. ที่กำหนดไว้ จึงเลือกต้นแบบนี้มาสร้างเป็นชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

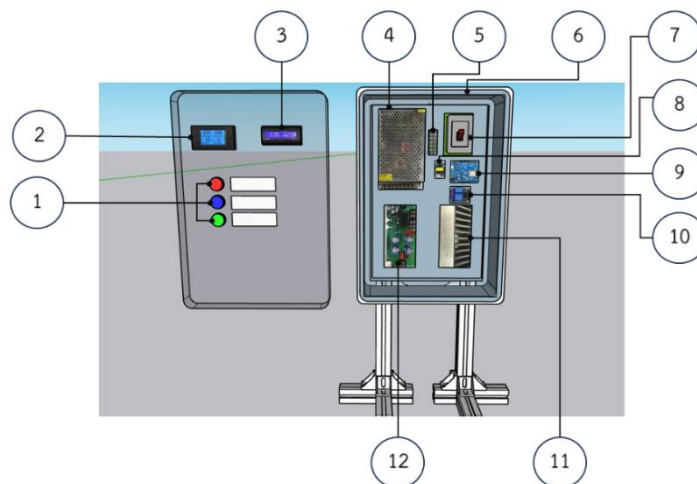
3.5 การออกแบบโครงสร้างชิ้นงาน

การออกแบบโครงสร้างชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า การออกแบบประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ



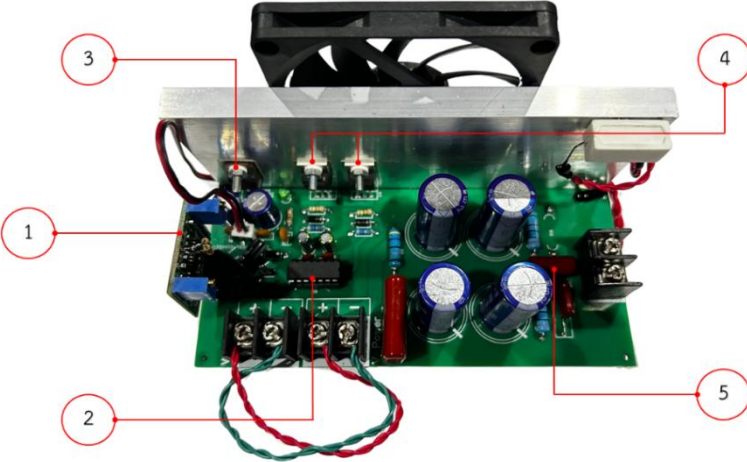
ภาพที่ 3-23 โครงสร้างชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

3.5.1 ชุดควบคุมการส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่ง

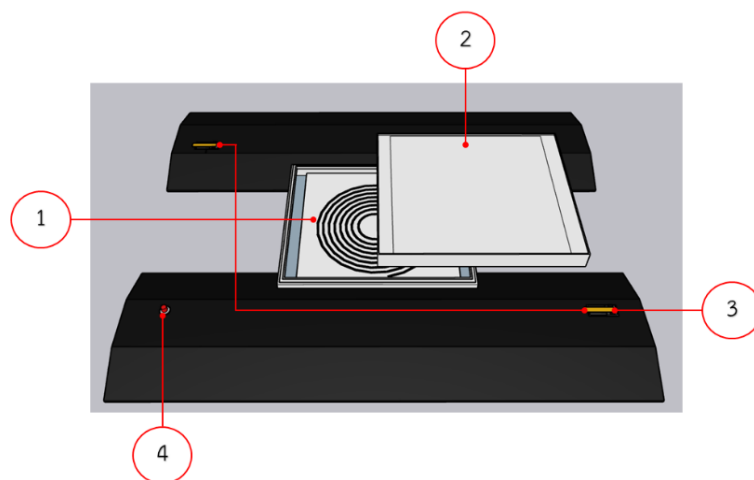


ภาพที่ 3-24 ชุดควบคุมการส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่ง

ตารางที่ 3-12 ตำแหน่งอุปกรณ์ชุดควบคุมการส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่ง

หมายเลข	รายละเอียดอุปกรณ์
1	Pilot Lamp
2	PZEM-022 100A AC Digital Power Meter มิเตอร์วัดการใช้พลังงาน
3	DC Watt Meter 60V 150A (DC วัดวัตต์มิเตอร์)
4	Switching Power Supply 24 VDC 10 A
5	Terminal Block
6	Buzzer 5 V
7	Safety Breaker 220 V 10 A 2 Pole
8	วงจรแปลงไฟ AC 220V เป็น DC 5V 700mA
9	WEMOS D1 R2 WIFI ESP8266 Shield Arduino Compatible
10	2 Channel 5V Optical Isolated Relay Module
11	Heat Sink ระบายความร้อน WIMA Capacitor 0.334 μ F 630 V
12	บอร์ด PCB ชุดควบคุมการส่งกำลังให้กับขดลวด
	
1	โมดูล วงจร SG3525 + LM358
2	IC IR2110PBF
3	IC Voltage Regulator 7812
4	Mosfet IRF540N
5	WIMA Capacitor 0.334 μ F 630 V

3.5.2 ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งกำลังไฟฟ้า และขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับกำลังไฟฟ้า

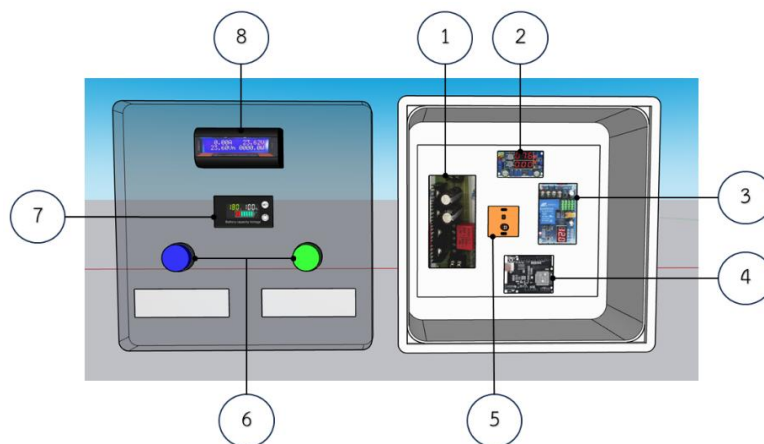


ภาพที่ 3-25 ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งกำลังไฟฟ้า และขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 3-13 ตำแหน่งอุปกรณ์ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งกำลังไฟฟ้า และขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับกำลังไฟฟ้า

หมายเลข	รายละเอียดอุปกรณ์
1	ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง
2	ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับ
3	Limit Switch Z-15GW-B
4	Push Button Switch

3.5.3 ชุดแสดงค่าพร้อมควบคุมขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับ



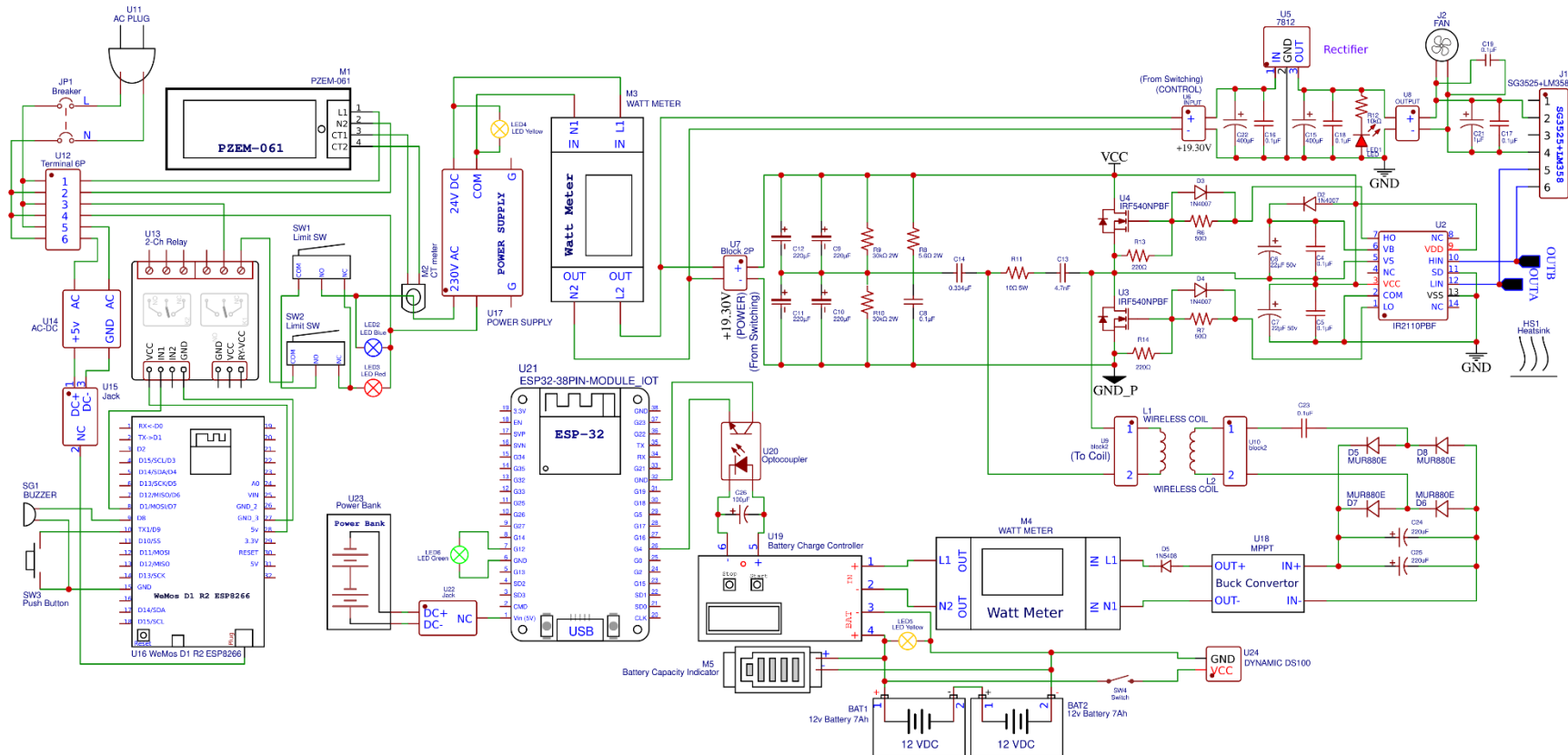
ภาพที่ 3-26 ชุดแสดงค่าพร้อมควบคุมขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับ

ตารางที่ 3-14 ตำแหน่งอุปกรณ์ชุดแสดงค่าพร้อมควบคุมขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับ

หมายเลข	รายละเอียดอุปกรณ์
1	ชุดวงจรเรียงกระแส (Rectifier)
2	High voltage and high current step-down converter
3	Battery Charger Control Module XH-M604 DC 6-60V
4	บอร์ด ESP32
5	ชุดวงจร PC817 (Optocoupler)
6	Pilot Lamp
7	Battery Capacity Indicator
8	DC Watt Meter 60V 150A (DC วัดวัตต์มิเตอร์)

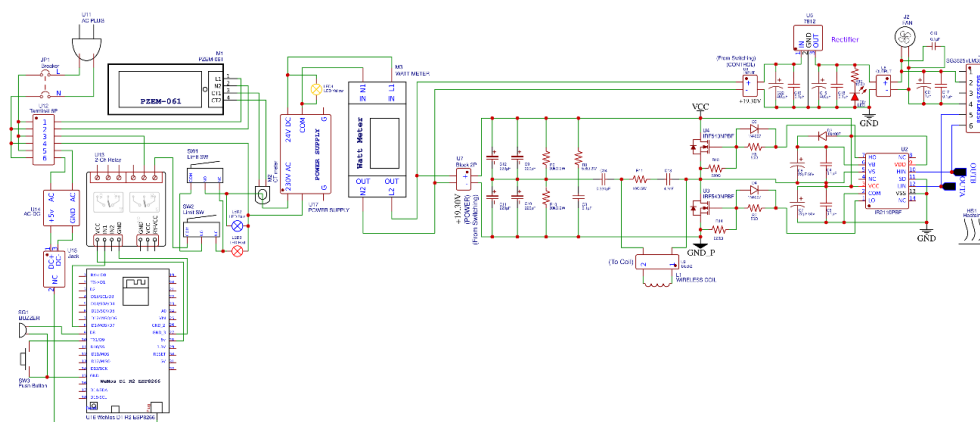
3.6 วงจรและการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของชุดสาริระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

3.6.1 วงจรเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า การออกแบบประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ



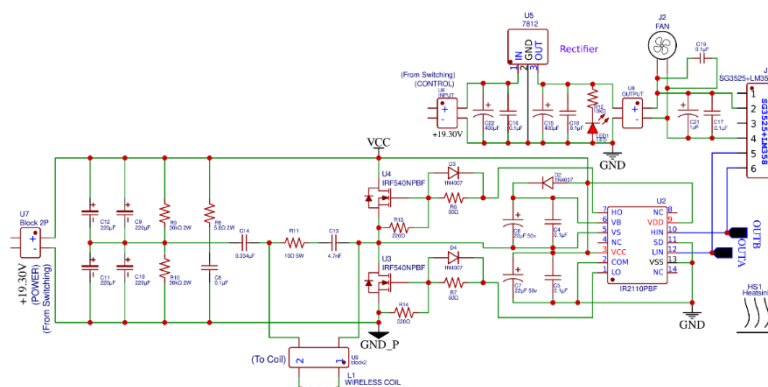
ภาพที่ 3-27 วงจรเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า

3.6.1.1 วงจรชุดควบคุมการส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่ง

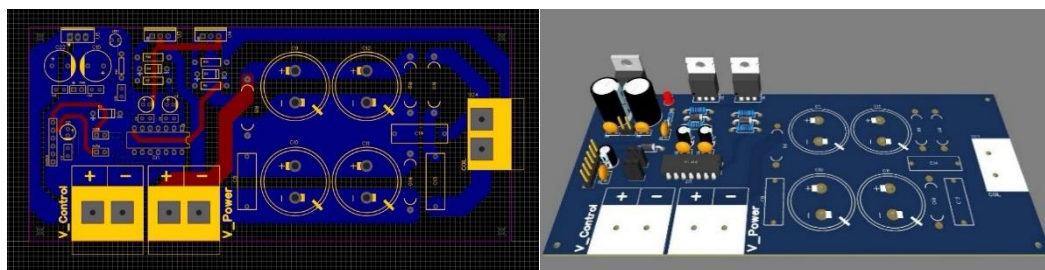


ภาพที่ 3-28 วงจรชุดควบคุมการส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่ง

1.) วงจรอินเวอร์เตอร์ภายในแผ่น PCB ที่ส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า

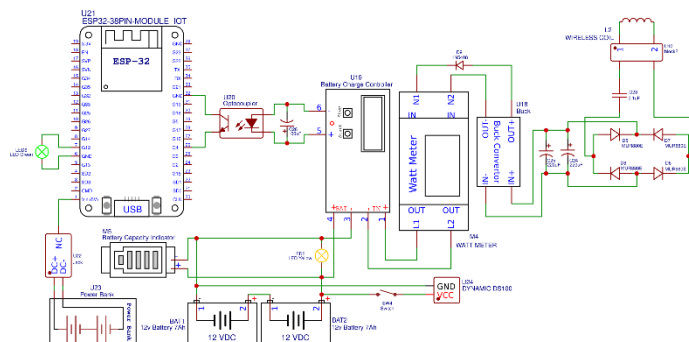


ภาพที่ 3-29 วงจรอินเวอร์เตอร์ภายในแผ่น PCB ที่ส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า



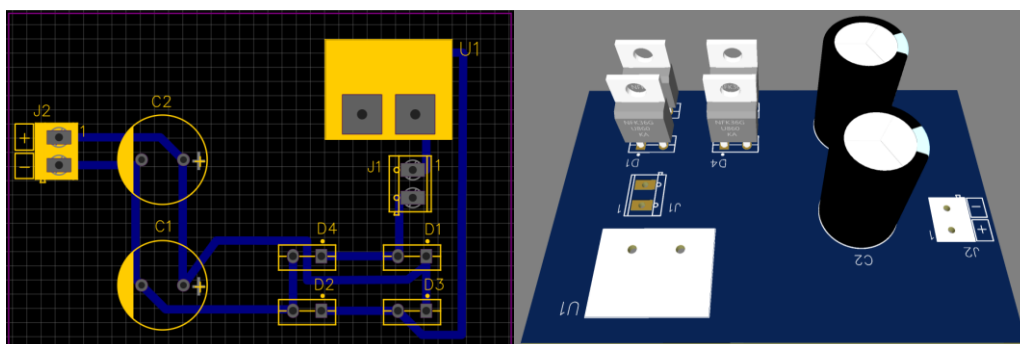
ภาพที่ 3-30 ลาย PCB และ 3D ของวงจรอินเวอร์เตอร์ภายในแผ่น PCB ที่ส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยโปรแกรม EasyEDA

3.6.1.2 วงจรชุดแสดงค่าพร้อมควบคุมขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับ



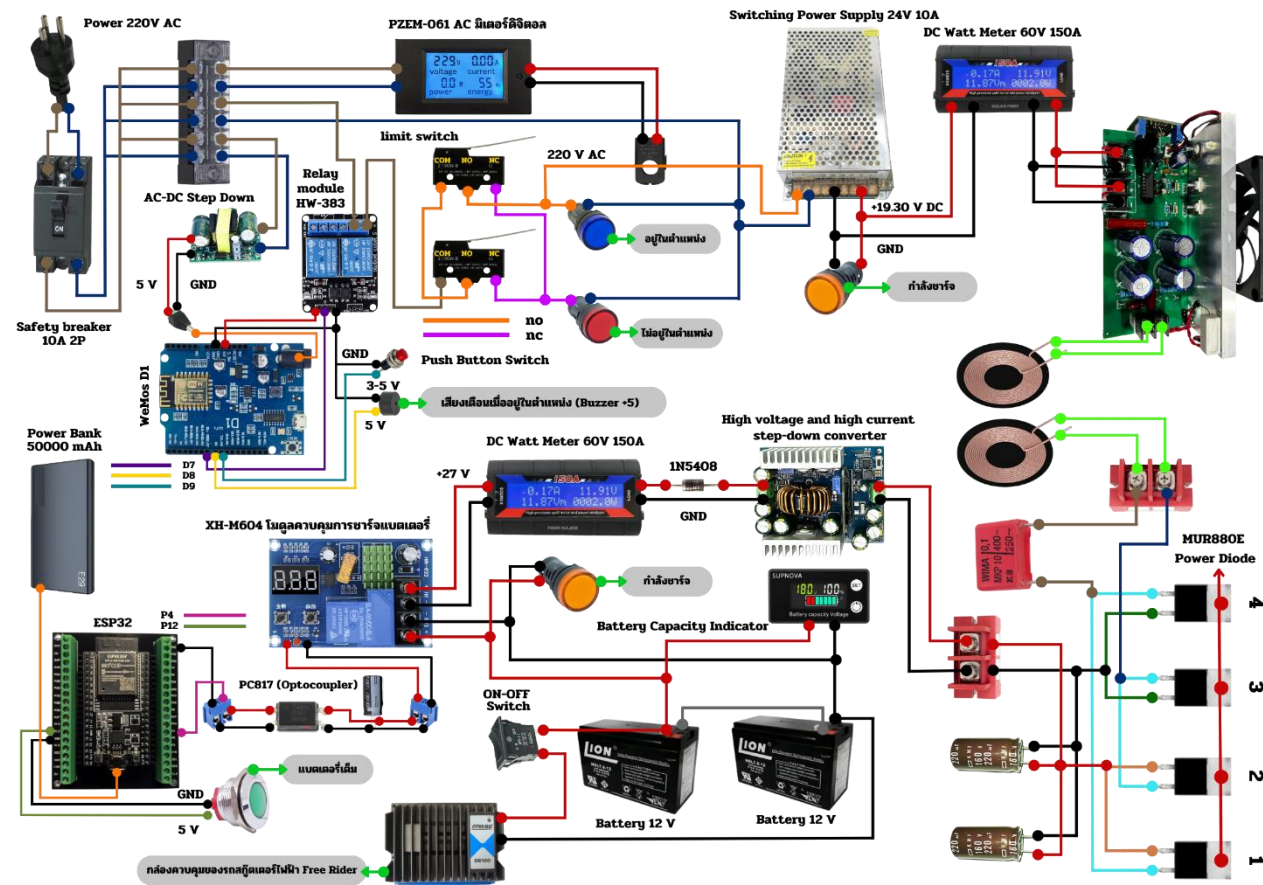
ภาพที่ 3-31 วงจรชุดแสดงค่าพร้อมควบคุมขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับ

PCB ที่ออกเป็นโปรแกรม EasyEDA ได้จะเป็นแฉ่วงจร Rectifier



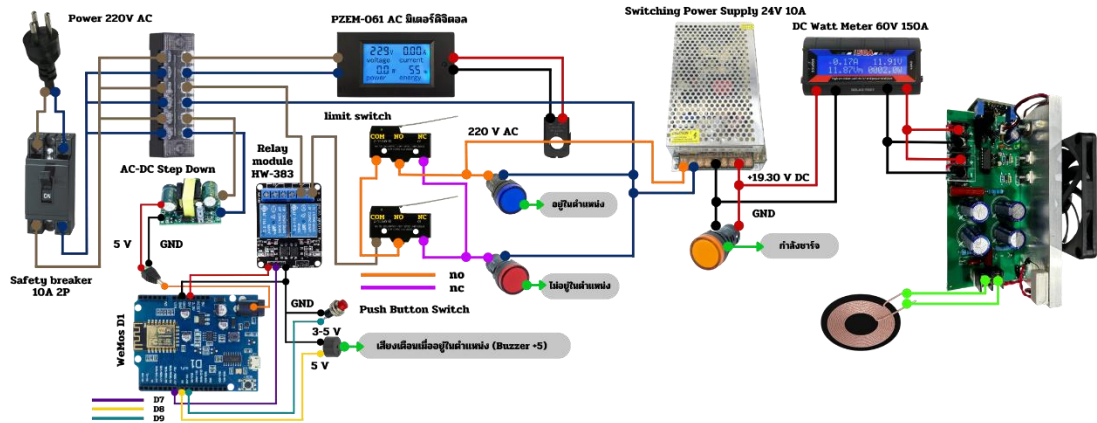
ภาพที่ 3-32 ลาย PCB และ 3D ของวงจร Rectifier โดยโปรแกรม EasyEDA

3.6.2 วงจรแสดงการต่อใช้งานของอุปกรณ์จริง



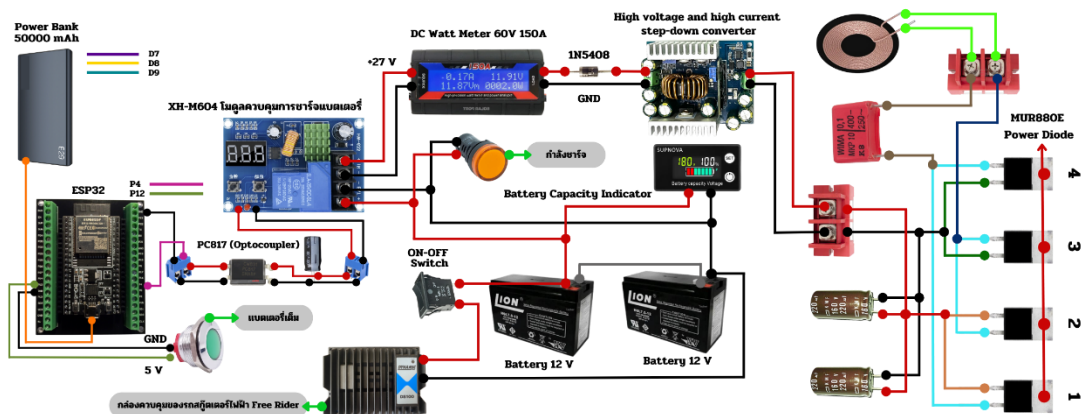
ภาพที่ 3-33 วงจรแสดงการต่อใช้งานของอุปกรณ์จริง

3.6.2.1 วงจรแสดงการต่อใช้งานของอุปกรณ์จริงภาคส่งกำลังไฟฟ้า



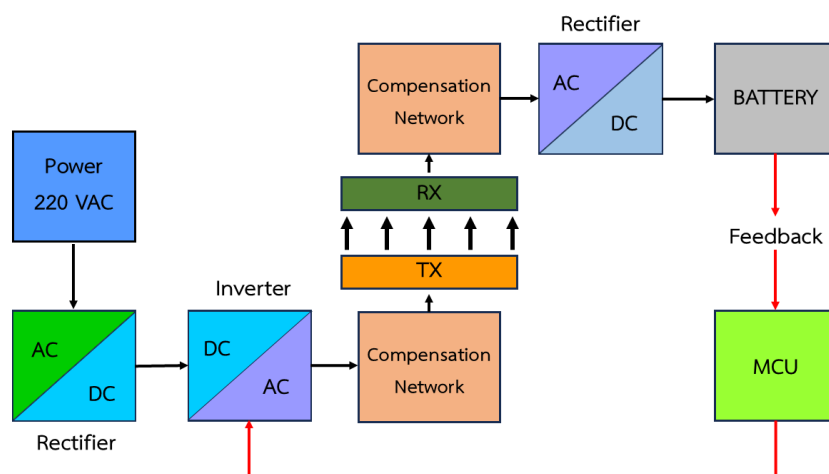
ภาพที่ 3-34 วงจรแสดงการต่อใช้งานของอุปกรณ์จริงภาคส่งกำลังไฟฟ้า

3.6.2.2 วงจรแสดงการต่อใช้งานของอุปกรณ์จริงภาครับกำลังไฟฟ้า

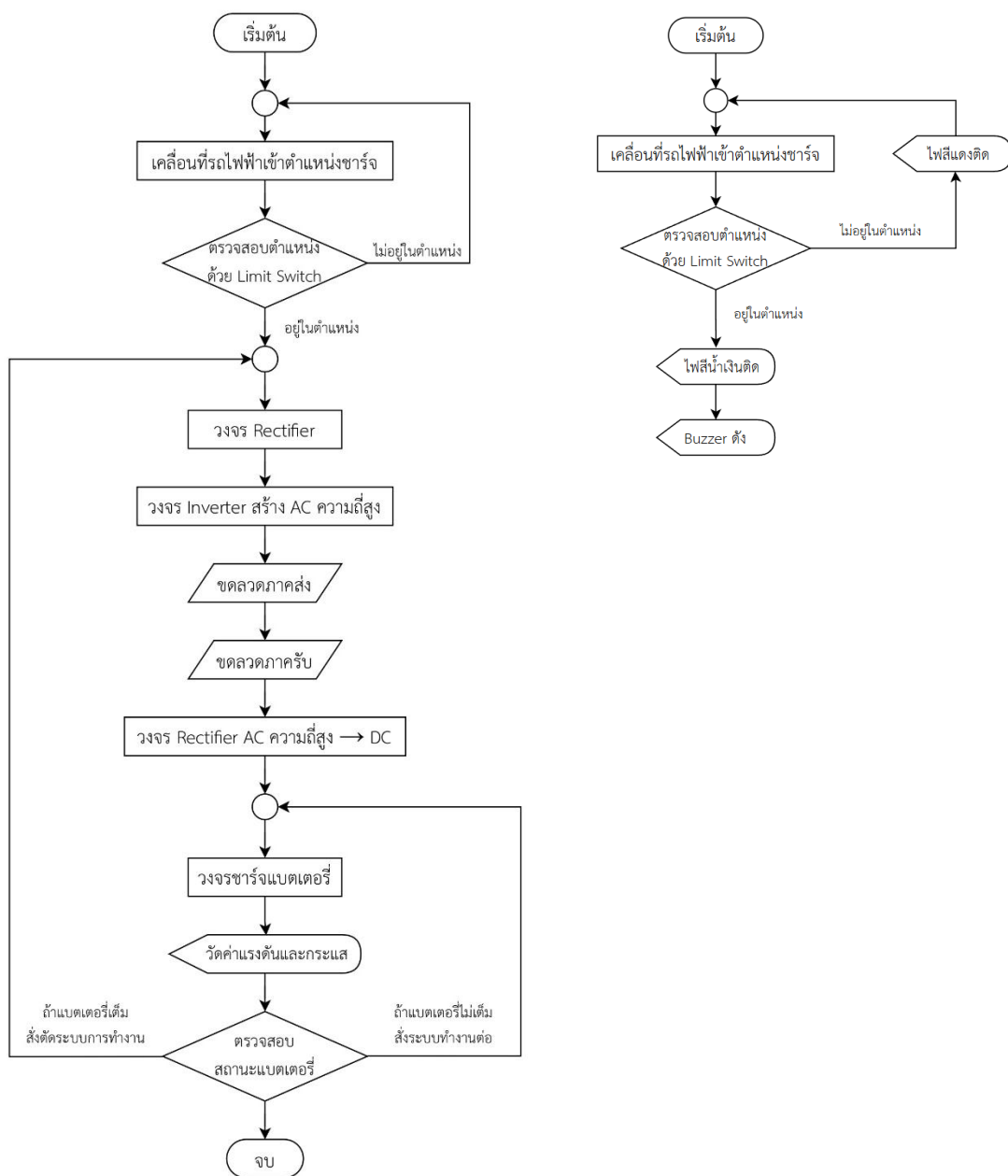


ภาพที่ 3-35 วงจรแสดงการต่อใช้งานของอุปกรณ์จริงภาครับกำลังไฟฟ้า

3.7 หลักการทำงาน



ภาพที่ 3-36 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย
สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า



ภาพที่ 3-37 แผนผัง Flowchart การทำงาน

3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

3.7.1 Safety Breaker 220 V 15 A 2 Pole



ภาพที่ 3-38 Safety Breaker 220 V 15 A 2 Pole

เป็นอุปกรณ์ที่ป้องกันการใช้กระแสไฟฟ้าเกินกำหนด เน้นความปลอดภัยในการใช้งาน ควบคุมและป้องกันความเสียหายที่เกิดจากความผิดพลาดของระบบไฟฟ้า

3.8.2 Switching Power Supply 24 VDC 10 A



ภาพที่ 3-39 Switching Power Supply 24 VDC 10 A

สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย หรืออาจเรียกกันในชื่อของ Switch Mode Power Supplies (SMPS) เป็นอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงคงที่ โดยค่าแรงดัน DC แรงดันต่ำที่ 24 V หรือ 12 V ซึ่งแปลงแรงดันมาจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่มีแรงดันสูง 220 V เพื่อส่งไปยังอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าให้อุปกรณ์นั้น ๆ ทำงานได้ตามปกติและไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่เครื่องใช้ไฟฟ้ามากเกินไป มีหลักการทำงานคล้ายกับหม้อแปลงแรงดันทั่วไป แต่สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย นั้นมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงกว่า มีขนาดเล็กกระทัดรัด และมีคุณสมบัติครอบคลุมในเรื่องของความปลอดภัยด้วย อีกทั้งยังสามารถติดตั้งได้กับอุปกรณ์หลายประเภท

3.8.3 AC-DC 5V 700mA



ภาพที่ 3-40 AC-DC 5V 700mA

โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แยกแรงดันไฟฟ้าสูงและต่ำ แรงดันไฟฟ้าเข้า AC 85-265 V เอาต์พุต DC 5 V ที่ควบคุมอย่างแม่นยำ ขนาดเล็ก ความสำเร็จ

ตารางที่ 3-15 ข้อมูลจำเพาะ AC-DC 5 V 700 mA

ข้อมูลจำเพาะ			
แรงดันไฟฟ้าขาเข้า	85-265 V AC	แรงดันไฟฟ้าขาออก	DC 5 V (+/-0.2 V)
กระแสไฟขาเข้า	0.014 A (AC 220 V)	Constant range	0.2-12 A
ขนาด (ยาวxกว้างxสูง)	30x20x18 มม.	Power	3.5 W
Output power	0-4 W (DC current)	Output current	700 mA
Output efficiency	80%	น้ำหนัก	60 กรัม

3.8.4 WEMOS D1 R2 WIFI ESP8266 Shield Arduino Compatible



ภาพที่ 3-41 WEMOS D1 R2 WIFI ESP8266 Shield Arduino Compatible

WeMos-D1R2 เป็นไมโครโปรเซสเซอร์ที่รองรับ Wi-Fi ที่ใช้ ESP8266-12E บนฐานของ Arduino-UNO ซึ่งหมายความว่าบอร์ดนี้มีลักษณะและการทำงานเหมือนกับ UNO เห็นได้ชัดว่าซิลด์, เซ็นเซอร์, และอุปกรณ์เอาต์พุตหลายตัวที่ผลิตขึ้นสำหรับแพลตฟอร์ม Arduino จะทำงานบน WeMos-D1R2 ได้พร้อมกับข้อได้เปรียบเพิ่มเติมคือมี WIFI ในตัว บอร์ดนี้ใช้งานได้กับ Arduino IDE และ NodeMCU นอกจากนี้ D1 R2 ยังมีแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งบนบอร์ดซึ่งช่วยให้คุณจ่ายไฟให้บอร์ดจากแหล่งจ่ายไฟได้สูงสุด 12V

ตารางที่ 3-16 ข้อมูลจำเพาะของ WEMOS D1 R2 WIFI ESP8266 Shield Arduino Compatible

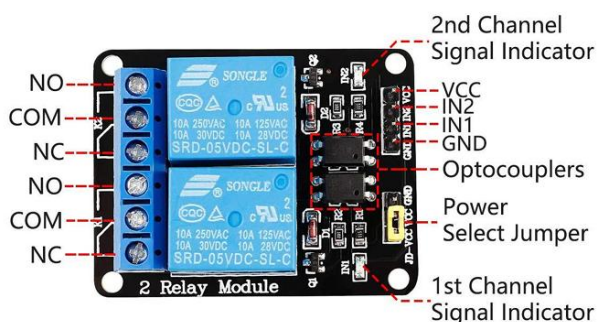
ข้อมูลจำเพาะ			
Microcontroller	ESP8266EX	Operating Voltage	3.3V
Flash Memory	4MB	Input Voltage Range	9V to 12V
Output	5V at 1A Max	Board Dimensions	68.6 x 53.4 มม.
Weight	21.8 กรัม	Analog Input Pins	1 (3.2V max input)
Digital I/O Pins	11 (all I/O pins have interrupt/pwm/I2C/one-wire capability, except for D 0)		

3.8.5 2 Channel 5V Optical Isolated Relay Module



ภาพที่ 3-42 2 Channel 5V Optical Isolated Relay Module

บอร์ดอินเทอร์เฟซรีเลย์ 2 ช่องสัญญาณ 5V และแต่ละช่องสัญญาณต้องใช้กระแสไฟขับ 15-20 mA สามารถใช้ควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีกระแสไฟสูง ติดตั้งรีเลย์กระแสไฟสูงที่ทำงานภายใต้ AC 250V 10 A หรือ DC30V 10A และมีอินเทอร์เฟซมาตรฐานที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์ควบคุมได้โดยตรง



ภาพที่ 3-43 แสดงขาต่างของ 2 Channel 5V Optical Isolated Relay Module

ข้อมูล Input และ Output ของวงจร ในด้านเอาต์พุต โมดูลรีเลย์มีการเชื่อมต่อ 3 แบบ

- NO (ปกติเปิด) : คือการเชื่อมต่อโหลดเมื่อเปิดใช้งาน (เปิด) ในสถานะปิด NO จะไม่เชื่อมต่อกับขั้วต่อ COM (กลาง)
- COM (กลาง) : ขั้วต่อนี้ทำหน้าที่เป็นการเชื่อมต่อทั่วไปสำหรับพินทั้ง NO และ NC
- NC (ปกติปิด) : นี่คือการเชื่อมต่อโหลดเริ่มต้น ซึ่งจะเชื่อมต่อกับขั้วต่อ COM เมื่อรีเลย์ปิดหรืออยู่ในสถานะเริ่มต้น
- VCC : อินพุตแหล่งจ่ายไฟบวก
- GND : กราวด์
- IN1 : พิน 1 อินพุตสัญญาณสำหรับรีเลย์บนช่อง 1 เมื่อมีอินพุตสัญญาณ Low คอนแทกแบบปกติเปิด (NO) ของรีเลย์จะเชื่อมต่อกับขั้วกลาง (COM)

- IN2 : พิน 2 อินพุตสัญญาณสำหรับรีเลย์บนช่อง 2 เมื่อมีอินพุตสัญญาณ Low คอนแทคแบบปกติเปิด (NO) ของรีเลย์จะเชื่อมต่อกับขั้วกลาง (COM)
- JD-VCC : พินนี้ใช้สำหรับแหล่งจ่ายไฟของรีเลย์ การเชื่อมต่อ JD-VCC และ VCC ด้วยฝาจัมเปอร์ แสดงว่ารีเลย์ได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟของบอร์ดควบคุมหลัก นอกจากนี้ ยังสามารถเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟภายนอกเข้ากับพินนี้เพื่อจ่ายไฟให้รีเลย์ได้

3.8.6 Limit Switch Z-15GW-B



ภาพที่ 3-44 Limit Switch Z-15GW-B

คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปิดหรือปิดวงจรไฟฟ้า โดยอาศัยการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนกลไกภายในสวิตช์ ใช้สำหรับจำกัดระยะทาง ตัด/ต่อวงจรไฟฟ้า ตรวจสอบตำแหน่งของวัตถุ ส่งสัญญาณและควบคุมการทำงานในระบบอัตโนมัติ จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การประยุกต์ใช้งานกับลิฟต์โดยสาร ระบบสายพานลำเลียง ระบบการผลิตอัตโนมัติ ระบบเครื่องจักรกล เป็นต้น

3.8.7 DC Watt Meter 60V 150A (DC วัดต์มิเตอร์)



ภาพที่ 3-45 DC Watt Meter 60V 150A (DC วัดต์มิเตอร์)

เครื่องวัดวัตต์ ได้รับการออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับ การตรวจสอบประสิทธิภาพของ พลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องวัดนี้สามารถตรวจสอบพารามิเตอร์ไฟฟ้าได้ 8 รายการ ได้แก่: แอมป์ โวลต์ วัตต์ แอมป์-ชั่วโมง วัตต์-ชั่วโมง แอมป์สูงสุด โวลต์ต่ำสุด (sag) และวัตต์สูงสุด ด้วยความจุ 60 โวลต์ และ 150 A จอแสดงผลสีน้ำเงินที่มีความคมชัดสูง และคุณสมบัติการตั้งค่าอัตโนมัติ

Description	Parameter
Operation Voltage:	7 - 55V
Auxiliary Battery Operating Voltage	0 – 55 V
Measurement Resolution:	0 – 150A, 0.01 A Resolution 0 – 60 V, 0.01 V Resolution 0 – 9000 W, 0.1 W Resolution 0 – 65 Ah, 0.001 Ah Resolution 0 – 9000 Wh, 0.1 Wh Resolution
LCD Display	62 x 12.5 mm (2.44 x 0.49 in)
Dimensions:	85 x 45 x 25 mm (3.35x1.77x0.98 in)
Weight	82 g (0.18lbs)
Wire Size	12 AWG

ภาพที่ 3-46 ข้อมูลจำเพาะ DC Watt Meter 60V 150A

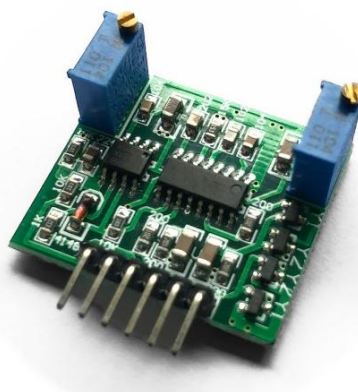
3.8.8 PZEM-022 100A AC Digital Power Meter มิเตอร์วัดการใช้พลังงาน



ภาพที่ 3-47 PZEM-022 100A AC Digital Power Meter มิเตอร์วัดการใช้พลังงาน

คือ มิเตอร์วัดการใช้พลังงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ สามารถวัดกระแสได้สูงสุด 100 A โดยใช้หม้อแปลงวัดกระแสแบบ coil ในการวัด หรือวัดการใช้พลังงานได้สูงสุด 22,000 Watt ใช้กับไฟฟ้า 1 เฟส แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ 80 ถึง 260 โวลต์ เหมาะสำหรับใช้วัดการใช้พลังงานของบ้านทั้งหลัง ค่าที่ได้จากมิเตอร์ สามารถนำไปคำนวณเป็นค่าไฟได้

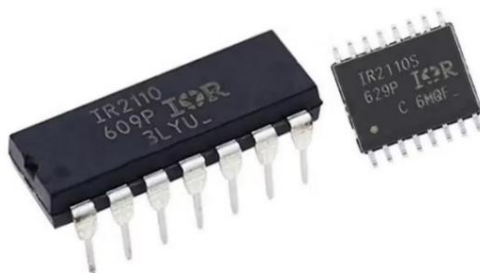
3.8.9 โมดูล วงจร SG3525 + LM358



ภาพที่ 3-48 โมดูล วงจร SG3525 + LM358

เป็น IC มอดูเลเตอร์ความกว้างพัลส์ IC ตัวนี้ใช้ในการออกแบบสัญญาณ SMPS (Switched Mode Power Supply) และ PWM ทุกประเภท เป็น IC 16 พิน เพื่อควบคุมแรงดันไฟขาออก จึงมีวงจรป้อนกลับที่ควบคุมแรงดันไฟโดยการเปรียบเทียบสัญญาณป้อนกลับกับสัญญาณอ้างอิง โดยอิงตามขีดจำกัดกระแสป้อนกลับ มีวงจรป้องกันที่ปิดสัญญาณ PWM โดยมีเอาต์พุต PWM หลัก 2 ตัวที่ตรงกันข้ามกัน ทำงานในรูปแบบโทเท็มโพลหรือฟลิปฟล็อปหรือแบบพุช-พูล กับอุปกรณ์ภายนอก เช่น MOSFET

3.8.10 IC IR2110PBF



ภาพที่ 3-49 IC IR2110PBF

เป็นไดรเวอร์เกต (gate driver) ที่ใช้สำหรับควบคุมทรานซิสเตอร์แบบ MOSFET หรือ IGBT ในงานที่เกี่ยวข้องกับการสวิตช์กำลังไฟฟ้าสูง เช่น อินเวอร์เตอร์, สวิตช์โหมดพาวเวอร์ซัพพลาย (SMPS), และวงจรควบคุมมอเตอร์ มีคุณสมบัติ ดังนี้ ช่วงแรงดันไฟเลี้ยง : 10 V ถึง 20 V, สามารถรองรับแรงดันสูงถึง 500V สำหรับ high-side driver, มีสองช่องควบคุม (high-side และ low-side) เพื่อควบคุมสวิตช์ MOSFET หรือ IGBT สองตัวในโหมดฮาฟบริดจ์ (half-bridge), สัญญาณอินพุตแยกสำหรับ high-side (HIN) และ low-side (LIN), กระแสเอาต์พุตสูงสุด : Peak Source Current : 2A , Peak Sink Current: 2A, ทำงานได้ในระบบที่มีความถี่สูง

3.8.11 MOSFET IRF540N



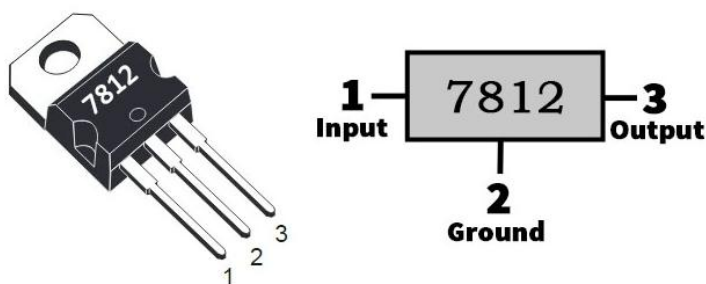
ภาพที่ 3-50 MOSFET IRF540N

เป็นทรานซิสเตอร์ชนิด N-channel ที่ออกแบบมาสำหรับงานที่ต้องการควบคุมแรงดันและกระแสในวงจรไฟฟ้ากำลัง ซึ่งหลักการทำงานของมันเป็นคือการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างขา Drain (D) และ Source (S) โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่ขา Gate (G) เป็นตัวเปิด-ปิด (Switching) หรือควบคุม (Modulation) กระแสไฟฟ้าในวงจร เช่น อินเวอร์เตอร์, DC-DC Converter, และวงจรควบคุมมอเตอร์ เป็นต้น

ตารางที่ 3-17 ข้อมูลจำเพาะ MOSFET IRF540N

แรงดันสูง (High Voltage) :	- แรงดัน Drain-Source สูงสุด (V_{ds}): 100 V ทำให้เหมาะกับวงจรไฟฟ้ากำลัง - แรงดัน Gate-Source สูงสุด (V_{gs}): ± 20 V
กระแสสูง (High Current) :	- กระแส Drain ต่อเนื่องสูงสุด (I_d): 28 A (ที่ $T_{case} = 25^\circ\text{C}$) - กระแส Drain ชั่วขณะ (Pulsed I_d): สูงสุด 110 A
ค่าความต้านทาน Drain-Source ($R_{ds(on)}$) ต่ำ :	- ค่าต้านทานเมื่อเปิด ($R_{ds(on)}$): 0.077 Ω (ที่ $V_{gs} = 10\text{V}$, $I_d = 17\text{A}$)
การกระจายพลังงาน (Power Dissipation) :	- พลังงานสูญเสียสูงสุด (P_{tot}): 150W (ที่ $T_{case} = 25^\circ\text{C}$)
การสวิตช์ความเร็วสูง :	- เหมาะสำหรับวงจรที่ต้องการการเปิด-ปิดอย่างรวดเร็ว (Switching Frequency)

3.8.12 IC Voltage Regulator 7812



ภาพที่ 3-51 IC Voltage Regulator 7812

เป็นวงจรควบคุมรักษาแรงดันไฟฟ้า หรือ วงจรควบคุมกระแสไฟฟ้า ที่ย่อขนาดให้เล็กลงมาอยู่ในชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ประเภทไอซี ในที่นี้จะกล่าวถึง IC 78xx Series ซึ่งเป็น Fixed Linear Voltage Regulator คือไม่สามารถเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตได้ โดยแต่ละรุ่นใน 78xx Series ก็จะมีค่า แรงดันเอาต์พุตที่ต่างกันไป โดยการดูจากเลข 2 หลัก

ชื่อ IC	แรงดันเอาต์พุต(V)
7805	+5
7806	+6
7808	+8
7810	+10
7812	+12
7815	+15
7818	+18
7824	+24

3.8.13 WIMA Film Capacitor



ภาพที่ 3-52 WIMA Film Capacitor

Film Capacitor อิเล็กโทรดจะไม่ถูกนำมาใช้กับตัวเก็บประจุแบบโลหะ แต่จะพันด้วยไดอิเล็กทริกในรูปแบบของฟิล์มโลหะ เนื่องจากความต้านทานแบบอนุกรมที่ต่ำกว่า โครงสร้างฟิล์มส่วนใหญ่ใช้สำหรับตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุที่เล็ก ข้อดีของส่วนประกอบที่ผลิตด้วยวิธีนี้คือ อิเล็กโทรดฟิล์มโลหะที่สัมผัสได้ง่าย สามารถใช้ในการส่งพัลส์และกระแสไฟฟ้าที่ยอดเยียม รวมถึงความต้านทานฉนวนที่สูงมาก เพื่อหลีกเลี่ยงการพังทลายที่เกิดจากจุดอ่อนในไดอิเล็กทริก ฟิล์มฉนวนที่เลือกจึงหนากว่าที่จำเป็นในทางทฤษฎีเสมอ โดยพิจารณาจากค่าที่กำหนดจากความแข็งแรงการพังทลายเฉพาะของวัสดุ

ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม WIMA ใน PCM ขนาด 5 มม. ถึง 15 มม. มีให้เลือกสองแบบเป็นไดอิเล็กทริก ตัวเก็บประจุ WIMA ที่มีไดอิเล็กทริกโพลีเอสเตอร์ (Polyester film : PET) เหมาะสำหรับการใช้งานทั่วไป เช่น การเชื่อมต่อ การแยก และการบายพาส ตัวเก็บประจุโพลีโพรพิลีน (Polypropylene film : PP) ใช้ในสนามความถี่สูง ซึ่งรวมถึงวงจรเรโซแนนซ์ แหล่งจ่ายไฟ วงจรเบี่ยงเบน วงจรออสซิลเลเตอร์ และอุปกรณ์เสียง ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม WIMA ใน PCM ขนาด 5 มม. ถึง 15 มม. มีจำหน่ายพร้อมค่าความจุตั้งแต่ 33 pF ถึง 0.22 μ F และแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดตั้งแต่ 63 VDC ถึง 1000 VDC

3.8.14 Pilot Lamp



ภาพที่ 3-53 Pilot Lamp

คือ หลอดไฟแสดงการทำงานของเครื่องจักรในสถานะต่างๆ นิยมติดตั้งอยู่บริเวณตู้ควบคุม โดยมีหน้าที่หลักคือ บอกสถานะการทำงาน เช่น กำลังทำงานอยู่, หยุดการทำงาน, แจ้งเตือนในกรณีที่มีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถแสดงสถานะอื่นๆ ได้ตามสีของหลอดไฟตามที่ผู้ออกแบบกำหนด

3.8.15 Push Button Switch



ภาพที่ 3-54 Push Button Switch

หรือที่เรียกกันว่าสวิตช์ปุ่มกด เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่ตัดและต่อวงจรทางไฟฟ้า เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ หรือการควบคุมทำงานของเครื่องจักรต่างๆ ใช้ได้กับอุตสาหกรรมทั่วไป สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1.) แบบกดติดปล่อยดับ

แบบกดติดปล่อยดับ หรือ ที่เรียกว่าแบบสปริงรีเทิร์น เมื่อมีการกด Push button Switch หน้าสัมผัสดังกล่าวจะเปลี่ยนสถานะ จาก NO เป็น NC หรือ จาก NC จะเป็น NO แต่เมื่อปล่อยมือออกจาก Push button Switch หน้าสัมผัสจะกลับสู่สภาวะปกติในตำแหน่งเดิมโดยมีแรงผลักดันจากสปริงให้ Push button Switch เข้าสู่สภาวะปกติ

2.) แบบกดติดกดดับ

แบบกดติดกดดับ หรือ แบบ push on / push off เมื่อมีการกด Push button Switch หน้าสัมผัสดังกล่าวจะเปลี่ยนสถานะ จาก NO เป็น NC หรือจาก NC จะเป็น NO แต่เมื่อ

ปล่อยมือออกจาก Push button Switch หน้าสัมผัสจะถูกล็อกไว้โดยกลไกของสวิตช์ ซึ่งสามารถกลับสู่สภาวะปกติในตำแหน่งเดิมได้โดยกด Push button Switch อีกครั้งทำให้คลายล็อก จะมีแรงผลักดันจากสปริงให้ Push button Switch เข้าสู่สภาวะปกติ

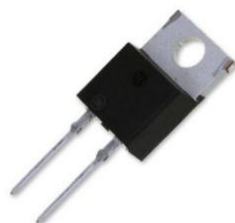
3.8.16 Buzzer 5 V



ภาพที่ 3-55 Buzzer 5 V

คือ ลำโพงแบบแม่เหล็กหรือ แบบเพียโซที่มีวงจรกำเนิดความถี่ (oscillator) อยู่ภายใน ตัว ใช้ไฟเลี้ยง 3.3 - 5V สามารถสร้างเสียงเตือนหรือส่งสัญญาณที่เป็นรูปแบบต่างๆ

3.8.17 MUR880E Power Diode

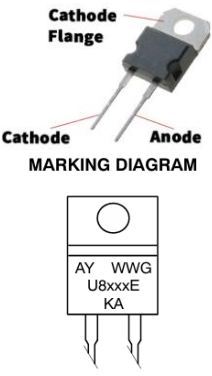


MUR880E Power Diode

ภาพที่ 3-56 MUR880E Power Diode

คือ ไดโอดเรียงกระแสแบบสวิตช์โหมดกึ่งความเร็วพิเศษ ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้ในแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง อินเวอร์เตอร์ และไดโอดแบบฟรีวีลลิง

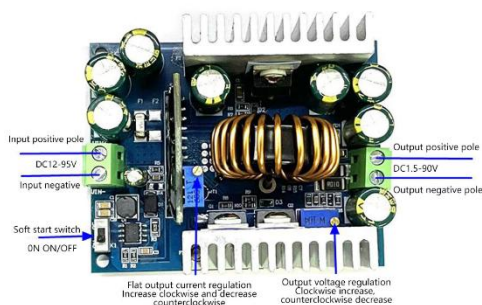
ตารางที่ 3-18 คุณสมบัติ MUR880E Power Diode

MUR880E Pinout  MARKING DIAGRAM AY WWG U8xxxE KA A = Assembly Location Y = Year WW = Work Week G = Pb-Free Package U8xxxE = Device Code xxx = 100 or 80 KA = Diode Polarity	คุณสมบัติ - 20 ม. J Avalanche Energy รับประกัน - การป้องกันที่ยอดเยียมต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าในวงจรโพลตเหนี่ยวนำแบบสลับ - เวลาการกู้คืนที่รวดเร็วถึง 75 นาโนวินาที - อุณหภูมิจุดเชื่อมต่อการทำงาน 175°C - แพคเกจ TO-220 ยอดนิยม - อีพ็อกซีเป็นไปตามมาตรฐาน UL 94 V-0 @ 0.125 นิ้ว - แรงดันไฟต่ำ - กระแสไฟต่ำ - รอยต่อแบบพาสซีฟกระจกทนอุณหภูมิสูง - แรงดันย้อนกลับถึง 1,000 โวลต์
--	--

ตารางที่ 3-19 ข้อมูลจำเพาะของ MUR880E Power Diode

ข้อมูลจำเพาะ			
คำอธิบายแพ็คเกจผู้ผลิต	เคส 221B-04, 2 พิน	ประเภทไดโอด	ไดโอดเรกติไฟเออร์
แอปพลิเคชัน	พลังงานกู้คืนที่เร็วพิเศษ	วัสดุขององค์ประกอบไดโอด	ซิลิคอน
แรงดันไฟไปข้างหน้าสูงสุด (VF)	1.8 V	กระแสไปข้างหน้า Pk แบบไม่ซ้ำซ้อน-สูงสุด	100 A
อุณหภูมิในการทำงานสูงสุด	175.0 °C	กระแสไฟขาออกสูงสุด	8 A
อุณหภูมิรีเฟล็กซ์สูงสุด	240 °C	แรงดันย้อนกลับสูงสุด	800 V
เวลาการกู้คืนย้อนกลับสูงสุด	0.1 μs	อุณหภูมิรีเฟล็กซ์สูงสุดตามเวลา	30 s

3.8.18 High voltage and high current step-down converter



ภาพที่ 3-57 High voltage and high current step-down converter

โมดูลเป็นแหล่งจ่ายไฟแบบลดแรงดันไฟที่สามารถลดแรงดันไฟได้เท่านั้น แต่ไม่สามารถเพิ่มแรงดันไฟได้ แรงดันไฟฟ้าขาเข้าจะต้องสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าขาออก โมดูลนี้ใช้รูปแบบการแก้ไขขั้นตอนที่มีประสิทธิภาพสูงมากโดยมีประสิทธิภาพสูงสุด 96% แรงดันและกระแสไฟขาออกสามารถปรับได้อย่างต่อเนื่อง แรงดันไฟฟ้าอินพุตสูงสุดสามารถเข้าถึง 95V และแรงดันขาออกสูงสุดคือ 90V อินพุตการเชื่อมต่อป้องกันการย้อนกลับการเชื่อมต่อย้อนกลับบวกและลบโดยไม่ต้องเผาไหม้ สวิตช์สตาร์ทแบบนิ้มมีสวิตช์สตาร์ทแบบนิ้ม

ตารางที่ 3-20 ข้อมูลจำเพาะของ High voltage and high current step-down converter

ข้อมูลจำเพาะ	
Module name	500w step-down constant voltage constant current adjustable power module
Module nature	Non isolated step-down module
Input voltage	12-95V
Output voltage range	1.5-90V (can only reduce voltage, cannot increase voltage, output voltage can only be lower than input voltage)
Input output pressure differe	2V
Output constant current	0.3-18A (continuously adjustable)
Output rated current	15A
Rated output power	400w
Input overvoltage protection	None (overpressure prohibited)
Working temperature	-10~+65 degrees Celsius
Working frequency	120KHz

ตารางที่ 3-20 ข้อมูลจำเพาะของ High voltage and high current step-down converter (ต่อ)

Conversion efficiency	up to 96% (efficiency is related to input and output voltage, current, and voltage difference)
Short circuit protection	Yes (constant current protection)
Input reverse protection	Yes (MOS transistor reverse connection)
Output anti backflow	None (charging the battery, connecting the output to an inductive load, such as adding anti backflow diodes when connecting to the motor)

3.8.19 Battery Charger Control Module XH-M604 DC 6-60V



ภาพที่ 3-58 Battery Charger Control Module XH-M604 DC 6-60V

เป็นโมดูลควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ที่รองรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ช่วง 6 V ถึง 60 V โดยโมดูลนี้มีฟังก์ชันควบคุมกระบวนการชาร์จแบตเตอรี่อัตโนมัติ เช่น การเริ่มและหยุดชาร์จเมื่อแรงดันถึงค่าที่ตั้งไว้ เหมาะสำหรับแบตเตอรี่ประเภท Lead-Acid และ Lithium

หลักการทำงาน :

1. เริ่มชาร์จ (Charging Start): โมดูลจะตรวจสอบแรงดันแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ หากแรงดันของแบตเตอรี่ต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ (Lower Limit Voltage) รีเลย์จะทำงานเพื่อเปิดวงจรชาร์จและจ่ายไฟไปยังแบตเตอรี่
2. หยุดชาร์จ (Charging Stop): เมื่อแรงดันแบตเตอรี่ถึงค่าที่ตั้งไว้ (Upper Limit Voltage) รีเลย์จะตัดการทำงานเพื่อหยุดการชาร์จ
3. การแสดงสถานะ:
 - หน้าจอ LED จะแสดงค่าแรงดันของแบตเตอรี่ปัจจุบัน
 - ไฟ LED บนบอร์ดแสดงสถานะการชาร์จ (Charging/Full)

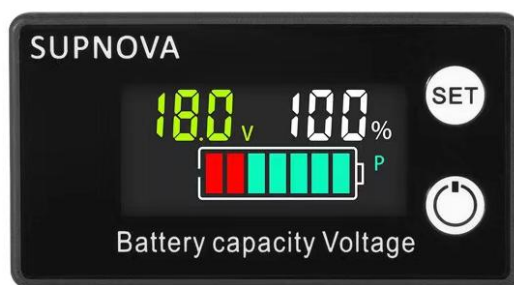
3.8.20 แบตเตอรี่แห้ง ยี่ห้อ Lion ชนิดตะกั่วกรด 12 V.DC 7 Ah



ภาพที่ 3-59 แบตเตอรี่แห้ง ยี่ห้อ Lion ชนิดตะกั่วกรด 12 V.DC 7 Ah

แบตเตอรี่แห้งใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายและเก็บพลังงานให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น เป็น แบตเตอรี่ back up รถกอล์ฟ รถมอเตอร์ไซด์ รถจักรยานไฟฟ้า ใช้งานง่าย ไม่ต้องเติมน้ำกลั่นและดูแลรักษาง่าย สามารถนำมาชาร์จไฟใหม่ได้ด้วยเครื่องชาร์จไฟที่ขนาดเหมาะสมกับแบตเตอรี่แต่ละขนาด อายุการใช้งานแบตเตอรี่แห้ง อยู่ระหว่าง 2-3 ปี แบตเตอรี่มีความเต็มแอมป์ คุณภาพสูง รองรับมาตรฐาน มอก.

3.8.21 Battery Capacity Indicator



ภาพที่ 3-60 โวลต์มิเตอร์วัดความจุแบตเตอรี่ DC

เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่และแสดงปริมาณความจุของแบตเตอรี่ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ (Battery Capacity Indicator) เหมาะสำหรับใช้งานในระบบแบตเตอรี่ เช่น รถไฟฟ้า, โซล่าเซลล์, ระบบ UPS และอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ คุณสมบัติทั่วไปมีดังนี้ รองรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ตั้งแต่ 8V ถึง 72V ใช้ได้กับแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ เช่น แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (Lead-acid), ลิเทียมไอออน (Li-ion), ลิเทียมฟอสเฟต (LiFePO4) ต่อเข้ากับขั้วแบตเตอรี่โดยตรงผ่านสายไฟ ความแม่นยำในการวัดแรงดัน: $\pm 1\%$ (ขึ้นอยู่กับรุ่น)

3.8.22 ON-OFF Switch



ภาพที่ 3-61 ON-OFF Switch

เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ใช้ควบคุมวงจรกระแสไฟฟ้า ทำหน้าที่เปิดกระแสไฟหรือตัดกระแสไฟ ไม่ให้ไหลเข้าสู่เครื่องใช้ไฟฟ้า หลอดไฟ เครื่องมือ เครื่องจักรที่ใช้ไฟฟ้า สวิตช์ไฟถูกออกแบบมาให้ติดตั้งได้ง่าย ใช้งานง่าย

3.8.23 PC817 (Optocoupler)



ภาพที่ 3-62 PC817 (Optocoupler)

คือ อุปกรณ์ที่รวม LED และโฟโตทรานซิสเตอร์เข้าด้วยกันเพื่อสร้างส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ เป็นออปโตคัปเปิลเลอร์หรือออปโตไอโซเลเตอร์ ทำงานโดยอาศัยการถ่ายโอนสัญญาณโดยใช้เส้นทางแสงระหว่างวงจรแยกไฟฟ้าสองวงจรผ่านแสง ทำหน้าที่แยกไฟฟ้าระหว่างวงจรสองวงจรที่ทำงานในระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกัน ไม่มีการสัมผัสทางกายภาพ (ผ่านตัวนำ) ระหว่างวงจรทั้งสอง เพื่อป้องกันวงจรแรงดันต่ำจากวงจรแรงดันสูงโดยป้องกันการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เป็นอันตราย และยังจัดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการอีกด้วย

3.8.24 ESP32



ภาพที่ 3-63 ESP32

ESP32 คือชิปเซ็ตไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีการรวม Wi-Fi และ Bluetooth ความถี่ 2.4 GHz ในตัวเดียวกัน ออกแบบด้วยเทคโนโลยี TSMC 40 นาโนเมตร ชิปนี้ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพพลังงานและ RF ที่ดีที่สุด แสดงให้เห็นถึงความทนทาน ความอเนกประสงค์ ความน่าเชื่อถือ และขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลให้มันกลายเป็นชิปที่ได้รับความนิยมในกลุ่มผู้พัฒนาโปรเจกต์ IoT ซึ่งข้อดีของชิปรุ่นนี้ก็จะมิดังนี้ มีหน่วยประมวลผล (Processor) แบบ Dual-Core ทำให้ทำงานประมวลผลได้เร็วแรง ใช้พลังงานต่ำ เหมาะกับงานที่ต้องใช้งานด้วยการแบตเตอรี่ มีการใช้เทคโนโลยี ไวไฟ (Wi-Fi) และ บลูทูธ (Bluetooth) ในตัว ทำให้เชื่อมต่อไร้สายได้ง่าย รองรับการเขียนโปรแกรมด้วยโปรแกรม Arduino IDE ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยม ทำให้ผู้ใช้งาน สามารถเริ่มต้นได้ง่าย

Categories	Items	Specifications
Certification	RF certification	See certificates for ESP32-WROOM-32
	Wi-Fi certification	Wi-Fi Alliance
	Bluetooth certification	BQB
	Green certification	RoHS/REACH
Test	Reliability	HTOL/HTSL/uHAST/TCT/ESD
Wi-Fi	Protocols	802.11 b/g/n (802.11n up to 150 Mbps) A-MPDU and A-MSDU aggregation and 0.4 μ s guard interval support
	Center frequency range of operating channel	2412 ~ 2484 MHz
Bluetooth	Protocols	Bluetooth v4.2 BR/EDR and Bluetooth LE specification
	Radio	NZIF receiver with -97 dBm sensitivity Class-1, class-2 and class-3 transmitter AFH
	Audio	CVSD and SBC
Hardware	Module interfaces	SD card, UART, SPI, SDIO, I2C, LED PWM, Motor PWM, I2S, IR, pulse counter, GPIO, capacitive touch sensor, ADC, DAC, Two-Wire Automotive Interface (TWAI®), compatible with ISO11898-1 (CAN Specification 2.0)
	Integrated crystal	40 MHz crystal
	Integrated SPI flash ¹	4 MB
	Operating voltage/Power supply	3.0 V ~ 3.6 V
	Operating current	Average: 80 mA
	Minimum current delivered by power supply	500 mA
	Recommended operating ambient temperature range	-40 °C ~ +85 °C
	Package size	18 mm × 25.5 mm × 3.10 mm

ภาพที่ 3-64 ข้อมูลจำเพาะของ ESP32

3.8.25 Power Bank 50000 mAh



ภาพที่ 3-65 Power Bank 50000 mAh

คือ อุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ชาร์จแบตเตอรี่หรือจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา เช่น สมาร์ทโฟน แท็บเล็ต กล้องดิจิทัล และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ได้ ในกรณีที่ไม่สามารถเข้าถึงแหล่งจ่ายไฟโดยตรงได้

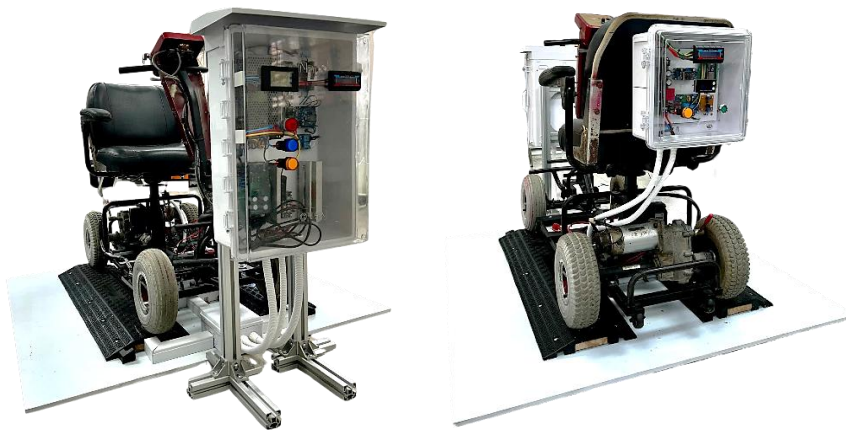
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

สำหรับในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองจากชุดต้นแบบและชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยพิจารณาจากรูปแบบของขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงของความถี่ และระยะห่างระหว่างขดลวด ซึ่งล้วนมีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้า แรงดัน กระแส และประสิทธิภาพของระบบ จากผลที่ได้จะมีการวิเคราะห์และวิจารณ์เพื่อหาแนวทางในการเลือกโครงสร้างต้นแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานจริง

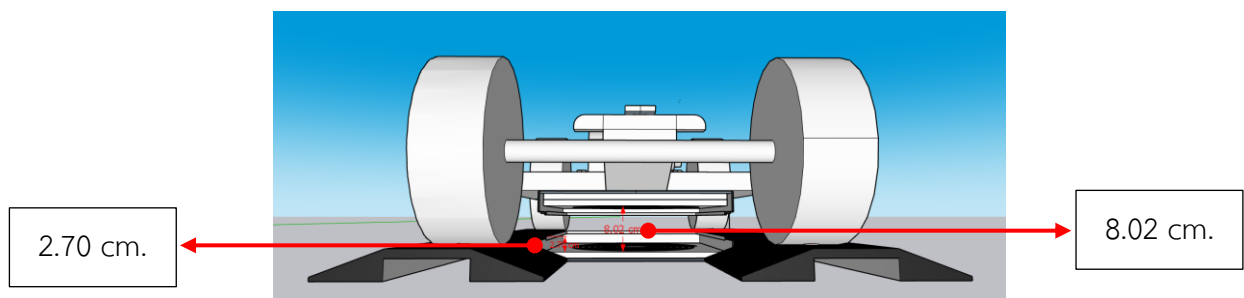
4.1 ชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

4.1.1 สร้างชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า



ภาพที่ 4-1 ชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

เมื่อสร้างชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าสำเร็จ ระยะห่างของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับ จะมีระยะถ่ายโอนพลังงานแค่ 6 cm. ,7 cm.และ 8 cm. เพราะ ด้วยความสูงของระยะพื้นถึงฐานรถทำให้มีข้อจำกัด แต่ระยะนี้ยังสามารถถ่ายโอนพลังงานได้ดี เมื่ออ้างอิงจากการทดลองของชุดต้นแบบ



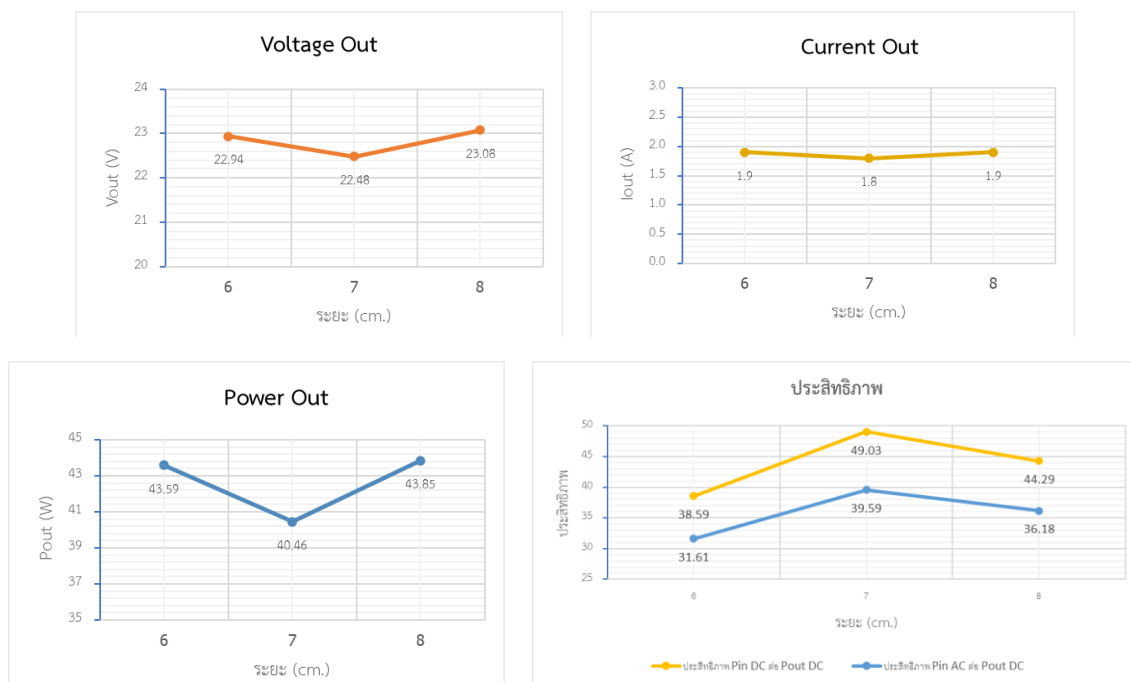
ภาพที่ 4-2 ระยะห่างของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับ

4.1.2 ทดลองชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

การทดลองชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า จะทดลองที่ความถี่ในช่วง 80.00 – 83.00 kHz ยังคงใช้โหลดค่าความต้านทานขนาด 12 Ω 15 W แทนแบตเตอรี่ เพื่อดึงพลังงานภายในวงจรในการทดลอง

ตารางที่ 4-1 บันทึกผลการทดลองชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ระยะ 6 cm., 7 cm. และ 8 cm.

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			η→EFF (ประสิทธิภาพ) DC	η→EFF (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้าSwitching (AC)			หลังSwitchingก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจรเรียงกระแส (DC)				
	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{out}	I _{out}	P _{out}		
6	223	1.08	137.9	19.11	5.91	112.94	22.94	1.9	43.59	38.59	31.61
7	223	0.82	102.2	19.15	4.31	82.54	22.48	1.8	40.46	49.03	39.59
8	223	0.96	121.2	19.15	5.17	99.01	23.08	1.9	43.85	44.29	36.18



ภาพที่ 4-3 กราฟแสดงผลการทดลองของชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า
แบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ที่ระยะ 6 cm. ,7 cm. และ 8 cm.

ที่ระยะห่าง 6 เซนติเมตร ระหว่างขดลวดส่งและขดลวดรับแสดงผลการทดลองดังนี้ : แรงดันไฟฟ้าขาออก (Voltage Out) ที่วัดได้มีค่า 22.94 V ซึ่งอยู่ในระดับสูงเมื่อเทียบกับระยะทดสอบอื่น กระแสไฟฟ้าขาออก (Current Out) มีค่า 1.9 A ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าขาออก (Power Out) มีค่าสูงถึง 43.59 W ประสิทธิภาพของระบบในการแปลงพลังงานจากไฟฟ้าขาเข้ากระแสตรง (Pin DC) เป็นพลังงานขาออกกระแสตรง (Pout DC) อยู่ที่ 38.59 % และประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานจากไฟฟ้าขาเข้ากระแสสลับ (Pin AC) เป็นพลังงานขาออกกระแสตรง (Pout DC) อยู่ที่ 31.61 %

ที่ระยะห่าง 7 เซนติเมตร ระหว่างขดลวดส่งและขดลวดรับแสดงผลการทดลองดังนี้ : แรงดันไฟฟ้าขาออกลดลงเหลือ 22.48 V กระแสไฟฟ้าขาออกลดลงเหลือ 1.8 A ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าขาออกลดลงเหลือ 40.46 W แต่ประสิทธิภาพของระบบกลับเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจาก Pin DC เป็น Pout DC เพิ่มขึ้นเป็น 49.03 % และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจาก Pin AC เป็น Pout DC เพิ่มขึ้นเป็น 39.59 %

ที่ระยะห่าง 8 เซนติเมตร ระหว่างขดลวดส่งและขดลวดรับแสดงผลการทดลองดังนี้ : แรงดันไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นเป็น 23.08 V กระแสไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นเป็น 1.9 A ทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นเป็น 43.85 W ประสิทธิภาพของระบบลดลงเล็กน้อย โดยประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจาก Pin DC เป็น Pout DC ลดลงเหลือ 44.29 % และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจาก Pin AC เป็น Pout DC ลดลงเหลือ 36.18%

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์กราฟ สามารถสรุปได้ว่าที่ระยะ 6 cm, 7 cm และ 8 cm พบว่าค่าแรงดันที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้ออกแบบไว้เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงาน เช่น คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ การสูญเสียในระบบ หรือการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอก ในส่วนของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าสอดคล้องกับที่ได้ออกแบบไว้และเป็นไปตามผลการทดลองที่ได้จากชุดต้นแบบในการทดลองก่อนหน้านี้

เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพของระบบโดยรวม พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ระยะ 7 cm ซึ่งเป็นระยะที่มีความสมดุลระหว่างการสูญเสียพลังงานกับการถ่ายโอนพลังงาน แต่เมื่อพิจารณาในแง่ของกำลังไฟฟ้าขาออกที่ส่งได้สูงสุด พบว่าระยะ 8 cm ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกที่สูงกว่า

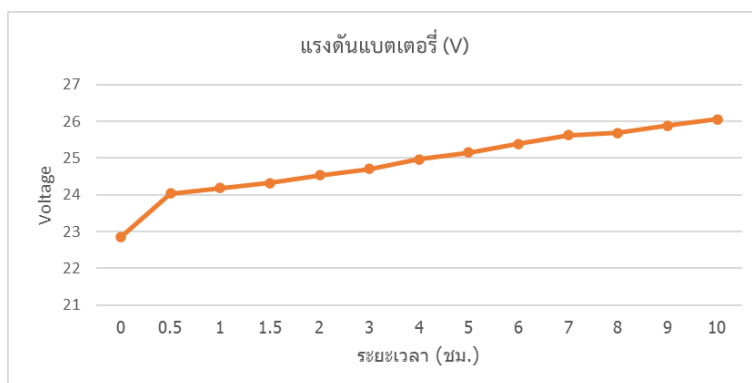
ในการพิจารณาความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงในการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่ต้องการแรงดันชาร์จในช่วง 26.4-27.4 V และกระแสชาร์จที่ 0.7-1.1 A นั้น ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ที่ระยะ 8 cm ยังคงเป็นระยะที่เหมาะสมและมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งาน แม้ว่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบจะไม่สูงเท่ากับที่ระยะ 7 cm ก็ตาม เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าขาออกที่ได้มีความเพียงพอต่อความต้องการของการชาร์จแบตเตอรี่

4.2 ผลการทดลองการชาร์จแบตเตอรี่แบบไร้สาย

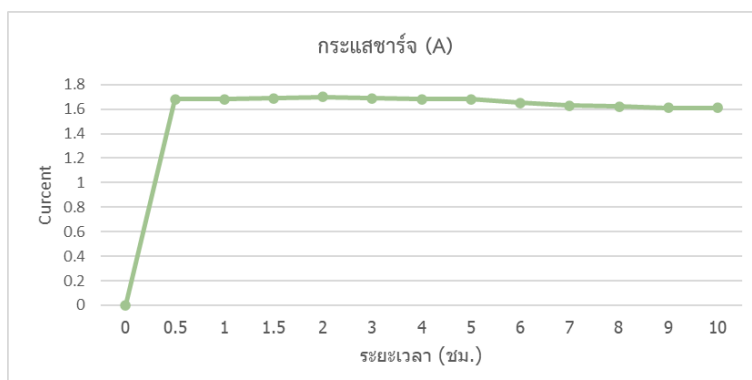
ในการทดลองนี้ได้ทำการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรด 24V 26Ah โดยใช้ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่พัฒนาขึ้น การทดลองดำเนินการเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมงติดต่อกัน โดยมีการบันทึกและเก็บข้อมูลการทำงานของระบบในทุกๆ 60 นาที

ตารางที่ 4-2 ผลการทดลองการชาร์จแบตเตอรี่ 24V 26Ah ด้วยระบบไร้สาย

เวลา (ชม.)	แรงดัน แบตเตอรี่ (V)	กระแส ชาร์จ (A)	พลังงาน สะสม (Wh)	ระดับ ประจุ	อุณหภูมิ แบตเตอรี่ (°C)	ประสิทธิภาพการ ชาร์จ SoC (%)
0	22.84	0	0.00	38	28.6	12.00
0.5	24.04	1.68	20.19	55	28.6	29.14
1	24.18	1.68	40.50	59	28.1	31.14
1.5	24.32	1.69	61.06	61	28.5	33.14
2	24.53	1.7	102.76	64	28.0	36.14
3	24.71	1.69	144.52	68	28.1	38.71
4	24.96	1.68	186.45	73	28.0	42.29
5	25.15	1.68	228.70	77	28.4	45.00
6	25.39	1.65	270.59	80	28.2	48.43
7	25.62	1.63	312.36	84	28.1	51.71
8	25.68	1.62	353.96	86	28.0	52.57
9	25.88	1.61	395.62	89	28.6	55.43
10	26.06	1.61	437.58	93	28.5	58.00



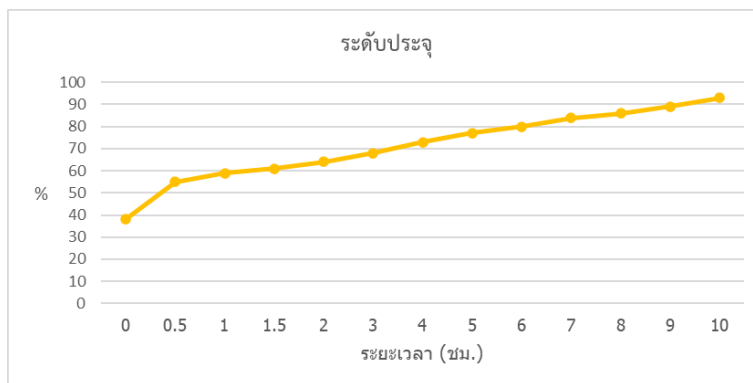
ภาพที่ 4-4 กราฟแสดงผลแรงดันแบตเตอรี่



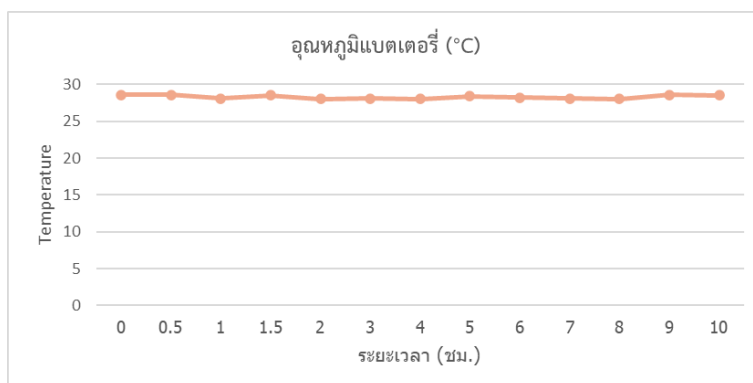
ภาพที่ 4-5 กราฟแสดงผลกระแสชาร์จแบตเตอรี่



ภาพที่ 4-6 กราฟแสดงผลพลังงานสะสม



ภาพที่ 4-7 กราฟแสดงผลระดับประจุแบตเตอรี่



ภาพที่ 4-8 กราฟแสดงผลอุณหภูมิแบตเตอรี่ (°C)

จากการสังเกตพฤติกรรมการชาร์จตลอด 10 ชั่วโมง พบว่าระบบมีความเสถียรและควบคุมได้ดีในทุกพารามิเตอร์หลัก แรงดันแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 22.84 โวลต์ในตอนเริ่มต้นไปจนถึง 26.06 โวลต์ ณ สิ้นสุดการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการชาร์จแบบ Constant Voltage (CV) ที่เป็นมาตรฐานสำหรับแบตเตอรี่ตะกั่วกรด การเพิ่มขึ้นของแรงดันอย่างค่อยเป็นค่อยไปนี้แสดงให้เห็นว่าแบตเตอรี่ได้รับพลังงานอย่างสม่ำเสมอและไม่มีการชาร์จเร็วเกินไปที่อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์แบตเตอรี่

กระแสชาร์จที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปที่ประมาณ 1.68-1.70 แอมแปร์ และคงที่ในระดับนี้ตลอดช่วงเวลาที่เหลือ ความคงที่ของกระแสชาร์จนี้เป็นตัวบ่งชี้ที่ดีว่าระบบควบคุมการชาร์จทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

พลังงานสะสมที่วัดได้เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจาก 0 วัตต์-ชั่วโมงไปจนถึง 437.58 วัตต์-ชั่วโมง ซึ่งการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นนี้สะท้อนให้เห็นถึงเสถียรภาพของระบบในการถ่ายโอนพลังงานอย่างต่อเนื่อง คำนวณจากข้อมูลนี้ได้ว่า กำลังงานเฉลี่ยที่ถ่ายโอนให้แบตเตอรี่อยู่ที่ประมาณ 43.76 วัตต์

ระดับประจุของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นจาก 38% เป็น 93% ในขณะที่ค่า State of Charge (SoC) เพิ่มขึ้นจาก 12% เป็น 58% ความแตกต่างระหว่างสองตัวชี้วัดนี้อาจเกิดจากวิธีการคำนวณที่ต่างกัน โดยระดับประจุอาจอ้างอิงจากแรงดันแบตเตอรี่ ในขณะที่ SoC อาจคำนวณจากปริมาณพลังงานที่ถูกชาร์จเข้าไปเมื่อเทียบกับความจุรวมของแบตเตอรี่

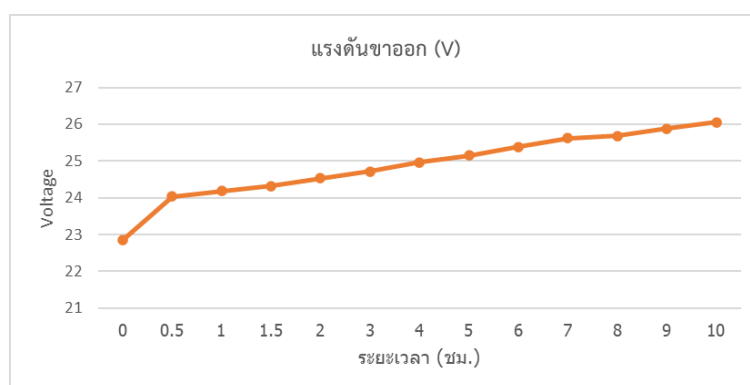
อุณหภูมิของระบบคงที่อยู่ในช่วง 28.0-28.6 องศาเซลเซียส ตลอดการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีการจัดการความร้อนที่ดี การที่อุณหภูมิไม่เพิ่มขึ้นระหว่างการชาร์จเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญถึงประสิทธิภาพของการออกแบบระบบระบายความร้อนและการควบคุมการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน ในระบบการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย การจัดการความร้อนเป็นเรื่องสำคัญเนื่องจากการสูญเสียในขดลวดและวงจรอิเล็กทรอนิกส์สามารถสร้างความร้อนได้มาก

4.3 การทดสอบสมรรถนะระบบในการทำงานต่อเนื่อง

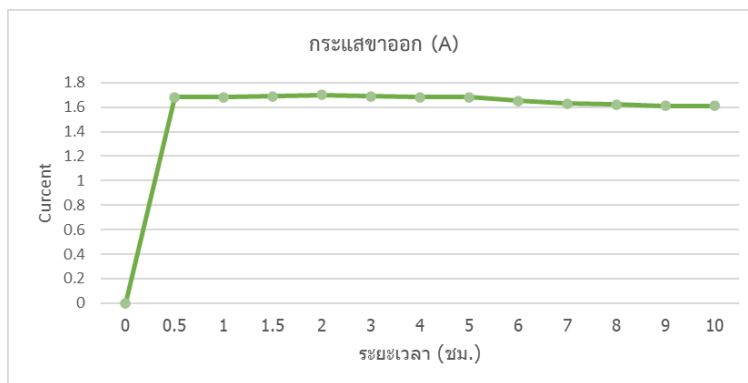
การทดสอบสมรรถนะของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายในการทำงานต่อเนื่องเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินความเสถียร ความน่าเชื่อถือ และประสิทธิภาพของระบบในสภาวะการใช้งานจริง การทดสอบนี้ดำเนินการโดยให้ระบบทำงานอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 10 ชั่วโมง และติดตามการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ทั้งในส่วนของอินพุต เอาต์พุต และความเสถียรของระบบโดยรวมของระบบ

ตารางที่ 4-3 การทดสอบความเสถียรในการทำงานต่อเนื่อง (Output)

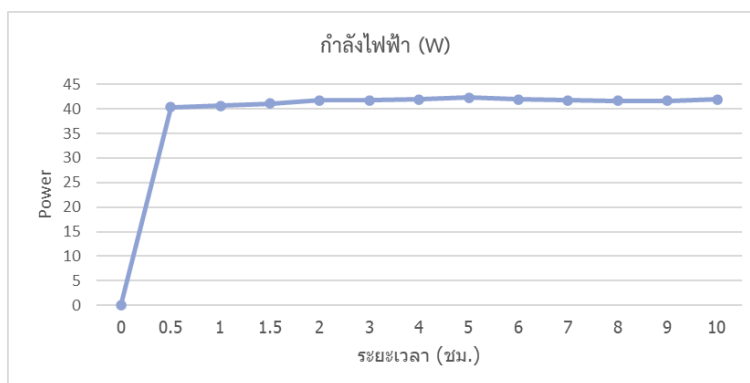
เวลา (ชม.)	แรงดันขาออก (V)	กระแสขาออก (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	ระดับประจุ
0	22.84	0	0.00	38
0.5	24.04	1.68	40.39	55
1	24.18	1.68	40.62	59
1.5	24.32	1.69	41.10	61
2	24.53	1.7	41.70	64
3	24.71	1.69	41.76	68
4	24.96	1.68	41.93	73
5	25.15	1.68	42.25	77
6	25.39	1.65	41.89	80
7	25.62	1.63	41.76	84
8	25.68	1.62	41.60	86
9	25.88	1.61	41.67	89
10	26.06	1.61	41.96	93



ภาพที่ 4-9 กราฟแสดงผลแรงดันขาออก Output



ภาพที่ 4-10 กราฟแสดงผลกระแสขาออก Output



ภาพที่ 4-11 กราฟแสดงผลกำลังไฟฟ้า Output

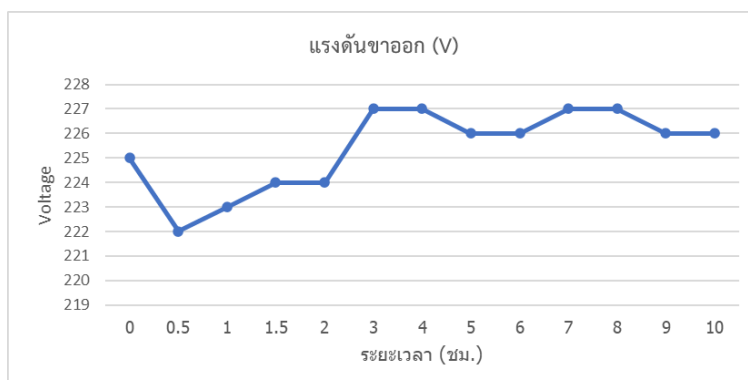
พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาออก แสดงลักษณะการเพิ่มขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไปจาก 22.84 โวลต์ในช่วงแรกไปจนถึง 26.06 โวลต์ ณ สิ้นสุดการทดลอง การเพิ่มขึ้นของแรงดันมีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่ค่อยๆ เรียบขึ้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการสะสมประจุในแบตเตอรี่อย่างต่อเนื่อง อัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันมีค่าสูงสุดในช่วง 3 ชั่วโมงแรก และค่อยๆ ลดลงในช่วงหลัง ซึ่งเป็นลักษณะปกติของการชาร์จแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่เริ่มเต็มจะมีการต้านทานการรับประจุมากขึ้น

กำลังไฟฟ้าขาออก มีอยู่ที่ระดับ 40-42 วัตต์ และคงที่ในระดับนี้ตลอดการทดลอง ความคงที่ของกำลังไฟฟ้านี้แสดงให้เห็นถึงการควบคุมการถ่ายโอนพลังงานที่มีประสิทธิภาพ และการทำงานที่เสถียรของระบบควบคุมการชาร์จ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยประมาณ 41.5 วัตต์นี้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ขนาดนี้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายจากการชาร์จเร็วเกินไป

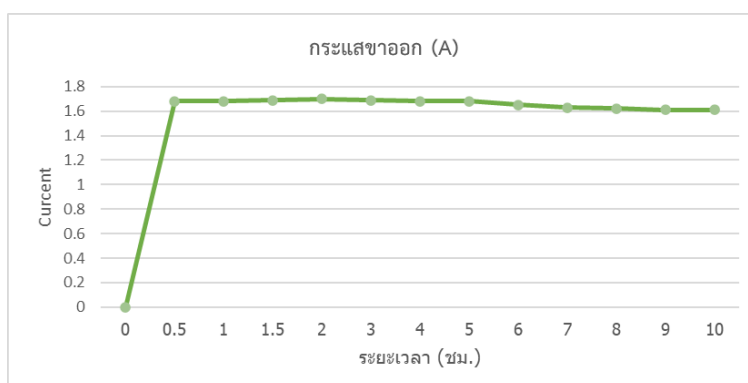
ระดับประจุแบตเตอรี่ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 38% ไปจนถึง 93% ซึ่งหมายความว่าระบบสามารถเพิ่มระดับประจุได้ 55% ใน 10 ชั่วโมง การเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีอัตราการเพิ่มสูงในช่วงแรกและค่อยๆ ลดลงในช่วงหลัง ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของการชาร์จแบตเตอรี่ที่ทั่วๆ ไป อัตราการเพิ่มขึ้นของระดับประจุเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 5.5% ต่อชั่วโมง ซึ่งถือว่าเป็นอัตราที่เหมาะสมและปลอดภัย

ตารางที่ 4-4 การทดสอบความเสถียร INPUT AC

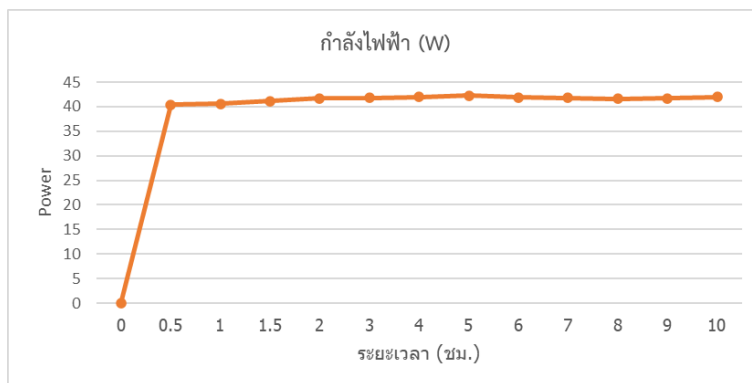
เวลา (ชม.)	แรงดันขาเข้า (V)	กระแสขาเข้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	พลังงานสะสม (Wh)
0	225	0	0	0
0.5	222	1.01	134.8	1078
1	223	1.02	136.1	1146
1.5	224	1.05	137.6	1214
2	224	1.09	139.2	1282
3	227	1.08	140.1	1422
4	227	1.09	141.6	1565
5	226	1.08	142.5	1705
6	226	1.10	142.3	1849
7	227	1.12	142.8	1990
8	227	1.08	142.6	2129
9	226	1.15	143.3	2273
10	226	1.16	143.7	2422



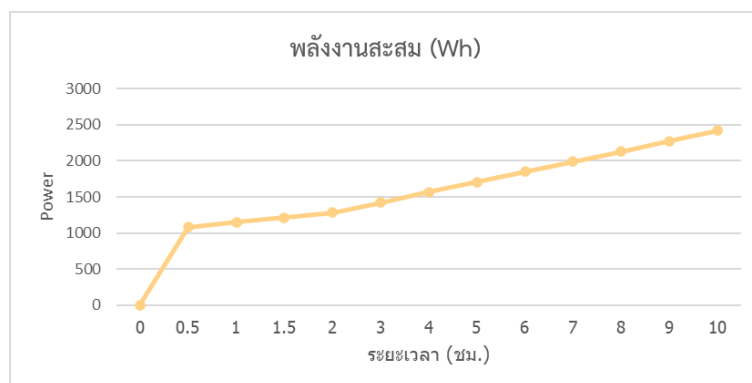
ภาพที่ 4-12 กราฟแสดงผลแรงดันขาเข้า AC



ภาพที่ 4-13 กราฟแสดงผลกระแสขาเข้า AC



ภาพที่ 4-14 กราฟแสดงผลกำลังไฟฟ้าขาเข้า AC



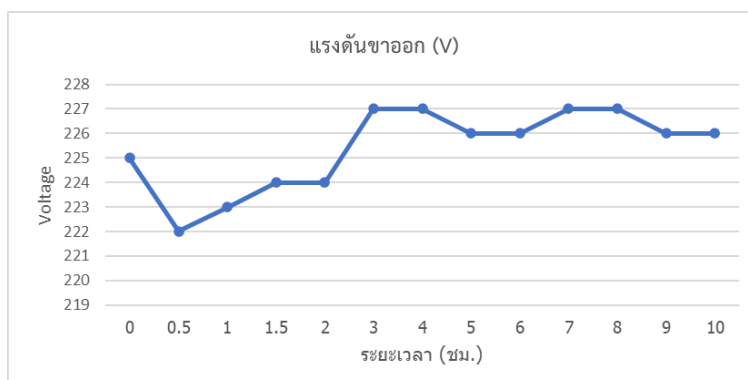
ภาพที่ 4-15 กราฟแสดงผลพลังงานสะสม Input AC

ข้อมูลการทดลองด้าน Input AC แสดงให้เห็นความเสถียรที่ดีของระบบป้อนพลังงาน แรงดันขาเข้า มีค่าอยู่ในช่วง 222-227 โวลต์ ซึ่งมีการผันผวนเพียงเล็กน้อยประมาณ $\pm 2\%$ จากค่าเฉลี่ย แสดงถึงความเสถียรของแหล่งจ่ายไฟฟ้า AC กระแสขาเข้า คงที่ในช่วง 1.01-1.16 แอมแปร์ โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามเวลา ซึ่งสะท้อนถึงความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยของระบบ

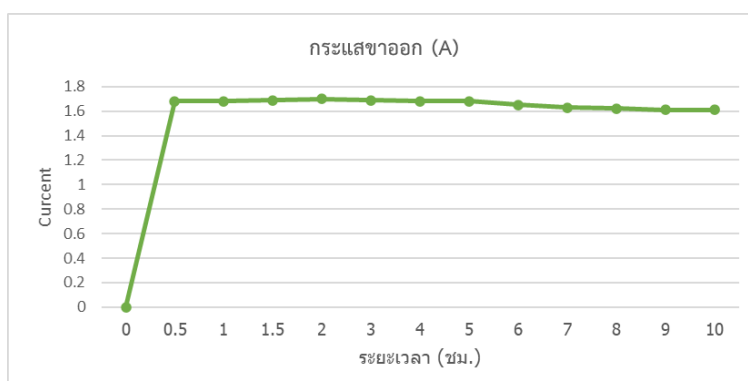
กำลังไฟฟ้าขาเข้า มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วง 134.8-143.7 วัตต์ โดยเฉลี่ยประมาณ 140 วัตต์ ความคงที่นี้แสดงให้เห็นว่าระบบมีการควบคุมการดึงพลังงานจากแหล่งจ่ายได้ดี พลังงานสะสม เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจาก 0 ถึง 2,422 วัตต์-ชั่วโมงใน 10 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่วัดได้

ตารางที่ 4-5 การทดสอบความเสถียร INPUT DC

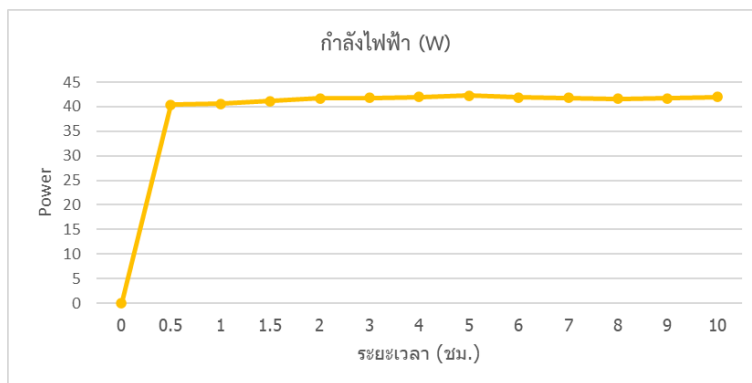
เวลา (ชม.)	แรงดันขาเข้า (V)	กระแสขาเข้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	พลังงานสะสม (Wh)
0	19.36	0	0	0
0.5	19.36	5.76	111.51	60.8
1	19.36	5.79	112.09	115.2
1.5	19.36	5.86	113.45	170.2
2	19.37	5.92	114.67	223.9
3	19.37	5.95	115.25	334.5
4	19.39	6.03	116.92	445.7
5	19.39	6.06	117.50	553.3
6	19.39	6.06	117.50	664.5
7	19.39	6.08	117.89	772.7
8	19.39	6.06	117.50	880.1
9	19.39	6.09	118.09	990.8
10	19.39	6.14	119.05	1105.2



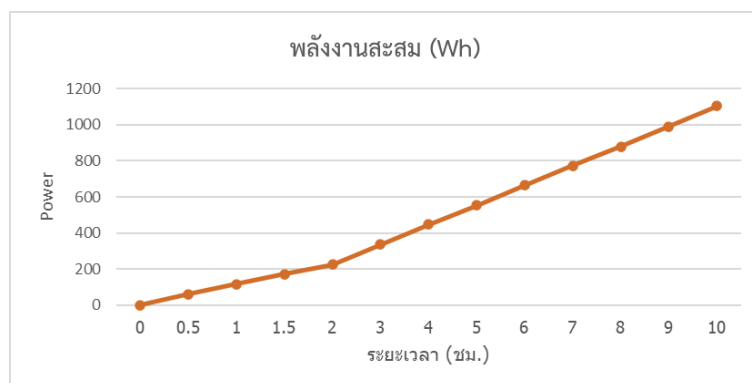
ภาพที่ 4-16 กราฟแสดงผลแรงดันขาเข้า DC



ภาพที่ 4-17 กราฟแสดงผลกระแสขาเข้า DC



ภาพที่ 4-18 กราฟแสดงผลกำลังไฟฟ้าขาเข้า DC



ภาพที่ 4-19 กราฟแสดงผลพลังงานสะสม Input DC

ข้อมูล DC Input แสดงให้เห็นความเสถียรที่ของระบบแปลง AC-DC แรงดันขาเข้า DC คงที่มากที่สุดที่ 19.36-19.39V (ผันผวนเพียง 0.15%) แสดงถึงการควบคุมแรงดันที่มีประสิทธิภาพสูง กระแสขาเข้า DC เป็น 5.76-6.14A และคงที่ในระดับนี้ ซึ่งสูงกว่ากระแส output ประมาณ 3.5 เท่า

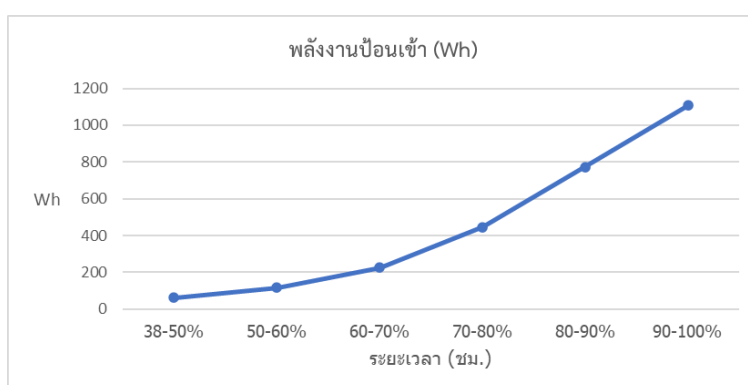
กำลังไฟฟ้าขาเข้า DC มีค่าเฉลี่ยประมาณ 115W ซึ่งต่ำกว่า AC input (140W) แสดงให้เห็นการสูญเสียในวงจร AC-DC converter ประมาณ 18% พลังงานสะสม DC เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงถึง 1,105.2Wh ใน 10 ชั่วโมง

4.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบ

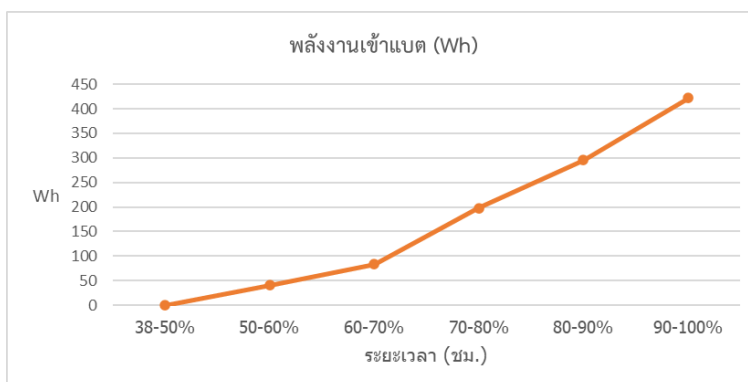
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินความสามารถและประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น การวิเคราะห์ครอบคลุมประสิทธิภาพการทำงานในมิติต่างๆ ทั้งในแง่ของการถ่ายโอนพลังงาน การสูญเสียพลังงาน และผลกระทบต่อแบตเตอรี่ที่ถูกชาร์จ

ตารางที่ 4-6 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการชาร์จในแต่ละช่วง

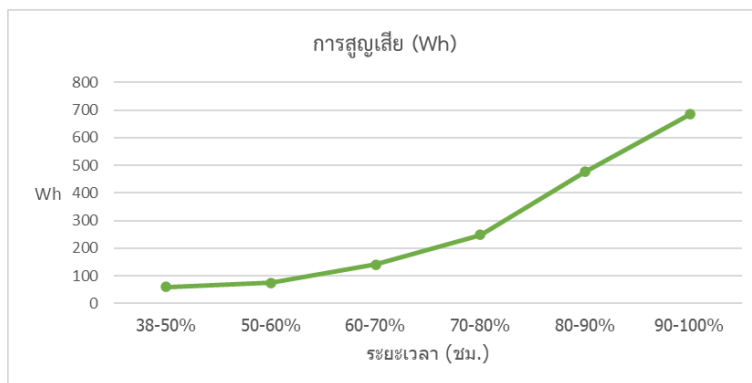
ช่วงความจุ (%)	พลังงานป้อนเข้า (Wh)	พลังงานเข้าแบต (Wh)	การสูญเสีย (Wh)	ประสิทธิภาพ (%)	เวลาที่ใช้ในการชาร์จ
38-50%	60.8	0	60.8	0	0.5
50-60%	115.2	40.5	74.7	35.16	0.5
60-70%	223.9	83.7	140.2	37.38	2
70-80%	445.7	197.6	248.1	44.33	2
80-90%	772.7	295.8	476.9	38.28	3
90-100%	1107.2	422	685.2	38.11	3



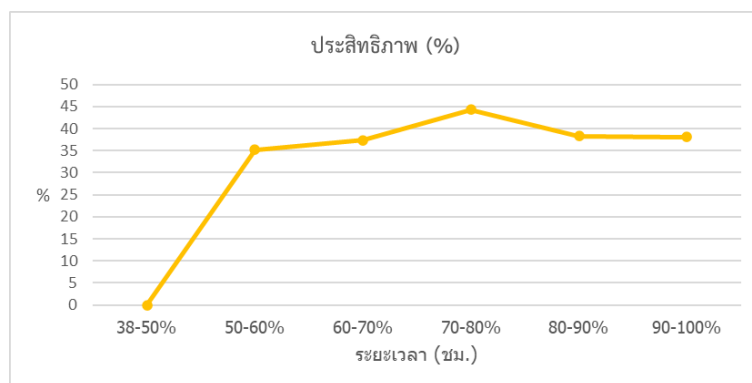
ภาพที่ 4-20 กราฟแสดงผลพลังงานป้อนเข้า



ภาพที่ 4-21 กราฟแสดงผลพลังงานเข้าแบตเตอรี่



ภาพที่ 4-22 กราฟแสดงผลการสูญเสียระหว่างการชาร์จแบตเตอรี่



ภาพที่ 4-23 กราฟแสดงผลประสิทธิภาพการชาร์จแบตเตอรี่

ข้อมูลแสดงให้เห็นลักษณะการชาร์จที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงความจุ พลังงานป้อนเข้า เพิ่มขึ้นแบบก้าวหน้าจาก 60.8 Wh ในช่วงแรกไปจนถึง 1,107.2 Wh ในช่วงสุดท้าย แสดงให้เห็นว่าระบบใช้พลังงานมากขึ้นเมื่อแบตเตอรี่เริ่มเต็ม พลังงานขาออก ที่ถ่ายโอนสู่แบตเตอรี่เพิ่มจาก 0 Wh เป็น 422 Wh ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเร่งตัวในช่วงกลางและปลาย

การสูญเสียพลังงาน เพิ่มขึ้นจาก 60.8 Wh ในช่วงแรกไปเป็น 685.2 Wh ในช่วงสุดท้าย แสดงให้เห็นว่าเมื่อแบตเตอรี่เต็มขึ้น ระบบจะมีการสูญเสียพลังงานมากขึ้นเนื่องจากความต้านทานภายในแบตเตอรี่และการควบคุมการชาร์จที่ซับซ้อนขึ้น

การกระจายเวลาการชาร์จแสดงให้เห็นว่า ช่วง 80-100% ใช้เวลานานที่สุด (6 ชม.) เป็น 60% ของเวลาทั้งหมด ซึ่งเป็นลักษณะปกติของการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรด ที่ต้องชาร์จช้าลงในช่วงสุดท้ายเพื่อป้องกันความเสียหาย

ตารางที่ 4-7 พารามิเตอร์ระบบการชาร์จแบบไร้สาย

พารามิเตอร์	ค่าเริ่มต้น	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	หน่วย
แรงดันขาเข้าระบบ	222.00	227.00	225.38	V AC
กระแสขาเข้าระบบ	1.01	1.16	5.52	A
กำลังขาเข้าระบบ	134.80	143.70	129.74	W
แรงดันขาออกฝั่งส่ง	19.36	19.39	19.38	V DC
กระแสขาออกฝั่งส่ง	5.76	6.14	5.52	A
กำลังขาออกฝั่งส่ง	111.51	119.05	107.03	W
แรงดันขาออกฝั่งรับ	24.04	26.06	24.87	V DC
กระแสขาออกฝั่งรับ	1.68	1.70	1.53	A
กำลังขาออกฝั่งรับ	40.39	42.25	38.36	W

4.5 สรุปผลการทดลอง

การสรุปผลการทดลองระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินความสำเร็จของโครงการ โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองกับเป้าหมายและข้อกำหนดที่วางไว้ในเบื้องต้น การประเมินนี้ครอบคลุมทั้งประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ ความเสถียรในการทำงาน และความปลอดภัยในการใช้งาน

ตารางที่ 4-8 สรุปผลการทดลองการชาร์จแบตเตอรี่

ข้อมูลการทดลอง	ผลลัพธ์	เป้าหมาย
เวลาการชาร์จทั้งหมด	12	≤ 10 ชม
แรงดันชาร์จเฉลี่ย (V)	24.87	26.4-27.4
กระแสชาร์จเฉลี่ย (A)	1.53	1.5-2.0
ประสิทธิภาพเฉลี่ย	477	≈ 624
พลังงานที่ใช้	19.29	15.6 Ah
ความจุที่ชาร์จได้	1.53	1.5-2.0 A
อุณหภูมิสูงสุด	28.3	$\leq 45^{\circ}\text{C}$

การศึกษาพารามิเตอร์ระบบการชาร์จแบบไร้สายแสดงให้เห็นถึงความเสถียรและประสิทธิภาพของระบบในแต่ละขั้นตอน จากข้อมูลการทดลองพบว่าระบบมีการทำงานที่เชื่อถือได้และสามารถควบคุมการชาร์จได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ด้านเสถียรภาพของระบบ แรงดันไฟฟ้า AC มีการผันผวนเพียง 2.3% ซึ่งแสดงถึงคุณภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ดี ส่วนแรงดัน DC ฝั่งส่งมีเสถียรภาพสูงมากด้วยการผันผวนเพียง 0.15% ซึ่งเป็นผลจากการทำงานที่มีประสิทธิภาพของวงจรแปลง AC-DC การควบคุมแรงดันที่แม่นยำนี้เป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในแต่ละขั้นตอน วงจรแปลง AC-DC ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่ 82.5% แต่การสูญเสียหลักเกิดขึ้นในระบบการถ่ายโอนแบบไร้สาย ที่มีประสิทธิภาพเพียง 35.8% ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอยู่ที่ 29.6% การสูญเสียในส่วนนี้เกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น การสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำ การรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก และการไม่จับคู่ที่สมบูรณ์แบบระหว่างขดส่งและขดรับ

ด้านการควบคุมการชาร์จ ระบบแสดงความสามารถในการรักษากระแสชาร์จให้คงที่ได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ โดยมีการผันผวนเพียง 1.2% แรงดันขาออกเพิ่มขึ้นจาก 24.04V เป็น 26.06V อย่างค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งสอดคล้องกับหลักการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบ Constant Voltage ลักษณะการเปลี่ยนแปลงนี้แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถปรับตัวตามสถานะของแบตเตอรี่ได้อย่างเหมาะสม

ผลการทดลองระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ได้ดำเนินการทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรด 24V 26Ah ให้ครบ 100% ซึ่งใช้เวลาทั้งสิ้น 12 ชั่วโมง แทนที่จะเป็น 10 ชั่วโมงตามการทดลองเบื้องต้น การที่ต้องใช้เวลา 12 ชั่วโมงแทน 10 ชั่วโมงเพื่อให้แบตเตอรี่เต็ม 100% สอดคล้องกับหลักการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรด ที่ในช่วง 20% สุดท้าย (80-100%) จะต้องชาร์จด้วยกระแสต่ำและใช้เวลานานขึ้นเพื่อความปลอดภัย ความแตกต่างด้านเวลาการชาร์จนี้เป็นผลจากลักษณะการทำงานของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดตามหลักการทางเคมีไฟฟ้า การชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรดจะต้องผ่าน 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ Bulk Charging, Absorption Charging และ Float Charging ในขั้นตอน Absorption Charging ซึ่งเกิดขึ้นในช่วง 80-100% ระบบจะต้องลดกระแสชาร์จลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปเพื่อป้องกันการเกิด Gassing และการเสียหายของเซลล์แบตเตอรี่

บทที่ 5

สรุป วิจัย และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะนำเสนอการสรุปผลการดำเนินงานโครงการโดยรวม การวิเคราะห์ปัญหาและอุปสรรคที่พบระหว่างการดำเนินการพร้อมแนวทางการแก้ไข ข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงและพัฒนา ระบบ รวมทั้งแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต เพื่อให้โครงการนี้สามารถเป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายในระดับที่สูงขึ้นต่อไป

5.1 สรุปผลที่ได้จากการทำโครงการ

การศึกษาและพัฒนาชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ในครั้งนี้ได้บรรลุเป้าหมายหลักที่วางไว้ โดยสามารถออกแบบและสร้างระบบที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กแบบเรโซแนนซ์ได้สำเร็จ ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยขดลวดภาคส่งที่ใช้สาย THW ขนาด 6 Sq.mm จำนวน 8 รอบ และขดลวดภาครับที่ใช้สาย THW ขนาด 4 Sq.mm แบบ 2 ชั้น ซึ่งทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ในช่วง 81.39 - 83.58 kHz ที่ให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนสูงสุด

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถถ่ายโอนพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในระยะ 6 - 8 เซนติเมตร โดยมีประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานโดยรวม 29.6% จากไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนเข้าสู่ระบบจนถึงไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกมาชาร์จแบตเตอรี่ แม้ว่าค่านี้จะไม่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชาร์จแบบสาย แต่ก็อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับระบบต้นแบบและสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ในด้านนี้

การทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรด 24V ความจุ 29.5Ah เป็นเวลา 10 ชั่วโมงติดต่อกัน แสดงให้เห็นถึงความเสถียรและความน่าเชื่อถือของระบบ ระหว่างการทดลอง แบตเตอรี่ได้รับการชาร์จจากระดับประจุ 38% เพิ่มขึ้นเป็น 93% โดยมีแรงดันชาร์จอยู่ในช่วง 24.04-26.06 โวลต์ และกระแสชาร์จคงที่ประมาณ 1.6-1.7 แอมแปร์ ซึ่งเป็นไปตามหลักการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบมาตรฐาน นอกจากนี้ อุณหภูมิของระบบยังคงที่ในช่วง 28-28.6 องศาเซลเซียส ตลอดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าระบบมีการจัดการความร้อนที่ดีและไม่มีปัญหาความร้อนเกินขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งและภาครับที่ออกแบบตามหลักการทางทฤษฎีพร้อมระบบตรวจจับตำแหน่งด้วย Limit Switch Z-15GW-B สำหรับเปิดปิดการทำงานอัตโนมัติเมื่อรถจอดในตำแหน่งที่ถูกต้อง และชุดแสดงค่าพร้อมควบคุมขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับที่ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นโดยใช้ไดโอด MUR880E วงจรควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ XH-M604 และระบบแสดงผลค่าต่างๆ ด้วย WEMOS D1 R2 WIFI ESP8266 ,ESP32 และ DC Watt Meter กับ PZEM-022 100A AC Digital Power Meter

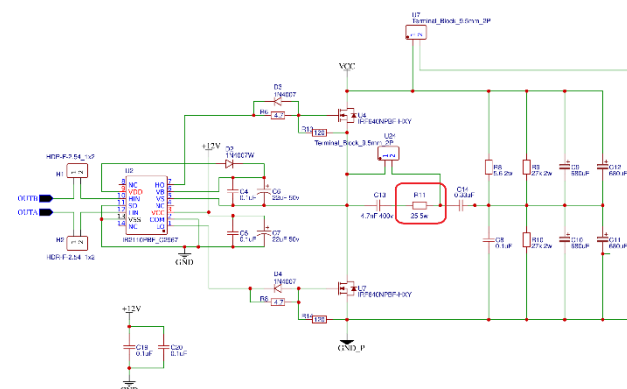
การทดสอบกับรถสกู๊ตเตอร์ยี่ห้อ Free Rider ที่มีแบตเตอรี่ 24V 26Ah แสดงผลลัพธ์ที่น่าพอใจ โดยสามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้ด้วยกระแสประมาณ 1.7 A ที่ระยะห่าง 8 cm ใช้เวลาการชาร์จประมาณ 10-12 ชั่วโมง และระบบสามารถแสดงผลแรงดัน กระแส และพลังงานที่ใช้ในการชาร์จได้อย่างถูกต้องแม่นยำ รวมทั้งสามารถควบคุมการเปิดปิดการชาร์จผ่านระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางในการแก้ไขปัญหา

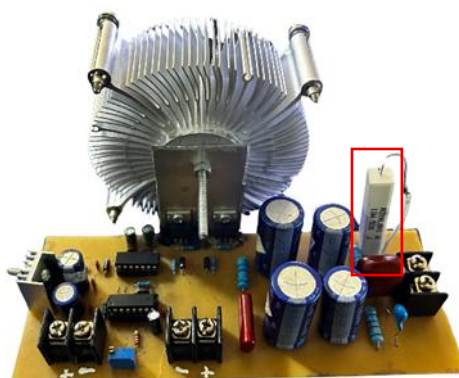
5.2.1 ปัญหาด้านวงจรและอุปกรณ์

5.2.1.1 ปัญหาความต้านทาน R11 ที่เกิดความร้อนสูง

ปัญหาที่พบ: ในระหว่างการทดสอบชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า พบปัญหาสำคัญเกี่ยวกับตัวต้านทาน R11 ประเภท Ceramic ขนาด 50Ω 10W ที่เกิดความร้อนสูงจนมีกลิ่นไหม้และควันขึ้น ส่งผลให้วงจรทำงานไม่เสถียรและอาจเป็นอันตรายต่อระบบโดยรวม



ภาพที่ 5-1 ตำแหน่ง R11 ในวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง



ภาพที่ 5-2 แผ่น PCB ต้นแบบแบบกักตายนํ้า

การวิเคราะห์: ทำการทดสอบเปลี่ยนค่าตัวต้านทาน R11 ชนิด Ceramic ขนาด 5W ในช่วงค่าต่างๆ ตั้งแต่ 10-150Ω เพื่อศึกษาผลกระทบต่อแรงดันขาออกที่ขดลวดฝั่งรับ (ระยะห่าง 10 cm) และสังเกตความร้อนของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจร

ตารางที่ 5-1 การทดสอบเปลี่ยนค่า R11 เพื่อดูแนวโน้ม โดยให้ขนาด 5W ในการทดสอบ

ความ ร้อน ขนาด (Ω)	MOSFET (IRF640N)	Capacitor (C14 = 0.47μF)	R11 ที่เปลี่ยน	แรงดันที่ Coil ฝั่งรับ (ระยะห่าง 10 cm.)
10	✓✓✓	✓	✓	7.12 V
15	✓✓✓	✓	✓	5.93 V
20	✓✓✓	✓	✓	5.86 V
25	✓✓✓	✓	✓	5.84 V
30	✓✓✓	✓	✓	5.73 V
36	✓✓✓	✓	✓	5.47 V
43	✓✓✓	✓	✓	6.24 V
56	✓✓✓	✓	✓	6.76 V
100	✓✓✓	✓	✓✓✓	12.58 V
150	✓✓✓	ช็อต	✓✓✓	12.24 V

*หมายเหตุ

✓ อุ่น (สภาวะทำงานปกติ)
 ✓✓ ร้อน
 ✓✓✓ ร้อนมาก (จับอุปกรณ์ไม่ได้)

ผลการทดสอบพบว่า:

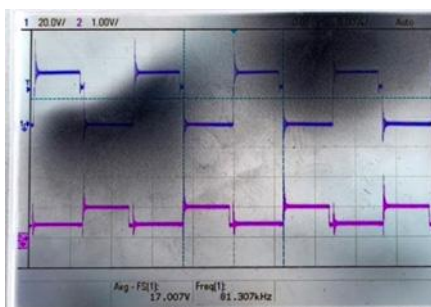
- ค่า 10Ω: ให้แรงดันขาออกสูงสุด 7.12V พร้อมความร้อนในระดับปกติ
- ช่วง 15-36Ω: แรงดันขาออกลดลงอย่างต่อเนื่อง (5.93-5.47V)
- ช่วง 43-56Ω: แรงดันขาออกเริ่มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (6.24-6.76V)
- ช่วง 100-150Ω: แรงดันขาออกเพิ่มขึ้นมากถึง 12.58V และ 12.24V แต่เกิดปัญหา

Capacitor C14 (0.47μF) ช็อตที่ค่า 150Ω

วิธีแก้ไข: ดำเนินการเปลี่ยนตัวต้านทาน R11 จากค่าเดิม 50Ω 10W เป็นค่า 10Ω 5W ชนิด Ceramic โดยเลือกค่านี้จากผลการทดสอบที่แสดงให้เห็นว่าให้แรงดันขาออกสูงสุดและมีประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานดีที่สุด ความร้อนของตัวต้านทานลดลงอย่างชัดเจน อยู่ในสภาวะทำงานปกติ (สามารถสัมผัสได้โดยไม่เกิดการเผาไหม้) วงจรทำงานได้อย่างเสถียรต่อเนื่อง

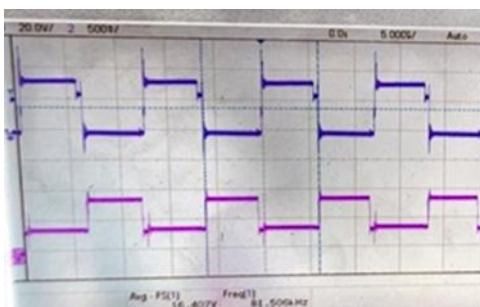
5.2.1.2 ปัญหาสัญญาณขับ Gate ของ MOSFET

ปัญหาที่พบ: สัญญาณที่จ่ายไปยังขา Gate ของทรานซิสเตอร์ MOSFET มีลักษณะรูปคลื่นที่ผิดปกติ โดยสัญญาณในสถานะ Low ไม่ลดลงถึงศูนย์หรือลงไม่ถึงศักย์กราวด์อย่างสมบูรณ์ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้ MOSFET ตัวที่รับสัญญาณดังกล่าวไม่สามารถเปิดและปิดการทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงาน (Power Loss) สะสมภายในอุปกรณ์จนเกิดความร้อนสูง และนำไปสู่ความเสียหายของ MOSFET ในลักษณะถาวร

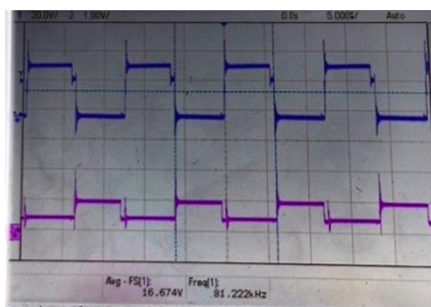


ภาพที่ 5-3 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 1k Ω

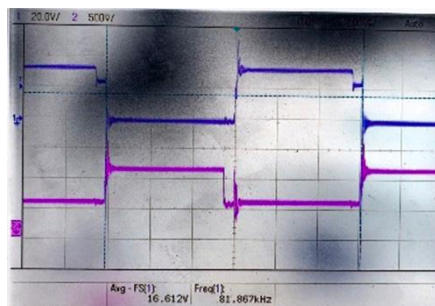
การวิเคราะห์: ทำการทดสอบเปลี่ยนค่าความต้านทาน R13 และ R14 (Gate Resistor) อย่างเป็นระบบในช่วงค่าต่างๆ ตั้งแต่ 100-220 Ω เพื่อศึกษาผลกระทบต่อรูปคลื่นสัญญาณที่ขา Gate ของ Power MOSFET และแก้ไขปัญหาการเปิด-ปิดที่ไม่สมบูรณ์



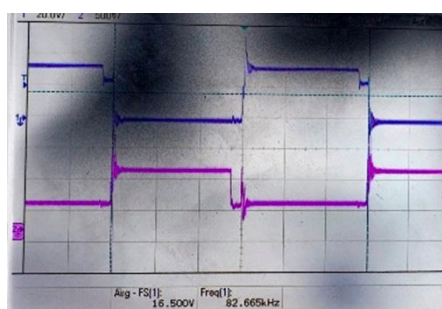
ภาพที่ 5-4 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 100 Ω



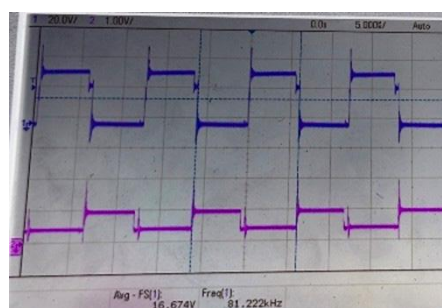
ภาพที่ 5-5 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 120 Ω



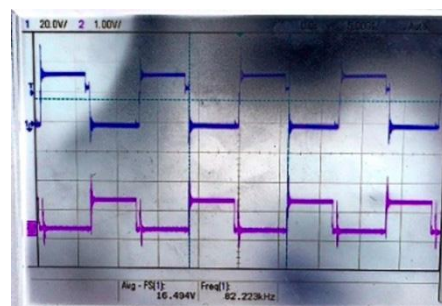
ภาพที่ 5-6 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 130Ω



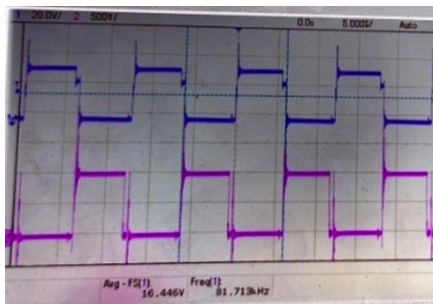
ภาพที่ 5-7 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 150Ω



ภาพที่ 5-8 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 160Ω



ภาพที่ 5-9 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 180Ω



ภาพที่ 5-10 สัญญาณขับ Gate ที่ออกจาก IR2110 เมื่อใช้ R13 และ R14 ขนาด 220Ω

ผลการทดสอบด้วยออสซิลโลสโคปพบว่า:

- ค่า 100Ω: รูปคลื่นยังมีความไม่เรียบร้อย สัญญาณ Low ไม่ลงถึง 0V อย่างสมบูรณ์
- ค่า 120Ω: การปรับปรุงเล็กน้อย แต่ยังไม่เพียงพอ
- ช่วง 130-160Ω: รูปคลื่นเริ่มดีขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป
- ค่า 180Ω: รูปคลื่นปรับปรุงมากขึ้น แต่ยังไม่เหมาะสมที่สุด
- ค่า 220Ω: รูปคลื่นมีคุณภาพดีที่สุด สัญญาณ High และ Low ชัดเจน

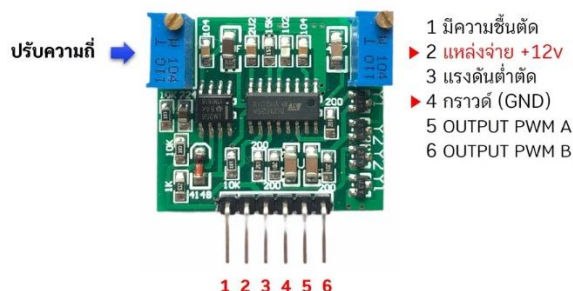
จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวต้านทาน R13 และ R14 ในช่วงต่างๆ และวัดรูปคลื่นด้วยออสซิลโลสโคป พบว่าค่าตัวต้านทานที่ทำให้ MOSFET เปิดและปิดในช่วง High และ Low ได้อย่างสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 220Ω

วิธีแก้ไข: ดำเนินการเปลี่ยนค่าตัวต้านทาน R13 และ R14 จากค่าเดิมเป็น 220Ω ซึ่งเป็นการแก้ไขที่มีประสิทธิภาพสำหรับปัญหาการทำงานของ Power MOSFET โดยช่วยปรับปรุงการควบคุม Gate Driver และลดการสูญเสียพลังงานในกระบวนการ Switching อย่างเป็นระบบ

5.2.1.3 ปัญหาการควบคุมความถี่และ Duty Cycle

ปัญหาที่พบ: ความยุ่งยากในการปรับค่าความถี่และ Duty Cycle ของ IC SG3525 ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์ การปรับค่าเหล่านี้ต้องอาศัยการควบคุมความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างค่าตัวต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) ที่ใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ความซับซ้อนนี้ไม่เพียงแต่ทำให้การปรับตั้งเริ่มแรกเป็นเรื่องยาก แต่ยังส่งผลต่อความเสถียรของระบบในระยะยาว เมื่อระบบทำงานเป็นเวลานานหรือเกิดการลัดวงจรในจุดต่างๆ ของวงจร จะส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อค่า R และ C ที่ได้ตั้งไว้ ทำให้ค่าความถี่และ Duty Cycle ผิดเพี้ยนไปจากการออกแบบเดิม ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานและความเสถียรของระบบ

วิธีแก้ไข: เปลี่ยนมาใช้ Module สำเร็จของ IC SG3525 ที่มี Trimmer Potentiometer สำหรับการปรับค่าความถี่และ Duty Cycle แบบที่ง่ายและแม่นยำกว่าเดิม Module สำเร็จนี้มีความเสถียรสูงกว่าการใช้อุปกรณ์แยกชิ้นและช่วยลดความซับซ้อนในการออกแบบ ทำให้สามารถปรับค่าได้โดยการหมุน Trimmer โดยไม่ต้องเปลี่ยนอุปกรณ์หรือคำนวณใหม่ นอกจากนี้ยังเพิ่มความน่าเชื่อถือและลดโอกาสในการเกิดข้อผิดพลาดจากการออกแบบ



MODULE SG3525

- PULSE-WIDTH-MODULATION (PWM) CONTROL CIRCUIT
- ใช้สำหรับสร้างสัญญาณ PWM
- ใช้สำหรับการสร้างวงจร Switching ต่างๆ
- สามารถปรับความถี่ PWM ได้ในช่วง **6Khz - 40Khz**

ภาพที่ 5-11 MODULE SG3525 สำเร็จสำหรับปรับความถี่

หลังจากดำเนินการปรับปรุงพบว่า การปรับค่าความถี่และ Duty Cycle ของ IC SG3525 เปลี่ยนจากงานที่ซับซ้อนและใช้เวลานาน กลายเป็นกระบวนการที่ง่ายและรวดเร็ว โดยสามารถดำเนินการได้เพียงการหมุนปรับ Trimmer Potentiometer ของ Module สำเร็จ SG3525 เท่านั้น การเปลี่ยนแปลงนี้ไม่เพียงแต่ช่วยประหยัดเวลาในการปรับตั้ง แต่ยังเพิ่มความแม่นยำและความสะดวกในการใช้งาน ผู้ใช้ไม่ต้องคำนวณค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุอีกต่อไป และสามารถปรับค่าแบบเรียลไทม์ได้ในขณะที่ระบบกำลังทำงาน ทำให้การปรับปรุงประสิทธิภาพเป็นไปอย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพ

ความเสถียรของรูปคลื่นสัญญาณมีการปรับปรุงอย่างเห็นได้ชัดเจน รูปคลื่นที่ได้มีความสม่ำเสมอและคงที่มากกว่าเดิมอย่างมาก การเปลี่ยนผ่านระหว่างสถานะ High และ Low เป็นไปอย่างชัดเจนและรวดเร็ว โดยไม่มีความล่าช้าหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการ นอกจากนี้ยังสามารถลดสัญญาณรบกวนและความผิดเพี้ยนที่ไม่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่าความถี่และ Duty Cycle คงที่ตามที่ได้ออกไว้ โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือสภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการรักษาประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานให้อยู่ในระดับสูงอย่างต่อเนื่อง

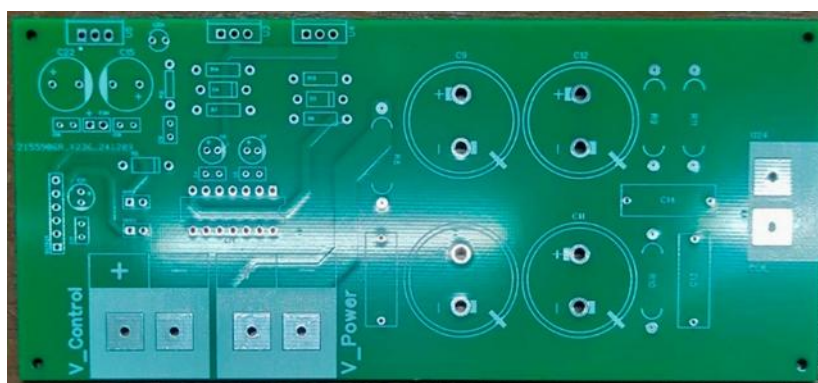
5.2.1.4 ปัญหาการลอกของลายปริ้นบนแผ่นวงจร

ปัญหาที่พบ: การลอกของลายปริ้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ ปัญหานี้มีสาเหตุหลักมาจากความร้อนที่เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เกินพิกัดการออกแบบของลายปริ้น ประกอบกับการไม่ได้เติมตะกั่วที่ลายปริ้นจนเต็มตามที่ตามมาตรฐาน ทำให้เกิดจุดที่มีความต้านทานสูงและความร้อนเฉพาะจุด เมื่อเกิดปัญหาดังกล่าวในวงจรที่ทำงานด้วยความถี่สูงในระดับกิโลเฮิร์ตซ์ จะส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนและความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ไม่ต้องการ สิ่งเหล่านี้ไม่เพียงแต่ส่งผลเสียต่อการทำงานของวงจรในตัวเอง แต่ยังอาจรบกวนการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ในบริเวณใกล้เคียงด้วย



ภาพที่ 5-12 แผ่น PCB แบบกัตลายปริ้นที่มีการหลุดลอก

วิธีแก้ไข: การออกแบบและสร้างแผ่นวงจรพิมพ์ใหม่ที่มีคุณภาพและมาตรฐานสูงกว่าเดิม โดยปรับปรุงการออกแบบลายปริ้นให้สามารถรองรับกระแสไฟฟ้าสูงได้อย่างปลอดภัย ควบคุมคุณภาพการเติมตะกั่วให้สมบูรณ์และเหมาะสมตามมาตรฐาน รวมทั้งจัดวางอุปกรณ์อย่างเหมาะสมเพื่อลดสัญญาณรบกวนและเพิ่มความทนทานต่อความร้อนและการใช้งานระยะยาว การปรับปรุงเหล่านี้ไม่เพียงแต่แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น แต่ยังป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตและเพิ่มอายุการใช้งานของระบบ



ภาพที่ 5-13 แผ่น PCB ใหม่ก่อนติดตั้งอุปกรณ์

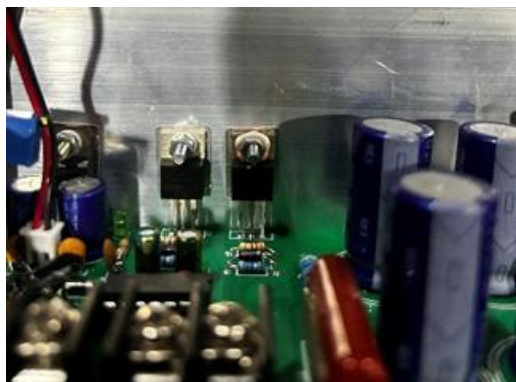


ภาพที่ 5-14 แผ่น PCB ใหม่หลังติดตั้งอุปกรณ์

หลังจากดำเนินการปรับปรุงพบว่าชั้นของลายปริ้นบนแผ่น PCB มีความหนาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ไม่เกิดการลอกหรือเสียหายของลายปริ้นแม้ในการใช้งานต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน การออกแบบใหม่ทำให้สามารถรองรับการจ่ายพลังงานได้ดีโดยไม่เกิดความร้อนเกินหรือจุดร้อนที่อาจก่อให้เกิดความเสียหาย ความเสถียรของการเชื่อมต่อต่างๆ ภายในวงจรมีการปรับปรุงอย่างเห็นได้ชัด ทำให้สามารถรักษาประสิทธิภาพการทำงานไว้ได้ในระยะยาว

5.2.1.5 ปัญหาแรงดันจ่ายให้ Gate Driver

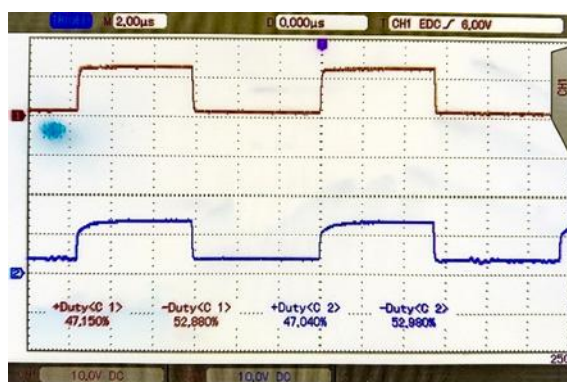
ปัญหาที่พบ: เมื่อจ่ายแรงดัน 24V ให้กับวงจร Inverter โดยผ่าน IC Voltage Regulator 7812 เพื่อลดระดับแรงดันให้เหลือ 12V สำหรับ IC SG3525 และ Gate Driver IR2110 ส่งผลให้ Power MOSFET ทั้ง 2 ตัวทำงานไม่สอดคล้องกัน เนื่องจาก Gate Driver IR2110 ที่ได้รับแรงดันเพียง 12V ไม่สามารถควบคุม MOSFET ที่ทำงานด้วยแรงดัน 24V ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความไม่สมดุลนี้ทำให้ MOSFET ไม่สามารถเปิด-ปิดในโหมด Switching ที่สมบูรณ์ แต่กลับทำงานในโซน Linear ซึ่งก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานสูงในรูปของความร้อน จนทำให้เกิดเกิดสภาวะ Thermal Runaway ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ความร้อนสะสมทำให้คุณสมบัติของ MOSFET เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งอุปกรณ์เสียหายถาวร กระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและไม่สามารถย้อนกลับได้ ทำให้ต้องเปลี่ยน MOSFET ใหม่ทั้งหมด



ภาพที่ 5-15 MOSFET ที่เกิดความเสียหายจาก Thermal Runaway



ภาพที่ 5-16 การวัดสัญญาณที่ออกจาก Gate Driver



ภาพที่ 5-17 รูปคลื่นสัญญาณที่ออกจาก Gate Driver ที่ผิดเพี้ยนไป

วิธีแก้ไข: การปรับเปลี่ยนแนวทางการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับขีดจำกัดของอุปกรณ์ โดยตัดสวิตช์จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 0-20V โดยไม่ผ่าน IC Voltage Regulator 7812 อีกต่อไป การเปลี่ยนแปลงนี้มีเป้าหมายเพื่อให้แน่ใจว่าแรงดันที่จ่ายให้ Gate Driver IR2110 จะไม่เกินพิกัดสูงสุดที่ 20V ซึ่งจะช่วยป้องกันความเสียหายและรักษาประสิทธิภาพการทำงาน การจ่ายแรงดันระดับเดียวกันให้กับทั้ง Gate Driver และ Power MOSFET แทนที่จะใช้ระดับแรงดันที่แตกต่างกันเหมือนเดิม การทำเช่นนี้ช่วยให้ Gate Driver สามารถควบคุม Power MOSFET ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากระดับแรงดันที่ Gate Driver ส่งออกไปควบคุม Gate ของ MOSFET จะสอดคล้องกับระดับแรงดันที่ MOSFET ทำงาน การปรับเปลี่ยนนี้แม้จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการใช้แรงดัน 24V เต็มที่ แต่กลับให้ผลลัพธ์ที่มีคุณค่ามากกว่าในด้านความเสถียรและความปลอดภัยของระบบ วงจรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดปัญหา Thermal Runaway หรือการเสียหายของอุปกรณ์



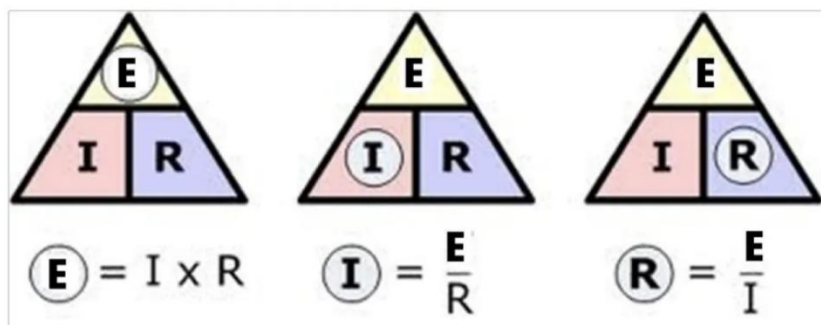
ภาพที่ 5-18 จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง Gate Driver

หลังจากการปรับปรุงระบบ วงจรสามารถทำงานได้ตามปกติอย่างสมบูรณ์ ไม่มีการหยุดทำงานกะทันหันหรือพฤติกรรมที่ผิดปกติเหมือนที่เคยเกิดขึ้นก่อนหน้านี้ ระบบสามารถดำเนินการถ่ายโอนพลังงานได้อย่างต่อเนื่องและเสถียร โดยไม่มีสัญญาณเตือนหรือความผิดพลาดใดๆ Gate Driver IR2110 ไม่เกิดความเสียหายหรือการทำงานผิดปกติอีกต่อไป การปรับระดับแรงดันให้อยู่ในขีดจำกัดที่ปลอดภัยทำให้อุปกรณ์นี้สามารถทำงานได้ตามศักยภาพเต็มที่ โดยไม่ต้องกังวลเรื่องความเสียหายจากแรงดันเกิน การที่ Gate Driver ทำงานในสภาวะที่เหมาะสมส่งผลให้สัญญาณควบคุมที่ส่งออกไปมีคุณภาพดีขึ้น มีความแม่นยำและเสถียรมากกว่าเดิม

สามารถควบคุม Power MOSFET ให้ทำงานร่วมกันได้อย่างเสถียรและปลอดภัย MOSFET ทั้งสองตัวสามารถเปิด-ปิดในจังหวะที่สอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์ ไม่มีการทำงานที่ขัดแย้งหรือไม่ประสานกัน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการป้องกันการเกิด Cross Conduction และ Thermal Runaway ที่เคยเป็นปัญหาร้ายแรงในอดีต การทำงานร่วมกันของ MOSFET อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้การสูญเสียพลังงานลดลงอย่างมาก ความร้อนที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และสามารถระบายออกไปได้อย่างเหมาะสม ไม่มีการสะสมความร้อนที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ รูปคลื่นสัญญาณที่ออกจาก Gate Driver กลับมามีคุณภาพดีเหมือนเดิม มีการเปลี่ยนผ่านที่รวดเร็วและชัดเจน

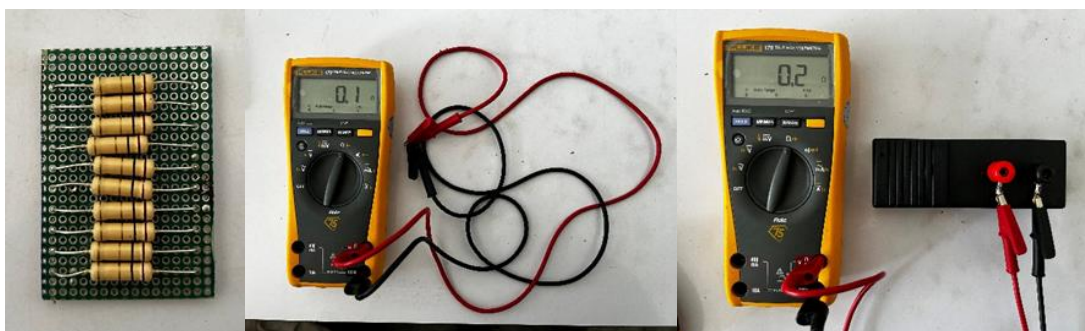
5.2.1.6 ปัญหาการวัดกระแสในระบบความถี่สูงและการใช้ตัวต้านทาน Shunt

ปัญหาที่พบ: เนื่องจากระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายทำงานด้วยความถี่ในช่วงกิโละเฮิร์ตซ์ การใช้เครื่องมือวัดมาตรฐาน เช่น มัลติมิเตอร์หรือแคลมป์มิเตอร์ไม่สามารถให้ผลการวัดแรงดันและกระแสที่ถูกต้องได้ เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้ได้รับการออกแบบมาให้รองรับการวัดในช่วงความถี่เพียง 50-60 Hz เท่านั้น ทำให้อุปกรณ์วัดแรงและกระแสจำเป็นต้องวัดด้วยออสซิลโลสโคป และนำมาคำนวณจากสูตรพื้นฐานกฎของโอห์ม

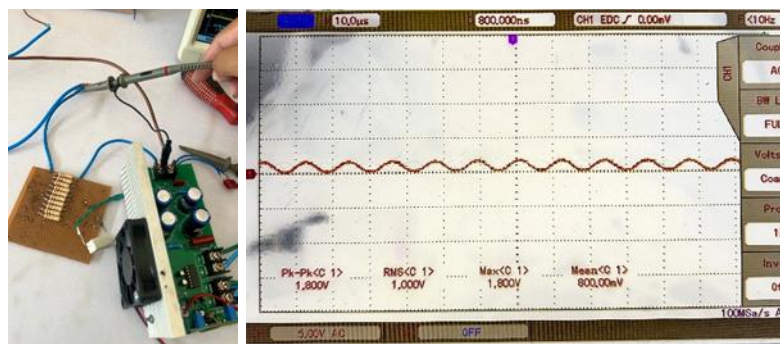


ภาพที่ 5-19 สูตรพื้นฐานกฎของโอห์ม

วิธีแก้ไข: การสร้างตัวต้านทาน Shunt สำหรับวัดกระแสจัดทำตัวต้านทาน (R) ขนาด 0.1 Ω 20W เพื่อใช้เป็น Current Shunt สำหรับการวัดกระแส โดยต่อในจุดที่ต้องการวัดกระแสที่ไหลไปยังชุดขดลวดฝั่งส่ง ซึ่งลักษณะการวัดที่ใช้ออสซิลโลสโคปวัดแรงดันตกคร่อม R ชุดนั้น แล้วนำมาคำนวณหากระแสจากสูตร



ภาพที่ 5-20 ตัวต้านทาน (R) ขนาด 0.1 Ω 20W ใช้เป็น Current Shunt



ภาพที่ 5-21 การต่อค่า R ที่จุดวัด เพื่อวัดกระแสที่ไหลไปยังชุดขดลวดฝั่งส่ง

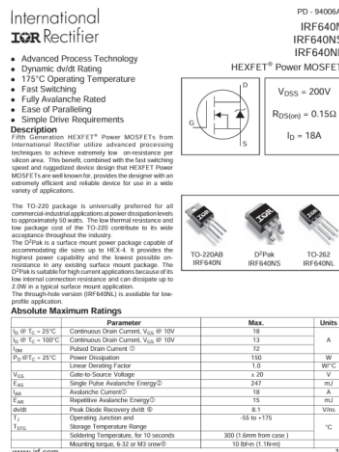
จะได้กระแสเท่ากับ

แรงดันที่ตกคร่อม R ขนาด 0.1 Ω 20 W มีค่าเท่ากับ 1.0 VRMS

$$\text{จากสูตรได้กระแส} \quad I = \frac{V}{R} = \frac{1.0 \text{ V}}{0.1 \Omega} = 10 \text{ A}$$

5.2.1.7 ปัญหาการเปลี่ยนเบอร์ Power MOSFET

ปัญหาที่พบ: เมื่อทำการทดสอบด้วย Power MOSFET เบอร์ IRF640N ที่ใช้อยู่เดิม พบว่าแรงดันที่ตกคร่อม Shunt Resistor มีค่า 1.0 VRMS ซึ่งเมื่อคำนวณแล้วได้กระแส 10 แอมป์ เมื่อเทียบกับข้อมูลจาก Data Sheet ของ IRF640N ที่ระบุว่ามีพิกัดกระแสสูงสุด 18A ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25°C และ 13A ที่อุณหภูมิสูงกว่า 25°C จึงสรุปได้ว่า MOSFET กำลังทำงานใกล้เต็มพิกัด



มีคุณสมบัติข้อมูล ดังนี้

$$V_{DS} = 200V$$

$$R_{DS(on)} = 0.15\Omega$$

$$I_D = 18A \text{ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า } 25^\circ C$$

$$= 13A \text{ ที่อุณหภูมิมากกว่า } 25^\circ C$$

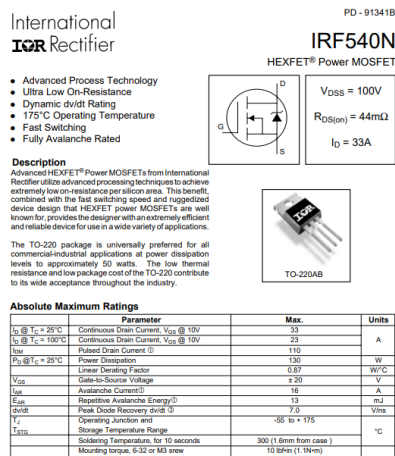
$$\text{Package ; TO-220}$$

ภาพที่ 5-22 Data Sheet ของ Power MOSFET เบอร์ IRF640N

เมื่อทำการทดสอบด้วย Power MOSFET เบอร์ IRF640N ที่ใช้อยู่เดิม พบว่าแรงดันที่ตกคร่อม Shunt Resistor มีค่า 1.0 VRMS ซึ่งเมื่อคำนวณแล้วได้กระแส 10A เมื่อเทียบกับข้อมูลจาก Data Sheet ของ IRF640N ที่ระบุว่ามีพิกัดกระแสสูงสุด 18A ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25°C และ 13A ที่อุณหภูมิสูงกว่า 25°C จึงสรุปได้ว่า MOSFET กำลังทำงานใกล้เต็มพิกัด และมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อทำงานเป็นเวลานานๆ จึงทำพลังงานที่เกิดขึ้นกับกระบวนการถ่ายโอนพลังงานทำได้น้อย จากการศึกษาสามารถแก้ไขได้ 2 วิธี คือ ขนาน Power MOSFET เบอร์เดิมให้หลายตัวขึ้น เพื่อเพิ่มกำลังอัตราการไหลของกระแส ซึ่งจะทำให้ Power เพิ่มมากขึ้น หรือเปลี่ยน Power MOSFET ที่รองรับกระแสได้มากขึ้น แต่ Package ต้องเป็น TO-220 หรือเป็นลักษณะที่สามารถใส่แทนกันได้กับ PCB ที่ออกแบบมาใช้กับ Package TO-220

ซึ่งหากดูค่า $R_{DS(on)}$ ของ Power MOSFET ยังคงสูง เมื่อค่าความต้านทานเยอะ แล้วมีการจัดการไบอัสที่ไม่ดี ก็จะทำให้เกิด Loss เยอะ ดังนั้น จึงได้ตัดสินใจจะเปลี่ยน Power MOSFET ตัวใหม่ที่รองรับกระแสได้สูง และมีค่าความต้านทานน้อย รวมถึงรองรับ Package TO-220

วิธีแก้ไข: เปลี่ยนไปใช้ Power MOSFET รุ่นที่มีประสิทธิภาพดีกว่า โดยเลือก IRF540N ซึ่งมีค่าความต้านทาน $R_{DS(on)}$ เพียง 0.044Ω เมื่อเทียบกับ IRF640N ที่มีค่า 0.15Ω นอกจากนี้ IRF540N ยังมีพิกัดกระแสสูงถึง 33A ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25°C และ 23A ที่อุณหภูมิสูงกว่า 25°C ซึ่งสูงกว่า IRF640N ข้อดีอีกอย่างคือทั้งสองรุ่นใช้ Package TO-220 เหมือนกัน จึงสามารถเปลี่ยนแทนกันได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยน PCB



มีคุณสมบัติข้อมูล ดังนี้

$$V_{DS} = 100 \text{ V}$$

$$R_{DS(on)} = 0.044 \Omega$$

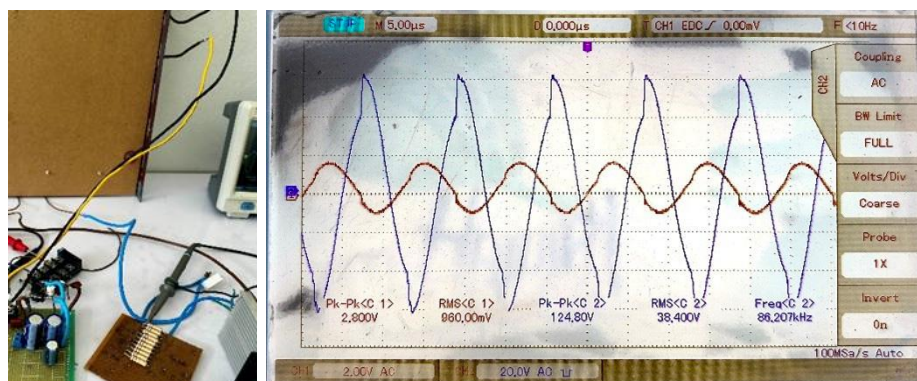
$$I_D = 33 \text{ A ที่อุณหภูมิต่ำกว่า } 25^\circ\text{C}$$

$$= 23 \text{ A ที่อุณหภูมิมากกว่า } 25^\circ\text{C}$$

$$\text{Package ; TO-220}$$

ภาพที่ 5-23 Data Sheet ของ Power MOSFET เบอร์ IRF540N

หลังจากเปลี่ยนเป็น IRF540N แล้ว ได้ทำการทดสอบวัดกระแสฝั่งส่งด้วยวิธีเดียวกับที่ใช้ก่อนหน้านี คือการใช้ออสซิลโลสโคปวัดแรงดันที่ตกคร่อม Shunt Resistor ขนาด 0.1Ω 20W



ภาพที่ 5-24 การวัดกระแสที่ไหลไปยังชุดขดลวดฝั่งส่ง เมื่อเปลี่ยน Power MOSFET จะได้กระแสเท่ากับ

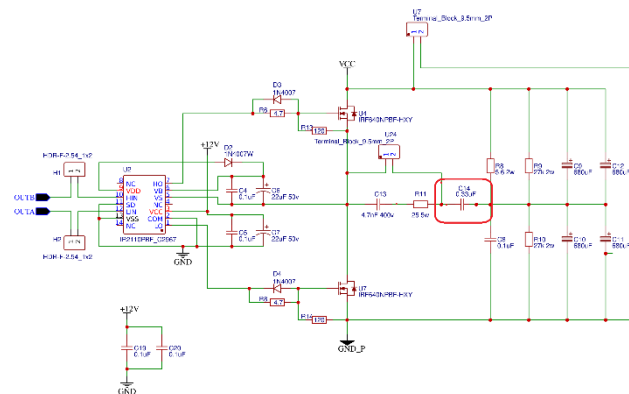
พิจารณารูปคลื่น คือ แรงดันตกคร่อม R 0.1Ω 20W มีค่าเท่ากับ 960 mVRMS

$$\text{จากสูตรได้กระแส} \quad I = \frac{V}{R} = \frac{960 \times 10^{-3} \text{ V}}{0.1 \Omega} = 9.6 \text{ A}$$

หลังจากเปลี่ยนเป็น IRF540N และทำการทดสอบใหม่ พบว่าแรงดันที่ตกคร่อม Shunt Resistor ลดลงเหลือ 960 mVRMS ซึ่งเมื่อคำนวณแล้วได้กระแส 9.6 แอมป์ กระแสยังอยู่ในช่วง 9-10 A แม้ว่ากระแสจะยังอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน แต่ MOSFET สามารถทำงานได้นานกว่าและมีอุณหภูมิการทำงานอยู่ในระดับปกติ เนื่องจากมีความต้านทานภายในที่ต่ำกว่าทำให้การสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบดีขึ้นและมีความสามารถในการทำงานได้อย่างเสถียรเป็นเวลานานขึ้น

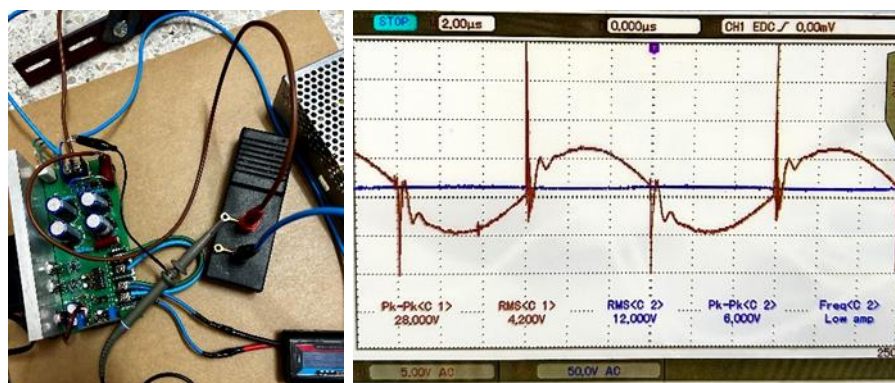
5.2.1.8 ปัญหาตัวเก็บประจุ C ที่เป็นตัวเรโซแนนซ์กับค่าเหนี่ยวนำ L ในฝั่งส่งมีความร้อน

ปัญหาที่พบ: ตัวเก็บประจุ C14 ขนาด 0.334 μF 630V ที่ใช้เป็นตัวเรโซแนนซ์กับขดลวดเหนี่ยวนำในฝั่งส่งเกิดความร้อนขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อวงจรทำงานต่อเนื่องเป็นเวลานาน สันนิษฐานว่าปัญหาอาจเกิดจากแรงดันที่ตัวเก็บประจุรองรับไม่ได้ จึงได้ทำการเปลี่ยนเป็นตัวเก็บประจุขนาดเดียวกัน แต่รองรับแรงดันสูงขึ้นเป็น 0.334 μF 2kV แต่ผลปรากฏว่าตัวเก็บประจุตัวใหม่ยังคงมีความร้อนเหมือนเดิม ซึ่งบ่งชี้ว่าปัญหาไม่ได้เกิดจากการรองรับแรงดันที่ไม่เพียงพอ



ภาพที่ 5-25 ตำแหน่ง C14 ในวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริง จึงได้ทำการวัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C14 ด้วยวิธีการเดียวกับที่ใช้วัดกระแสใน MOSFET คือการต่อ Shunt Resistor ขนาด 0.1 Ω 20W แล้ววัดแรงดันที่ตกคร่อมด้วยออสซิลโลสโคป



ภาพที่ 5-26 การวัดค่ากระแสที่ไหลผ่าน C14

ผลการวัดพบว่า รูปคลื่นแสดงแรงดันตกคร่อม Shunt Resistor มีค่าถึง 4.2 VRMS

จะได้กระแสเท่ากับ

พิจารณารูปคลื่น คือ แรงดันตกคร่อม R 0.1 Ω 20W มีค่าเท่ากับ 4.2 VRMS

$$\text{จากสูตรได้กระแส} \quad I = \frac{V}{R} = \frac{4.2 \text{ V}}{0.1 \Omega} = 42 \text{ A}$$

หาค่า X_C จากสูตร

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 83.80 \times 10^3 \times 0.340 \times 10^{-6}} = 5.59\Omega$$

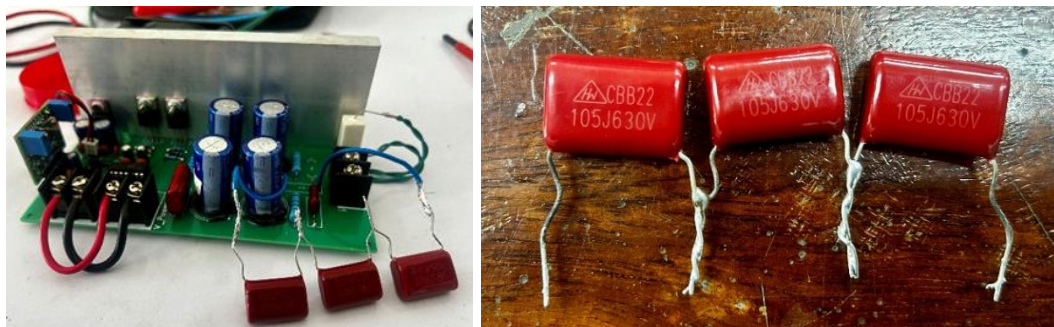
หากพิจารณา Power จะได้

$$P = 42^2 \times 5.59 = 9,853.62 \text{ W}$$

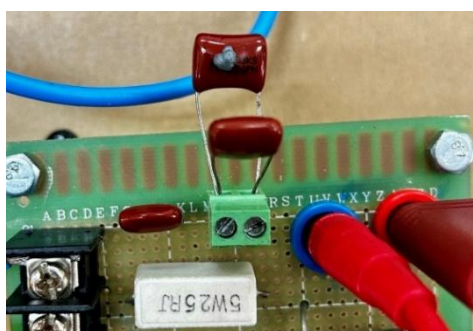
ค่ากระแสที่สูงถึง 42 A นี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ตัวเก็บประจุเกิดความร้อน เนื่องจากแม้ว่าตัวเก็บประจุจะเป็นอุปกรณ์ที่ย่อมให้กระแสความถี่สูงไหลผ่านได้ดี แต่เมื่อมีกระแสไหลผ่านในปริมาณมากเกินไป จะเกิดการสูญเสียพลังงาน (Power Loss) ภายในตัวเก็บประจุ ซึ่งปรากฏออกมาในรูปของความร้อน ปัญหานี้เกิดขึ้นเพราะในวงจรเรโซแนนซ์ เมื่อค่าความจุหรือการต่อวงจรไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดกระแสหมุนเวียนสูงในวงจร LC โดยเฉพาะเมื่อวงจรทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์หรือใกล้เคียง กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุอาจสูงกว่ากระแสที่จ่ายให้วงจรหลายเท่า ซึ่งเป็นลักษณะปกติของวงจรเรโซแนนซ์ แต่ในกรณีนี้กระแสสูงเกินไปจนทำให้ตัวเก็บประจุไม่สามารถระบายความร้อนได้ทัน

ตามหลักการพื้นฐานแล้ว ตัวเก็บประจุมีความต้านทานต่อกระแสที่ลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น หรือที่เรียกว่า Capacitive Reactance (X_C) ซึ่งมีความสัมพันธ์ผกผันกับความถี่ตามสูตร $X_C = 1/(2\pi fC)$ ดังนั้นที่ความถี่สูง ตัวเก็บประจุจึงยอมให้กระแสไหลผ่านได้ง่าย เหมือนกับเป็นวงจรลัดสำหรับสัญญาณความถี่สูง อย่างไรก็ตาม เมื่อตัวเก็บประจุถูกต่อเข้าในวงจรเรโซแนนซ์ไม่ว่าจะเป็นแบบอนุกรมหรือขนาน หากค่าความจุไม่เหมาะสมกับความถี่การทำงานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด จะเกิดปรากฏการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ขึ้น ในวงจรเรโซแนนซ์ที่ออกแบบไม่เหมาะสม กระแสที่ไหลเวียนภายในวงจร LC อาจมีค่าสูงกว่ากระแสที่จ่ายเข้าระบบหลายเท่า เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างสนามไฟฟ้าในตัวเก็บประจุและสนามแม่เหล็กในขดลวดเหนี่ยวนำ

เมื่อกระแสที่มีค่าสูงไหลผ่านตัวเก็บประจุเป็นเวลานาน จะเกิดการสูญเสียพลังงาน (Power Loss) ภายในตัวเก็บประจุ เนื่องจากตัวเก็บประจุจริงมีความต้านทานภายใน (ESR - Equivalent Series Resistance) และค่า Dielectric Loss ที่ไม่เป็นศูนย์ การสูญเสียพลังงานนี้จะปรากฏออกมาในรูปของความร้อนตามสูตร $P = I^2R$ ดังนั้นเมื่อกระแส (I) เพิ่มขึ้น กำลังที่สูญเสียจะเพิ่มขึ้นตามกำลังสอง ความร้อนที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของตัวเก็บประจุ



ภาพที่ 5-27 การอนุกรมตัวเก็บประจุ 3 ตัว ให้ได้ขนาด เพื่อต่อที่ C14



ภาพที่ 5-28 ตัวเก็บประจุฝั่งรับที่เกิดความเสียหาย

หลังจากพบปัญหาความร้อนของตัวเก็บประจุ ได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเหมาะสมของชนิดตัวเก็บประจุที่ใช้ในงานความถี่สูง จากการศึกษพบว่า ตัวเก็บประจุชนิด Mylar ที่ใช้อยู่เดิมนั้น ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในวงจรกำลังสูงที่ความถี่ kHz เช่นนี้ ตัวเก็บประจุ Mylar โดยทั่วไปจะเหมาะสมกับงานที่ต้องการความแม่นยำและเสถียรภาพ เช่น วงจรกรองความถี่สูง วงจรภาค Intermediate Frequency (IF) ของวิทยุและโทรทัศน์ หรืองานที่มีกระแสไม่สูงมาก แต่สำหรับการใช้งานในวงจรเรโซแนนซ์ที่มีกระแสสูงและความถี่ในช่วง kHz แล้ว Mylar อาจมีข้อจำกัดด้านการทนกระแสและการระบายความร้อน

จากการศึกษาพบว่า Film Capacitor จะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่า เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมหลายประการสำหรับงานนี้ ได้แก่ ค่า Equivalent Series Resistance (ESR) ที่ต่ำ ซึ่งช่วยลดการสูญเสียพลังงานและความร้อนที่เกิดขึ้น สามารถใช้งานกับความถี่สูงได้ดีโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุมากนัก มีความเสถียรที่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและแรงดัน และสามารถทนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านได้สูงกว่า ตัดสินใจทดลองเปลี่ยนมาใช้ Film Capacitor แทน Mylar Capacitor เพื่อแก้ไขปัญหาความร้อนและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ



ภาพที่ 5-29 ตัวเก็บประจุขนาด 1.0 μF มาอนุกรมกัน 3 ตัวเพื่อให้ได้ขนาด 0.334 μF

ผลการทดลองหลังจากเปลี่ยนมาใช้ Film Capacitor แบบ MKP (Metallized Polypropylene) แทน Mylar Capacitor แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงที่เห็นได้ชัด โดยพบว่า การส่งผ่านพลังงานมีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่าเดิม และกระแสสามารถไหลผ่านได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของ Film Capacitor ที่มีค่า ESR ต่ำกว่าและสามารถรองรับกระแสที่สูงกว่า Mylar Capacitor แต่เมื่อระบบทำงานต่อเนื่องเป็นเวลานาน Film Capacitor MKP ก็ยังคงเกิดความร้อนขึ้น และที่น่ากังวลกว่านั้นคือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุเริ่มเปลี่ยนแปลงหรือเพี้ยนไปจากค่าเดิม



ภาพที่ 5-30 ค่าตัวเก็บประจุขนาด 0.334 μF จำนวน 1 ตัว

จึงลองเปลี่ยนมาใช้ตัวเก็บประจุชนิดใหม่ที่เรียกว่า Film Capacitor แบบ MKP แทนตัวเดิมที่เป็น Mylar และใช้วิธีต่อหลายตัวต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการ เมื่อทดลองแล้วพบว่าระบบทำงานดีขึ้นเห็นได้ชัด การส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านอากาศไปยังรถได้ดีกว่าเดิม และกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ง่ายขึ้นมาก เพราะตัวเก็บประจุใหม่มีคุณภาพดีกว่า ทำให้ไฟฟ้าสูญเสียน้อยลงตอนไหลผ่าน แต่เมื่อเปิดเครื่องใช้งานไปนานๆ ปัญหาเก่ายังเกิดขึ้นอีก คือ ตัวเก็บประจุใหม่ยังคงร้อนขึ้น และที่แย่กว่านั้นคือเริ่มบวมตัวขึ้น เหมือนกับลูกโป่งที่เป่าลมมากเกินไป เมื่อวัดค่าตัวเก็บประจุใหม่ พบว่าค่าเปลี่ยนไปจากเดิม

หลังจากพบปัญหาการเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุแบบ MKP ที่ยังคงเกิดความร้อน บวมตัว และมีค่าความจุเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทีมผู้จัดทำจึงได้ศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมเพื่อหาทางแก้ไขปัญหานี้อย่างถาวร จากการศึกษพบว่า Film Capacitor ประเภท FKP จากผู้ผลิต WIMA ซึ่งเป็นบริษัทชั้นนำด้านตัวเก็บประจุคุณภาพสูงจากประเทศเยอรมนี น่าจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่าสำหรับการใช้

งานในระบบความถี่สูงและกำลังไฟฟ้าสูงเช่นนี้ ตัวเก็บประจุ WIMA FKP มีคุณลักษณะพิเศษที่แตกต่างจากตัวเก็บประจุทั่วไป โดยได้รับการออกแบบมาเฉพาะสำหรับงานที่ต้องรองรับกระแสสูงและความถี่สูง มีค่า ESR ที่ต่ำมาก ความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดีเยี่ยม และสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการเสื่อมสภาพ แม้ว่าราคาจะแพงกว่าตัวเก็บประจุทั่วไปมาก แต่คุณภาพและประสิทธิภาพที่ได้รับคุ้มค่างับการลงทุน



ภาพที่ 5-31 ตัวเก็บประจุ WIMA FKP

การสั่งซื้อตัวเก็บประจุ WIMA FKP จากต่างประเทศเป็นกระบวนการที่ต้องใช้ความอดทนพอสมควร เนื่องจากต้องรอรระยะเวลาในการจัดส่งประมาณ 15 วัน ซึ่งค่อนข้างนานเมื่อเทียบกับการสั่งซื้ออุปกรณ์ทั่วไปภายในประเทศ อย่างไรก็ตาม การรอคอยนี้กลับให้ผลตอบแทนที่คุ้มค่าเมื่อได้รับสินค้าและนำมาทดลองใช้งานจริง

วิธีแก้ไข: การเลือกใช้ตัวเก็บประจุ Film Capacitor ประเภท FKP จาก WIMA เมื่อนำตัวเก็บประจุ WIMA FKP มาติดตั้งในระบบและทำการทดสอบ ผลลัพธ์ที่ได้เป็นที่น่าพอใจ การส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายมีประสิทธิภาพดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ดีขึ้นมาก และที่สำคัญคือตัวเก็บประจุสามารถทำงานเข้ากันได้ดีกับความถี่ที่ระบบใช้งานในช่วง 81.39 ถึง 90 kHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่สำคัญสำหรับการเกิดเรโซแนนซ์และการถ่ายโอนพลังงานที่มีประสิทธิภาพ เมื่อทำการทดสอบการทำงานต่อเนื่องเป็นเวลานาน ปัญหาที่เคยเกิดขึ้นกับตัวเก็บประจุแบบเก่าทั้งหมดได้รับการแก้ไขอย่างสมบูรณ์ ตัวอุปกรณ์ไม่เกิดความร้อนขึ้นแม้จะทำงานหนักเป็นเวลานาน ลักษณะทางกายภาพยังคงปกติไม่มีการบวมตัวหรือเสียรูปใดๆ และที่สำคัญที่สุดคือค่าความจุของตัวเก็บประจยังคงคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงจากค่าเดิมที่ออกแบบไว้ ซึ่งหมายความว่าระบบสามารถรักษาความถี่เรโซแนนซ์ไว้ได้อย่างแม่นยำ และประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานจึงคงที่ตลอดการใช้งาน

5.2.1.9 ปัญหาการเลือกประเภทของอุปกรณ์สำหรับวงจร Rectifier

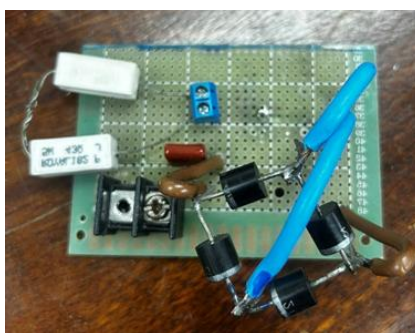
ปัญหาที่พบ: จากการใช้ KBPC5010 เมื่อทำการศึกษาคุณสมบัติของ KBPC5010 อย่างละเอียด พบว่าเป็นวงจรบริดจ์ที่ออกแบบมาสำหรับการทำงานที่ความถี่ต่ำ (Low Frequency) ซึ่งไม่เหมาะสมกับระบบของโครงงานนี้ที่ทำงานที่ความถี่สูงในช่วง 80+ kHz ความไม่เหมาะสมนี้ส่งผลให้การเรียงกระแสไม่มีประสิทธิภาพ และอาจเกิดการสูญเสียพลังงานสูงในรูปของความร้อน



ภาพที่ 5-32 KBPC5010

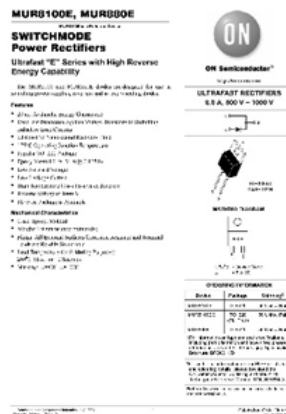
วิธีการแก้ไขครั้งแรก: จากการศึกษเพิ่มเติม ทิมพบว่าไดโอดที่เหมาะสมสำหรับงานความถี่สูง มีสองประเภทหลัก คือ Schottky Diode และ Fast Recovery Rectifier Diode จึงได้ทดลองเปลี่ยนมาใช้ Schottky Diode มาประกอบเป็นวงจรบริดจ์แทน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเรียงกระแสทำได้ดีขึ้นกว่าเดิม แต่เมื่อทดสอบกับโหลด R 12Ω 15W พบว่ากระแสที่ได้มีเพียง 0.4-0.5A และแรงดันตกคร่อมโหลดอยู่ที่ 12.4-14.7V ค่าเหล่านี้ยังไม่เพียงพอสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรด 24V ที่ต้องการแรงดันชาร์จในช่วง 26.4-27.4V



ภาพที่ 5-33 วงจรบริดจ์แบบ Schottky Diode

วิธีการแก้ไขครั้งที่สอง: เนื่องจากผลจาก Schottky Diode ยังไม่น่าพอใจ จึงทดลองใช้ Fast Recovery Rectifier Diode รุ่น MUR880E ซึ่งเป็น Ultrafast Rectifiers ที่มีเวลาการกู้คืนเร็วมาก เหมาะสำหรับงานความถี่สูงและสามารถรองรับกระแสสูงได้



ภาพที่ 5-34 Datasheet Ultrafast Rectifiers MUR880E

เมื่อนำ MUR880E มาประกอบเป็นวงจรบริดจ์และทดสอบกับโหลด R 12Ω 15W ผลที่ได้เป็นที่น่าสนใจอย่างมาก โดยแรงดันตกคร่อมโหลดอยู่ที่ 23.4-24.5V และกระแสไหลผ่านโหลดอยู่ที่ 1.8-2.0A เมื่อคำนวณกำลังไฟฟ้าได้ 42.12-49.00W ค่าเหล่านี้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานกับระบบชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรด 24V 26Ah ที่เป็นเป้าหมายของโครงการ โดยแรงดันที่ได้ใกล้เคียงกับช่วงแรงดันชาร์จที่เหมาะสม และกระแสที่ได้สามารถให้การชาร์จที่มีประสิทธิภาพตามที่ต้องการได้



ภาพที่ 5-35 วงจร Rectifier ที่ใช้ MUR880E

5.2.1.10 ปัญหาการควบคุมแรงดันชาร์จแบตเตอรี่

ปัญหาที่พบ: การควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ให้เหมาะสม เนื่องจากแรงดันที่ได้จากวงจรเรียงกระแสอยู่ในช่วง 80-90V ซึ่งสูงเกินกว่าที่แบตเตอรี่ 24V จะรับได้ จึงต้องมีอุปกรณ์ลดแรงดันและควบคุมการชาร์จ อุปกรณ์ควบคุมการชาร์จที่เหมาะสมต้องสามารถรับแรงดันขาเข้าได้ในช่วง 80-90V และแปลงเป็นแรงดันขาออก 27.6-29.6V เพื่อนำไปชาร์จแบตเตอรี่ในระบบ CV (Constant Voltage) ซึ่งจะควบคุมเฉพาะแรงดันที่เข้าไปยังแบตเตอรี่ แต่ปล่อยให้กระแสไหลเข้าแบตเตอรี่ตามความต้องการธรรมชาติของแบตเตอรี่

การเลือกใช้อุปกรณ์ครั้งแรก ได้เลือกใช้ DC MPPT Controller 5A DC-DC Step Down ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาสำหรับระบบโซลาร์เซลล์ คาดว่าจะสามารถปรับแรงดันให้เหมาะสมและควบคุมการชาร์จได้ดี



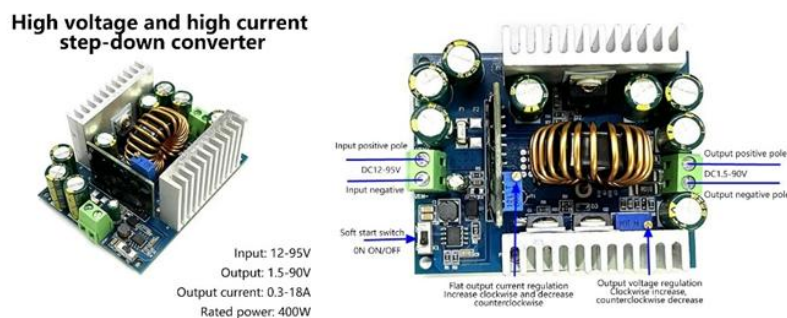
ภาพที่ 5-36 DC MPPT Controller 5A DC-DC Step Down

เมื่อทำการทดสอบ พบว่าแม้อุปกรณ์จะสามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้ แต่ไม่สามารถควบคุมแรงดันขาออกของโมดูลให้คงที่ได้ตามที่ต้องการ ปัญหาที่ร้ายแรงกว่านั้นเกิดขึ้นเมื่อแบตเตอรี่ใกล้จะเต็ม แรงดันขาเข้าที่ป้อนให้โมดูลเพิ่มสูงขึ้นเกินพิกัดที่โมดูลรองรับได้ คือ 35V ส่งผลให้ตัวเก็บประจุในภาคขาเข้าของโมดูลระเบิดเสียหาย การระเบิดของตัวเก็บประจุเป็นปัญหาร้ายแรงที่บ่งชี้ว่าอุปกรณ์ที่เลือกมาไม่เหมาะสมกับระบบ เนื่องจากไม่สามารถรองรับแรงดันสูงที่เกิดขึ้นในระบบการถ่ายโอนพลังงานไร้สายได้



ภาพที่ 5-37 DC MPPT Controller 5A DC-DC Step Down ที่เกิดการระเบิด

วิธีการแก้ไข: ได้ศึกษาและหาอุปกรณ์ใหม่ที่เหมาะสมกว่า โดยเลือก DC-DC Step Down Module ที่มีข้อมูลจำเพาะ DC 12-95V to 1.5-90V 18A Step-down 400W ซึ่งมีช่วงแรงดันขาเข้าที่กว้างกว่าและสามารถรองรับแรงดันสูงสุดถึง 95V ซึ่งครอบคลุมช่วงการทำงานของระบบที่ 80-90V ได้อย่างปลอดภัย อีกทั้งโมดูลใหม่นี้ยังสามารถปรับแรงดันขาออกได้ในช่วงกว้าง 1.5-90V และรองรับกระแสได้สูงถึง 18A ที่กำลังไฟฟ้า 400W ซึ่งมีความสามารถเกินพอสำหรับระบบนี้



ภาพที่ 5-38 DC-DC Step Down Module

หลังจากเปลี่ยนมาใช้โมดูลใหม่ ระบบสามารถทำงานได้อย่างเสถียรและมีประสิทธิภาพ โดยสามารถรองรับแรงดันที่ออกจากวงจรเรียงกระแสได้อย่างปลอดภัย ปรับแรงดันขาออกของโมดูลได้ตามค่าที่ต้องการในช่วง 27.6-29.6V และรักษาระดับแรงดันขาออกให้คงที่ได้แม้ในขณะที่แบตเตอรี่กำลังชาร์จ เมื่อนำแรงดันที่ควบคุมแล้วไปชาร์จแบตเตอรี่ สามารถชาร์จได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย โดยไม่เกิดปัญหาแรงดันเกินพิกัดหรือการเสียหายของอุปกรณ์อีกต่อไป

5.2.2 ปัญหาด้านประสิทธิภาพและการถ่ายโอนพลังงาน

ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบที่พัฒนาขึ้นอยู่ในระดับ 30-50% ซึ่งถือว่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชาร์จแบบสายไฟทั่วไปที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 90% การสูญเสียพลังงานเกิดขึ้นในหลายจุดของระบบ ได้แก่ ในวงจรอินเวอร์เตอร์ เกิดการสูญเสียจากการสวิตชิงของ MOSFET ซึ่งทุกครั้งที่ MOSFET เปิด-ปิด จะมีพลังงานสูญเสียในรูปของความร้อน โดยเฉพาะที่ความถี่สูงกว่า 80 kHz ทำให้การสูญเสียเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งของการสวิตชิง การถ่ายโอนพลังงานผ่านอากาศเป็นจุดที่เกิดการสูญเสียมากที่สุด เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีการรั่วไหลไปรอบๆ ไม่ได้ถูกจับโดยขดลวดรับทั้งหมด ยิ่งระยะห่างเพิ่มขึ้น การรั่วไหลก็จะมากขึ้นตามไปด้วย วงจรเรียงกระแสที่ใช้ไดโอดก็มีการสูญเสียเช่นกัน แม้จะเปลี่ยนมาใช้ไดโอดชนิด Fast Recovery แล้ว แต่ยังคงมีแรงดันตกคร่อมที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน

ระยะการถ่ายโอนพลังงานที่มีประสิทธิภาพจำกัดอยู่ที่เพียง 6-8 เซนติเมตร ระยะที่สั้นเช่นนี้อาจไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานจริงในชีวิตประจำวัน เนื่องจากต้องการความยืดหยุ่นในการจอดรถมากกว่านี้ ในสถานการณ์จริง ผู้ขับขี่อาจไม่สามารถจัดตำแหน่งรถให้ตรงกับจุดชาร์จได้อย่างแม่นยำเสมอไป อาจมีความผิดพลาดในการจอดรถ หรือพื้นผิวไม่เรียบทำให้ระยะห่างไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ ความแตกต่างของความสูงรถยนต์แต่ละรุ่นก็อาจส่งผลให้ระยะห่างระหว่างขดลวดเปลี่ยนแปลงไป ระยะการทำงานที่จำกัดนี้ทำให้ระบบยังไม่พร้อมสำหรับการใช้งานเชิงพาณิชย์ที่ต้องการความสะดวกสบายและความยืดหยุ่นสูง แต่ก็ยังคงเป็นพื้นฐานที่ดีสำหรับการพัฒนาต่อไปในอนาคต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและขยายระยะการทำงานให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง

5.2.3 ปัญหาการใช้งานและความปลอดภัย

ปัญหาด้านสัญญาณรบกวน เนื่องจากระบบทำงานที่ความถี่สูงกว่า 80 kHz ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อระบบวิทยุที่ทำงานในย่านความถี่ AM หรือ FM ทำให้เกิดเสียงรบกวนหรือสัญญาณผิดเพี้ยน โทรศัพท์มือถือและอุปกรณ์สื่อสารไร้สายอื่นๆ อาจได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แรงส่งส่งผลให้การรับสัญญาณไม่เสถียรหรือเกิดการขัดข้อง

ในส่วนของปัญหาด้านความปลอดภัยในการใช้งาน เช่น ความเป็นไปได้ที่จะมีวัตถุแปลกปลอมเข้าไปในบริเวณระหว่างขดลวดส่งและขดลวดรับ วัตถุโลหะ เช่น เหรียญ กุญแจ หรือเศษโลหะต่างๆ หากเข้าไปในบริเวณสนามแม่เหล็กที่แรง อาจเกิดการเหนี่ยวนำและร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจก่อให้เกิดไฟไหม้หรือการบาดเจ็บได้ ใบไม้ เศษกิ่งไม้ หรือเศษกระดาษ แม้จะไม่ใช่โลหะ แต่หากมีความชื้นสูงก็อาจได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นกัน การสัมผัสกับสนามแม่เหล็กของมนุษย์หรือสัตว์ และความปลอดภัยจากไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง เนื่องจากระบบจะติดตั้งกลางแจ้งและต้องทนต่อสภาพอากาศต่างๆ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ผู้ใช้งานควรศึกษาคู่มือการใช้งานและทำความเข้าใจขั้นตอนการทำงานของระบบก่อนการใช้งานจริง รวมถึงการตรวจสอบสัญญาณไฟแสดงสถานะต่างๆ วิธีการเปิด-ปิดระบบ และข้อควรระวังด้านความปลอดภัย เพื่อให้สามารถใช้งานได้ถูกต้องและปลอดภัย

5.3.2 เมื่อต้องการชาร์จแบตเตอรี่ ให้ขั้วรถเข้าจอดในจุดชาร์จโดยจัดตำแหน่งให้ขดลวดรับที่ติดตั้งอยู่ได้รูดสอดคล้องกับขดลวดส่งบนพื้น โดยสังเกตจากไฟสัญญาณที่แสดงการเชื่อมต่อ ระบบจะเริ่มทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อล้อรถกดสวิตช์ตรวจจับตำแหน่ง (Limit Switch) ที่ติดตั้งไว้ ทำให้วงจรจ่ายโอนพลังงานเริ่มส่งไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่

5.3.3 ระบบการชาร์จไฟฟ้าแบบไร้สายนี้ใช้เวลาในการชาร์จพลังงานอยู่ระดับหนึ่ง จึงต้องวางแผนการใช้งานให้เหมาะสม โดยแนะนำให้ชาร์จในช่วงเวลาที่ไม่ต้องใช้รถ เช่น ชาร์จตอนกลางคืนหรือระหว่างวันหยุด ผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะการชาร์จผ่านหน้าจอแสดงผลที่แสดงระดับแรงดัน กระแส และปริมาณพลังงานที่ได้รับ เพื่อให้แบตเตอรี่มีประจุเต็มพร้อมสำหรับการเดินทางครั้งต่อไป

5.4 แนวทางในการพัฒนา

5.4.1 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและกำลังการถ่ายโอนพลังงานของระบบให้สูงขึ้น จำเป็นต้องมีการปรับปรุงและพัฒนาในหลายด้านที่สำคัญ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นประเด็นต่างๆ ดังนี้

5.4.1.1 การพัฒนาหรือเลือกใช้อุปกรณ์ Gate Driver ที่สามารถทำงานได้ที่แรงดันสูงกว่า 20V จะช่วยให้สามารถขับ MOSFET ได้เต็มประสิทธิภาพ และลดข้อจำกัดด้านแรงดันที่พบในการทดลองครั้งนี้ ทำให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น

5.4.1.2 การเลือกใช้ MOSFET ที่มีสมรรถนะสูงขึ้น เช่น รองรับกระแสได้เยอะกว่า I_D มีค่า $R_{DS(on)}$ ต่ำ เหมาะสมกับระดับความถี่ใช้งานที่อยู่ในช่วง 81.39–90 kHz จะช่วยเพิ่มกำลังการส่งและลดการสูญเสียพลังงาน โดยเฉพาะในด้านความสามารถในการรองรับกระแสที่สูงขึ้น ค่าความต้านทานขณะเปิดที่ต่ำลง และคุณสมบัติการสวิตช์ที่เหมาะสมกับประสิทธิภาพการทำงาน

5.4.1.3 การปรับเปลี่ยนโครงสร้างวงจรขยาย MOSFET วงจรจาก Half Bridge Converter เป็น Full Bridge Converter จะช่วยเพิ่มกำลังการส่งได้สูงกว่าเดิมประมาณสองเท่า และมีการควบคุมที่ดีกว่า ทำให้สามารถถ่ายโอนพลังงานได้มากขึ้น

5.4.1.4 การศึกษาและเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับการทำงานที่ความถี่สูง เช่น ตัวเก็บประจุชนิด Polypropylene Film หรือ Ceramic ที่มีค่า ESR ต่ำและสามารถทนความถี่สูงได้ดี จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดการสูญเสีย

5.4.1.5 การเปลี่ยนวัสดุขดลวดจากสายทองแดงธรรมดาเป็นสาย Litz Wire หรือท่อนำไฟฟ้าแบบกลวง หรือ Capillary Tube จะช่วยลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ Skin Effect ที่เกิดขึ้นที่ความถี่สูง ทำให้การนำไฟฟ้ามีประสิทธิภาพดีขึ้นและลดความต้านทานของขดลวด

5.4.1.6 การพัฒนางจรเรียงกระแสด้วยเทคโนโลยี Synchronous Rectification แทนการใช้ไดโอดธรรมดา จะช่วยลดการสูญเสียพลังงานในการแปลงกระแสกลับเป็นกระแสตรง และเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ

5.4.2 การพัฒนาการออกแบบขดลวดและระบบป้องกันเพื่อควบคุมการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กให้น้อยที่สุดเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนพลังงานให้มากขึ้น การควบคุมนี้จะช่วยให้พลังงานที่ส่งจากฝั่งส่งสามารถถ่ายโอนไปยังฝั่งรับได้มากที่สุด ลดการสูญเสียพลังงานที่กระจายออกไปสู่สิ่งแวดล้อมรอบข้าง และเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน โดยอาจพิจารณาการใช้วัสดุป้องกันหรือการออกแบบรูปทรงขดลวดที่เหมาะสม

5.4.3 การพัฒนาระบบป้อนกลับ (Feedback System) โดยการติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจวัดแรงดันและกระแสที่ฝั่งรับพลังงานเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อส่งข้อมูลสถานะการชาร์จกลับไปยังชุดส่งกำลังฝั่งส่ง ทำให้สามารถควบคุมการทำงานของระบบให้สอดคล้องกันระหว่างฝั่งส่งและฝั่งรับ ปรับกำลังการส่งให้เหมาะสมกับสภาวะการชาร์จแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงเวลา และเพิ่มความปลอดภัยด้วยการตรวจสอบสถานะและหยุดการทำงานเมื่อเกิดความผิดปกติ

5.4.4 การพัฒนาระบบ Maximum Power Point Tracking (MPPT) ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับการถ่ายโอนพลังงานไร้สายมีความสำคัญอย่างมาก เพื่อให้สามารถติดตามและรักษาจุดทำงานที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดอย่างต่อเนื่อง โดยระบบนี้ต้องสามารถปรับความถี่ แรงดัน และเฟสให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานแบบเรียลไทม์ และรองรับการชาร์จแบตเตอรี่ครบทั้ง 3 โหมดการชาร์จ ได้แก่ Bulk Charging ซึ่งเป็นการชาร์จด้วยกระแสคงที่เมื่อแบตเตอรี่ว่าง Boost Charging ที่เป็นการชาร์จด้วยแรงดันคงที่เมื่อแบตเตอรี่เริ่มเต็ม และ Float Charging ที่เป็นการชาร์จค้ำไว้เพื่อรักษาระดับประจุเต็ม ระบบ MPPT นี้จะช่วยให้การชาร์จแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพสูงสุดและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] จิณณวัตร วรณโสภา และณรงค์ฤทธิ์ โพธิ์ศรีทอง. (2558). *การออกแบบระบบส่งพลังงานไร้สายสำหรับชาร์จแบตเตอรี่โดรน*. [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [2] ชัยปดินทร์ อัครเวฬุกุล และสายชล หน่อชาย. (2557). *การส่งพลังงานไฟฟ้าโดยหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก*. [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [3] ชาญณรงค์ เรืองขจร. (2562). *แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า*. [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [4] ณัฐ ราชกรม. (2559). *การออกแบบขดลวดวงกลมแบบอย่างง่ายสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย*. [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [5] ทวีศักดิ์ สมานชื่น, กมล จิรเสรีอมรกุล, ไชยรินทร์ อัครวโรดม, สาธิต มังคลาจารย์, และธรรมวฤทธิ์ สิงห์วิลัย. (2563). *รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการ “การส่งพลังงานไร้สายสำหรับการประจุพลังงานยานยนต์ไฟฟ้า (ระยะที่ 1)”*. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- [6] ธนพล ตริธรรมานุรักษ์, จิรณัฐ ทัดจำปา, ศุภวิชญ์หลักบุญ, สรอรจ เทียมศรีทัศนากร, ภูมิ ศิลาพันธ์ และ วินัย ใจกล้า. (2564). *การสร้างและทดสอบเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย*. *วารสารงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์โดยสมาคม ECTI*, 64(1), 28-33.
- [7] นิรันดร์ ศรีสุข และ ปิยะ สุขเสริม. (2565). *การเปรียบเทียบประสิทธิภาพขดลวดเหนี่ยวนำรูปทรงต่างๆ ในระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย*. *วารสารวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 34(1), 45-58.
- [8] บุญทัน สนั่นน้ำหนัก, อติสร นวลอ่อน, สรายุตร์ สวัสดิ์วงษ์ชัย, วันทนา สุขมณี, บุญยัง สิงห์เจริญ, สันติ สาแก้ว และพงศกร ตอรัมย์. (2566). *ชุดสาธิตการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย*. *วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี*, 66(2), 23-33.
- [9] ผ่านสื่อและภาพลักษณ์องค์กร บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). (2561). *รถไฟฟ้าเปลี่ยนโลก*. ปตท.
- [10] ภริดา จีบกล้า. (2563). *การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัตด้วยความถี่เรโซแนนซ์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก*. [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [11] วิษณุ ทองคำ, สุรเชษฐ์ แก้วใส และ มานิต จันทรเพ็ญ. (2564). *การศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ระยะห่างต่างๆ*. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา*, 8(2), 56-68.

- [12] วัชร อมศิริ, พัฒนวิ โพธิ์ทอง, ธนสร ภิญญธนาบัตร และวันชัย ไพจิตรोजना. (2560). ระบบรักษาประสิทธิภาพการส่งพลังงาน ไฟฟ้าไร้สายด้วยการปรับความถี่เรโซแนนซ์อัตโนมัติ, *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 25(5): 870-879.
- [13] สายชล ชุตเจือจัน และณัฐภัทร พันธคง. (2566). ระบบส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไร้สายด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์โดยใช้เทคนิค SPWM. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งรัตนโกสินทร์*, 5(1), 9-19.
- [14] สุรัชย์ จิตต์เจริญสุข และ วิชัญชา แสงทอง. (2565). เทคโนโลยีการชาร์จไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า: ความท้าทายและโอกาส. *วารสารวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์*, 45(2), 78-92.
- [15] สมศักดิ์ ลิ้มสกุล และ อารีย์ เจริญผล. (2563). การออกแบบและสร้างระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายความถี่ 85 kHz. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*, 17(3), 234-247.
- [16] อิทธิพล เหลลาพรม และสมโภชน์ วงเขียด. (2560). ชุดสาธิตการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายด้วยหลักการความถี่ที่สภาวะเรโซแนนซ์. *สัปดาห์วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สทวท.)*, 4(2), 79-86.
- [17] เอกชัย ชัยดี, ภาณุพงศ์ โวหาร และวัฒน์ แก้วถึง. (2560). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดส่งกำลังงานสองขด. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา*, 2(1), 34-45.
- [18] เอกชัย ชัยดี, อนนท์ นำอิน, สุกัลย์ ยะอู่ และเอกพจน์ ยศแก้ว. (2559). ผลกระทบทางความถี่ที่มีต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 26(2), 173-182.
- [19] เอกชัย ชัยดี, ดุสิต มหิทธิ และอนนท์ นำอิน. (2559). การศึกษาและพัฒนางจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย. *วารสารวิชาการปทุมวัน*, 6(16), 15-28.
- [20] Chunbo Zhu, Kai Liu, Chunlai Yu, Rui Ma, and Hexiao Cheng. (2008). "Simulation and Experimental Analysis on Wireless Energy Transfer Based on Magnetic Resonances". *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. September 03-05.
- [21] Coil32. (2021). *Multi-Layer Air Core Inductor Calculator*. <http://coil32.net/>
- [22] Dragos Niculae, Mihai lordache, Marilena Stanculescu, Maria Lavinia Bobaru, and Sorin Deleanu. (2019). "A Review of Electric Vehicles Charging Technologies Stationary and Dynamic". *International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*. March 28-30.

- [23] Digi-Key Electronics. (2021). *Online Component Calculators and Design Tools*.
<https://www.digikey.com/en/resources/conversion-calculators>
- [24] Li, S., & Mi, C. C. (2015). "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(1), 4-17.
- [25] Mohammad Khakroei, Mohsen Mostafaei, Mansour Arefian, Afshin Rezaei-Zare and Majid Najafi Zarmehri. "Designing of Multilayer Planar Spiral Air-Core Inductor for Power Electronic Applications" *International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 30, 71-77.
- [26] Pichet Wisartpong. (2021) "A Review of Wireless Power Transfer". *ENGINEERING TRANSACTION*. 24(51), 162-169.
- [27] RF Cafe. (2021). *Flat Spiral Coil Inductor Calculator*. <https://www.rfcafe.com/>
SAE International. (2020). *SAE J2954_202010: Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology*. Warrendale, PA: SAE International.
- [28] Technical Information Site to Learn the Basics of Design. (2024). *Resonant Circuits: Resonant Frequency and Q Factor*. ROHM Semiconductor.
<https://techweb.rohm.com/product/power-device/si/18332/>
- [29] Xiaolin Mou, and Hongjian Sun. (2015). "Wireless Power Transfer: Survey and Roadmap". *IEEE Wireless Communications*, 20(4), 140-145.

ภาคผนวก ก
งบประมาณ

งบประมาณในการจัดทำชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า แบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

ตารางที่ ก-1 งบประมาณในการจัดทำชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับ
ยานยนต์ไฟฟ้า

ลำดับ	รายการวัสดุ/อุปกรณ์	จำนวน (ชิ้น)	ราคา/หน่วย	ราคา (บาท)
1	สายพาวเวอร์ (AC Power Cord)	1	80	80
2	Safety Breaker 2P 220V ขนาด 10A	1	40	40
3	step-down module 220V turn 5V	1	49	49
4	WeMos D1 ESP8266 WiFi Board	1	120	120
5	2 Channel 5V Relay Module	1	35	35
6	PZEM-061 AC Power Meter มิเตอร์ดิจิตอล	1	350	350
7	Push Button Switch	1	20	20
8	Buzzer	1	10	10
9	Limit switch	2	80	160
10	Pilot Lamp LED Indicator	4	30	120
11	IR2110 IC Gate Drive	1	50	50
12	IC socket 14 Pin	1	4	4
13	Capacitor 0.1 μ F 50V (แบบไม่มีขั้ว)	10	5	50
14	Capacitor 0.334 μ F 50V (แบบไม่มีขั้ว)	3	10	30
15	Capacitor 0.47 μ F 50V (แบบไม่มีขั้ว)	1	12	12
16	Capacitor 47nF 50V (แบบไม่มีขั้ว)	3	12	36
17	Capacitor 220 μ F 160V (แบบมีขั้ว)	4	35	140
18	Capacitor 22 μ F 50V (แบบมีขั้ว)	10	2	20
19	Resistor 5 Ω 1/4W	2	10	20
20	Resistor 120 Ω 1/4W	2	10	20
21	Resistor 4.7 Ω 2W	1	16	16

ตารางที่ ก-1 งบประมาณในการจัดทำชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับ
ยานยนต์ไฟฟ้า (ต่อ)

ลำดับ	รายการวัสดุ/อุปกรณ์	จำนวน (ชิ้น)	ราคา/หน่วย	ราคา (บาท)
22	Resistor 27k Ω 2W	2	14	28
23	Resistor 25 Ω 5W	1	7	7
24	IC Voltage Regulator 78L12	1	15	15
28	Heat Sink	1	69	69
29	พัดลม 12V	1	34	34
30	Terminal Block	5	7	35
31	wima capacitors 0.33 μ F 630V	1	120	120
32	wima capacitors 0.1 μ F 630V	1	100	100
33	สายไฟ THW 4 SQ.MM IEC 01	20 เมตร	22	440
34	สายไฟ THW 6 SQ.MM IEC 01	6 เมตร	30	180
35	Switch-mode Power Rectifiers MUR880E	4	22	88
36	DC Watt Meter 60V 150A	2	220	440
37	1N5408 Diode Rectifiers	1	5	5
38	XH-M604 Battery Charger Control Module	1	100	100
39	Electrolytic Capacitor 220 μ F 160V	2	30	60
40	Battery Capacity Voltage	1	152	152
41	Metal Indicator Light-Led Indicator	1	62	62
42	ON-OFF Switch	1	23	23
43	PC817 (Optocoupler)	1	4	4
44	ESP32 development board WIFI Bluetooth	1	145	145
45	Power Bank 50000 mAh	2	294	588
46	แบตเตอรี่แห้งชนิดตะกั่วกรด ขนาด 12V-7Ah	2	850	1,700
47	แผ่นพลาสติก 240X120mm.	1	1,400	1,400

ตารางที่ ก-1 งบประมาณในการจัดทำชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับ
ยานยนต์ไฟฟ้า (ต่อ)

ลำดับ	รายการวัสดุ/อุปกรณ์	จำนวน (ชิ้น)	ราคา/หน่วย	ราคา (บาท)
48	รางครอบสายไฟ ป้องกันรถทับสาย Rubber Cable Cover	2	390	780
49	ตู้พลาสติกกันน้ำ ขนาด กว้าง 305mm. X ยาว 395mm. X สูง 150mm.	1	504	504
50	ตู้พลาสติกกันน้ำ ขนาด กว้าง 300mm. X ยาว 290mm. X สูง 104mm.	1	395	395
51	High voltage and high current step-down converter	1	260	260
52	พัดลมระบายความร้อน 220V	1	124	124
53	Mosfet IRF540N	8	30	240
54	เบ็ดเตล็ด		1,000	1,000
รวมเป็นเงิน		10,497		

ภาคผนวก ข
การคำนวณและการออกแบบ

ข.1 การคำนวณขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบวงกลม

ข.1.1 สูตรการคำนวณความเหนี่ยวนำของขดลวดแบบ Flat Spiral Coil

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ:

$$L = \frac{N^2 \times A^2}{(30A - 11D_i)} \quad (\text{ข-1})$$

ที่ A คำนวณจาก:

$$A = \frac{(D_i + N(w + s))}{2} \quad (\text{ข-2})$$

เมื่อ:	L	=	ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (μH)
	N	=	จำนวนรอบ
	D _i	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (mm)
	w	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดลวด (mm)
	s	=	ความกว้างระหว่างขดลวดแต่ละรอบ (mm)
	D _o	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (mm)

ข.1.2 การคำนวณขดลวดฝั่ส่ง

ข้อกำหนด: ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ = 12 μH
 สายไฟ THW ขนาด 6 Sq.mm (W = 2.54 mm)

การคำนวณ:

ขั้นตอนที่ 1:	D _i = 65 mm
กำหนดค่าเริ่มต้น	s = 14.25 mm (ระยะห่างระหว่างขดลวด)
	N = 8 รอบ
ขั้นตอนที่ 2:	A = (65 + 8(2.54 + 14.25)) / 2
คำนวณค่า A	A = (65 + 8 × 16.79) / 2
	A = (65 + 134.32) / 2
	A = 99.66 mm
ขั้นตอนที่ 3:	L = 8 ² × 99.66 ² / (30 × 99.66 - 11 × 65)
คำนวณค่าความเหนี่ยวนำ	L = 64 × 9,932.11 / (2,989.8 - 715)
	L = 635,655.04 / 2,274.8
	L = 279.36 μH

การปรับปรุง: เนื่องจากค่าที่ได้สูงเกินไป จึงปรับลดจำนวนรอบและระยะห่าง

$N = 8$ รอบ

$D_i = 33.64 \text{ mm}$

$D_o = 65 \text{ mm}$

ผลการคำนวณใหม่: $A = (33.64 + 8 \times 16.79) / 2$

$A = 83.98 \text{ mm}$

$L = 64 \times 7,052.23 / (30 \times 83.98 - 11 \times 33.64)$

$L = 11.00 \text{ } \mu\text{H} \checkmark$

Flat spiral coil inductor calculator

Formula used in this calculation is based on the Harold A. Wheeler approximations.

$L (\mu\text{H}) = r^2 \cdot A^2 / (30 \cdot A - 11 \cdot D_i)$
 $A = (D_i + N \cdot (w + s)) / 2$

...where:

D_i = inner diameter in inches.
 s = distance between windings in inches.
 w = wire diameter in inches.
 N = number of turns.
 D_o = outer diameter.
 1 inch = 0.0254m = 25.4mm.

This formula applies at 'low' frequencies (<30MHz) using enameled copper wire. Some people call it "magnet wire".

Coil inner diameter (Di): mm

Number of turns (N):

Wire Diameter (w): mm

Spacing between turns (s): mm

Inductance (L): uH

Outer diameter (Dout): mm

Wire lenght (Wl): m

Calculate Clear

ภาพที่ ข-1 หน้าเว็บ Flat spiral coil inductor calculator

Coil inner diameter (Di): mm

Number of turns (N):

Wire Diameter (w): mm

Spacing between turns (s): mm

Inductance (L): uH

Outer diameter (Dout): mm

Wire lenght (Wl): m

Calculate Clear

ภาพที่ ข-2 แสดงการคำนวณหน้าเว็บ Flat spiral coil inductor calculator

ข.1.3 การคำนวณขดลวดฝักรับ (Multi-layer)

สูตรสำหรับขดลวดหลายชั้น:

$$L(\mu H) = \frac{(31.6 \times r_1^2 \times N^2)}{(6 \times r_1 + 9 \times L + 10 \times (r_2 - r_1))} \quad (\text{ข-3})$$

เมื่อ: r_1 = รัศมีภายใน (mm)
 r_2 = รัศมีภายนอก (mm)
 L = ความยาวของขดลวด (mm)
 N = จำนวนรอบทั้งหมด

ข้อกำหนด: ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ = 37 μH
 สายไฟ THW ขนาด 4 Sq.mm (เส้นผ่านศูนย์กลาง = 1.06 mm)
 Number of Layers = 2 ชั้น
 Turns per Layer = 8 รอบ
 $N = 16$ รอบ

การคำนวณ:

ชั้นตอนที่ 1: $r_1 = 20$ mm
 กำหนดค่าเริ่มต้น $r_2 = 43.185$ mm
 $L = 2 \times 1.06 = 2.12$ mm
 ชั้นตอนที่ 2: $L = (31.6 \times 20^2 \times 16^2) / (6 \times 20 + 9 \times 2.12 + 10 \times (43.185 - 20))$
 คำนวณค่าความเหนี่ยวนำ $(43.185 - 20)$
 $L = (31.6 \times 400 \times 256) / (120 + 19.08 + 231.85)$
 $L = 3,235,840 / 370.93$
 $L = 35.25 \mu H$

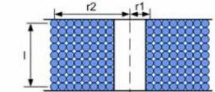
Multi layer air core inductor calculator

Formula used in this calculation is from Wheelers approximations which is accurate to <1% if the cross section is near square shaped.:

$$L (\mu H) = 31.6 \cdot N^2 \cdot r_1^2 / 6 \cdot r_1 + 9 \cdot L + 10 \cdot (r_2 - r_1)$$

where....
 L(μH)= Inductance in microHenries
 N = Total Number of turns
 r1 = Radius of the inside of the coil in meters
 r2 = Radius of the outside of the coil in meters
 L = Length of the coil in meters

This formula applies at 'low' frequencies (<3MHz) using enameled copper wire tightly wound.



Inductance (L): mH μH

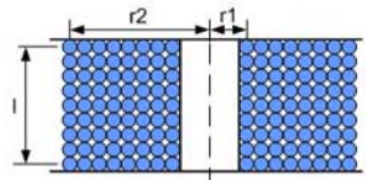
Coil Inner Diameter (d): mm

Coil Length (l): mm

Wire Gauge: AWG

Number of Turns (N):	
Turns per Layer:	
Number of Layers:	
Coil Outer Diameter (D):	mm
Wire Diameter:	mm
Wire Length:	meters
DC Resistance (R):	Ohms (at 20°C,

ภาพที่ ข-3 หน้าเว็บ Multi Layer air core inductor calculator



Inductance (L): uH

Coil Inner Diameter (d): mm

Coil Length (l): mm

Wire Gauge: AWG

Number of Turns (N):	17
Turns per Layer:	7.53
Number of Layers:	2.26
Coil Outer Diameter (D):	86.37 mm mm
Wire Diameter:	1.06 mm mm
Wire Length:	4.34 meters meters
DC Resistance (R):	0.09 Ohms (at 20°C,

ภาพที่ ข-2 แสดงการคำนวณหน้าเว็บ Multi Layer air core inductor calculator

ข.2 การคำนวณตัวเก็บประจุเพื่อให้เกิดเรโซแนนซ์

ข.2.1 ความถี่เรโซแนนซ์

สูตรพื้นฐาน:

$$f_0 = \frac{1}{(2\pi\sqrt{LC})} \quad (\text{ข-4})$$

การแปลงเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุ:

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L} \quad (\text{ข-5})$$

ข.2.2 การคำนวณตัวเก็บประจุฝั่งส่ง

ข้อกำหนด:

$$\begin{aligned} L_1 &= 11.688 \mu\text{H} \\ &= 11.688 \times 10^{-6} \text{ H} \\ F_0 &= 81.40 \text{ kHz} \\ &= 81,400 \text{ Hz} \end{aligned}$$

การคำนวณ:

$$\begin{aligned} C_1 &= 1 / (4\pi^2 \times (81,400)^2 \times 11.688 \times 10^{-6}) \\ C_1 &= 1 / (4 \times 9.8696 \times 6,625,960,000 \times 11.688 \times 10^{-6}) \\ C_1 &= 1 / 3.056 \times 10^{-6} \\ C_1 &= 327.08 \times 10^{-9} \text{ F} \\ C_1 &= 327.08 \text{ nF} \end{aligned}$$

ข.2.3 การคำนวณตัวเก็บประจุฝั่งรับ

ข้อกำหนด:

$$\begin{aligned} L_2 &= 37.13 \mu\text{H} \\ &= 37.13 \times 10^{-6} \text{ H} \\ F_0 &= 81.40 \text{ kHz} \\ &= 81,400 \text{ Hz} \end{aligned}$$

การคำนวณ:

$$\begin{aligned} C_2 &= 1 / (4\pi^2 \times (81,400)^2 \times 37.13 \times 10^{-6}) \\ C_2 &= 1 / (4 \times 9.8696 \times 6,625,960,000 \times 37.13 \times 10^{-6}) \\ C_2 &= 1 / 9.715 \times 10^{-6} \\ C_2 &= 102.96 \times 10^{-9} \text{ F} \\ C_2 &= 102.96 \text{ nF} \end{aligned}$$

ข.3 การคำนวณกระแสและเวลาชาร์จแบตเตอรี่

ข.3.1 กระแสชาร์จที่เหมาะสม

สูตรการคำนวณ:

$$I_{\text{charge}} = 0.1 \times C_{\text{battery}} \text{ ถึง } 0.15 \times C_{\text{battery}} \quad (\text{ข-6})$$

เมื่อ: I_{charge} = กระแสชาร์จ (A)
 C_{battery} = รัศมีภายนอก (mm)

สำหรับแบตเตอรี่ 26 Ah:

$$I_{\text{charge}} = 0.1 \times 26 \text{ ถึง } 0.15 \times 26$$

$$C_{\text{battery}} = 2.6 \text{ A ถึง } 3.9 \text{ A}$$

ข.3.2 เวลาการชาร์จ

สูตรการคำนวณ:

$$t_{\text{charge}} = Ah_{\text{needed}} / I_{\text{charge}} \quad (\text{ข-7})$$

เมื่อ: t_{charge} = เวลาการชาร์จ (ชั่วโมง)
 Ah_{needed} = พลังงานที่ต้องชาร์จเพิ่ม (Ah)

การคำนวณ:

การคำนวณพลังงานที่ต้องชาร์จ: $Ah_{\text{needed}} = 0.6 \times C_{\text{battery}}$
 $= 0.6 \times 26$
 $= 15.6 \text{ Ah}$

การคำนวณเวลาชาร์จ: $t_{\text{charge}} = 15.6 / 2.6$
 $= 6 \text{ ชั่วโมง}$

ข.4 การคำนวณแรงดันชาร์จ

ข.4.1 แรงดันชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ 24V

สูตรการคำนวณ:

$$V_{\text{charge}} = V_{\text{battery}} \times 1.1 \text{ ถึง } V_{\text{battery}} \times 1.15 \quad (\text{ข-8})$$

การคำนวณ:

$$\begin{aligned} \text{สำหรับแบตเตอรี่ 24V: } V_{\text{charge}} &= 24 \times 1.1 \text{ ถึง } 24 \times 1.15 \\ V_{\text{charge}} &= 26.4 \text{ V ถึง } 27.6 \text{ V} \end{aligned}$$

ข.5 การคำนวณประสิทธิภาพ

ข.5.1 ประสิทธิภาพ DC-DC

สูตรการคำนวณ:

$$\eta_{\text{DC}} = (P_{\text{out}} / P_{\text{inDC}}) \times 100\% \quad (\text{ข-9})$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ: } \eta_{\text{DC}} &= \text{ประสิทธิภาพ DC-DC (\%)} \\ P_{\text{out}} &= \text{กำลังไฟฟ้าขาออก (W)} \\ P_{\text{inDC}} &= \text{กำลังไฟฟ้าขาเข้า DC (W)} \end{aligned}$$

ข.5.2 ประสิทธิภาพ AC-DC

สูตรการคำนวณ:

$$\eta_{\text{AC}} = (P_{\text{out}} / P_{\text{inAC}}) \times 100\% \quad (\text{ข-10})$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ: } \eta_{\text{AC}} &= \text{ประสิทธิภาพ AC-DC (\%)} \\ P_{\text{inAC}} &= \text{กำลังไฟฟ้าขาเข้า AC (W)} \end{aligned}$$

ข.6 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

ข.6.1 การคำนวณ Duty Cycle

สูตรสำหรับ Half-Bridge Inverter:

$$\text{Duty Cycle} = 50\% \quad (\text{ข-11})$$

ข.6.2 การคำนวณความถี่ PWM

สูตรการคำนวณ:

$$f_{\text{PWM}} = 1 / T_{\text{PWM}} \quad (\text{ข-12})$$

เมื่อ: $f_{\text{PWM}} =$ ความถี่ PWM (Hz)
 $T_{\text{PWM}} =$ คาบเวลา PWM (s)

สำหรับการตั้งค่า SG3525:

$$\begin{aligned} f_{\text{PWM}} &= 81.39 \text{ kHz} \\ T_{\text{PWM}} &= 1 / 81,390 = 12.28 \mu\text{s} \end{aligned}$$

ข.7 การคำนวณการสูญเสียในระบบ

ข.7.1 การสูญเสียในขดลวด

สูตรการคำนวณ:

$$P_{\text{loss}_{\text{coil}}} = I^2 R \quad (\text{ข-13})$$

เมื่อ: $P_{\text{loss}_{\text{coil}}} =$ การสูญเสียในขดลวด (W)
 $I =$ กระแสไฟฟ้า (A)
 $R =$ ความต้านทานของขดลวด (Ω)

ข.7.2 การสูญเสียในการถ่ายโอน

สูตรการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมโยง:

$$k = \frac{M}{\sqrt{(L_1 L_2)}} \quad (\text{ข-14})$$

เมื่อ: $K =$ ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมโยง
 $M =$ ความเหนี่ยวนำร่วม (H)
 $L_1 L_2 =$ ความเหนี่ยวนำของขดลวดฝั่งส่งและรับ (H)

ภาคผนวก ค
SOURCE CODE

Source Code ที่เขียนลงบอร์ด WEMOS D1 R2 WIFI ESP8266 Shield Arduino Compatible

```

#include <ESP8266WiFi.h>           // ไลบรารีสำหรับเชื่อมต่อ WiFi
#include <ESP8266WebServer.h>      // ไลบรารีสำหรับสร้าง Web Server

const char* ssid = "TP-Link_F30D"; // ชื่อ WiFi ที่จะเชื่อมต่อ
const char* password = "90001141"; // รหัสผ่าน WiFi

ESP8266WebServer server(80);      // สร้าง Web Server ที่ Port 80
const int relayPin = D7;          // กำหนดขา D7 สำหรับควบคุมรีเลย์
const int buttonPin = D9;         // กำหนดขา D9 สำหรับปุ่มกด
const int buzzerPin = D8;         // กำหนดขา D8 สำหรับ buzzer

bool buttonWasPressed = false;    // ตัวแปรป้องกันการกดปุ่มซ้ำ

void handleRelayOn() {            // เปิดรีเลย์
    digitalWrite(relayPin, HIGH); // ส่งสัญญาณ HIGH ไปยังรีเลย์ (เปิด)
    Serial.println("Relay turned ON by command"); // แสดงข้อความใน Serial Monitor
    server.send(200, "text/plain", "Relay is ON"); // ส่งตอบกลับไปยัง client ว่าเปิดแล้ว
}

void handleRelayOff() {           // ปิดรีเลย์
    digitalWrite(relayPin, LOW);  // ส่งสัญญาณ LOW ไปยังรีเลย์ (ปิด)
    Serial.println("Relay turned OFF by command"); // แสดงข้อความใน Serial Monitor
    server.send(200, "text/plain", "Relay is OFF"); // ส่งตอบกลับไปยัง client ว่าปิดแล้ว
}

void setup() {
    Serial.begin(74880);          // เริ่มต้น Serial Communication
                                    // ที่ baud rate 74880
    pinMode(relayPin, OUTPUT);    // ตั้งขา relayPin เป็น OUTPUT
    digitalWrite(relayPin, HIGH); // ตั้งค่าเริ่มต้นรีเลย์เป็น HIGH (เปิด)

```



```

pinMode(buttonPin, INPUT_PULLUP);           // ตั้งขาปุ่มเป็น INPUT แบบ Pull-up
pinMode(buzzerPin, OUTPUT);                 // ตั้งขา buzzer เป็น OUTPUT
digitalWrite(buzzerPin, LOW);               // ตั้งค่าเริ่มต้น buzzer เป็น LOW
                                           // (ปิด)

WiFi.begin(ssid, password);                 // เริ่มการเชื่อมต่อ WiFi
Serial.print("Connecting to WiFi");        // แสดงข้อความ
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {    // ตรวจสอบจนกว่าจะเชื่อมต่อได้
    delay(500); Serial.print(".");         // หน่วงเวลา 500ms และแสดงจุด
}
Serial.println("\nConnected to WiFi");     // แสดงข้อความเมื่อเชื่อมต่อสำเร็จ
Serial.print("IP Address: ");              // แสดงข้อความ
Serial.println(WiFi.localIP());            // แสดง IP Address ที่ได้รับ

server.on("/relay/on", HTTP_POST, handleRelayOn); // กำหนด route สำหรับเปิดรีเลย์
server.on("/relay/off", HTTP_POST, handleRelayOff); // กำหนด route สำหรับปิดรีเลย์

server.onNotFound([]() {                  // ฟังก์ชันสำหรับ URL ที่ไม่พบ
    Serial.print("Unknown request: ");    // แสดงข้อความ
    Serial.println(server.uri());         // แสดง URL ที่ร้องขอ
    server.send(404, "text/plain", "Not found"); // ส่งตอบกลับ 404 Not Found
});

server.begin();                          // เริ่มต้น Web Server
Serial.println("Server started");         // แสดงข้อความ
}

void loop() {
    server.handleClient();                // จัดการ client requests

    bool buttonState = digitalRead(buttonPin) == LOW; // อ่านสถานะปุ่ม (LOW = ถูกกด)
    if (buttonState && !buttonWasPressed) { // ถ้าปุ่มถูกกดและยังไม่ได้ process

```

```

Serial.println("Button pressed, activating buzzer with pattern for 5 seconds...");

unsigned long startTime = millis();           // เก็บเวลาเริ่มต้น
while (millis() - startTime < 5000) {        // วงรอบเป็นเวลา 5 วินาที
    digitalWrite(buzzerPin, HIGH);           // เปิด buzzer
    delay(200);                               // หน่วงเวลา 200ms
    digitalWrite(buzzerPin, LOW);            // ปิด buzzer
    delay(200);                               // หน่วงเวลา 200ms
}

buttonWasPressed = true;                     // ตั้ง flag ว่าได้ process แล้ว
}
else if (!buttonState && buttonWasPressed) {  // ถ้าปล่อยปุ่มแล้ว
    buttonWasPressed = false;                // รีเซ็ต flag เพื่อให้กดได้อีก
}
}

```

Source Code ที่เขียนลงบอร์ด ESP-WROOM-32 Wi-Fi and Bluetooth

```

#include <WiFi.h>                                // ไลบรารีสำหรับเชื่อมต่อ WiFi
                                                // (สำหรับ ESP32)

#include <HTTPClient.h>                          // ไลบรารีสำหรับส่ง HTTP requests

const char* ssid = "TP-Link_F30D";              // ชื่อ WiFi ที่จะเชื่อมต่อ
const char* password = "90001141";             // รหัสผ่าน WiFi
const char* serverIP = "192.168.0.145";         // IP Address ของ ESP8266 server
                                                // ที่จะส่งคำสั่งไป

const int buttonPin = 4;                        // กำหนดขา 4 สำหรับปุ่มกด
const int ledPin = 12;                         // กำหนดขา 12 สำหรับ LED
                                                // แสดงสถานะ

bool lastButtonState = HIGH;                   // เก็บสถานะปุ่มครั้งที่แล้ว
                                                // (เริ่มต้น HIGH เพราะใช้ pull-up)

void setup() {
    Serial.begin(115200);                       // เริ่มต้น Serial Communication
                                                // ที่ baud rate 115200

    pinMode(buttonPin, INPUT_PULLUP);           // ตั้งขาปุ่มเป็น INPUT แบบ Pull-up
                                                // (ปุ่มต่อกับ GND)

    pinMode(ledPin, OUTPUT);                    // ตั้งขา LED เป็น OUTPUT

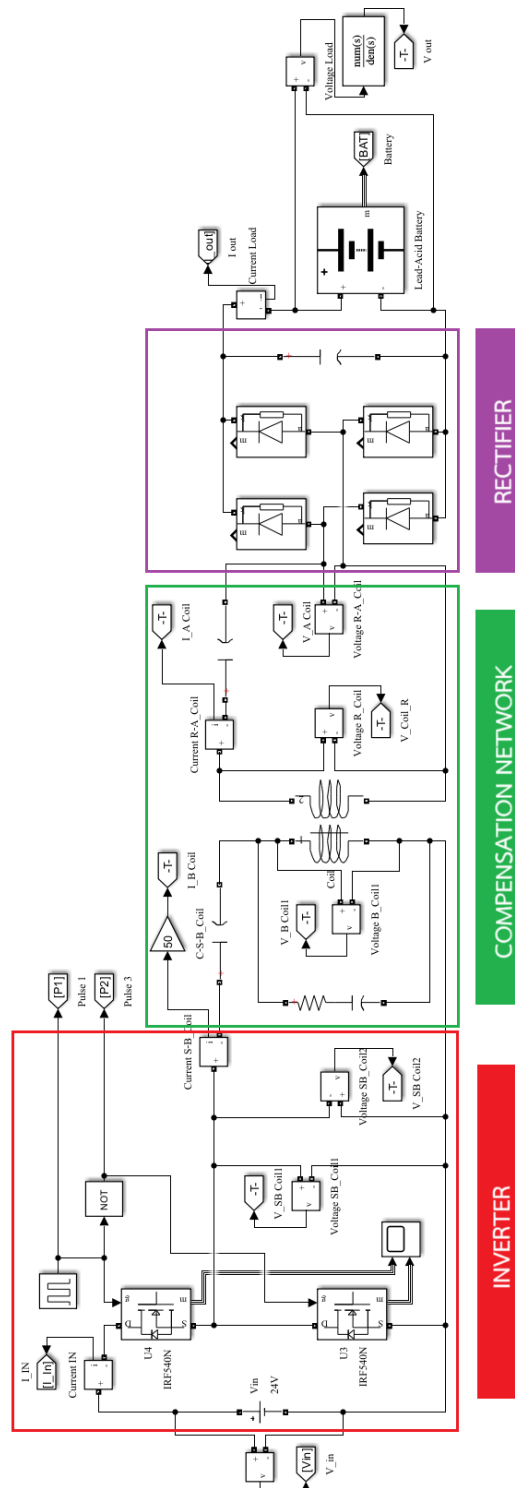
    WiFi.begin(ssid, password);                // เริ่มการเชื่อมต่อ WiFi
    Serial.print("Connecting to WiFi");        // แสดงข้อความ
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {    // จนกว่าจะเชื่อมต่อได้
        delay(500); Serial.print(".");         // หน่วงเวลา 500ms และแสดงจุด
    }
    Serial.println("\nConnected to WiFi");      // แสดงข้อความเมื่อเชื่อมต่อสำเร็จ
}

void loop() {
    bool buttonState = digitalRead(buttonPin);  // อ่านสถานะปุ่มปัจจุบัน

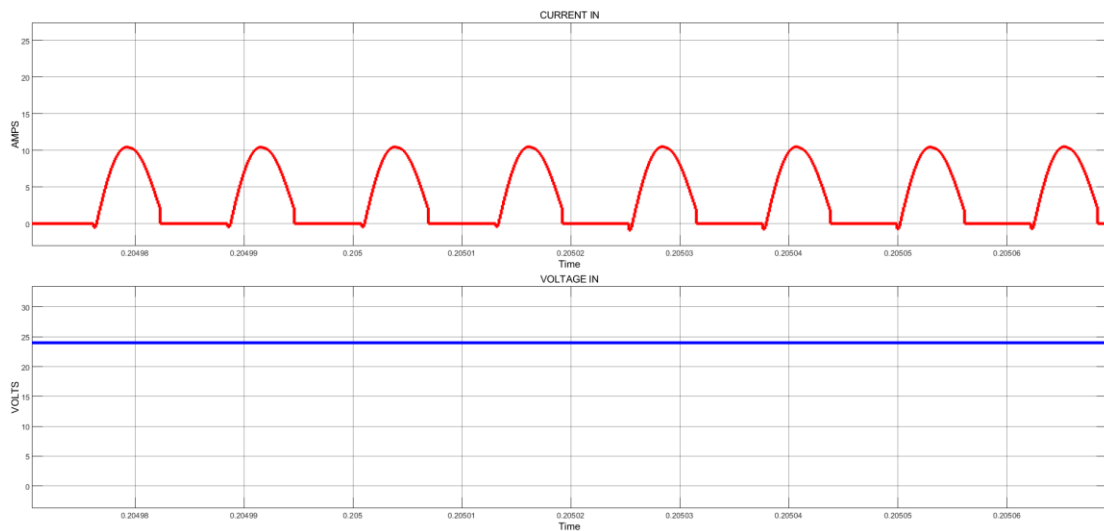
```


ภาคผนวก ง
ผลการจำลองจาก MATLAB/Simulink

ง.1 จำลองระบบการถ่ายโอนพลังงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink



ภาพที่ ง-1 วงจรที่จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink



ภาพที่ ง-2 สัญญาณ Input ของวงจร

ง.2 วงจร Inverter

Block Parameters: Pulse Generator

Pulse Generator

Output pulses:

```

if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on
    Y(t) = Amplitude
else
    Y(t) = 0
end

```

Pulse type determines the computational technique used.

Time-based is recommended for use with a variable step solver, while Sample-based is recommended for use with a fixed step solver or within a discrete portion of a model using a variable step solver.

Parameters

Pulse type: Time based

Time (t): Use simulation time

Amplitude: 1

Period (secs): 1/81390 1.2287e-05

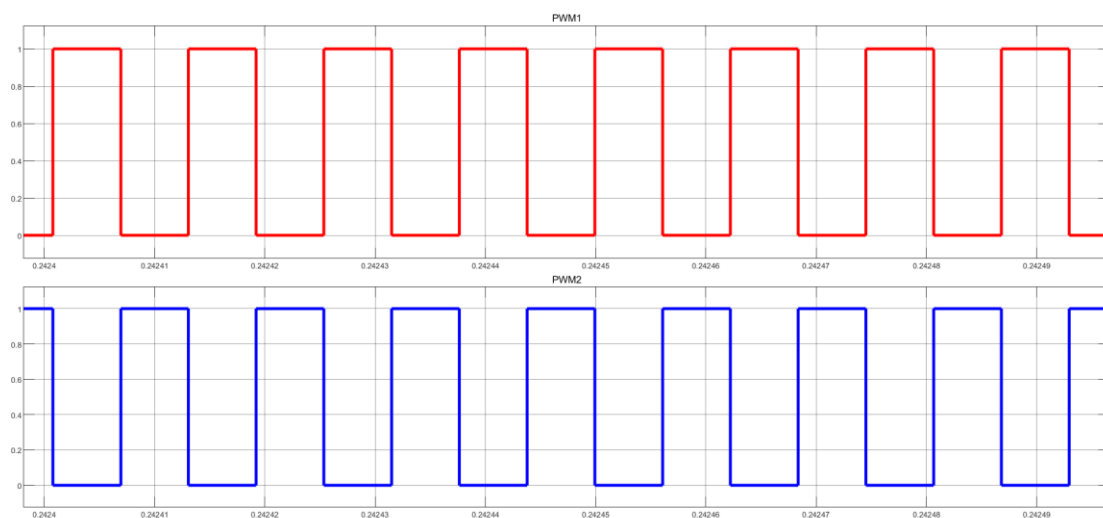
Pulse Width (% of period): 50

Phase delay (secs): 0

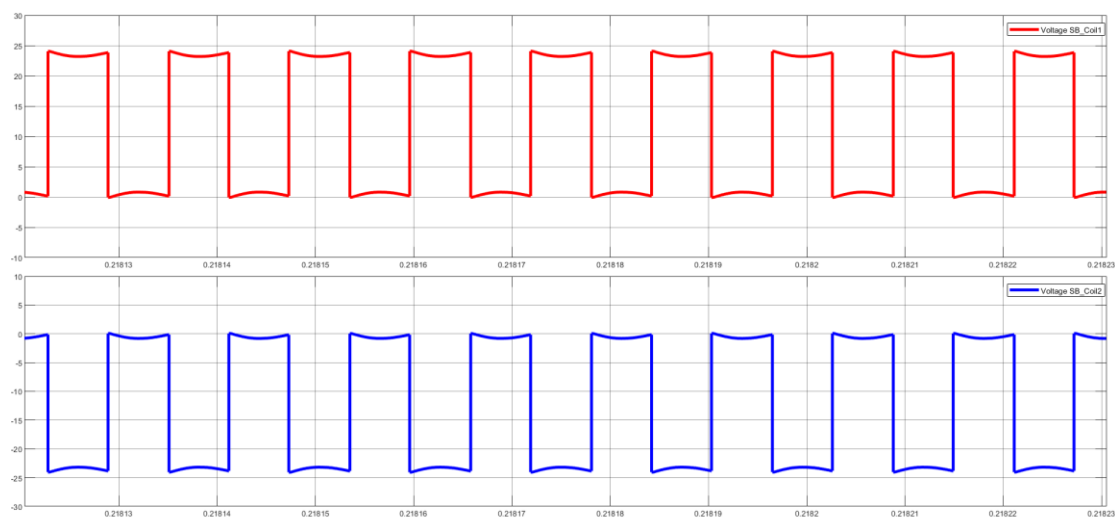
☒ Interpret vector parameters as 1-D

OK Cancel Help Apply

ภาพที่ ง-3 การตั้งค่า Pulse Generator

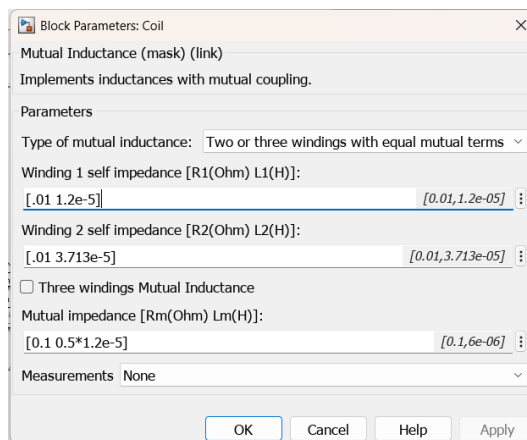


ภาพที่ ง-4 สัญญาณ Pulse Generator ขับขา Gate Mosfet



ภาพที่ ง-5 สัญญาณ Voltage Output เมื่อผ่านวงจร Inverter

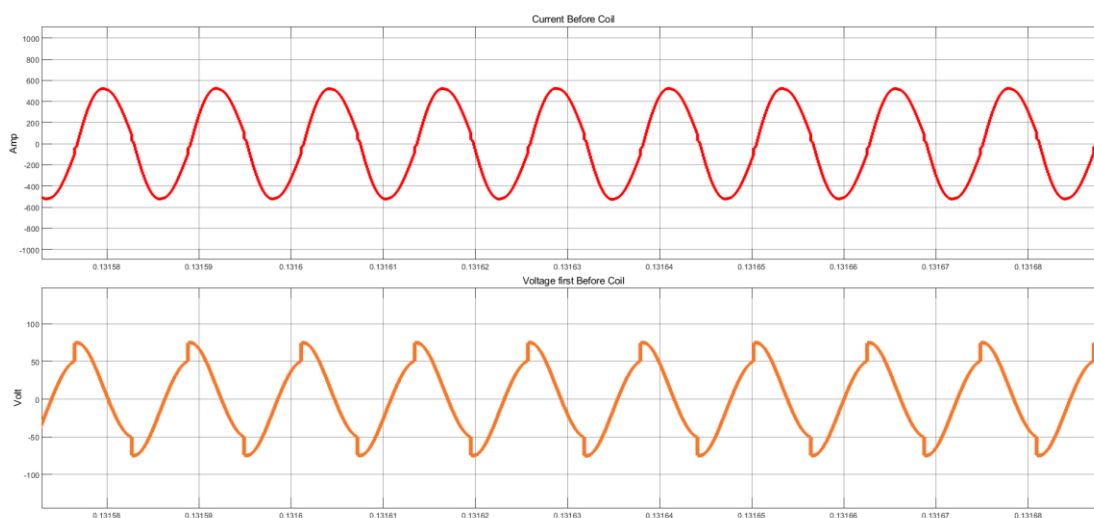
ง.3 วงจร Compensation Network



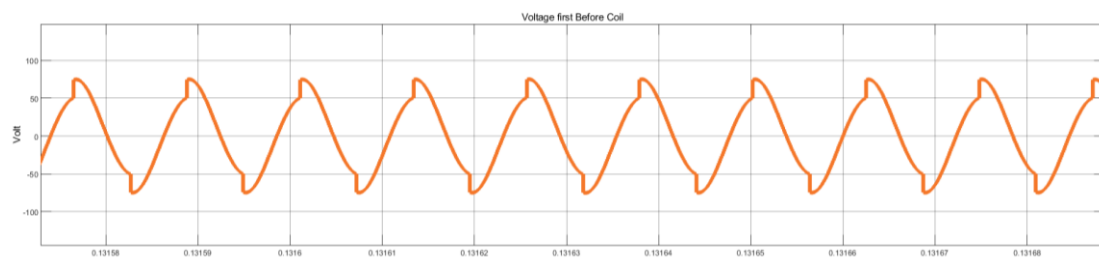
ภาพที่ ง-6 การตั้งค่าพารามิเตอร์ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ตารางที่ ง-1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าและขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าในการจำลอง MATLAB/Simulink

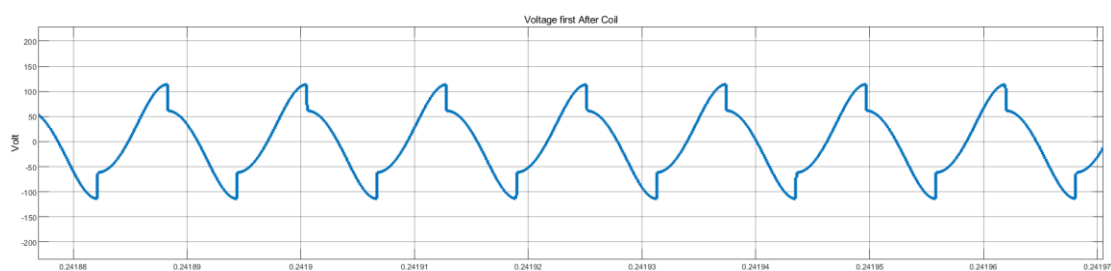
ค่าตัวเก็บประจุฝั่งส่ง (C_1)	ค่าขดลวดเหนี่ยวนำ		ค่าตัวเก็บประจุฝั่งรับ (C_2)
	Winding 1: ฝั่งส่ง (L_1)	Winding 2: ฝั่งรับ (L_2)	
Parameters Branch type: C Capacitance (F): 3.34e-7	Parameters Type of mutual inductance: Two or three windings with equal mutual terms Winding 1 self impedance [R1(Ohm) L1(H)]: [.01 1.2e-5]	Parameters Type of mutual inductance: Two or three windings with equal mutual terms Winding 2 self impedance [R2(Ohm) L2(H)]: [.01 3.713e-5]	Parameters Branch type: C Capacitance (F): 1.027e-7
$C_1 = 0.334 \mu\text{F}$	$L_1 = 12 \mu\text{H}$	$L_2 = 37 \mu\text{H}$	$C_2 = 0.102 \mu\text{F}$



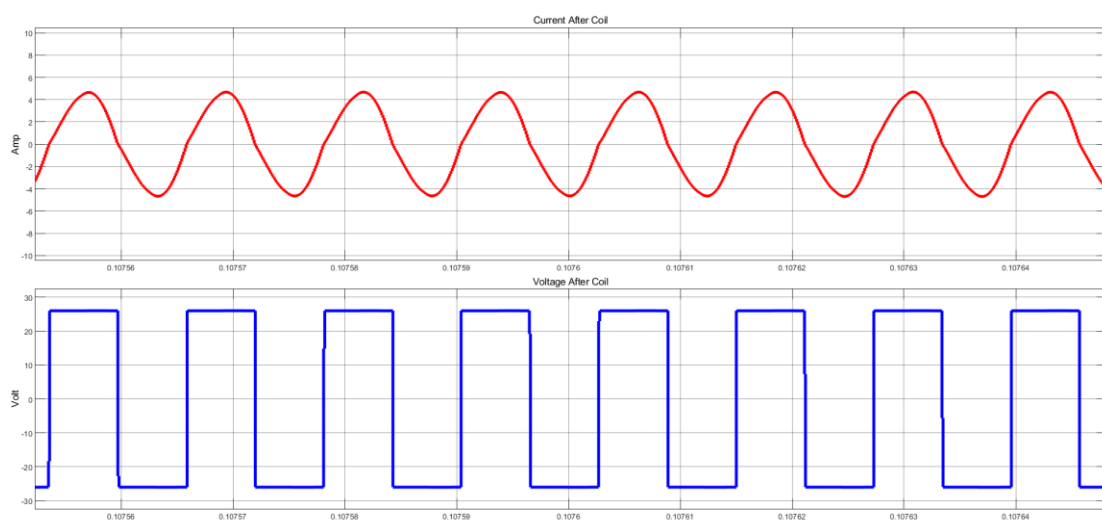
ภาพที่ ง-7 สัญญาณแรงดันและกระแสก่อนเข้าขดลวด



ภาพที่ ง-8 สัญญาณแรงดันฝั่งส่ง

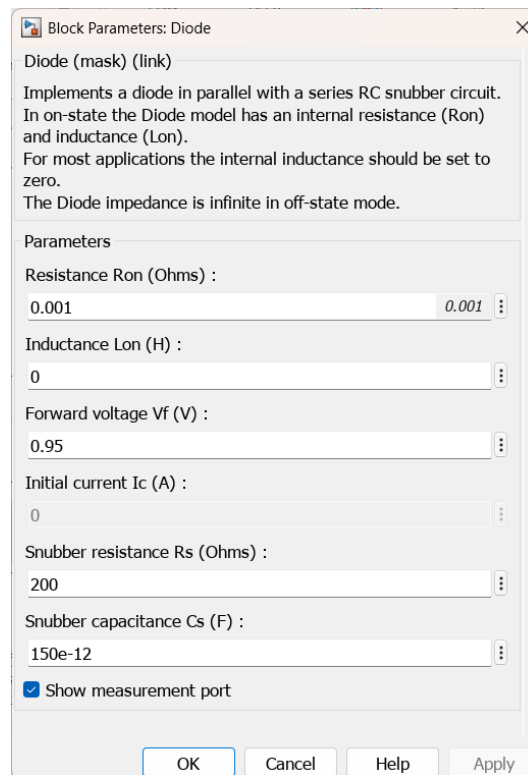


ภาพที่ ง-9 สัญญาณแรงดันฝั่งรับ

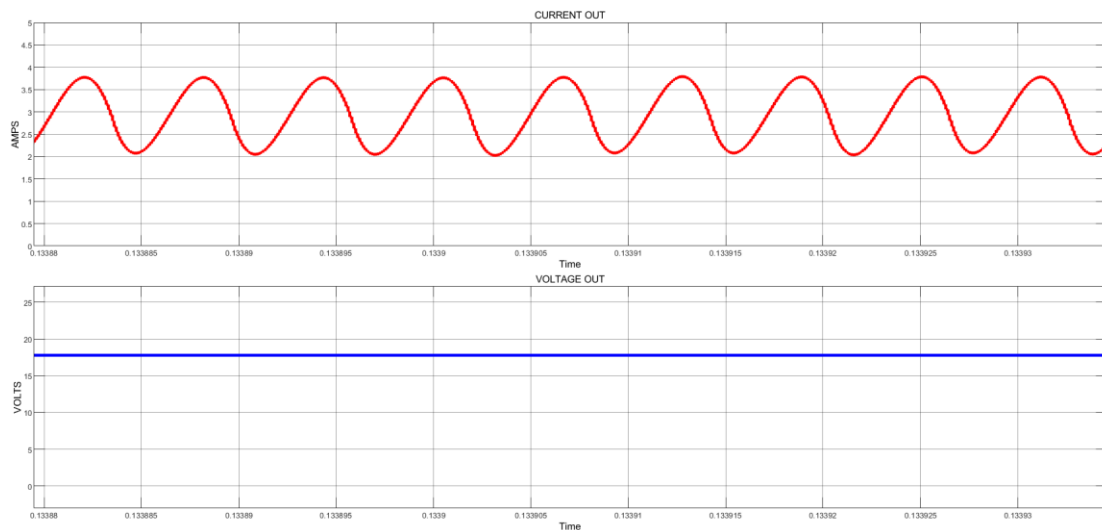


ภาพที่ ง-10 สัญญาณแรงดันและกระแสหลังจากออกจากขดลวด

ง.4 วงจร Rectifier

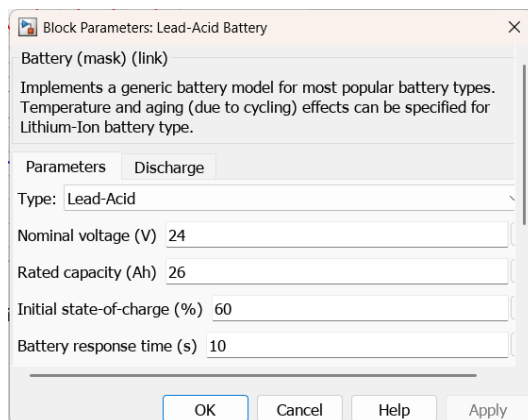


ภาพที่ ง-11 การตั้งค่า Diode ที่วงจร Rectifier

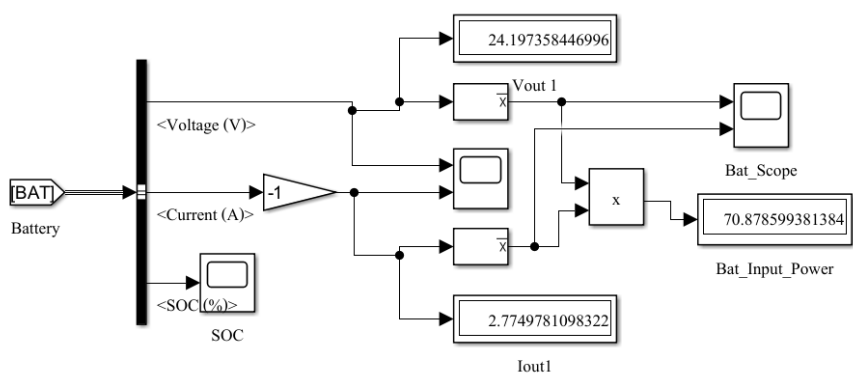


ภาพที่ ง-12 กระแสและแรงดันหลังจากเข้าวงจร Rectifier

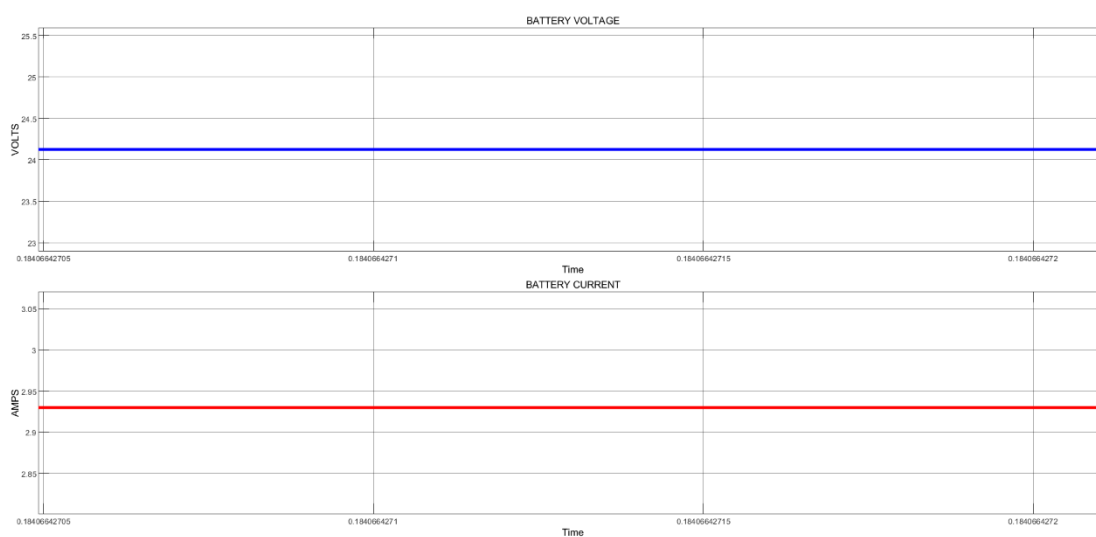
๓.5 Battery



ภาพที่ ๓-13 การตั้งค่าแบตเตอรี่



ภาพที่ ๓-14 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองชาร์จแบตเตอรี่



ภาพที่ ๓-15 กระแสและแรงดันจากการจำลองชาร์จแบตเตอรี่

ภาคผนวก จ
ข้อมูลการทดลองแบบละเอียด

จ.1 บทนำ

ภาคผนวกนี้นำเสนอข้อมูลการทดลองแบบละเอียดของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ครอบคลุมการทดลองด้วยขดลวดรูปแบบต่างๆ และเงื่อนไขการทดลองที่หลากหลาย เพื่อให้ผู้อ่านสามารถศึกษาข้อมูลเชิงลึกและนำไปประยุกต์ใช้ในการวิจัยต่อไปได้

จ.2 เงื่อนไขการทดลองทั่วไป

จ.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด

แหล่งจ่ายไฟ	:	AC 220V $\pm$ 5%, 50Hz
โหลดทดสอบ	:	ความต้านทาน 12Ω , 15W
เครื่องมือวัด AC ผั่งส่ง	:	PZEM-022 AC Digital Power Meter
เครื่องมือวัด DC ผั่งส่ง	:	DC Watt Meter 60V 150A
เครื่องมือวัด DC ผั่งรับ	:	Fluke 179 True-RMS Digital Multimeter Fluke 336 True-RMS Clamp Meter
เครื่องมือวัดสัญญาณ	:	Keysight EDUX1052A Oscilloscope: 50 MHz, 2 analog channels
เครื่องวัดค่า L, C	:	LCR Meter ยี่ห้อ Digicom รุ่น LCR-841

จ.3 รูปแบบขดลวดที่ทำการทดลอง

จ.3.1 ขดลวดภาคส่ง

รูปแบบที่ 1: THW 4 mm² (8 รอบ)

ลักษณะ	:	สายไฟ THW ขนาด 4 Sq.mm, ตัวนำทองแดงแกนเดียว
จำนวนรอบ	:	8 รอบ
ค่าความเหนี่ยวนำ (L)	:	11.745 μ H
ความต้านทานภายใน (R)	:	0.135 Ω
ค่าตัวเก็บประจุ (C)	:	341.2 nF
ความต้านทานภายใน (R)	:	0.271 Ω
ความถี่เรโซแนนซ์คำนวณ	:	79.70 kHz

รูปแบบที่ 2: THW 6 mm² (8 รอบ)

ลักษณะ	:	สายไฟ THW ขนาด 6 Sq.mm, ตัวนำทองแดงหลายแกน
จำนวนรอบ	:	8 รอบ
ค่าความเหนี่ยวนำ (L)	:	11.688 μ H
ความต้านทานภายใน (R)	:	0.136 Ω
ค่าตัวเก็บประจุ (C)	:	341.2 nF
ความต้านทานภายใน (R)	:	0.271 Ω
ความถี่เรโซแนนซ์คำนวณ	:	79.70 kHz

รูปแบบที่ 3: Induction Coil (สำเร็จรูป)

ลักษณะ	:	ขดลวดจากเตาแม่เหล็กไฟฟ้า 3500W
ค่าความเหนี่ยวนำ (L)	:	109.58 μ H
ความต้านทานภายใน (R)	:	0.616 Ω
ค่าตัวเก็บประจุ (C)	:	33.21 nF
ความต้านทานภายใน (R)	:	0.109 Ω
ความถี่เรโซแนนซ์คำนวณ	:	83.43 kHz

จ.3.2 ขดลวดภาครับ

รูปแบบที่ 1: อนุกรม-ขนาน (Series-Parallel)

ลักษณะ	:	สายไฟ THW 4 mm ² , ต่ออนุกรมกัน 2 ชั้น แล้วต่อขนานกัน 2 ชุด
จำนวนรอบ	:	8 รอบ / ชั้น
ค่าความเหนี่ยวนำ (L)	:	37.13 μ H
ความต้านทานภายใน (R)	:	0.247 Ω
ค่าตัวเก็บประจุ (C)	:	102.70 nF
ความต้านทานภายใน (R)	:	0.043 Ω
ความถี่เรโซแนนซ์คำนวณ	:	81.50 kHz

รูปแบบที่ 2: THW 6 mm² (24 รอบ)

ลักษณะ	:	สายไฟ THW ขนาด 6 Sq.mm, ตัวนำทองแดงหลายแกน
จำนวนรอบ	:	24 รอบ
ค่าความเหนี่ยวนำ (L)	:	99.6 μ H
ความต้านทานภายใน (R)	:	0.79 Ω
ค่าตัวเก็บประจุ (C)	:	32.26 nF
ความต้านทานภายใน (R)	:	0.201 Ω
ความถี่เรโซแนนซ์คำนวณ	:	88.79 kHz

รูปแบบที่ 3: Induction Coil (สำเร็จรูป)

ลักษณะ	:	ขดลวดจากเตาแม่เหล็กไฟฟ้า 3500W
ค่าความเหนี่ยวนำ (L)	:	109.74 μ H
ความต้านทานภายใน (R)	:	0.473 Ω
ค่าตัวเก็บประจุ (C)	:	32.23 nF
ความต้านทานภายใน (R)	:	0.140 Ω
ความถี่เรโซแนนซ์คำนวณ	:	84.63 kHz

รูปแบบที่ 4: Induction Coil (สำเร็จรูป)

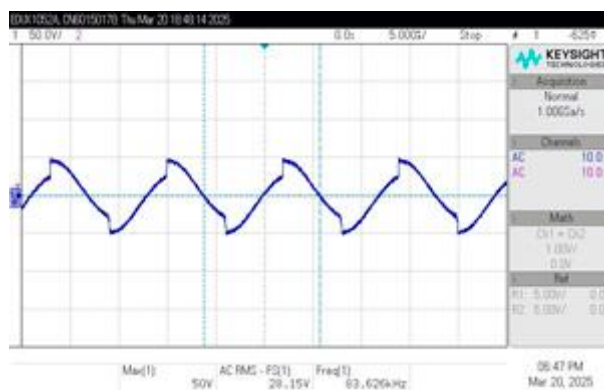
ลักษณะ	:	ขดลวดจากเตาแม่เหล็กไฟฟ้า 2000W
ค่าความเหนี่ยวนำ (L)	:	102.32 μ H
ความต้านทานภายใน (R)	:	0.490 Ω
ค่าตัวเก็บประจุ (C)	:	33.21 nF
ความต้านทานภายใน (R)	:	0.109 Ω
ความถี่เรโซแนนซ์คำนวณ	:	86.34 kHz

จ.4 ข้อมูลการทดลองรายละเอียด

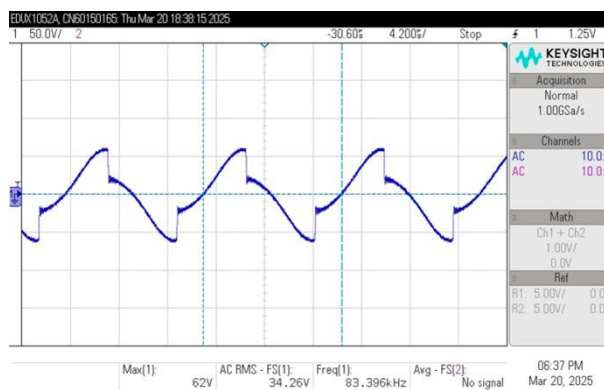
จ.4.1 การทดลองที่ 1: รูปแบบที่ 1 (THW 4 mm² (8)) - รูปแบบที่ 1 (อนุกรม+ขนาน)



ภาพที่ จ-1 รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 1



ภาพที่ จ-2 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 1



ภาพที่ จ-3 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 1

ตารางที่ จ-1 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 1 ที่ความถี่ 80.47 kHz

ระยะห่างของ ขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	226	0.34	39.6	19.30	1.32	25.48	13.56	1.0	13.56	53.23	34.24
2	226	0.40	47.0	19.30	1.67	32.23	15.02	1.2	18.02	55.92	38.35
3	225	0.45	54.0	19.29	2.00	38.58	16.05	1.3	20.87	54.08	38.64
4	225	0.51	64.5	19.27	2.49	47.98	16.95	1.4	23.73	49.46	36.79
5	225	0.58	73.1	19.27	2.89	55.69	17.17	1.3	22.32	40.08	30.53
6	225	0.64	82.4	19.26	3.33	64.14	16.78	1.3	21.81	34.01	26.47
7	225	0.69	89.2	19.26	3.62	69.72	15.84	1.2	19.01	27.26	21.31
8	225	0.71	94.2	19.26	3.84	73.96	14.75	1.1	16.23	21.94	17.22
9	225	0.74	97.4	19.26	4.01	77.23	13.65	1.0	13.65	17.67	14.01
10	225	0.76	100.3	19.26	4.13	79.54	12.25	0.9	11.03	13.86	10.99

ตารางที่ จ-2 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 1 ที่ความถี่ 83.69 kHz

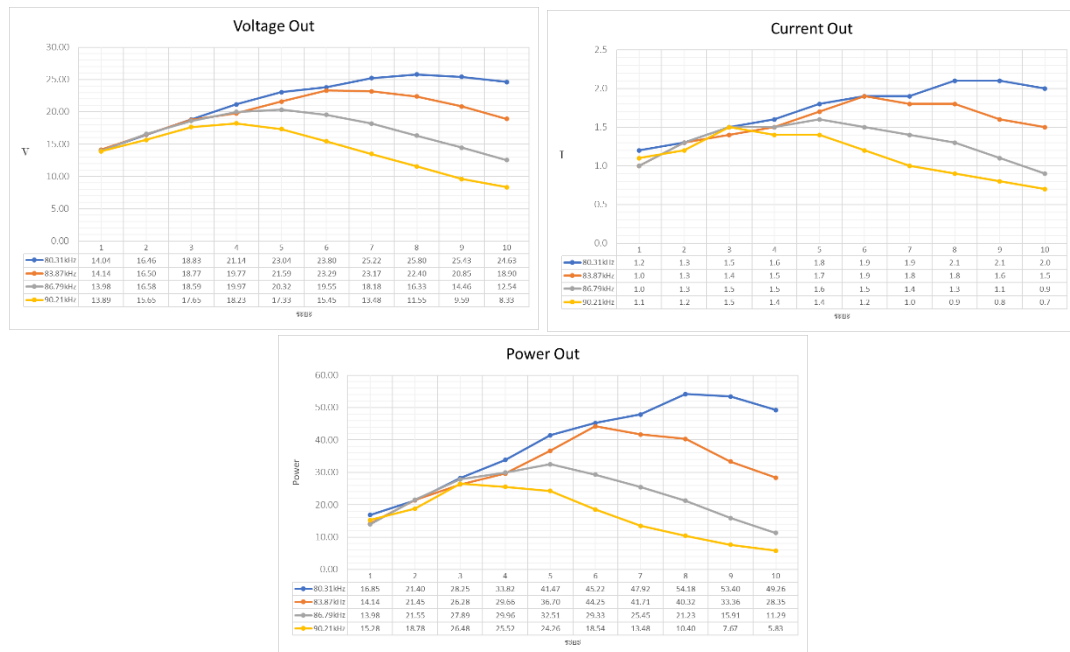
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	226	0.34	38.4	19.29	1.27	24.50	13.27	0.9	11.94	48.75	31.10
2	225	0.38	45.3	19.28	1.60	30.85	14.73	1.0	14.73	47.75	32.52
3	225	0.40	47.9	19.29	1.71	32.99	15.14	1.0	15.14	45.90	31.61
4	225	0.46	56.2	19.28	2.11	40.68	16.05	1.2	19.26	47.34	34.27
5	226	0.51	64.4	19.29	2.47	47.65	15.90	1.2	19.08	40.05	29.63
6	224	0.53	67.2	19.28	2.60	50.13	14.90	1.0	14.90	29.72	22.17
7	225	0.54	68.7	19.28	2.68	51.67	13.78	0.9	12.40	24.00	18.05
8	225	0.55	68.9	19.28	2.67	51.48	12.30	0.8	9.84	19.12	14.28
9	225	0.54	68.0	19.27	2.63	50.68	10.92	0.7	7.64	15.08	11.24
10	225	0.53	67.9	19.29	2.63	50.73	9.69	0.7	6.78	13.37	9.99

ตารางที่ จ-3 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 1 ที่ความถี่ 86.56 kHz

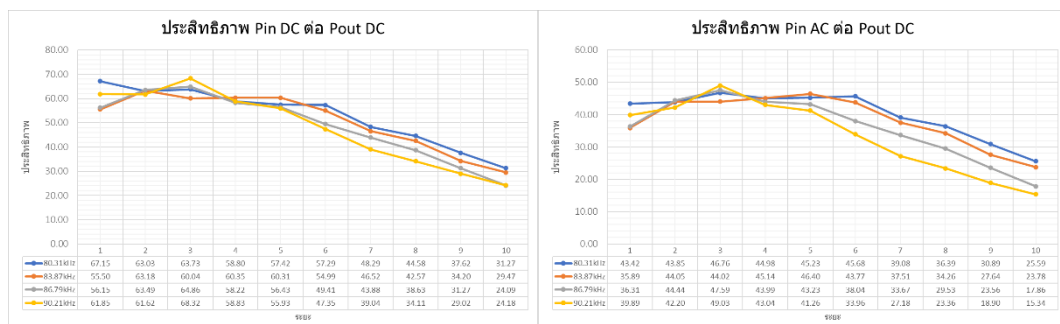
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	225	0.34	38.9	19.30	1.29	24.90	13.39	1.0	13.39	53.78	34.42
2	226	0.39	45.6	19.29	1.60	30.86	14.67	1.1	16.14	52.28	35.39
3	225	0.42	50.4	19.28	1.83	35.28	15.24	1.2	18.29	51.83	36.29
4	226	0.45	54.5	19.29	2.02	38.97	15.08	1.2	18.10	46.44	33.20
5	226	0.46	55.8	19.29	2.07	39.93	14.38	1.2	17.26	43.22	30.92
6	225	0.45	54.8	19.28	2.03	39.14	12.92	1.0	12.92	33.01	23.58
7	225	0.44	53.0	19.29	1.94	37.42	11.28	0.9	10.15	27.13	19.15
8	224	0.43	51.5	19.29	1.87	36.07	10.02	0.8	8.02	22.22	15.57
9	225	0.42	49.8	19.28	1.79	34.51	8.60	0.7	6.02	17.44	12.09
10	225	0.41	49.5	19.28	1.76	33.93	7.66	0.6	4.60	13.54	9.28

ตารางที่ จ-4 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 1 ที่ความถี่ 90.73 kHz

ระยะทาง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$	$\eta \rightarrow \text{EFF}$
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)			(ประสิทธิภาพ	(ประสิทธิภาพ
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	) DC	) AC
1	224	0.34	38.5	19.29	1.27	24.50	13.25	1.0	13.25	54.09	34.42
2	224	0.38	44.1	19.29	1.54	29.71	14.27	1.1	15.70	52.84	35.59
3	225	0.40	47.2	19.29	1.67	32.21	14.29	1.1	15.72	48.80	33.30
4	224	0.40	46.7	19.29	1.66	32.02	13.38	1.1	14.72	45.96	31.52
5	224	0.38	44.6	19.29	1.55	29.90	11.97	1.0	11.97	40.03	26.84
6	224	0.36	41.2	19.29	1.40	27.01	10.22	0.8	8.18	30.27	19.84
7	224	0.34	38.8	19.29	1.28	24.69	8.80	0.6	5.28	21.38	13.61
8	224	0.32	36.6	19.29	1.19	22.96	7.60	0.5	3.80	16.55	10.38
9	225	0.31	34.5	19.28	1.11	21.40	6.38	0.4	2.55	11.92	7.40
10	225	0.30	33.2	19.28	1.06	20.44	5.34	0.3	1.60	7.84	4.83



ภาพที่ จ-4 กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 1

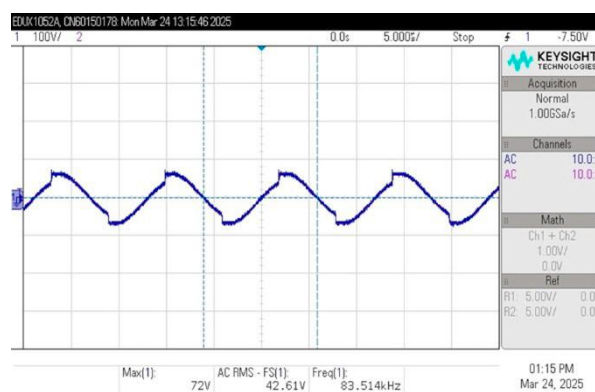


ภาพที่ จ-5 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 1

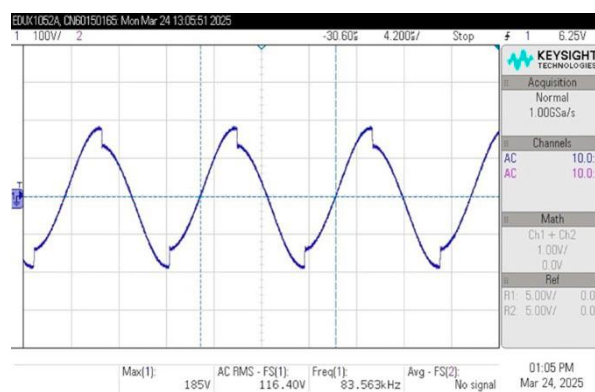
จ.4.2 การทดลองที่ 2 : รูปแบบที่ 1 (THW 4 mm² (8)) - รูปแบบที่ 2 (THW 6 mm² (24 รอบ))



ภาพที่ จ-6 รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 2



ภาพที่ จ-7 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 2



ภาพที่ จ-8 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 2

ตารางที่ จ-5 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 2 ที่ความถี่ 80.53 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	223	0.22	23.5	19.31	0.65	12.55	8.87	0.7	6.21	49.47	26.42
2	223	0.24	25.7	19.31	0.76	14.68	9.70	0.8	7.76	52.88	30.19
3	223	0.27	30.3	19.30	0.94	18.14	11.19	0.8	8.95	49.34	29.54
4	223	0.32	37.4	19.30	1.22	23.55	13.04	1.1	14.34	60.92	38.35
5	223	0.41	49.7	19.28	1.79	34.51	15.91	1.2	19.09	55.32	38.41
6	222	0.51	63.0	19.27	2.40	46.25	18.37	1.5	27.56	59.58	43.74
7	222	0.63	79.1	19.26	3.13	60.28	20.64	1.7	35.09	58.20	44.36
8	222	0.77	97.8	19.25	4.01	77.19	22.66	1.9	43.05	55.77	44.02
9	222	0.92	116.8	19.25	4.87	93.75	24.06	1.9	45.71	48.76	39.14
10	220	1.05	135.8	19.22	5.71	109.75	24.78	2.0	49.56	45.16	36.49

ตารางที่ จ-6 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 2 ที่ความถี่ 83.61 kHz

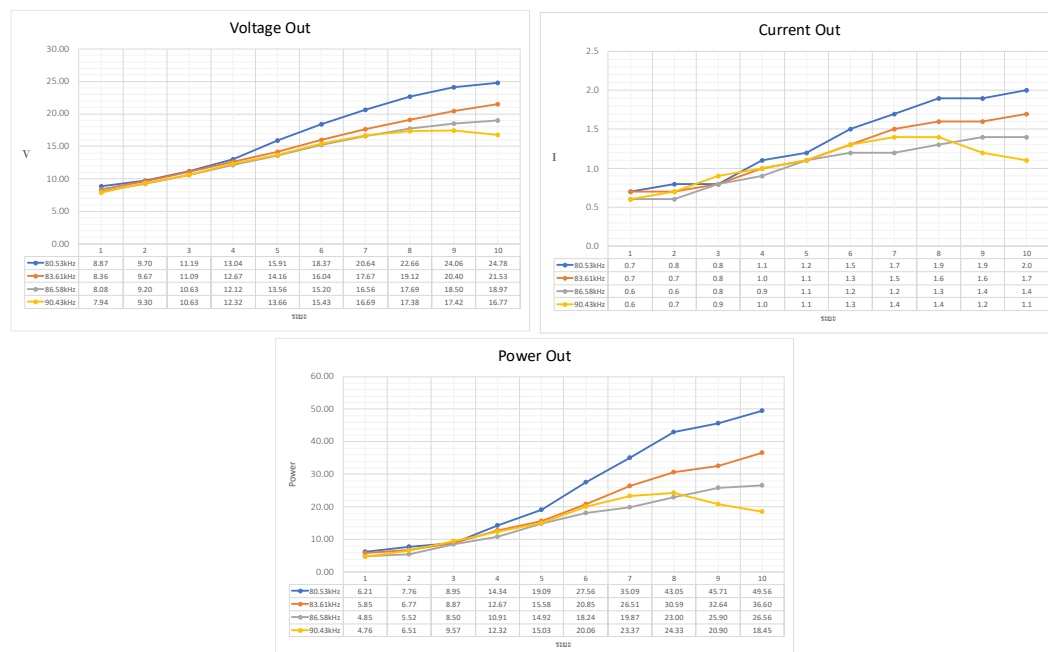
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ)) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ)) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	223	0.22	22.4	19.30	0.59	11.39	8.36	0.7	5.85	51.39	26.13
2	222	0.24	25.3	19.31	0.73	14.10	9.67	0.7	6.77	48.02	26.75
3	222	0.27	29.5	19.29	0.91	17.55	11.09	0.8	8.87	50.54	30.07
4	222	0.31	35.4	19.30	1.14	22.00	12.67	1.0	12.67	57.59	35.79
5	222	0.35	41.4	19.29	1.39	26.81	14.16	1.1	15.58	58.09	37.62
6	222	0.41	49.7	19.29	1.78	34.34	16.04	1.3	20.85	60.73	41.96
7	223	0.47	58.8	19.27	2.21	42.59	17.67	1.5	26.51	62.24	45.08
8	223	0.55	68.7	19.26	2.66	51.23	19.12	1.6	30.59	59.71	44.53
9	223	0.63	79.5	19.27	3.16	60.89	20.40	1.6	32.64	53.60	41.06
10	222	0.73	93.3	19.24	3.79	72.92	21.53	1.7	36.60	50.19	39.23

ตารางที่ จ-7 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 2 ที่ความถี่ 86.58 kHz

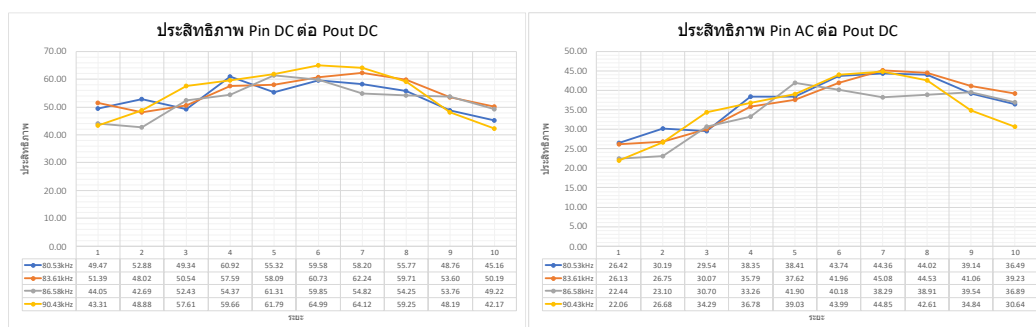
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	222	0.22	21.6	19.31	0.57	11.01	8.08	0.6	4.85	44.05	22.44
2	223	0.23	23.9	19.30	0.67	12.93	9.20	0.6	5.52	42.69	23.10
3	222	0.26	27.7	19.31	0.84	16.22	10.63	0.8	8.50	52.43	30.70
4	223	0.29	32.8	19.29	1.04	20.06	12.12	0.9	10.91	54.37	33.26
5	223	0.33	35.6	19.31	1.26	24.33	13.56	1.1	14.92	61.31	41.90
6	223	0.38	45.4	19.29	1.58	30.48	15.20	1.2	18.24	59.85	40.18
7	222	0.43	51.9	19.28	1.88	36.25	16.56	1.2	19.87	54.82	38.29
8	223	0.48	59.1	19.27	2.20	42.39	17.69	1.3	23.00	54.25	38.91
9	222	0.53	65.5	19.27	2.50	48.18	18.50	1.4	25.90	53.76	39.54
10	223	0.58	72.0	19.27	2.80	53.96	18.97	1.4	26.56	49.22	36.89

ตารางที่ จ-8 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 2 ที่ความถี่ 90.45 kHz

ระยะทาง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ)) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ)) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	223	0.22	21.6	19.30	0.57	11.00	7.94	0.6	4.76	43.31	22.06
2	223	0.24	24.4	19.30	0.69	13.32	9.30	0.7	6.51	48.88	26.68
3	222	0.26	27.9	19.31	0.86	16.61	10.63	0.9	9.57	57.61	34.29
4	222	0.31	33.5	19.30	1.07	20.65	12.32	1.0	12.32	59.66	36.78
5	222	0.34	38.5	19.30	1.26	24.32	13.66	1.1	15.03	61.79	39.03
6	222	0.39	45.6	19.29	1.60	30.86	15.43	1.3	20.06	64.99	43.99
7	222	0.44	52.1	19.28	1.89	36.44	16.69	1.4	23.37	64.12	44.85
8	222	0.47	57.1	19.28	2.13	41.07	17.38	1.4	24.33	59.25	42.61
9	222	0.50	60.0	19.28	2.25	43.38	17.42	1.2	20.90	48.19	34.84
10	222	0.49	60.2	19.27	2.27	43.74	16.77	1.1	18.45	42.17	30.64

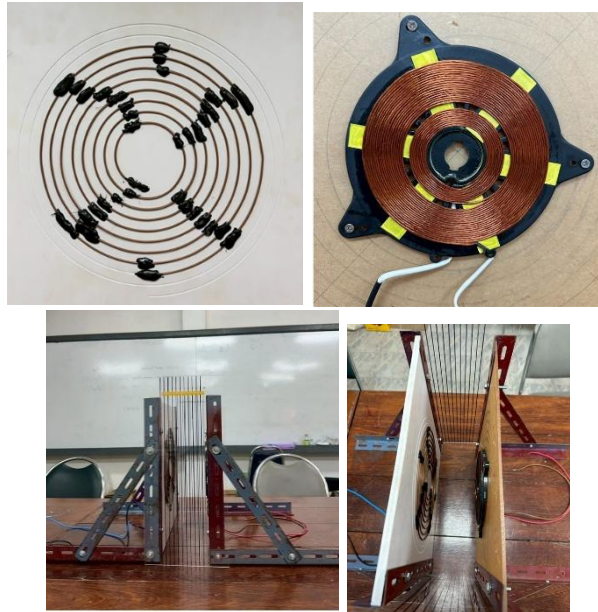


ภาพที่ จ-9 กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 2

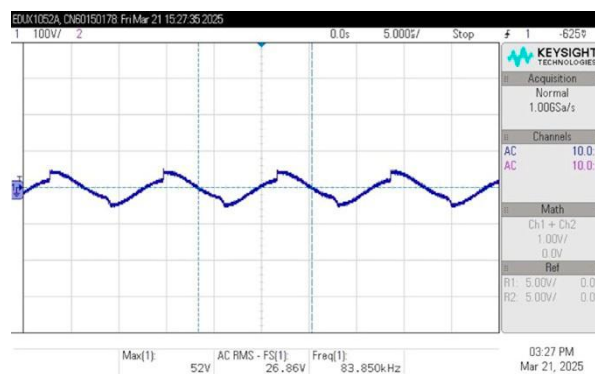


ภาพที่ จ-10 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 2

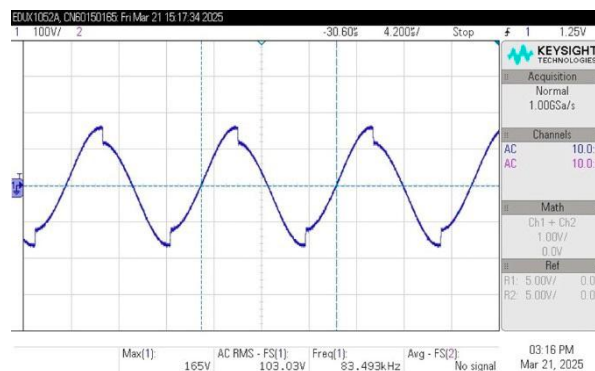
จ.4.2 การทดลองที่ 3 : รูปแบบที่ 1 (THW 4 mm² (8)) - รูปแบบที่ 3 (Induction Coil 3500W (สำเร็จรูป))



ภาพที่ จ-11 รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 3



ภาพที่ จ-12 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 3



ภาพที่ จ-13 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 3

ตารางที่ จ-9 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3 ที่ความถี่ 80.35 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	216	0.26	28.0	19.30	0.88	16.98	10.80	0.9	9.72	57.23	34.71
2	216	0.33	37.5	19.30	1.23	23.74	13.40	1.0	13.40	56.45	35.73
3	215	0.41	47.6	19.29	1.71	32.99	15.94	1.2	19.13	57.99	40.18
4	215	0.54	63.6	19.28	2.45	47.24	19.03	1.5	28.55	60.43	44.88
5	215	0.67	79.7	19.26	3.18	61.25	21.28	1.7	36.18	59.07	45.39
6	215	0.82	99.4	19.26	4.12	79.35	23.13	1.7	39.32	49.55	39.56
7	215	0.99	121.6	19.24	5.11	98.32	24.15	1.9	45.89	46.67	37.73
8	215	1.08	135.5	19.24	5.72	110.05	23.75	1.9	45.13	41.00	33.30
9	215	1.13	145.3	19.24	6.14	118.13	22.32	1.7	37.94	32.12	26.11
10	215	1.14	149.9	19.23	6.33	121.73	20.37	1.6	32.59	26.77	21.74

ตารางที่ จ-10 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3 ที่ความถี่ 83.60 kHz

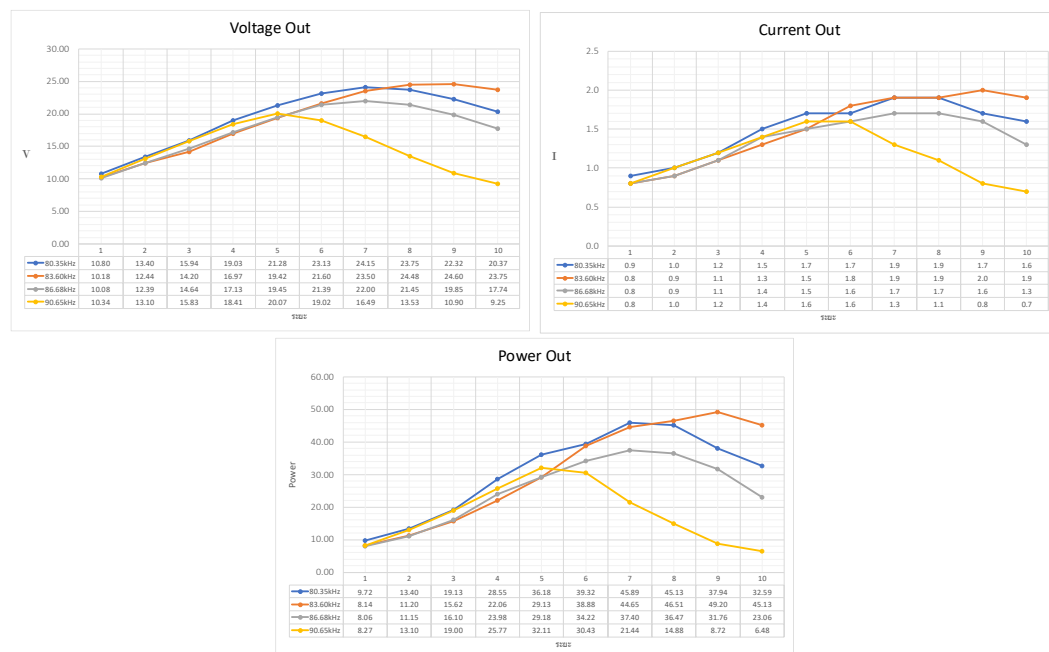
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	217	0.24	26.0	19.31	0.79	15.25	10.18	0.8	8.14	53.39	31.32
2	217	0.30	33.4	19.29	1.08	20.83	12.44	0.9	11.20	53.74	33.52
3	217	0.35	40.1	19.30	1.35	26.06	14.20	1.1	15.62	59.95	38.95
4	217	0.44	52.0	19.29	1.91	36.84	16.97	1.3	22.06	59.88	42.43
5	217	0.56	66.1	19.28	2.55	49.16	19.42	1.5	29.13	59.25	44.07
6	217	0.69	82.8	19.27	3.35	64.55	21.60	1.8	38.88	60.23	46.96
7	217	0.85	105.3	19.26	4.36	83.97	23.50	1.9	44.65	53.17	42.40
8	216	1.02	125.9	19.25	5.32	102.41	24.48	1.9	46.51	45.42	36.94
9	215	1.18	149.7	19.22	6.37	122.43	24.60	2.0	49.20	40.19	32.87
10	215	1.29	168.6	19.23	7.21	138.65	23.75	1.9	45.13	32.55	26.76

ตารางที่ จ-11 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3 ที่ความถี่ 86.68 kHz

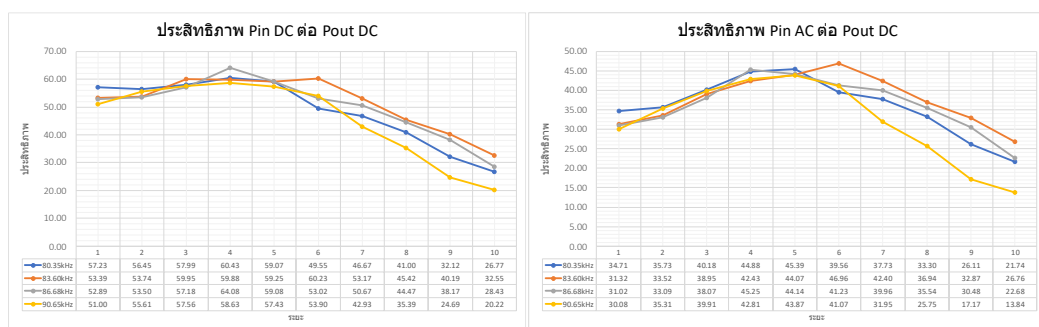
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	217	0.24	26.0	19.30	0.79	15.25	10.08	0.8	8.06	52.89	31.02
2	218	0.29	33.7	19.30	1.08	20.84	12.39	0.9	11.15	53.50	33.09
3	218	0.36	42.3	19.29	1.46	28.16	14.64	1.1	16.10	57.18	38.07
4	217	0.45	53.0	19.29	1.94	37.42	17.13	1.4	23.98	64.08	45.25
5	217	0.55	66.1	19.29	2.56	49.38	19.45	1.5	29.18	59.08	44.14
6	218	0.68	83.0	19.27	3.35	64.55	21.39	1.6	34.22	53.02	41.23
7	217	0.73	93.6	19.27	3.83	73.80	22.00	1.7	37.40	50.67	39.96
8	217	0.80	102.6	19.25	4.26	82.01	21.45	1.7	36.47	44.47	35.54
9	216	0.81	104.2	19.26	4.32	83.20	19.85	1.6	31.76	38.17	30.48
10	216	0.81	101.7	19.27	4.21	81.13	17.74	1.3	23.06	28.43	22.68

ตารางที่ จ-12 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3 ที่ความถี่ 90.65 kHz

ระยะทาง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	221	0.25	27.5	19.31	0.84	16.22	10.34	0.8	8.27	51.00	30.08
2	220	0.32	37.1	19.31	1.22	23.56	13.10	1.0	13.10	55.61	35.31
3	220	0.40	47.6	19.30	1.71	33.00	15.83	1.2	19.00	57.56	39.91
4	220	0.50	60.2	19.28	2.28	43.96	18.41	1.4	25.77	58.63	42.81
5	220	0.60	73.2	19.28	2.90	55.91	20.07	1.6	32.11	57.43	43.87
6	220	0.61	74.1	19.27	2.93	56.46	19.02	1.6	30.43	53.90	41.07
7	220	0.55	67.1	19.28	2.59	49.94	16.49	1.3	21.44	42.93	31.95
8	219	0.48	57.8	19.29	2.18	42.05	13.53	1.1	14.88	35.39	25.75
9	220	0.42	50.8	19.30	1.83	35.32	10.90	0.8	8.72	24.69	17.17
10	220	0.39	46.8	19.29	1.66	32.02	9.25	0.7	6.48	20.22	13.84



ภาพที่ จ-14 กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 3

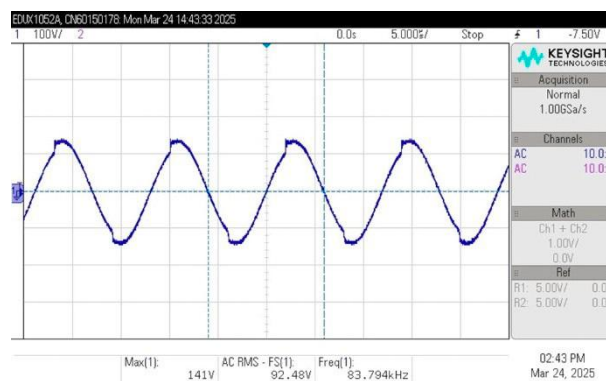


ภาพที่ จ-15 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 3

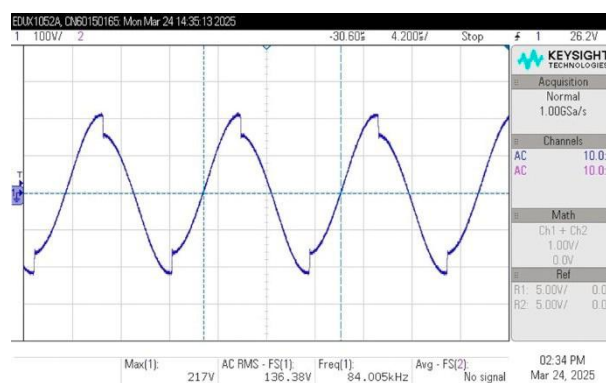
จ.4.4 การทดลองที่ 4 : รูปแบบที่ 1 (THW 4 mm² (8)) - รูปแบบที่ 4 (Induction Coil 2000W (สำเร็จรูป))



ภาพที่ จ-16 รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 4



ภาพที่ จ-17 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 4



ภาพที่ จ-18 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 4

ตารางที่ จ-13 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4 ที่ความถี่ 80.36 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{out}	I _{out}	P _{out}		
1	223	0.24	25.5	19.31	0.75	14.48	9.75	0.7	6.83	47.13	26.76
2	222	0.29	33.2	19.31	1.06	20.47	12.10	0.9	10.89	53.20	32.80
3	224	0.36	43.0	19.28	1.48	28.53	14.55	1.2	17.46	61.19	40.60
4	224	0.47	57.6	19.29	2.15	41.47	17.56	1.4	24.58	59.28	42.68
5	224	0.63	78.5	19.27	3.12	60.12	20.78	1.6	33.25	55.30	42.35
6	223	0.81	103.1	19.25	4.24	81.62	23.31	1.8	41.96	51.41	40.70
7	223	0.98	125.2	19.24	5.26	101.20	24.48	1.9	46.51	45.96	37.15
8	222	1.11	143.5	19.24	6.08	116.98	24.30	1.9	46.17	39.47	32.17
9	222	1.14	147.3	19.22	6.23	119.74	22.36	1.8	40.25	33.61	27.32
10	223	1.15	151.3	19.23	6.36	122.30	20.38	1.6	32.61	26.66	21.55

ตารางที่ จ-14 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4 ที่ความถี่ 83.54 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	223	0.23	24.1	19.32	0.68	13.14	9.21	0.7	6.45	49.07	26.75
2	223	0.26	28.7	19.29	0.88	16.98	10.90	0.8	8.72	51.37	30.38
3	224	0.32	36.8	19.30	1.19	22.97	13.09	1.0	13.09	56.99	35.57
4	224	0.40	46.5	19.29	1.63	31.44	15.39	1.2	18.47	58.74	39.72
5	223	0.48	58.1	19.27	2.18	42.01	17.65	1.4	24.71	58.82	42.53
6	224	0.58	71.9	19.27	2.82	54.34	19.65	1.6	31.44	57.86	43.73
7	223	0.69	87.8	19.27	3.54	68.22	21.25	1.7	36.13	52.96	41.14
8	223	0.81	105.6	19.25	4.37	84.12	22.40	1.8	40.32	47.93	38.18
9	222	0.99	127.0	19.24	5.34	102.74	22.93	1.8	41.27	40.17	32.50
10	223	1.08	141.0	19.23	5.96	114.61	22.59	1.8	40.66	35.48	28.84

ตารางที่ จ-15 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4 ที่ความถี่ 86.33 kHz

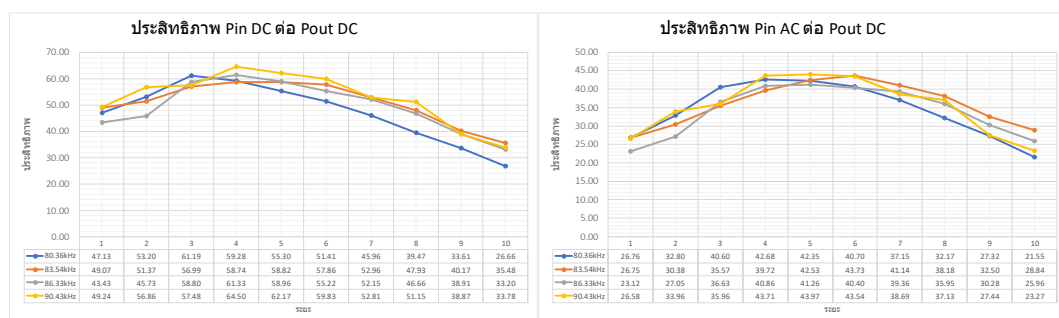
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	222	0.23	23.2	19.30	0.64	12.35	8.94	0.6	5.36	43.43	23.12
2	222	0.25	27.4	19.30	0.84	16.21	10.59	0.7	7.41	45.73	27.05
3	221	0.30	34.7	19.30	1.12	21.62	12.71	1.0	12.71	58.80	36.63
4	222	0.37	43.7	19.28	1.51	29.11	14.88	1.2	17.86	61.33	40.86
5	222	0.43	52.9	19.28	1.92	37.02	16.79	1.3	21.83	58.96	41.26
6	222	0.52	64.0	19.27	2.43	46.83	18.47	1.4	25.86	55.22	40.40
7	222	0.60	74.0	19.26	2.90	55.85	19.42	1.5	29.13	52.15	39.36
8	222	0.67	82.0	19.26	3.28	63.17	19.65	1.5	29.48	46.66	35.95
9	221	0.72	88.4	19.27	3.57	68.79	19.12	1.4	26.77	38.91	30.28
10	221	0.73	90.4	19.26	3.67	70.68	18.05	1.3	23.47	33.20	25.96

ตารางที่ จ-16 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4 ที่ความถี่ 90.43 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	222	0.23	23.6	19.30	0.66	12.74	8.96	0.7	6.27	49.24	26.58
2	222	0.26	29.1	19.31	0.90	17.38	10.98	0.9	9.88	56.86	33.96
3	221	0.32	36.4	19.30	1.18	22.77	13.09	1.0	13.09	57.48	35.96
4	222	0.39	46.4	19.29	1.63	31.44	15.60	1.3	20.28	64.50	43.71
5	222	0.45	54.8	19.28	2.01	38.75	17.21	1.4	24.09	62.17	43.97
6	223	0.50	61.7	19.27	2.33	44.90	17.91	1.5	26.87	59.83	43.54
7	223	0.50	62.6	19.27	2.38	45.86	17.30	1.4	24.22	52.81	38.69
8	222	0.48	59.5	19.28	2.24	43.19	15.78	1.4	22.09	51.15	37.13
9	222	0.44	53.8	19.28	1.97	37.98	13.42	1.1	14.76	38.87	27.44
10	222	0.41	49.3	19.29	1.76	33.95	11.47	1.0	11.47	33.78	23.27



ภาพที่ จ-19 กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 4

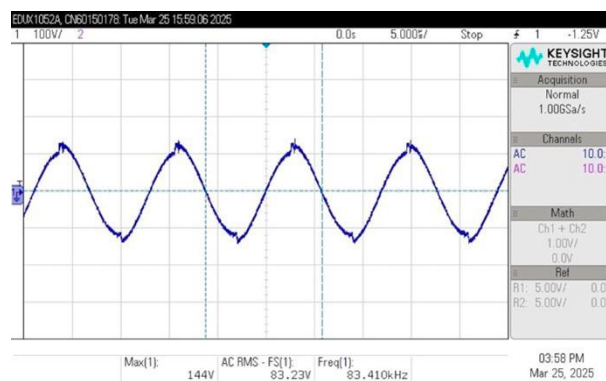


ภาพที่ จ-20 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 4

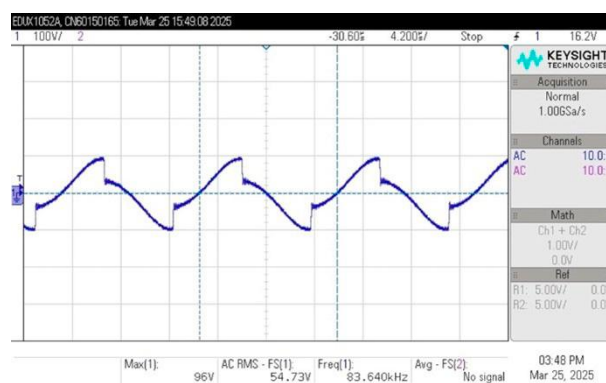
จ.4.5 การทดลองที่ 5 : รูปแบบที่ 2 (THW 6 mm² (8 รอบ)) - รูปแบบที่ 1 (อนุกรม-ขนาน (Series-Parallel))



ภาพที่ จ-21 รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 5



ภาพที่ จ-22 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 5



ภาพที่ จ-23 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 5

ตารางที่ จ-17 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 5 ที่ความถี่ 80.43 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ)	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ)
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	DC	AC
1	224	0.36	41.9	19.30	1.43	27.60	14.73	1.2	17.68	64.05	42.19
2	224	0.45	54.8	19.28	2.01	38.75	17.51	1.4	24.51	63.26	44.73
3	224	0.52	64.0	19.28	2.45	47.24	19.08	1.5	28.62	60.59	44.72
4	224	0.62	76.4	19.27	3.03	58.39	20.60	1.6	32.96	56.45	43.14
5	224	0.69	86.9	19.28	3.51	67.67	21.43	1.6	34.29	50.67	39.46
6	226	0.76	97.0	19.26	3.96	76.27	21.65	1.7	36.81	48.26	37.94
7	225	0.81	102.7	19.26	4.23	81.47	21.16	1.7	35.97	44.15	35.03
8	225	0.83	105.3	19.26	4.34	83.59	20.70	1.7	35.19	42.10	33.42
9	225	0.88	112.4	19.26	4.67	89.94	19.50	1.5	29.25	32.52	26.02
10	225	0.90	117.4	19.26	4.86	93.60	19.10	1.4	26.74	28.57	22.78

ตารางที่ จ-18 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 5 ที่ความถี่ 83.58 kHz

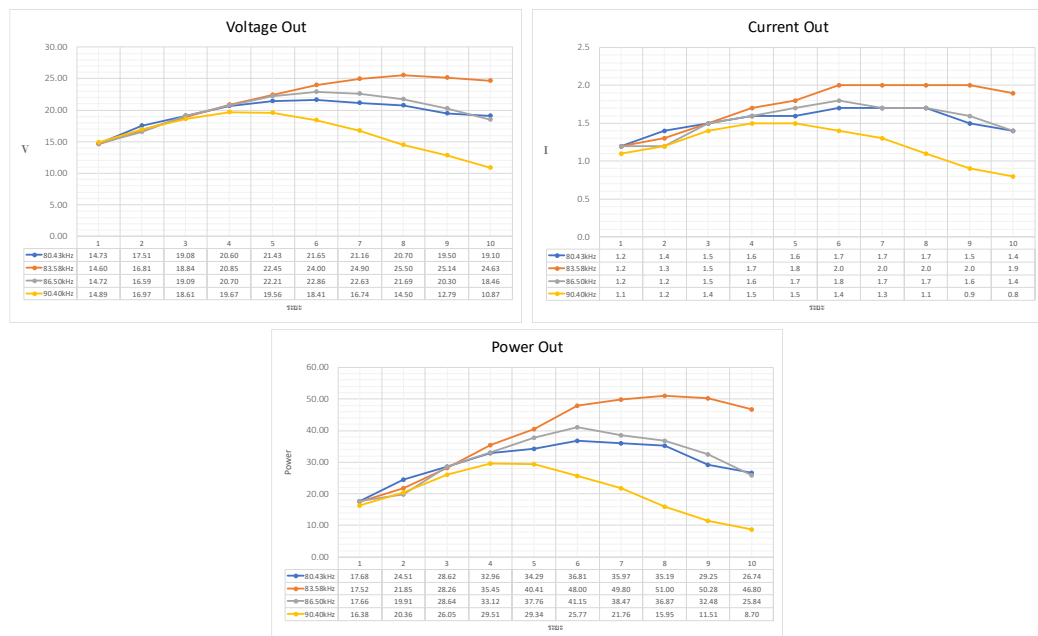
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	225	0.36	41.3	19.30	1.39	26.83	14.60	1.2	17.52	65.31	42.42
2	224	0.43	50.4	19.29	1.81	34.91	16.81	1.3	21.85	62.59	43.36
3	225	0.51	61.0	19.28	2.30	44.34	18.84	1.5	28.26	63.73	46.33
4	224	0.61	73.7	19.27	2.91	56.08	20.85	1.7	35.45	63.21	48.09
5	224	0.71	87.3	19.27	3.54	68.22	22.45	1.8	40.41	59.24	46.29
6	224	0.85	105.5	19.28	4.37	84.25	24.00	2.0	48.00	56.97	45.50
7	224	0.99	124.6	19.25	5.24	100.87	24.90	2.0	49.80	49.37	39.97
8	225	1.10	140.6	19.24	5.94	114.29	25.50	2.0	51.00	44.63	36.27
9	224	1.23	158.4	19.22	6.74	129.54	25.14	2.0	50.28	38.81	31.74
10	224	1.31	174.5	19.20	7.43	142.66	24.63	1.9	46.80	32.80	26.82

ตารางที่ จ-19 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 5 ที่ความถี่ 86.50 kHz

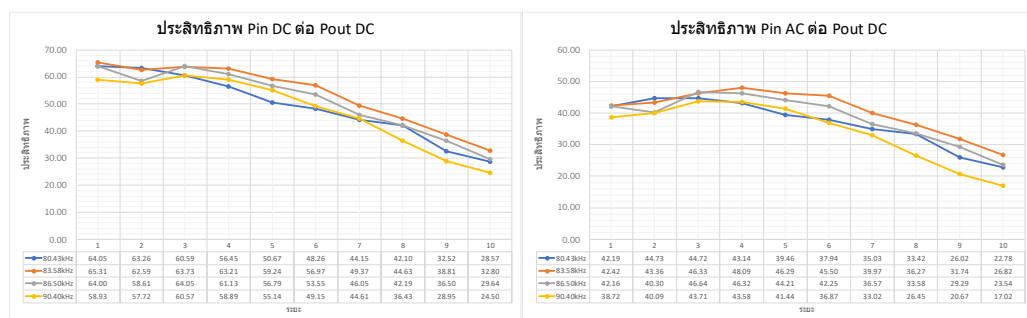
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	225	0.37	41.9	19.30	1.43	27.60	14.72	1.2	17.66	64.00	42.16
2	225	0.42	49.4	19.30	1.76	33.97	16.59	1.2	19.91	58.61	40.30
3	225	0.51	61.4	19.27	2.32	44.71	19.09	1.5	28.64	64.05	46.64
4	224	0.59	71.5	19.28	2.81	54.18	20.70	1.6	33.12	61.13	46.32
5	224	0.70	85.4	19.27	3.45	66.48	22.21	1.7	37.76	56.79	44.21
6	224	0.79	97.4	19.26	3.99	76.85	22.86	1.8	41.15	53.55	42.25
7	224	0.85	105.2	19.25	4.34	83.55	22.63	1.7	38.47	46.05	36.57
8	224	0.88	109.8	19.25	4.54	87.40	21.69	1.7	36.87	42.19	33.58
9	224	0.89	110.9	19.26	4.62	88.98	20.30	1.6	32.48	36.50	29.29
10	225	0.87	109.8	19.25	4.53	87.20	18.46	1.4	25.84	29.64	23.54

ตารางที่ จ-20 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 5 ที่ความถี่ 90.40 kHz

ระยะทาง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ)	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ)
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	DC	AC
1	224	0.37	42.3	19.30	1.44	27.79	14.89	1.1	16.38	58.93	38.72
2	224	0.43	50.8	19.28	1.83	35.28	16.97	1.2	20.36	57.72	40.09
3	224	0.49	59.6	19.29	2.23	43.02	18.61	1.4	26.05	60.57	43.71
4	224	0.56	67.7	19.27	2.60	50.10	19.67	1.5	29.51	58.89	43.58
5	223	0.58	70.8	19.28	2.76	53.21	19.56	1.5	29.34	55.14	41.44
6	223	0.57	69.9	19.28	2.72	52.44	18.41	1.4	25.77	49.15	36.87
7	223	0.54	65.9	19.28	2.53	48.78	16.74	1.3	21.76	44.61	33.02
8	224	0.50	60.3	19.29	2.27	43.79	14.50	1.1	15.95	36.43	26.45
9	223	0.46	55.7	19.30	2.06	39.76	12.79	0.9	11.51	28.95	20.67
10	223	0.43	51.1	19.29	1.84	35.49	10.87	0.8	8.70	24.50	17.02



ภาพที่ จ-24 กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 5

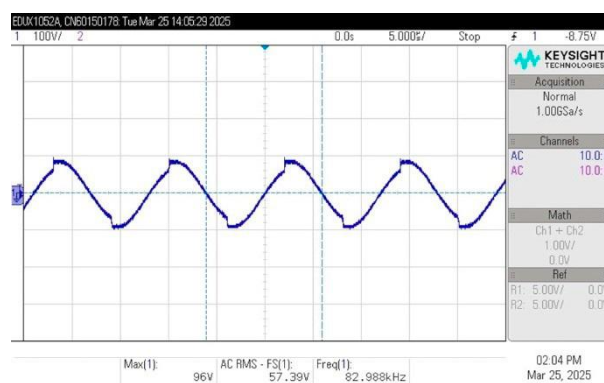


ภาพที่ จ-25 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 5

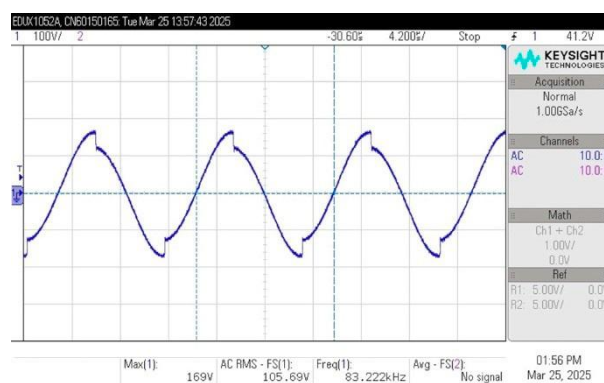
จ.4.6 การทดลองที่ 6 : รูปแบบที่ 2 (THW 6 mm² (8 รอบ)) - รูปแบบที่ 2 (THW 6 mm² (24 รอบ))



ภาพที่ จ-26 รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 6



ภาพที่ จ-27 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 6



ภาพที่ จ-28 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 6

ตารางที่ จ-21 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 6 ที่ความถี่ 80.37 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	223	0.23	23.7	19.31	0.66	12.74	8.97	0.7	6.28	49.27	26.49
2	222	0.25	27.1	19.31	0.83	16.03	10.33	0.8	8.26	51.56	30.49
3	223	0.29	32.5	19.30	1.04	20.07	11.86	1.0	11.86	59.09	36.49
4	222	0.35	39.7	19.30	1.32	25.48	13.68	1.1	15.05	59.07	37.90
5	223	0.41	47.7	19.29	1.70	32.79	15.59	1.3	20.27	61.80	42.49
6	222	0.49	58.7	19.29	2.21	42.63	17.72	1.5	26.58	62.35	45.28
7	222	0.60	72.7	19.27	2.87	55.30	19.90	1.6	31.84	57.57	43.80
8	222	0.74	90.1	19.27	3.66	70.53	22.06	1.7	37.50	53.17	41.62
9	222	0.91	111.0	19.26	4.63	89.17	23.82	1.9	45.26	50.75	40.77
10	222	1.03	126.4	19.23	5.32	102.30	24.60	1.9	46.74	45.69	36.98

ตารางที่ จ-22 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 6 ที่ความถี่ 83.33 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	223	0.22	22.5	19.32	0.60	11.59	8.42	0.5	4.21	36.32	18.71
2	223	0.23	24.4	19.30	0.69	13.32	9.40	0.7	6.58	49.41	26.97
3	223	0.27	28.7	19.31	0.89	17.19	10.89	0.9	9.80	57.03	34.15
4	223	0.32	34.6	19.31	1.11	21.43	12.46	1.0	12.46	58.13	36.01
5	222	0.36	39.9	19.29	1.34	25.85	13.85	1.1	15.24	58.94	38.18
6	222	0.41	47.0	19.29	1.67	32.21	15.52	1.1	17.07	53.00	36.32
7	222	0.48	56.0	19.28	2.10	40.49	17.30	1.4	24.22	59.82	43.25
8	223	0.56	65.5	19.27	2.52	48.56	18.78	1.5	28.17	58.01	43.01
9	222	0.66	78.8	19.27	3.13	60.32	20.49	1.6	32.78	54.35	41.60
10	223	0.77	92.2	19.26	3.74	72.03	21.78	1.7	37.03	51.40	40.16

ตารางที่ จ-23 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 6 ที่ความถี่ 86.65 kHz

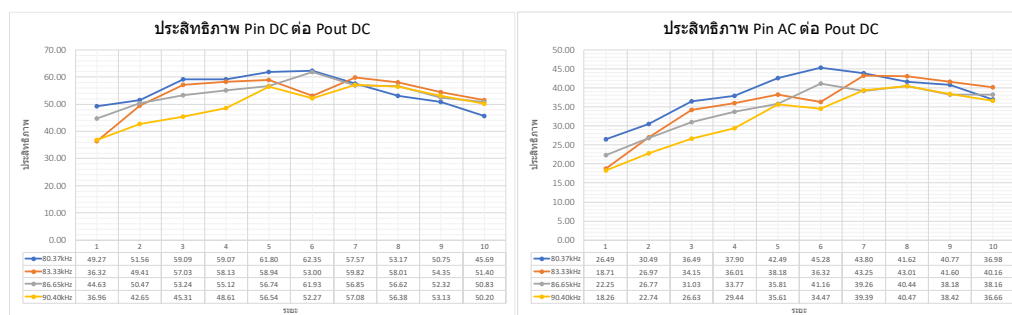
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	222	0.22	21.3	19.31	0.55	10.62	7.90	0.6	4.74	44.63	22.25
2	222	0.23	23.3	19.31	0.64	12.36	8.91	0.7	6.24	50.47	26.77
3	221	0.25	26.5	19.31	0.80	15.45	10.28	0.8	8.22	53.24	31.03
4	221	0.29	31.5	19.30	1.00	19.30	11.82	0.9	10.64	55.12	33.77
5	221	0.33	37.0	19.30	1.21	23.35	13.25	1.0	13.25	56.74	35.81
6	221	0.38	43.0	19.31	1.48	28.58	14.75	1.2	17.70	61.93	41.16
7	221	0.42	48.9	19.30	1.75	33.78	16.00	1.2	19.20	56.85	39.26
8	222	0.47	55.1	19.29	2.04	39.35	17.14	1.3	22.28	56.62	40.44
9	222	0.52	61.6	19.29	2.33	44.95	18.09	1.3	23.52	52.32	38.18
10	221	0.58	69.3	19.27	2.70	52.03	18.89	1.4	26.45	50.83	38.16

ตารางที่ จ-24 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 6 ที่ความถี่ 90.00 kHz

ระยะทาง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	223	0.21	21.5	19.31	0.55	10.62	7.85	0.5	3.93	36.96	18.26
2	223	0.23	23.9	19.31	0.66	12.74	9.06	0.6	5.44	42.65	22.74
3	223	0.26	27.6	19.31	0.84	16.22	10.50	0.7	7.35	45.31	26.63
4	223	0.29	32.2	19.31	1.01	19.50	11.85	0.8	9.48	48.61	29.44
5	223	0.33	37.1	19.31	1.21	23.37	13.21	1.0	13.21	56.54	35.61
6	223	0.37	42.7	19.29	1.46	28.16	14.72	1.0	14.72	52.27	34.47
7	223	0.42	49.5	19.30	1.77	34.16	16.25	1.2	19.50	57.08	39.39
8	223	0.47	55.6	19.28	2.07	39.91	17.31	1.3	22.50	56.38	40.47
9	223	0.50	60.0	19.28	2.25	43.38	17.73	1.3	23.05	53.13	38.42
10	223	0.52	62.3	19.28	2.36	45.50	17.57	1.3	22.84	50.20	36.66



ภาพที่ จ-29 กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 6

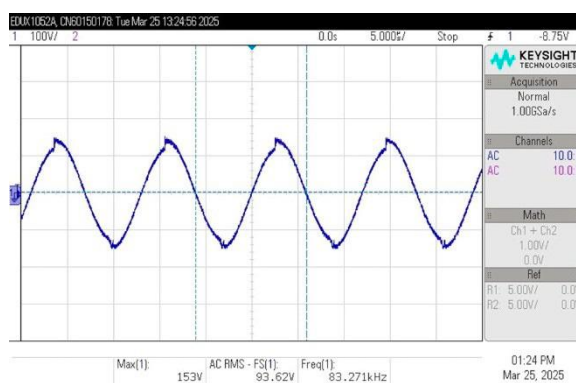


ภาพที่ จ-30 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 6

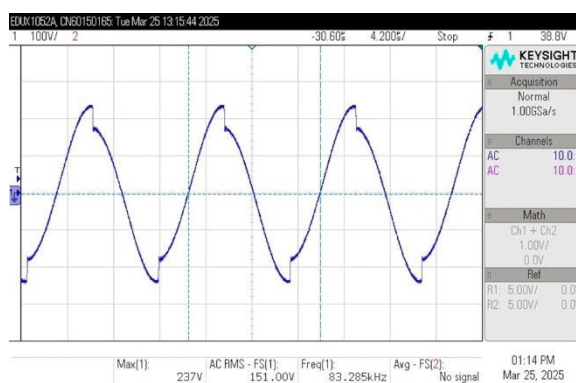
จ.4.7 การทดลองที่ 7 : รูปแบบที่ 2 (THW 6 mm² (8 รอบ)) - รูปแบบที่ 3 (Induction Coil 3500W (สำเร็จรูป))



ภาพที่ จ-31 รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 7



ภาพที่ จ-32 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 7



ภาพที่ จ-33 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 7

ตารางที่ จ-25 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7 ที่ความถี่ 80.37 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{out}	I _{out}	P _{out}		
1	221	0.32	35.4	19.30	1.15	22.20	12.87	1.0	12.87	57.99	36.36
2	222	0.39	43.9	19.30	1.54	29.72	15.06	1.2	18.07	60.80	41.17
3	221	0.48	55.4	19.27	2.07	39.89	17.54	1.4	24.56	61.56	44.32
4	222	0.60	71.5	19.26	2.80	53.93	20.19	1.6	32.30	59.90	45.18
5	222	0.76	90.5	19.26	3.68	70.88	22.34	1.7	37.98	53.58	41.96
6	222	0.89	107.5	19.25	4.45	85.66	23.59	1.8	42.46	49.57	39.50
7	222	0.94	112.6	19.25	4.69	90.28	23.87	1.8	42.97	47.59	38.16
8	222	1.01	124.2	19.24	5.21	100.24	23.20	1.9	44.08	43.97	35.49
9	221	1.08	134.3	19.25	5.65	108.76	21.23	1.6	33.97	31.23	25.29
10	221	1.10	137.6	19.24	5.77	111.01	19.50	1.4	27.30	24.59	19.84

ตารางที่ จ-26 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7 ที่ความถี่ 83.34 kHz

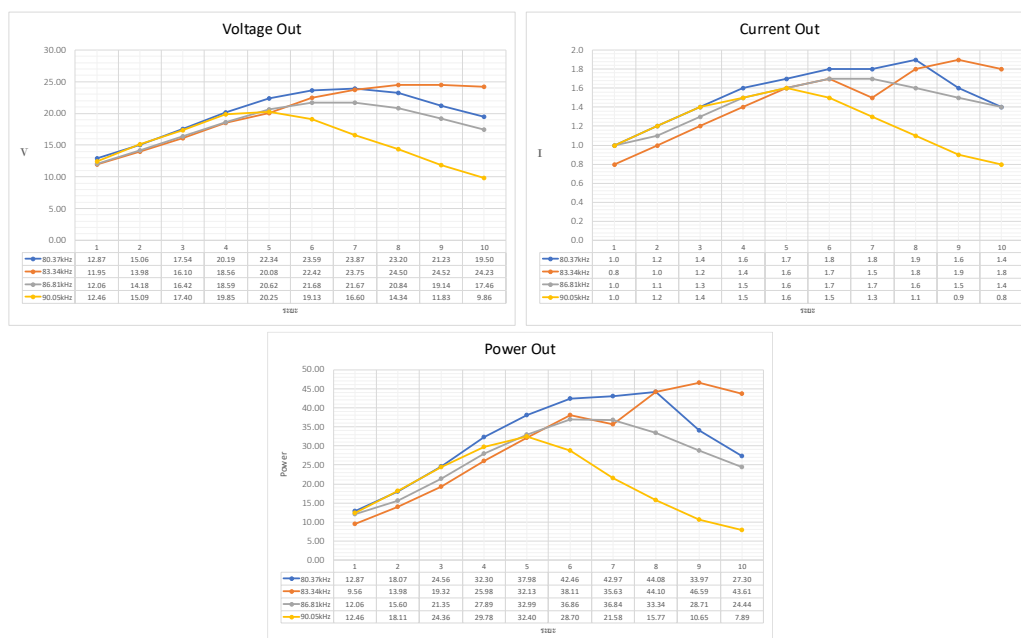
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	221	0.29	31.7	19.30	1.01	19.49	11.95	0.8	9.56	49.04	30.16
2	221	0.35	39.3	19.30	1.31	25.28	13.98	1.0	13.98	55.29	35.57
3	221	0.42	48.0	19.29	1.72	33.18	16.10	1.2	19.32	58.23	40.25
4	221	0.51	59.1	19.29	2.23	43.02	18.56	1.4	25.98	60.39	43.96
5	221	0.65	76.6	19.28	3.03	58.42	20.08	1.6	32.13	55.00	41.94
6	221	0.79	92.9	19.27	3.79	73.03	22.42	1.7	38.11	52.19	41.03
7	222	0.94	112.6	19.25	4.69	90.28	23.75	1.5	35.63	39.46	31.64
8	220	1.08	132.5	19.24	5.59	107.55	24.50	1.8	44.10	41.00	33.28
9	221	1.23	154.0	19.23	6.53	125.57	24.52	1.9	46.59	37.10	30.25
10	220	1.35	172.0	19.21	7.33	140.81	24.23	1.8	43.61	30.97	25.36

ตารางที่ จ-27 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7 ที่ความถี่ 86.81 kHz

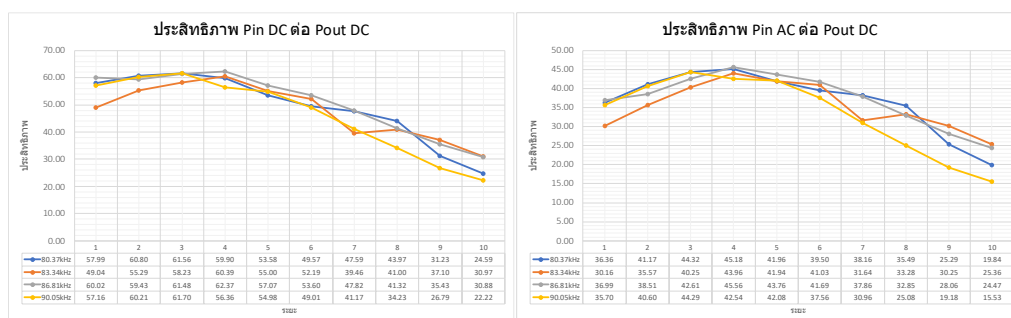
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	221	0.30	32.6	19.32	1.04	20.09	12.06	1.0	12.06	60.02	36.99
2	221	0.36	40.5	19.30	1.36	26.25	14.18	1.1	15.60	59.43	38.51
3	221	0.44	50.1	19.29	1.80	34.72	16.42	1.3	21.35	61.48	42.61
4	222	0.53	61.2	19.27	2.32	44.71	18.59	1.5	27.89	62.37	45.56
5	221	0.64	75.4	19.27	3.00	57.81	20.62	1.6	32.99	57.07	43.76
6	221	0.74	88.4	19.26	3.57	68.76	21.68	1.7	36.86	53.60	41.69
7	221	0.81	97.3	19.26	4.00	77.04	21.67	1.7	36.84	47.82	37.86
8	220	0.84	101.5	19.26	4.19	80.70	20.84	1.6	33.34	41.32	32.85
9	221	0.84	102.3	19.25	4.21	81.04	19.14	1.5	28.71	35.43	28.06
10	220	0.82	99.9	19.26	4.11	79.16	17.46	1.4	24.44	30.88	24.47

ตารางที่ จ-28 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7 ที่ความถี่ 90.05 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	222	0.32	34.9	19.29	1.13	21.80	12.46	1.0	12.46	57.16	35.70
2	221	0.40	44.6	19.28	1.56	30.08	15.09	1.2	18.11	60.21	40.60
3	221	0.48	55.0	19.26	2.05	39.48	17.40	1.4	24.36	61.70	44.29
4	222	0.59	70.0	19.28	2.74	52.83	19.85	1.5	29.78	56.36	42.54
5	221	0.65	77.0	19.26	3.06	58.94	20.25	1.6	32.40	54.98	42.08
6	220	0.64	76.4	19.26	3.04	58.55	19.13	1.5	28.70	49.01	37.56
7	221	0.59	69.7	19.27	2.72	52.41	16.60	1.3	21.58	41.17	30.96
8	222	0.54	62.9	19.28	2.39	46.08	14.34	1.1	15.77	34.23	25.08
9	221	0.48	55.5	19.29	2.06	39.74	11.83	0.9	10.65	26.79	19.18
10	221	0.44	50.8	19.29	1.84	35.49	9.86	0.8	7.89	22.22	15.53



ภาพที่ จ-34 กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 7

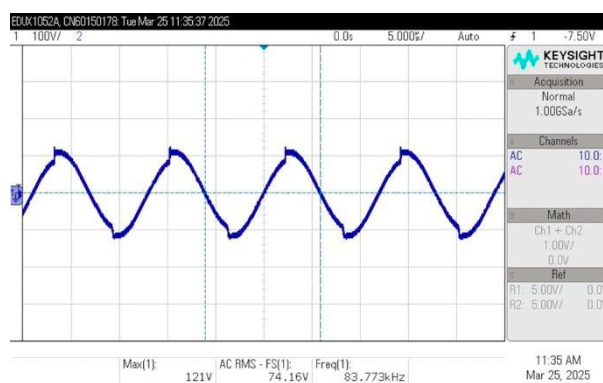


ภาพที่ จ-35 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 7

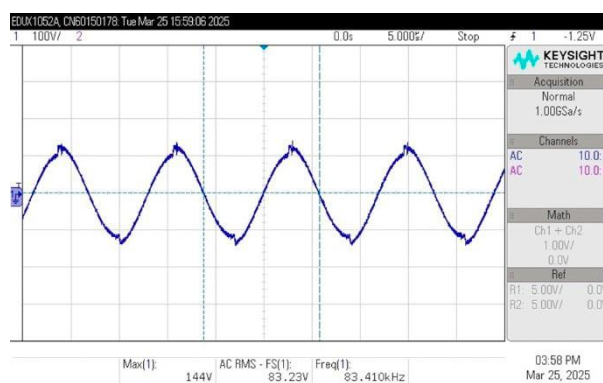
จ.4.8 การทดลองที่ 8 : รูปแบบที่ 2 (THW 6 mm² (8 รอบ)) - รูปแบบที่ 4 (Induction Coil 2000W (สำเร็จรูป))



ภาพที่ จ-36 รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 8



ภาพที่ จ-37 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 8



ภาพที่ จ-38 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 8

ตารางที่ จ-29 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 8 ที่ความถี่ 80.78 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	223	0.29	31.8	19.29	1.00	19.29	11.63	0.9	10.47	54.26	32.92
2	222	0.35	39.1	19.27	1.30	25.05	13.51	1.1	14.86	59.32	38.01
3	223	0.44	50.4	19.28	1.82	35.09	16.12	1.3	20.96	59.72	41.58
4	222	0.56	66.9	19.25	2.59	49.86	19.12	1.5	28.68	57.52	42.87
5	223	0.70	85.5	19.25	3.45	66.41	21.48	1.8	38.66	58.22	45.22
6	223	0.83	104.1	19.23	4.30	82.69	23.16	1.9	44.00	53.22	42.27
7	222	0.99	126.8	19.24	5.34	102.74	24.25	2.0	48.50	47.21	38.25
8	222	1.12	145.0	19.21	6.15	118.14	24.30	2.0	48.60	41.14	33.52
9	223	1.19	157.0	19.20	6.63	127.30	23.35	1.9	44.37	34.85	28.26
10	222	1.22	166.9	19.20	7.07	135.74	21.72	1.8	39.10	28.80	23.42

ตารางที่ จ-30 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 8 ที่ความถี่ 83.56 kHz

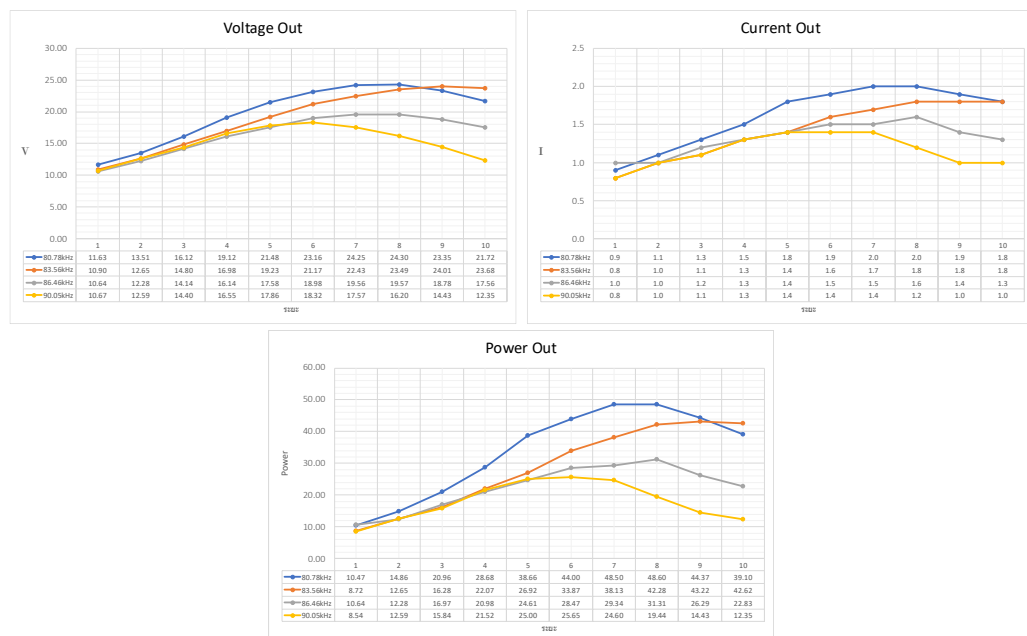
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{out}	I _{out}	P _{out}		
1	223	0.27	28.8	19.31	0.89	17.19	10.90	0.8	8.72	50.74	30.28
2	223	0.32	35.2	19.30	1.14	22.00	12.65	1.0	12.65	57.49	35.94
3	223	0.38	43.9	19.28	1.52	29.31	14.80	1.1	16.28	55.55	37.08
4	223	0.46	53.7	1.97	19.28	37.98	16.98	1.3	22.07	58.12	41.11
5	224	0.57	68.4	19.27	2.64	50.87	19.23	1.4	26.92	52.92	39.36
6	223	0.69	83.7	19.25	3.37	64.87	21.17	1.6	33.87	52.21	40.47
7	223	0.81	99.6	19.26	4.10	78.97	22.43	1.7	38.13	48.29	38.28
8	222	0.95	119.3	19.23	5.00	96.15	23.49	1.8	42.28	43.98	35.44
9	222	1.10	140.3	19.22	5.94	114.17	24.01	1.8	43.22	37.86	30.80
10	221	1.23	161.7	19.21	6.88	132.16	23.68	1.8	42.62	32.25	26.36

ตารางที่ จ-31 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 8 ที่ความถี่ 86.46 kHz

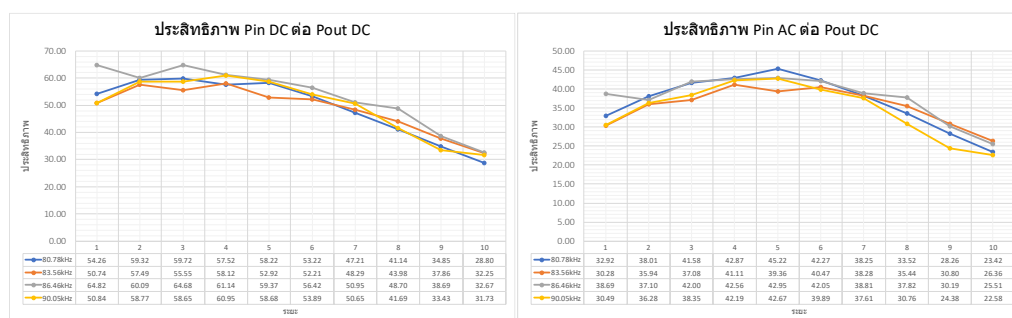
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	220	0.27	27.5	19.31	0.85	16.41	10.64	1.0	10.64	64.82	38.69
2	220	0.31	33.1	19.28	1.06	20.44	12.28	1.0	12.28	60.09	37.10
3	220	0.36	40.4	19.29	1.36	26.23	14.14	1.2	16.97	64.68	42.00
4	220	0.43	49.3	19.28	1.78	34.32	16.14	1.3	20.98	61.14	42.56
5	220	0.50	57.3	19.28	2.15	41.45	17.58	1.4	24.61	59.37	42.95
6	220	0.57	67.7	19.26	2.62	50.46	18.98	1.5	28.47	56.42	42.05
7	221	0.63	75.6	19.26	2.99	57.59	19.56	1.5	29.34	50.95	38.81
8	220	0.68	82.8	19.25	3.34	64.30	19.57	1.6	31.31	48.70	37.82
9	220	0.72	87.1	19.25	3.53	67.95	18.78	1.4	26.29	38.69	30.19
10	221	0.73	89.5	19.25	3.63	69.88	17.56	1.3	22.83	32.67	25.51

ตารางที่ จ-32 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 8 ที่ความถี่ 90.05 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	222	0.27	28.0	19.30	0.87	16.79	10.67	0.8	8.54	50.84	30.49
2	222	0.32	34.7	19.30	1.11	21.42	12.59	1.0	12.59	58.77	36.28
3	221	0.37	41.3	19.29	1.40	27.01	14.40	1.1	15.84	58.65	38.35
4	222	0.44	51.0	19.29	1.83	35.30	16.55	1.3	21.52	60.95	42.19
5	222	0.50	58.6	19.28	2.21	42.61	17.86	1.4	25.00	58.68	42.67
6	221	0.54	64.3	19.27	2.47	47.60	18.32	1.4	25.65	53.89	39.89
7	219	0.56	65.4	19.27	2.52	48.56	17.57	1.4	24.60	50.65	37.61
8	219	0.54	63.2	19.27	2.42	46.63	16.20	1.2	19.44	41.69	30.76
9	219	0.50	59.2	19.27	2.24	43.16	14.43	1.0	14.43	33.43	24.38
10	219	0.47	54.7	19.27	2.02	38.93	12.35	1.0	12.35	31.73	22.58

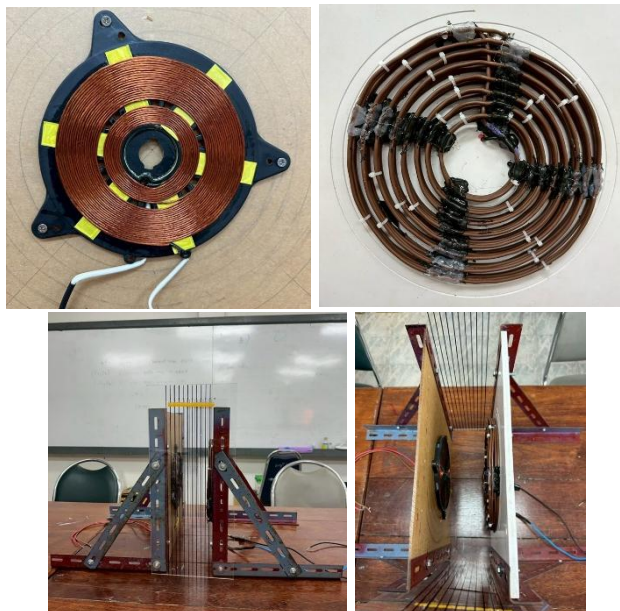


ภาพที่ จ-39 กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 8

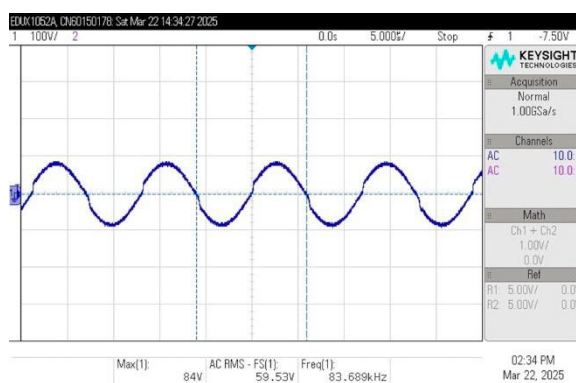


ภาพที่ จ-40 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 8

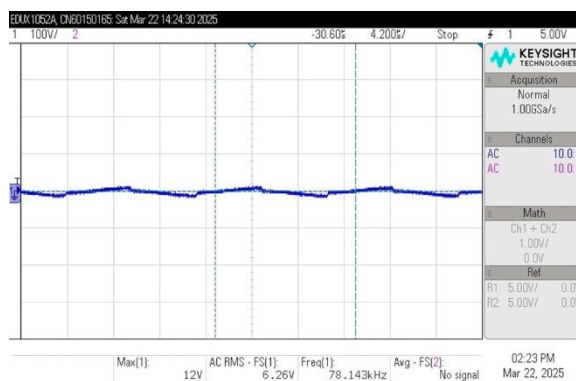
จ.4.9 การทดลองที่ 9 : รูปแบบที่ 3 (Induction Coil 3500W (สำเร็จรูป)) - รูปแบบที่ 1 (อนุกรม-ขนาน (Series-Parallel))



ภาพที่ จ-41 รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 9



ภาพที่ จ-42 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 9



ภาพที่ จ-43 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 9

ตารางที่ จ-33 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 9 ที่ความถี่ 80.73 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{out}	I _{out}	P _{out}		
1	226	0.19	18.1	19.31	0.39	7.53	5.48	0.4	2.19	29.11	12.11
2	225	0.20	19.1	19.31	0.44	8.50	6.26	0.5	3.13	36.84	16.39
3	226	0.21	21.0	19.30	0.52	10.04	7.31	0.5	3.66	36.42	17.40
4	225	0.21	22.0	19.30	0.58	11.19	7.70	0.6	4.62	41.27	21.00
5	226	0.22	22.7	19.30	0.61	11.77	7.70	0.6	4.62	39.24	20.35
6	225	0.22	22.3	19.31	0.60	11.59	7.15	0.6	4.29	37.03	19.24
7	225	0.21	21.5	19.30	0.56	10.81	6.23	0.4	2.49	23.06	11.59
8	225	0.21	20.6	19.31	0.52	10.04	5.24	0.4	2.10	20.87	10.17
9	226	0.20	19.9	19.30	0.48	9.26	4.27	0.3	1.28	13.83	6.44
10	226	0.20	19.4	19.30	0.46	8.88	3.54	0.2	0.71	7.97	3.65

ตารางที่ จ-34 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 9 ที่ความถี่ 83.70 kHz

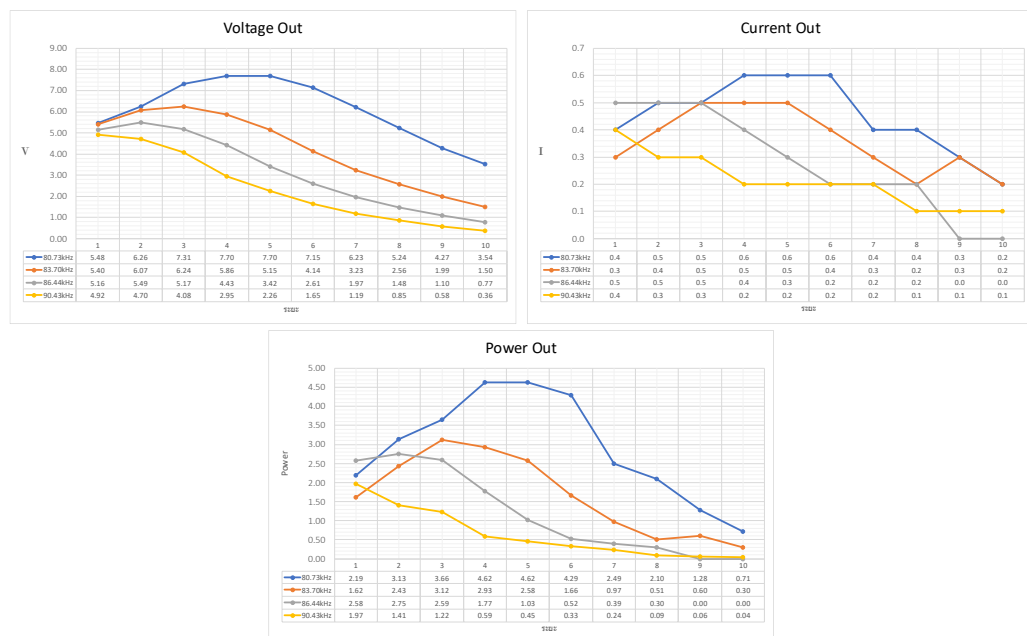
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	226	0.19	17.9	19.30	0.39	7.53	5.40	0.3	1.62	21.52	9.05
2	225	0.20	18.8	19.31	0.43	8.30	6.07	0.4	2.43	29.24	12.91
3	225	0.20	19.2	19.31	0.44	8.50	6.24	0.5	3.12	36.72	16.25
4	225	0.20	18.8	19.30	0.42	8.11	5.86	0.5	2.93	36.15	15.59
5	226	0.18	18.0	19.32	0.39	7.53	5.15	0.5	2.58	34.17	14.31
6	225	0.19	16.9	19.30	0.35	6.76	4.14	0.4	1.66	24.52	9.80
7	225	0.18	16.2	19.31	0.32	6.18	3.23	0.3	0.97	15.68	5.98
8	226	0.18	15.7	19.31	0.30	5.79	2.56	0.2	0.51	8.84	3.26
9	225	0.17	15.4	19.30	0.28	5.40	1.99	0.3	0.60	11.05	3.88
10	225	0.17	15.2	19.30	0.27	5.21	1.50	0.2	0.30	5.76	1.97

ตารางที่ จ-35 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 9 ที่ความถี่ 86.44 kHz

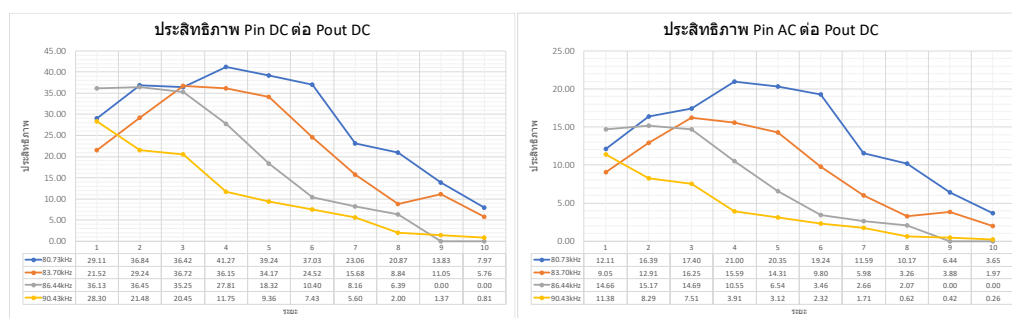
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	225	0.19	17.6	19.30	0.37	7.14	5.16	0.5	2.58	36.13	14.66
2	226	0.19	18.1	19.31	0.39	7.53	5.49	0.5	2.75	36.45	15.17
3	226	0.19	17.6	19.30	0.38	7.33	5.17	0.5	2.59	35.25	14.69
4	226	0.18	16.8	19.31	0.33	6.37	4.43	0.4	1.77	27.81	10.55
5	226	0.18	15.7	19.31	0.29	5.60	3.42	0.3	1.03	18.32	6.54
6	226	0.17	15.1	19.31	0.26	5.02	2.61	0.2	0.52	10.40	3.46
7	226	0.17	14.8	19.31	0.25	4.83	1.97	0.2	0.39	8.16	2.66
8	225	0.17	14.3	19.30	0.24	4.63	1.48	0.2	0.30	6.39	2.07
9	226	0.17	14.4	19.30	0.23	4.44	1.10	0.0	0.00	0.00	0.00
10	226	0.16	14.4	19.30	0.23	4.44	0.77	0.0	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ จ-36 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 9 ที่ความถี่ 90.43 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$	$\eta \rightarrow \text{EFF}$
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)			(ประสิทธิภาพ	(ประสิทธิภาพ
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	) DC	) AC
1	225	0.19	17.3	19.32	0.36	6.96	4.92	0.4	1.97	28.30	11.38
2	226	0.18	17.0	19.31	0.34	6.57	4.70	0.3	1.41	21.48	8.29
3	225	0.18	16.3	19.31	0.31	5.99	4.08	0.3	1.22	20.45	7.51
4	225	0.17	15.1	19.31	0.26	5.02	2.95	0.2	0.59	11.75	3.91
5	226	0.17	14.5	19.32	0.25	4.83	2.26	0.2	0.45	9.36	3.12
6	226	0.17	14.2	19.32	0.23	4.44	1.65	0.2	0.33	7.43	2.32
7	2250	0.16	13.9	19.31	0.22	4.25	1.19	0.2	0.24	5.60	1.71
8	226	0.16	13.7	19.31	0.22	4.25	0.85	0.1	0.09	2.00	0.62
9	226	0.16	13.7	19.31	0.22	4.25	0.58	0.1	0.06	1.37	0.42
10	226	0.16	14.0	19.31	0.23	4.44	0.36	0.1	0.04	0.81	0.26

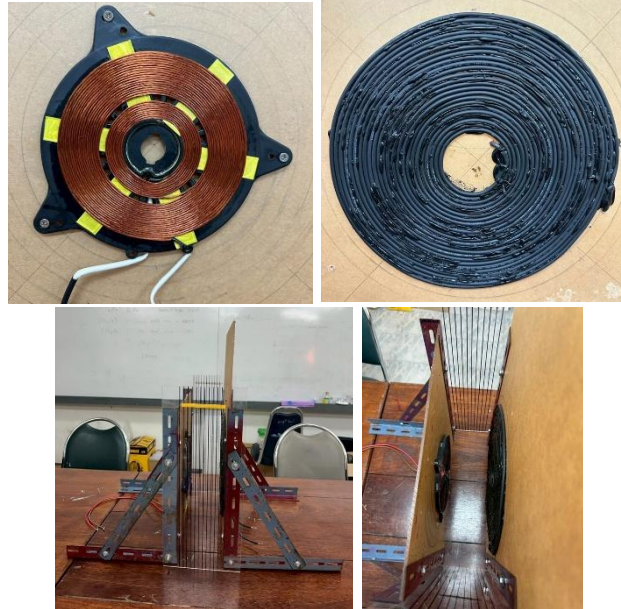


ภาพที่ จ-44 กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 9

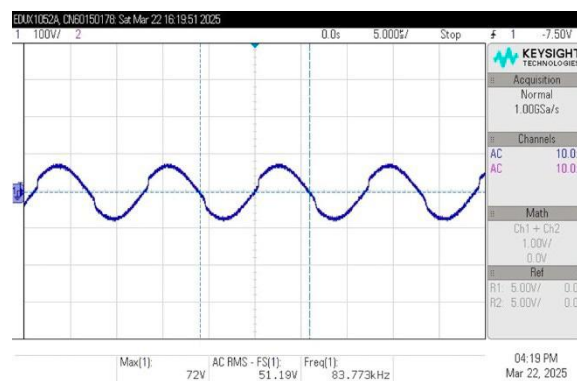


ภาพที่ จ-45 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 9

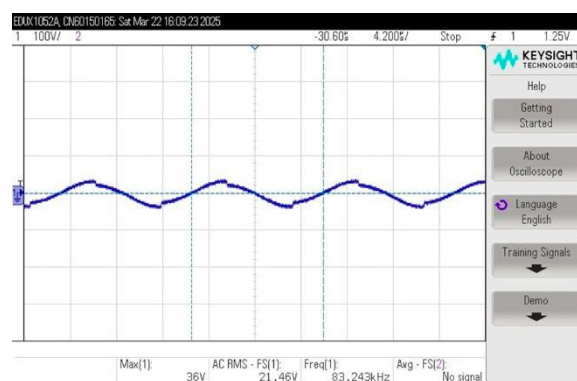
จ.4.10 การทดลองที่ 10 : รูปแบบที่ 3 (Induction Coil 3500W (สำเร็จรูป)) - รูปแบบที่ 2 (THW 6 mm² (24 รอบ))



ภาพที่ จ-46 รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 10



ภาพที่ จ-47 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 10



ภาพที่ จ-48 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 10

ตารางที่ จ-37 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 10 ที่ความถี่ 80.07 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	225	0.17	15.6	19.31	0.29	5.60	3.62	0.3	1.09	19.39	6.96
2	225	0.18	16.3	19.31	0.32	6.18	4.21	0.3	1.26	20.44	7.75
3	226	0.18	17.0	19.31	0.35	6.76	4.77	0.4	1.91	28.23	11.22
4	225	0.19	18.0	19.30	0.39	7.53	5.35	0.5	2.68	35.54	14.86
5	226	0.20	18.8	19.31	0.43	8.30	5.76	0.4	2.30	27.75	12.26
6	226	0.21	19.8	19.30	0.47	9.07	6.14	0.5	3.07	33.84	15.51
7	226	0.21	21.0	19.30	0.53	10.23	6.48	0.6	3.89	38.01	18.51
8	225	0.21	21.3	19.31	0.54	10.43	6.40	0.6	3.84	36.83	18.03
9	226	0.22	21.9	19.31	0.57	11.01	6.23	0.5	3.12	28.30	14.22
10	225	0.22	21.4	19.31	0.56	10.81	5.58	0.4	2.23	20.64	10.43

ตารางที่ จ-38 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 10 ที่ความถี่ 83.45 kHz

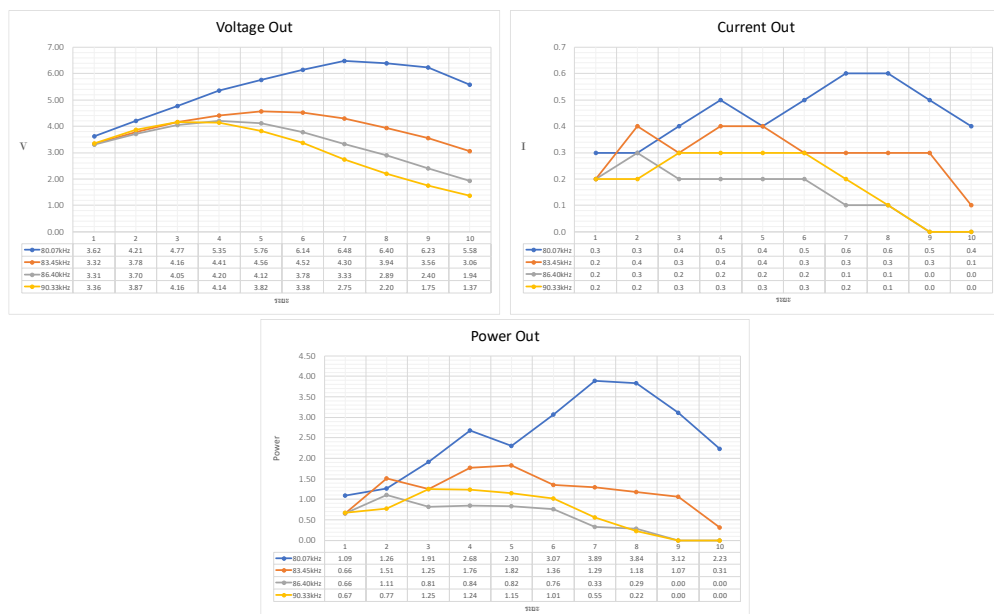
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	226	0.17	15.4	19.30	0.28	5.40	3.32	0.2	0.66	12.29	4.31
2	226	0.18	15.9	19.31	0.30	5.79	3.78	0.4	1.51	26.10	9.51
3	226	0.18	16.4	19.30	0.31	5.98	4.16	0.3	1.25	20.86	7.61
4	226	0.19	16.7	19.31	0.33	6.37	4.41	0.4	1.76	27.68	10.56
5	226	0.18	16.7	19.30	0.34	6.56	4.56	0.4	1.82	27.80	10.92
6	225	0.19	16.8	19.30	0.34	6.56	4.52	0.3	1.36	20.66	8.07
7	225	0.19	16.9	19.31	0.34	6.57	4.30	0.3	1.29	19.65	7.63
8	226	0.19	16.7	19.31	0.33	6.37	3.94	0.3	1.18	18.55	7.08
9	225	0.18	16.4	19.31	0.32	6.18	3.56	0.3	1.07	17.28	6.51
10	225	0.18	16.2	19.31	0.31	5.99	3.06	0.1	0.31	5.11	1.89

ตารางที่ จ-39 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 10 ที่ความถี่ 86.40 kHz

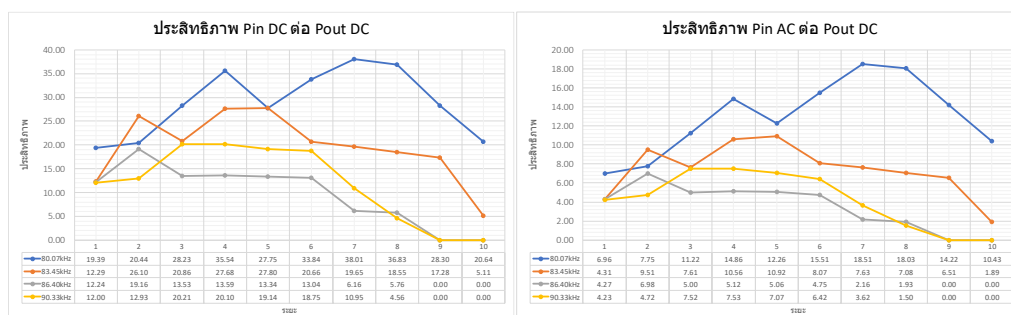
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	225	0.18	15.5	19.31	0.28	5.41	3.31	0.2	0.66	12.24	4.27
2	225	0.18	15.9	19.31	0.30	5.79	3.70	0.3	1.11	19.16	6.98
3	225	0.18	16.2	19.31	0.31	5.99	4.05	0.2	0.81	13.53	5.00
4	226	0.18	16.4	19.31	0.32	6.18	4.20	0.2	0.84	13.59	5.12
5	226	0.18	16.3	19.31	0.32	6.18	4.12	0.2	0.82	13.34	5.06
6	225	0.18	15.9	19.32	0.30	5.80	3.78	0.2	0.76	13.04	4.75
7	225	0.17	15.4	19.30	0.28	5.40	3.33	0.1	0.33	6.16	2.16
8	226	0.17	15.0	19.31	0.26	5.02	2.89	0.1	0.29	5.76	1.93
9	226	0.17	14.9	19.31	0.26	5.02	2.40	0.0	0.00	0.00	0.00
10	2260	0.17	14.8	19.30	0.25	4.83	1.94	0.0	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ จ-40 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 10 ที่ความถี่ 90.33 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$	$\eta \rightarrow \text{EFF}$
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)			(ประสิทธิภาพ	(ประสิทธิภาพ
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	) DC	) AC
1	226	0.18	15.9	19.31	0.29	5.60	3.36	0.2	0.67	12.00	4.23
2	226	0.19	16.4	19.31	0.31	5.99	3.87	0.2	0.77	12.93	4.72
3	226	0.19	16.6	19.30	0.32	6.18	4.16	0.3	1.25	20.21	7.52
4	226	0.18	16.5	19.31	0.32	6.18	4.14	0.3	1.24	20.10	7.53
5	226	0.17	16.2	19.31	0.31	5.99	3.82	0.3	1.15	19.14	7.07
6	227	0.18	15.8	19.31	0.28	5.41	3.38	0.3	1.01	18.75	6.42
7	226	0.17	15.2	19.31	0.26	5.02	2.75	0.2	0.55	10.95	3.62
8	226	0.17	14.7	19.31	0.25	4.83	2.20	0.1	0.22	4.56	1.50
9	227	0.17	14.4	19.31	0.24	4.63	1.75	0.0	0.00	0.00	0.00
10	227	0.17	14.2	19.31	0.23	4.44	1.37	0.0	0.00	0.00	0.00

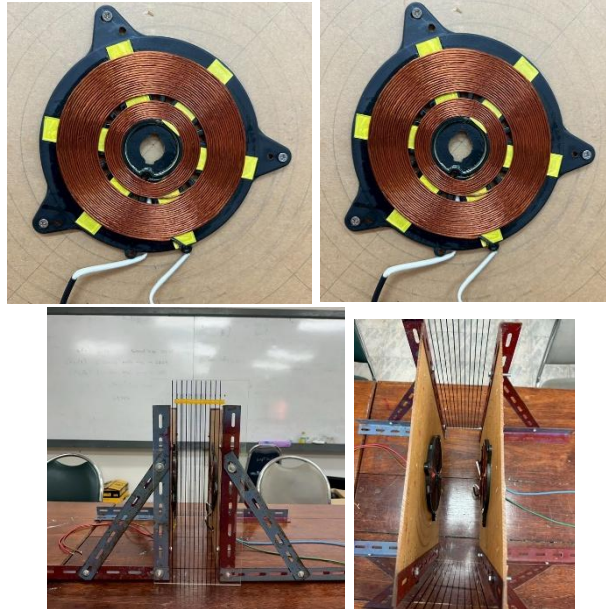


ภาพที่ จ-49 กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 10

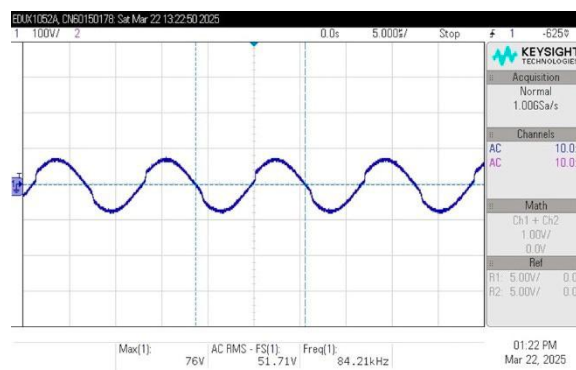


ภาพที่ จ-50 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 10

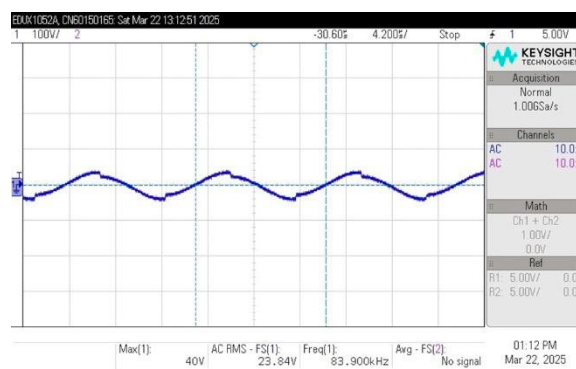
จ.4.11 การทดลองที่ 11 : รูปแบบที่ 3 (Induction Coil 3500W (สำเร็จรูป)) - รูปแบบที่ 3 (Induction Coil 3500W (สำเร็จรูป))



ภาพที่ จ-51 รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 11



ภาพที่ จ-52 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 11



ภาพที่ จ-53 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 11

ตารางที่ จ-41 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 11 ที่ความถี่ 80.00 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	226	0.16	14.4	19.31	0.23	4.44	1.50	0.0	0.00	0.00	0.00
2	225	0.17	14.6	19.32	0.25	4.83	2.45	0.1	0.25	5.07	1.68
3	226	0.17	15.3	19.31	0.27	5.21	3.23	0.2	0.65	12.39	4.22
4	225	0.18	16.4	19.31	0.32	6.18	4.32	0.2	0.86	13.98	5.27
5	226	0.19	17.6	19.30	0.39	7.53	5.34	0.4	2.14	28.38	12.14
6	225	0.20	19.8	19.29	0.48	9.26	6.51	0.5	3.26	35.15	16.44
7	226	0.22	22.2	19.30	0.59	11.39	7.35	0.6	4.41	38.73	19.86
8	225	0.23	24.2	19.30	0.69	13.32	7.61	0.6	4.57	34.29	18.87
9	225	0.24	25.8	19.30	0.76	14.67	7.37	0.6	4.42	30.15	17.14
10	226	0.25	26.8	19.29	0.81	15.62	6.72	0.5	3.36	21.50	12.54

ตารางที่ จ-42 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 11 ที่ความถี่ 83.72 kHz

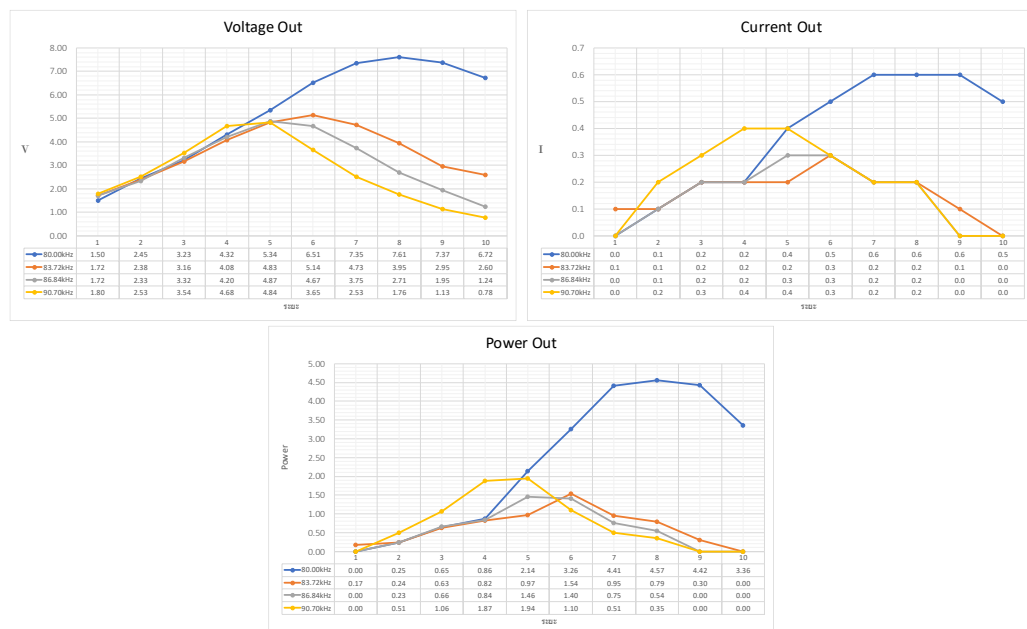
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	226	0.17	14.4	19.31	0.24	4.63	1.72	0.1	0.17	3.71	1.19
2	225	0.17	14.9	19.30	0.26	5.02	2.38	0.1	0.24	4.74	1.60
3	225	0.17	15.5	19.30	0.28	5.40	3.16	0.2	0.63	11.70	4.08
4	226	0.18	16.5	19.30	0.32	6.18	4.08	0.2	0.82	13.21	4.95
5	226	0.18	17.1	19.30	0.36	6.95	4.83	0.2	0.97	13.90	5.65
6	225	0.19	17.6	19.31	0.38	7.34	5.14	0.3	1.54	21.01	8.76
7	225	0.19	17.3	19.30	0.36	6.95	4.73	0.2	0.95	13.62	5.47
8	225	0.18	16.8	19.30	0.34	6.56	3.95	0.2	0.79	12.04	4.70
9	225	0.18	16.0	19.30	0.31	5.98	2.95	0.1	0.30	4.93	1.84
10	226	0.17	15.7	19.30	0.28	5.40	2.60	0.0	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ จ-43 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 11 ที่ความถี่ 86.84 kHz

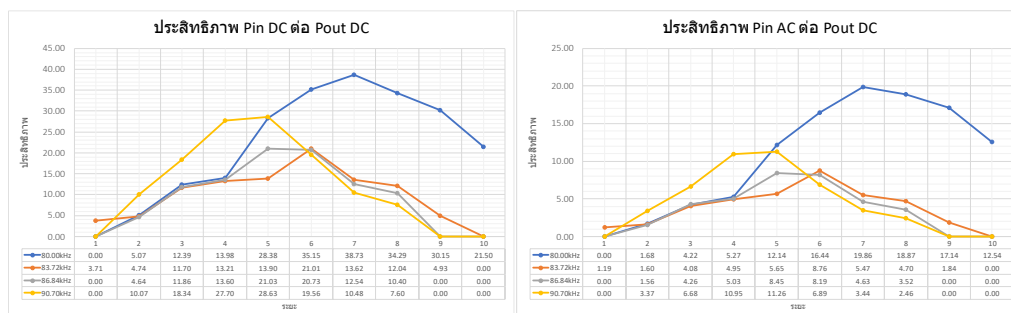
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	226	0.17	14.5	19.31	0.24	4.63	1.72	0.0	0.00	0.00	0.00
2	225	0.17	14.9	19.31	0.26	5.02	2.33	0.1	0.23	4.64	1.56
3	225	0.17	15.6	19.31	0.29	5.60	3.32	0.2	0.66	11.86	4.26
4	226	0.18	16.7	19.30	0.32	6.18	4.20	0.2	0.84	13.60	5.03
5	225	0.18	17.3	19.30	0.36	6.95	4.87	0.3	1.46	21.03	8.45
6	225	0.18	17.1	19.31	0.35	6.76	4.67	0.3	1.40	20.73	8.19
7	225	0.18	16.2	19.30	0.31	5.98	3.75	0.2	0.75	12.54	4.63
8	225	0.17	15.4	19.30	0.27	5.21	2.71	0.2	0.54	10.40	3.52
9	226	0.17	14.9	19.30	0.26	5.02	1.95	0.0	0.00	0.00	0.00
10	226	0.17	14.7	19.31	0.25	4.83	1.24	0.0	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ จ-44 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 11 ที่ความถี่ 90.70 kHz

ระยะทาง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	225	0.17	14.5	19.32	0.25	4.83	1.80	0.0	0.00	0.00	0.00
2	226	0.17	15.0	19.32	0.26	5.02	2.53	0.2	0.51	10.07	3.37
3	225	0.17	15.9	19.30	0.30	5.79	3.54	0.3	1.06	18.34	6.68
4	226	0.18	17.1	19.31	0.35	6.76	4.68	0.4	1.87	27.70	10.95
5	226	0.18	17.2	19.32	0.35	6.76	4.84	0.4	1.94	28.63	11.26
6	226	0.17	15.9	19.30	0.29	5.60	3.65	0.3	1.10	19.56	6.89
7	226	0.17	14.7	19.32	0.25	4.83	2.53	0.2	0.51	10.48	3.44
8	226	0.16	14.3	19.31	0.24	4.63	1.76	0.2	0.35	7.60	2.46
9	226	0.16	11.2	19.30	0.23	4.44	1.13	0.0	0.00	0.00	0.00
10	226	0.17	14.1	19.38	0.23	4.46	0.78	0.0	0.00	0.00	0.00

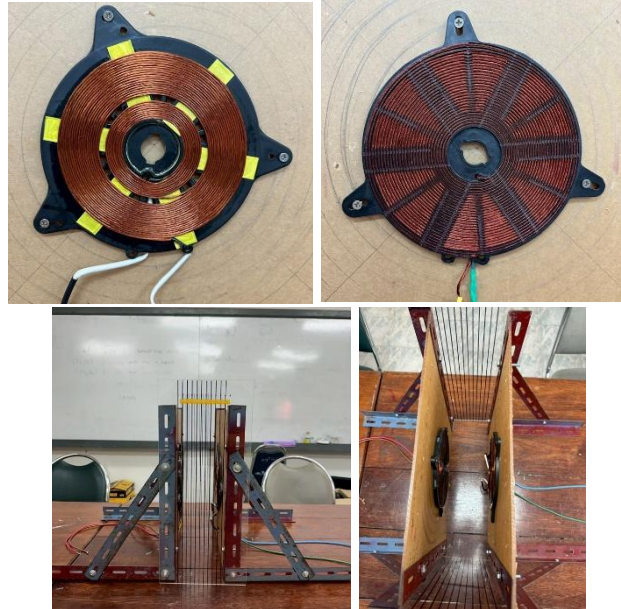


ภาพที่ จ-54 กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 11

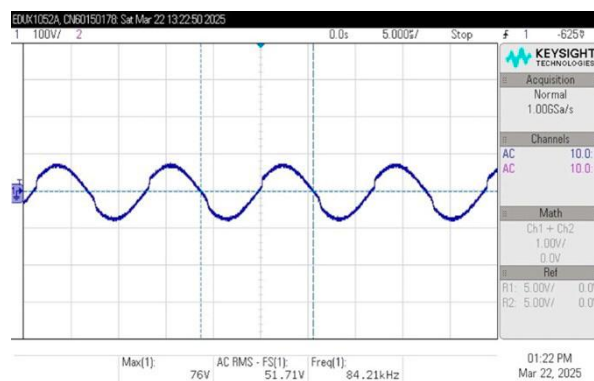


ภาพที่ จ-55 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 11

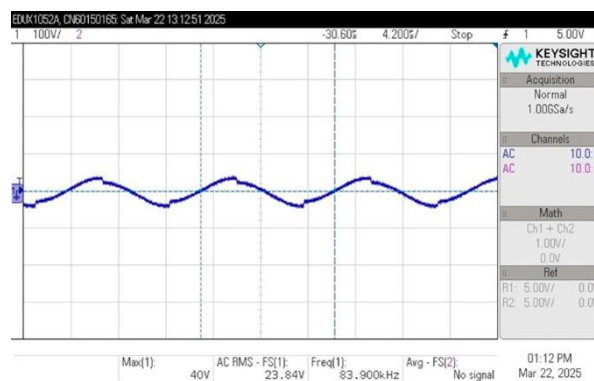
จ.4.12 การทดลองที่ 12 : รูปแบบที่ 3 (Induction Coil 3500W (สำเร็จรูป)) - รูปแบบที่ 4 (Induction Coil 2000W (สำเร็จรูป))



ภาพที่ จ-56 รูปแบบขดลวดการทดลองที่ 12



ภาพที่ จ-57 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งส่งของการทดลองที่ 12



ภาพที่ จ-58 รูปคลื่นสัญญาณฝั่งรับของการทดลองที่ 12

ตารางที่ จ-45 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 12 ที่ความถี่ 80.58 kHz

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	226	0.17	14.4	19.31	0.24	4.63	1.50	0.0	0.00	0.00	0.00
2	225	0.17	14.6	19.32	0.26	5.02	2.45	0.1	0.25	4.88	1.68
3	226	0.17	15.3	19.31	0.27	5.21	3.23	0.2	0.65	12.39	4.22
4	225	0.18	16.4	19.31	0.34	6.57	4.32	0.3	1.30	19.74	7.90
5	226	0.19	17.6	19.30	0.39	7.53	5.34	0.4	2.14	28.38	12.14
6	225	0.19	19.8	19.29	0.51	9.84	6.51	0.5	3.26	33.09	16.44
7	226	0.21	22.2	19.30	0.60	11.58	7.46	0.6	4.48	38.65	20.16
8	225	0.23	24.2	19.30	0.69	13.32	7.61	0.6	4.57	34.29	18.87
9	225	0.24	25.8	19.30	0.76	14.67	7.37	0.6	4.42	30.15	17.14
10	226	0.24	26.8	19.29	0.85	16.40	6.72	0.5	3.36	20.49	12.54

ตารางที่ จ-46 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 12 ที่ความถี่ 83.41 kHz

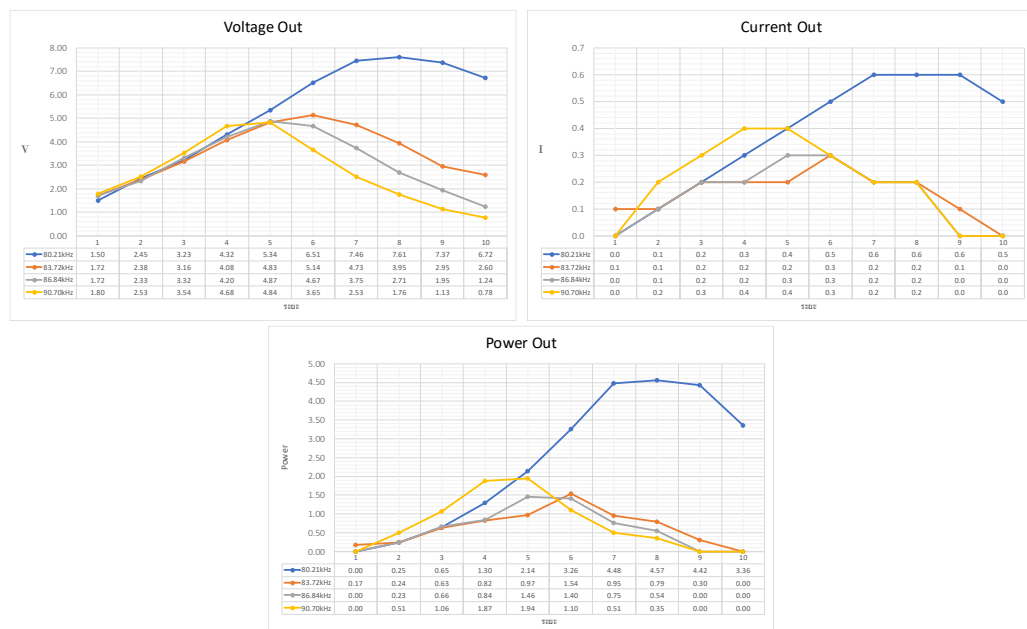
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	226	0.17	14.4	19.31	0.24	4.63	1.72	0.1	0.17	3.71	1.19
2	225	0.17	14.9	19.30	0.26	5.02	2.38	0.1	0.24	4.74	1.60
3	225	0.17	15.5	19.30	0.28	5.40	3.16	0.2	0.63	11.70	4.08
4	226	0.18	16.5	19.30	0.32	6.18	4.08	0.2	0.82	13.21	4.95
5	226	0.18	17.1	19.30	0.36	6.95	4.83	0.2	0.97	13.90	5.65
6	225	0.19	17.6	19.31	0.38	7.34	5.14	0.3	1.54	21.01	8.76
7	225	0.19	17.3	19.30	0.36	6.95	4.73	0.2	0.95	13.62	5.47
8	225	0.19	17.2	19.30	0.34	6.56	3.95	0.2	0.79	12.04	4.59
9	225	0.18	16.0	19.30	0.31	5.98	2.95	0.1	0.30	4.93	1.84
10	226	0.17	15.7	19.30	0.28	5.40	2.60	0.0	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ จ-47 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 12 ที่ความถี่ 86.78 kHz

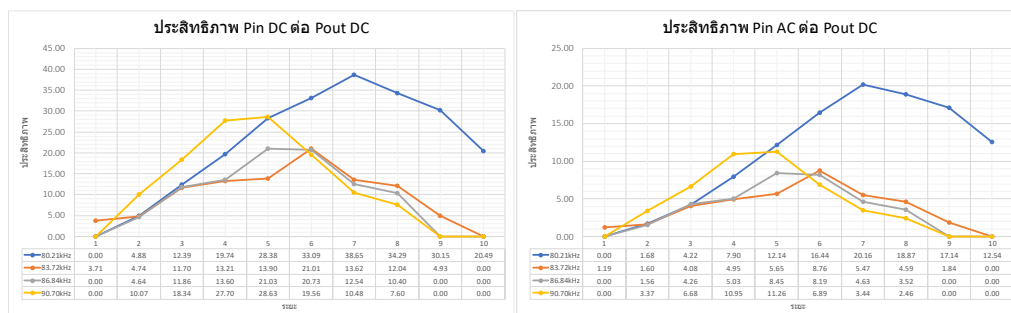
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	226	0.17	14.5	19.31	0.24	4.63	1.72	0.0	0.00	0.00	0.00
2	225	0.17	14.9	19.31	0.26	5.02	2.33	0.1	0.23	4.64	1.56
3	225	0.17	15.6	19.31	0.29	5.60	3.32	0.2	0.66	11.86	4.26
4	226	0.18	16.7	19.30	0.32	6.18	4.20	0.2	0.84	13.60	5.03
5	225	0.18	17.3	19.30	0.36	6.95	4.87	0.3	1.46	21.03	8.45
6	225	0.18	17.1	19.31	0.35	6.76	4.67	0.3	1.40	20.73	8.19
7	225	0.18	16.2	19.30	0.31	5.98	3.75	0.2	0.75	12.54	4.63
8	225	0.17	15.4	19.30	0.27	5.21	2.71	0.2	0.54	10.40	3.52
9	226	0.17	14.9	19.30	0.26	5.02	1.95	0.0	0.00	0.00	0.00
10	226	0.17	14.7	19.31	0.25	4.83	1.24	0.0	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ จ-48 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 12 ที่ความถี่ 90.21 kHz

ระยะทาง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow \text{EFF}$ (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}		
1	225	0.17	14.5	19.32	0.25	4.83	1.80	0.0	0.00	0.00	0.00
2	226	0.17	15.0	19.32	0.26	5.02	2.53	0.2	0.51	10.07	3.37
3	225	0.17	15.9	19.30	0.30	5.79	3.54	0.3	1.06	18.34	6.68
4	226	0.18	17.1	19.31	0.35	6.76	4.68	0.4	1.87	27.70	10.95
5	226	0.18	17.2	19.32	0.35	6.76	4.84	0.4	1.94	28.63	11.26
6	226	0.17	15.9	19.30	0.29	5.60	3.65	0.3	1.10	19.56	6.89
7	226	0.17	14.7	19.32	0.25	4.83	2.53	0.2	0.51	10.48	3.44
8	226	0.16	14.3	19.31	0.24	4.63	1.76	0.2	0.35	7.60	2.46
9	226	0.16	11.2	19.30	0.23	4.44	1.13	0.0	0.00	0.00	0.00
10	226	0.17	14.1	19.38	0.23	4.46	0.78	0.0	0.00	0.00	0.00



ภาพที่ จ-59 กราฟแสดงแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกของการทดลองที่ 12



ภาพที่ จ-60 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการทดลองที่ 12

ภาคผนวก ฉ
คู่มือแนะนำการใช้งาน

คู่มือการใช้งาน

ชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

1. การเปิดระบบและเตรียมพร้อมใช้งาน

เริ่มต้นการใช้งานโดยการเสียบปลั๊กไฟฟ้ากระแสสลับ 220V เข้าสู่ตู้ควบคุมการส่งกำลัง



ภาพที่ ฉ-1 เสียบปลั๊กไฟฟ้ากระแสสลับ 220V เข้าสู่ตู้ควบคุม

จากนั้นเปิดสวิตช์ Safety Breaker ที่อยู่ด้านหน้าตู้ควบคุม



ภาพที่ ฉ-2 เปิดสวิตช์ Safety Breaker

เมื่อระบบได้รับไฟฟ้าแล้ว จะสังเกตเห็นไฟ Pilot Lamp สีแดงติดขึ้น



ภาพที่ ฉ-3 Pilot Lamp สีแดงติด

ซึ่งเป็นสัญญาณที่บ่งบอกว่าระบบได้รับพลังงานไฟฟ้าและพร้อมสำหรับการทำงาน นอกจากนี้หน้าจوميเตอร์ PZEM-022 จะแสดงค่าแรงดันและพารามิเตอร์ต่างๆ



ภาพที่ ฉ-4 หน้าจوميเตอร์ PZEM-022 ด้านหน้าตู้ควบคุม

2. การจัดตำแหน่งรถเข้าสู่จุดชาร์จ

ขับรถสปีดเตอร์เข้ามาใกล้จุดชาร์จอย่างช้าๆ และระมัดระวัง จัดตำแหน่งให้ขดลวดเหนี่ยวนำที่ติดตั้งอยู่ใต้ท้องรถตรงกับขดลวดเหนี่ยวนำที่ฝังอยู่บนพื้นให้มากที่สุด เลื่อนรถไปข้างหน้าจนกระทั่งล้อทั้งสองข้างกดสวิตช์ Limit Switch ที่ติดตั้งไว้



ภาพที่ ฉ-5 ล้อทั้งสองข้างกดสวิตช์ Limit Switch

เมื่อรถเข้าตำแหน่งที่ถูกต้องแล้ว จะได้ยินเสียงบัสเซอร์ดังขึ้น 1 ครั้ง เป็นสัญญาณยืนยันว่าระบบตรวจพบรถในตำแหน่งที่เหมาะสม พร้อมกันนั้นไฟ Pilot Lamp สีน้ำเงินที่ตู้ควบคุมจะติดขึ้น

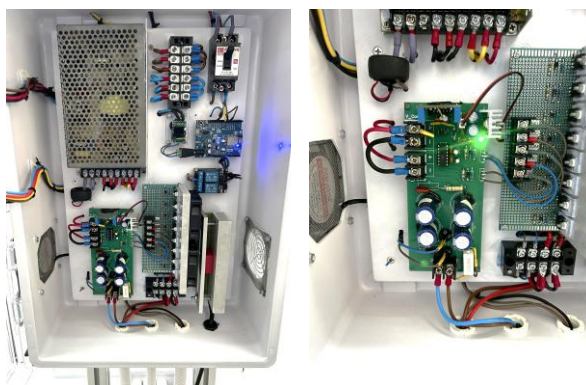


ภาพที่ ฉ-6 Pilot Lamp สีน้ำเงินติด

แสดงว่ารถสกู๊ตเตอร์อยู่ในตำแหน่งแล้วระบบพร้อมที่จะเริ่มกระบวนการชาร์จ

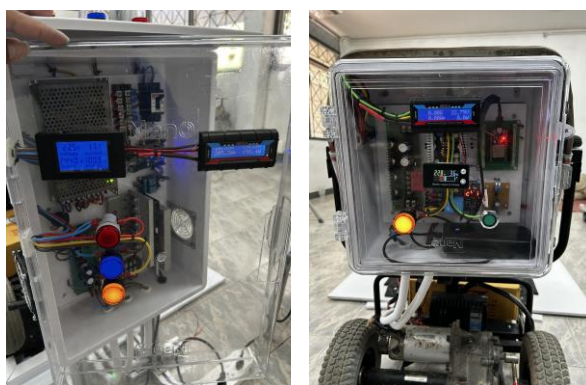
3. การเริ่มต้นกระบวนการชาร์จ

หลังจากที่รถเข้าตำแหน่งถูกต้องแล้ว ระบบจะทำการตรวจสอบสถานะและเตรียมพร้อมสำหรับการถ่ายโอนพลังงานเป็นเวลา 3-5 วินาที โดยผู้ใช้ไม่ต้องกดปุ่มหรือทำอะไรเพิ่มเติม เนื่องจากระบบทำงานแบบอัตโนมัติ สังเกตไฟ LED ที่แผงวงจรจะติดขึ้น และพัดลมระบายความร้อนจะเริ่มทำงานเพื่อป้องกันอุปกรณ์ภายในจากความร้อนเกิน



ภาพที่ ฉ-7 วงจรทำงาน LED ที่แผงวงจรจะติดขึ้น

เมื่อระบบเริ่มการชาร์จแล้ว ไฟ Pilot Lamp สีเหลืองทั้งที่ตู้ควบคุมและบนตัวรถจะติดขึ้น ในขณะเดียวกันมัลติมิเตอร์ที่ติดอยู่ด้านหน้าของตู้ควบคุม และที่ตัวรถ จะเริ่มแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ



ภาพที่ ฉ-8 Pilot Lamp สีเหลืองติด

4. การติดตามสถานะระหว่างกระบวนการชาร์จ

ระหว่างที่แบตเตอรี่กำลังได้รับการชาร์จ ผู้ใช้สามารถติดตามสถานะการทำงานผ่านมิเตอร์หลายตัวที่ติดตั้งไว้

ที่ตู้ควบคุมจะมีมิเตอร์ PZEM-022 ที่แสดงค่าแรงดันขาเข้า กระแสขาเข้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานสะสม รวมถึง DC Watt Meter ที่แสดงค่าแรงดันและกระแสขาออก



ภาพที่ ๙-9 มิเตอร์ที่ตู้ควบคุม

ส่วนที่ตัวรถจะมี DC Watt Meter ที่แสดงค่าแรงดันและกระแสที่จ่ายให้แบตเตอรี่ รวมถึง Battery Capacity Indicator ที่แสดงระดับแบตเตอรี่เป็นเปอร์เซ็นต์



ภาพที่ ๙-10 มิเตอร์ที่ตัวรถ

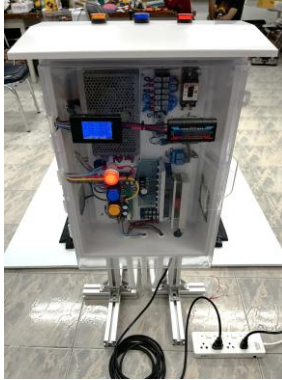
5. การเสร็จสิ้นกระบวนการชาร์จ

เมื่อแบตเตอรี่ได้รับการชาร์จจนเต็มที่แล้ว ระบบจะแสดงสัญญาณการชาร์จเสร็จสิ้นโดยไฟสีเขียวที่ติดตั้งบนตัวรถจะติดขึ้น เป็นสัญญาณว่าแบตเตอรี่มีประจุเต็มแล้ว ในขณะที่เดียวกันไฟที่ตู้ควบคุมจะยังคงเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งหมายความว่ารถยังคงอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง แต่ระบบได้หยุดการชาร์จแล้วเพื่อป้องกันการชาร์จเกิน นอกจากนี้ Battery Capacity Indicator จะแสดงค่า 100% และกระแสชาร์จจะลดลงเหลือน้อยกว่า 0.5A



ภาพที่ ๙-11 ไฟสีเขียวบนตัวรถจะติด

เมื่อต้องการปิดระบบ ให้ขั้วบรออกจากตำแหน่งซึ่งจะทำให้ไฟสีแดงติดขึ้นอีกครั้งเนื่องจากไม่มีรอยู่ในตำแหน่งและไม่มีการวนการชาร์จเกิดขึ้น



ภาพที่ ฉ-12 Pilot Lamp สีแดงติด กลับเข้าสู่สภาวะเริ่มต้น

จากนั้นปิดสวิตช์ Safety Breaker ที่ตู้ควบคุม และถอดปลั๊กไฟฟ้าออกหากต้องการ

ภาคผนวก ซ
Datasheet รถสกู๊ตเตอร์ไฟฟ้า Freerider

ณ.1 คู่มือรถสกู๊ตเตอร์ไฟฟ้า Freerider Mayfair

first choice
mobility
www.firstchoiceamobility.com
more | online | mobile

FreeRider®
working together

ATTENTION
Read all parts in this
manual before operating
your scooter



FR510DX2/FR510DXs2



FR168-3/FR-168-3S



FR168-4/FR168-4S/FR168-4S2b

USERS INSTRUCTION MANUAL



FOREWORD

Please read and follow all instructions in this Users Instruction Manual before attempting to operate your **Freerider** Scooter for the first time. If there is anything in this manual that you do not understand, or if you require additional assistance for setting it up, contact your Authorized **Freerider** Agent.

Using your **Freerider** product safely depends upon your diligence in following the warnings, cautions and instructions in this manual. Using your **Freerider** Scooter safely also depends upon your good judgment and / or common sense, as well as that of your Provider, Carer or Health Professional.

Always think safety!



CONTENTS

Introduction	2	Battery and battery charging	23
Product description.	3	Care and maintenance.	26
Purpose of your Freerider Scooter	5	Basic fault finding	30
Rules for safe use.	5	Technical specification.	33
Getting to know your Freerider Scooter.	7	Circuit diagrams.	38
Operating your Freerider Scooter.	8	Advisory safety notice	39
Freewheeling your Freerider Scooter	12	Freerider Scooter spare parts	39
Safety instructions and warnings	12	Optional accessories	40
Safety instruction labels	16	Guarantee terms	41
Learning to get about	16	Service history	42
Transporting your Scooter	19		



INTRODUCTION

Congratulations on purchase of your **Freerider** Scooter.

Please read this User Instruction Manual carefully before your attempt to operate **Freerider** Scooter. Your User Instruction Manual will assist you to get the most from your machine.

This manual contains important information regarding the safe operation and maintenance of your **Freerider** Scooter. Before beginning to use your Scooter, make sure you completely read and understand all instructions thoroughly. Please observe the "Rules for safe use" and the Safety Instructions outlined on page 5, 12 of this manual. If you have any queries concerning operation or maintenance, consult your authorized **Freerider** dealer.

Please keep in mind that the operator of the Scooter is responsible for hazards occurring to other people or their property.

Your **Freerider** Scooter has numerous features not found on other power Scooters. With proper care and maintenance, you will enjoy many years of dependable service.

Your **Freerider** Scooter needs to receive maintenance at regular intervals and should be inspected frequently for proper mechanical operation. Troubleshooting Guidelines, methods of detecting improper operation and making minor adjustments are included in manual.

Follow all recommendations to obtain trouble free, safe and enjoyable operation of your **Freerider** Scooter.

Please remember that when it comes to service and repairs, your authorized **Freerider** dealer knows your **Freerider** Scooter best.



PRODUCT DESCRIPTION

- Rear-wheel drive via sealed drive axle
- 36 A/H sealed non-maintenance lead-acid batteries.
- Automatic charging system.
- Off-board charging facility.
- Seat with folding backrest, height adjustment and adjustable width arm-rests.
- Seat rotates and is fully adjustable forwards and backwards and for height.
- Multi-positional handle bars for greater comfort, driving mirror, front basket for storing personal items.
- A simple 'wig-wag' tyre control lever situated on the handlebar, controls speed, braking and direction.
- Steering is controlled by handlebar attached to a linkage system containing front wheels for FR168-4/FR168-4S/FR510DX2/FR510DXs2.
- Steering is controlled by handlebar attached to a fork system containing the single front wheel for FR168-3/FR168-3S.
- 'System-of-the-art' micro-controller electronics ensure a smooth, comfortable and safe drive on all surfaces and gradients.
- Two piece steel chassis for ease of transporting.
- Your scooter can be dismantled into separate components without the use of tools for ease of transporting. However, your scooter is not designed to transport the user in a moving vehicle; for advice on transporting consult your selling agent.

Your **Freerider** Scooter should be serviced as recommended by an approved **Freerider** distributor in order to ensure safe, reliable operation. For details and list of options available for user, refer to accessories section of this manual.



FR510DX2/FR510DXs2 FEATURE GUIDE

- 1 Steering handlebars
- 2 Drive mirror
- 3 Console
- 4 Charging socket
- 5 Basket
- 6 Front light
- 7 Direction indicator lights
- 8 Front and rear bumper
- 9 Amber side reflectors
- 10 Floor mat
- 11 Pneumatic wheels with grey tyres
- 12 Rear lights and indicators
- 13 Adjustable angle seat with backrest





FR168-4/FR168-4S/FR168-4S2b FEATURE GUIDE

- 1 Adjustable steering handlebars
- 2 Driving mirror
- 3 Console
- 4 Charging socket
- 5 Basket
- 6 Front light
- 7 Direction indicator lights
- 8 Front and rear bumper
- 9 Amber side reflectors
- 10 Floor mat
- 11 Pneumatic wheels with grey tyres
- 12 Rear lights and indicators
- 13 Adjustable angle seat with backrest



FR168-3/FR168-3S FEATURE GUIDE

- 1 Adjustable steering handlebars
- 2 Driving mirror
- 3 Console
- 4 Charging socket
- 5 Basket
- 6 Front light
- 7 Direction indicator lights
- 8 Front and rear bumper
- 9 Amber side reflectors
- 10 Floor mat
- 11 Pneumatic wheels with grey tyres
- 12 Rear lights and indicators
- 13 Adjustable angle seat with backrest



PURPOSE OF YOUR FREERIDER SCOOTER



Your **Freerider Scooter** is suitable for persons who require independent mobility combined with comfort, maneuverability, reliability and a product that needs a minimal amount of maintenance.

The intended user should possess some degree of ability with the use of both arms and hands, reasonable balance and eyesight, and a degree of spatial awareness. The user should have received training in the use of the product, preferably in their normal environment. The maximum user weight for your Scooter can be found in the rear of this manual, under 'Technical Specification' (see page 33, 34).

Your Scooter is suitable for use indoors in shopping malls or precincts for example, or outdoors on dry, smooth level surfaces. It climbs slopes safely up to 8° rain or snow, on loose slippery surfaces and slopes or on wet grass etc., which could become a danger to the rider. Passengers must not be carried. Excess baggage outside of the seating area can affect stability.

Your Scooter is a 'Class 2' (B) * vehicle and designed for pavement use only. The Scooter must only be used on the road with caution if a pavement is not available. It is designed for a single occupant who experiences difficulty or discomfort when walking for prolonged periods, but has the use of both legs and the physical, visual and cognitive ability to operate the Scooter safely.

Do not drive your Scooter if you are under the influence of alcohol, drugs or medication that may affect your ability. If in doubt consult your doctor. As a pavement user you should



familiarize yourself with the current editions of the Highway Code.

* DEFINITION

Electrically powered scooter are classified in the following categories :

Class 2 as defined in "The use of invalid carriages on the Highways Regulations 1988"

A scooter tyre invalid carriage designed for the use on the footway, with maximum speed up to 4 M.P.H.

Class 'B', as defined in The European Standard EN12184 :1999. A scooter sufficiently compact and maneuverable for some indoor environments and capable of traveling over longer distances and negotiating outdoor obstacles.

RULES FOR SAFE USE

These symbols below are used in this owner manual to identify and warnings and cautions. It is very important for you to read and understand them.



Warning: Failure to note the warnings in this users manual may result in personal injury.



Cautions: Failure to observe the cautions in this users manual in damage to your scooter.

Your scooter is a powerful machine, for your safety and the safety of bystanders, please read all of the instruction in this manual before operating your scooter, they have been prepared from years of experience with this type of equipment.

Follow notes carefully to ensure safety at all times.

Always make certain your machine is in full working order before starting your journey.

1. Do not ride your scooter without reading this instruction manual. Also read all of safety instructions and warnings starting on page 12 of this manual.
2. Only drive your scooter if your health condition will allow you to be safe.
3. Do not exceed the maximum safe gradient outlined for your vehicle (see Technical Specification, page 33).
Warning: Always have the anti-tipping wheels fitted when outdoors or on ramps indoors (see Fig 18 page 19).
4. Do not carry passengers or exceed the maximum carrying weight.
5. Do not mount or dismount your scooter unless it is switched off with the freewheel device fully engaged.





6. Do not switch your scooter 'on' with the forward/reverse lever depressed. **Warning:** Do not hang bags etc over your steering handlebars, always use the front basket. Failure to observe this warning may interfere with your controls and put you and other at risk.
7. Do not mount or dismount your scooter unless the speed adjustment dial is set to minimum.
8. Do not reverse your scooter onto uneven inclines or surfaces. Be cautious when traversing slopes.
9. Do not drive your Scooter in a confined space unless the speed adjustment dial is set low.
10. Do not turn suddenly at full speed, especially on uneven or sloping ground.
11. Do not drive your Scooter where you cannot safely or legally walk. Obey the Highway Code.
12. Do not drive your Scooter unless the seat is locked into the driving position.
13. Do not drive your scooter with the handlebar adjustment lock, in the unlocked position.
14. Do not drive your scooter over deep, soft terrain (eg. soft earth, deep grass, snow).
15. Do not drive when under the influence of alcohol or certain drugs which may impair your safety.
16. Avoid climbing or descending kerbs, you may ground your chassis and fall over.
17. Always approach small obstacles "straight on" and at slow speed. Do not attempt to climb or descend kerbs. This may damage your Scooter
18. Always stop fully before changing dissection (forward or reverse).
19. Always keep your feet on the vehicle when driving.
20. Always proceed carefully while riding, especially as you approach the downgrade of a ramp.
21. Always avoid uneven surfaces.
22. Always consult your physician or a therapist if in doubt about your ability to operate a Scooter.
23. Transport- Do not sit on your scooter while it is in a moving vehicle. Always strap down your scooter then transfer to the vehicle seat.
24. The batteries fitted to your scooter are Maintenance free and do not require topping up with distilled water. Do not attempt to remove the safety valves situated in the top of the battery. Failure to observe this warning

will invalidate your battery guarantee.

25. Do not drive your Scooter through deep water or clean with a high pressure hose.
26. Do not drive your Scooter through sea sand or sea water, this is very corrosive. Always wash salt splashing from the metal parts of your scooter with hot soapy water as soon as possible. This is also important during the winter months when roads and pavements have been treated with salt to prevent icing.

Please remember you are a motorized pedestrian and must observe all rules and regulations of other pedestrians wherever possible. Your scooter has not been designed for use on normal roads, except for crossing between pavements and where a pavement is not available.

Please have a safe journey





GETTING YOU KNOW YOUR SCOOTER

Your **Freerider** scooter is delivered in a strong tri-wall carton. When unpacking the carton, first remove all of the sharp metal staples which are located in the top. Carefully dispose of the staples to avoid injury. Remove all packing materials, avoid using sharp instruments as this may damage the scooter. Carefully remove the scooter from the carton; to minimize damage to the scooter and the operator, two people should be used for this operation.

Safely dispose of all packaging materials, your local waste disposal authority can advise you on this procedure.

Your **Freerider** Scooter is delivered fully assembled, fitting the two batteries and the seat assembly together with some minor adjustments are detailed on the following pages, under 'Operating your **Freerider** Scooter'. A full technical specification for your **Freerider** Scooter can be found at the rear of this manual.

A great deal of thought and consultation has gone into the design of your state-of-the-art, life-changing scooter. Your **Freerider** Scooter will help to increase your mobility and therefore give you more time and energy to enjoy life.

Six models of **Freerider** Scooter are described in this manual. **Freerider** models have same control functions but vary in wheel sizes, battery location and seats. Please refer to your appropriate model when reading the manual. A full technical specification for each model can be found at the rear of this manual. A great deal of thought has gone into the design of your **Freerider** Three wheeled vehicle which will allow you to negotiate obstacles found in confined shopping areas, four wheels will give you added stability on uneven surfaces. This is just one of the features you will find on your **Freerider** Scooter.

Others are:

COMFORT- The contoured seat helps cushion you from the vibrations of a journey, giving you maximum comfort. A fully proportional speed-controller with a speed restriction facility allows you a smooth jerk-free ride. Automatic braking gives you that added peace of mind.

VERSATILITY- The removable fold down seat, together with a facility to fully lower the steering handlebar, allows your . to be easily transported in an average saloon or hatchback car for those days when you travel further afield.

SERVICE- Your **Freerider** scooter has been designed to be service friendly. Sealed batteries which are virtually maintenance-free will give your **Freerider** the power it requires. Should you need to take your batteries on an aircraft, then you can peace of mind because the batteries are totally

Spill-free. (Please consult your carrier for details).

SAFETY- The advanced speed controller has been designed with extensive self-checking circuits to give you the maximum 'state-of-the-art' safety technology. Fully automatic braking give the driver confidence in any environment. The on/off key be removed for added security and safety, this disables the electronic drive circuitry, and your **Freerider** scooter cannot therefore be easily driven away by any other person.

CAUTION- Do not switch 'off' the on/off power key when you are moving; this will automatically apply the motor parking brake suddenly and could place you in a dangerous situation. Your scooter is fitted with anti-tipping wheels. **Do not remove these anti-tipping wheels**, they are an important part of the scooter design provided specifically for your safety. They help protect against backwards tipping on excessively sharp inclines.

CHARGING- Your scooter is fitted with a battery level indicator. Charging is straight forward. Your charge is fully automatic and will reduce to a top-up charge mode when the re-charge cycle is complete. (See Batteries and Battery Charging section of this manual).



OPERATING YOUR FREERIDER SCOOTER

Before setting out on your scooter you need to make sure that your seat is in the correct driving position. Your Freerider distributor will set the seat to the correct height for your individual needs (note: see warnings on page 9). The seat has four basic adjustments to assist your comfort.

1. **Seat Lock Lever** (Fig 1). This allows the seat to swivel through 360° NB: It can be re-located on the right side for your convenience. Pull up fully to release the seat allowing rotation. Release level to lock the seat into the desired position.



Warning: When driving, the seat should be locked in the straight ahead position.



Caution: The seat locking level must lock be lifted up fully when rotating the seat, failure to observe this may result in unnecessary wear of the seat post.

Removing seat from Scooter: The seat mounting post is designed with a special safety lifting point, this will prevent the seat from inadvertently dismounting itself in the case only be demounted by turning the 90° the forward driving position.



Warning: The seat base has a series of threaded holes for universal mounting, on no account must your scooter seat be relocated from the original factory setting. Failure to observe this warning will put you into an unstable and dangerous situation which could cause you harm.

2. **Armrest Width Adjustment:** On each side at the rear of the seat you will find a large black knob (Fig 2). By simply loosening this knob you are able to slide the armrests in or out to whatever width you desire. Re-tighten the knobs fully. You may need a friend to assist you with this initial setting up operation. This may extend the width of your Scooter.



Caution: The backrest of your seat will not fully fold forwards if armrests are positioned too closely towards one another.



Warning: Do not drive your scooter with the arms removed or in the raised position.

3. **Armrest Angle Adjustment** (Fig 3). The armrest angle can be adjusted individually to suit your needs. To make adjustments to the armrest angle you will need two 13mm spanners (not provided). Lift the arm upwards, you will note the adjusting bolt. First loosen the locking nut, rotate the bolt in or out until the required angle is found, lower the arm and check the angle for comfort; re-adjust as necessary. Finally tighten the locking nut.



Warning: When lowering the arm make certain clothing or fingers are not positioned under it.

4. **Seat Height Adjustment:** You may need to alter the seat height setting at a later date, please follow these instructions.

1. Remove your seat from the Scooter by lifting the seat

locking lever and lifting the seat clear of the vehicle (see Fig 4). Note your seat for safety reasons can only be removed when it is Turned 90°. Please take care when lifting heavy weights. Place your seat on a soft clean work area.



2. With the aid of a 17mm spanner (not supplied) loosen the 10mm seat clamp fixing bolt (see Fig 5).
3. Remove the 10mm fixing bolt and reposition the bolt into one of the four preferred location holes of the seat mounting tube (see Fig 6).
4. Re-tighten the 10mm fixing bolt. Refit the seat onto your Scooter.



Warning: Do not have the seat set too high, you must be able to place both feet firmly on the Scooter's floor area. Stability will be reduced the higher your seat is set on the mounting tube. Always take great care when cornering, lean into the corner to achieve the best stability from your Scooter.

5. **Seat Slide of the seat:** (see Fig 7) Located on the right front side of the seat. The lever allows you to adjust your seat forwards and backwards when sitting on the seat. Simply pull up the lever and move in the desired position backward by pushing or forward by hitching. As soon as the lever is released, the seat will lock into the new position.



Caution: The best the seat has fully locked by hitching backwards and forwards.



Warning: Do not carry out this operation when your scooter is moving, first stop apply the brakes and then carry out the seat position.

CAPTAIN SEAT

The seat as fitted to your **Freerider** Scooter, has a fold down backrest. The seat has four height positions similar to those found on the standard seat. Your **Freerider** distribution wick position the seat to allow you the most comfortable driving position.

6. **Backrest Angle Adjustment (option):** The angle of your backrest can be adjusted to a comfortable driving position by the operation of the lever situated on the left side of your seat. When sitting on your seat, lean backwards against the backrest and at the same time lift the operation lever upwards. Lean forwards or backwards once the locking mechanism has released, positioning the backrest in a comfortable driving position. Releasing the lever will lock the backrest in your chosen position.



Caution: Care should be taken during this operation as the backrest mechanism has a strong assisting spring to aid movement. Please Note: Damage can result the mechanism if the backrest is not supported during this operation.

7. **Backrest Height Adjustment:** The upper cushion of your backrest (See Fig 8) can be adjustment for height, giving you more back support if you are tall, by operating the small latch cushion up or push down for the most comfortable position. The headrest will also lift out for convenience.

HANDLEBAR ADJUSTMENT

The handlebar of your Scooter is designed to allow you to position it in a comfortable driving position. It can be locked into numerous positions or unlocked to move freely for transportation.

The handlebar lock is operated by a black lever positioned on the right hand side of the handlebar (see Fig 9, page 10). To release the handlebar from a locked position pull the black lever upwards, the handlebar will now move freely, but under mild tension.



To lock the handlebar into a comfortable driving position, simply push the black lever downwards until the handlebar is locked firmly into position.

With the combination of the height adjustment together with the handlebar movement, you should find a suitably comfortable driving position.



Warning: Always make certain the handlebar locking lever is fully down and the handlebar is securely clamped onto the chrome support plates before driving your Scooter. To make service adjustment of this part, refer to the Care and Maintenance section of this manual.

CONTROL FEATURES

Your controls are located on the handlebar console (see Fig 10) they are:

1. **Speed Adjustment Dial:** This allows you to pre-select your desired top speed. The dial is proportional to speed and can be set anywhere between minimum ('min') and maximum ('max') increments. Turn the dial knob anticlockwise to minimum for a very gentle operation, and clockwise towards maximum to increase your speed. NOTE: When attempting to climb obstacles, you will need to set the dial to a high setting. Remember the higher position you set your speed dial to, the faster your Scooter will travel.

2. **Horn Buttons:** (yellow). Sounds a polite warning signal.

3. **On-Off Power Switch:** Located at the right side of the control console. Insert the key and turn clockwise. You will note after a second the needle on the battery state indicator moves towards the green sector and the green status light illuminates. Your Scooter is now ready to drive. To switch off your machine turn the key anticlockwise. Remove the key when your vehicle is left unattended. Do not attach heavy additional keys to your key ring, the weight can damage the switch unit.



Caution: Do Not switch to 'off' when your Scooter is moving. Failure to observe this warning will result in the motor brake being applied suddenly and placing you in a dangerous situation.

You should only switch 'off' when in motion in the case of an emergency. Continual use in this mode may cause undue stress to the drive system and damage the main electronic speed control unit. Be extremely cautious on slopes. Sit upright in your seat or your machine could become less stable.

Sleep Time: When you rest your Scooter with the electronics switched 'on' you are using valuable battery power. Your Scooter will automatically go into a sleep mode to preserve battery energy after approximately 15 minutes, the battery indicator and green status light goes off. To start your Scooter again simply switch the key switch to 'off' and back to 'on' again, your Scooter is now ready to go.

4. **Status Light:** When you turn your Scooter on, the green light on your console will illuminate at a constant rate. The status light is connected to a very sophisticated



FIG 9

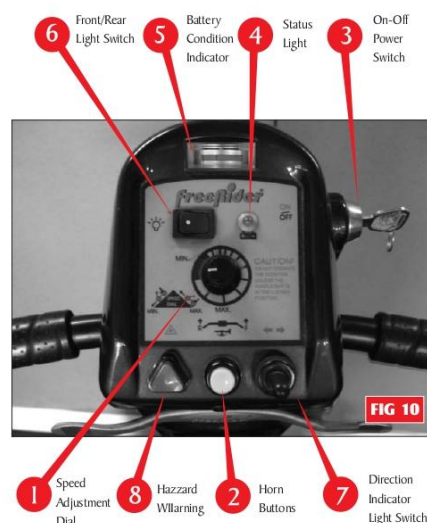


FIG 10

diagnostic system which can identify faults which could occur on the main speed control system or some other part of your Scooter's electronic drive system. For instance if your batteries run low in power, the status light will flash slowly at one flash a second; this indicates your batteries need recharging.

If you notice the status light flashing at two flashes per second, you are being notified that the battery voltage is too low and you must stop using your Scooter at the earliest opportunity.

Your status light has nine similar flashing diagnostic signals, reference to these diagnostic codes is found under 'Fault Finding' at the rear of this manual.

5. **Battery Condition Indicator:** Located at the top of your console. When your Scooter is switched on, the needles on the gauge will move across the scale from the left 'red' sector towards the 'green' sector, indicating the state of charge in your batteries. As the power is used up in your

batteries the needle will move towards the red sector indicating the state of charge at that precise time. When the needle is fully over to the right (green sector), the batteries are fully charged. When the needle falls towards the red sector your batteries are losing power, but you will still have power to spare. When the needle falls into the red sector your batteries are low in power and need to be re-charged, although you will still have approximately half-an-hours normal flat pavement driving in reserve. It is not recommended to use this power regularly as it will shorten battery life. It is wise to re-charge your batteries when the needle enters the red zone (see Batteries and Battery Charging section of this manual).
NOTE: When driving up a slope or similar obstacle your Freerider Scooter will be working hard, the battery gauge will move into the red sector, it will return towards the green sector once the load on your motor is reduced, this does not indicate low batteries.

6. Front/Rear Light Switch: This rocker tyre switch controls the function of the front and rear lights. Simply push down on the left side (white spot) (Fig 11) for 'on' and the right side for 'off'.

7. Direction Indicator Light Switch: Located at the bottom right of your console, the direction indicator lights for right and left manoeuvres are controlled by this switch. When making a turning manoeuvre on the road the appropriate switch dissection warning light (See Fig 10), will flash. To cancel the direction indicator return the switch to the centre position. The left direction indicators are activated by 'flicking' the switch to the left.



Caution: Please note the direction indicators are not self-canceling. **Warning:** Please be aware to test the function of your direction light before each journey. Failure to observe this warning could put you and other road users into a dangerous situation.

8. Hazard Warning: Positioned to the bottom left of your console, when pressed this red triangular button activates all of the amber flashing direction lights to warn other road users that you are stationary or in distress. This function should only be used in emergencies. You will note that both green direction lights at the top of your console are flashing to warn you the hazard system is in operation. To cancel the hazard warning simply press and release the red triangular button.

FORWARD, REVERSE CONTROL LEVER (Wig wag)

Located under the handlebar grips. Your speed for forwards and reverse motion and braking is controlled here. The right thumb lever moves your Scooter in a forwards direction (Fig 12) and also controls the rate of speed by the proportional amount of pressure applied.

The left thumb lever moves the Scooter in a reverse direction and controls the rate of speed by the pressure applied (Fig 13). The lever when released will return itself, and you will gently stop. You will note that you can obtain the reverse of this procedure by pulling the levers backwards with your thumb.

Warning: Do not hang bags etc over the steering handlebars which could interfere with the movement of your control lever. Failure to observe this warning could put you in a dangerous situation.



Note: Your approved **Freerider** distributor can modify your vehicle for left-hand forward operation use.

Warning: If you are not an accomplished outdoors powered vehicle driver, we strongly recommend that you first practice in an open, safe area, free from traffic, preferably with a **Freerider** Scooter who can assist you.



FREEWHEELING YOUR SCOOTER

If for the reasons of convenience, you require to push your scooter, the drive from the motor can be disconnected to allow the vehicle to roll freely.

Free wheel procedure: The free wheel device is a 'red' handled lever located at the rear right hand side of your machine under body cover (See Fig 14).

To free wheel your scooter push down the red lever; gently rock your machine to assist the drive to disengage. You can now push your scooter with ease.

To re-engage the drive simply pull up the red lever; again gently rocking your machine will allow full engagement of the drive system.

Caution Notes:

1. You must sit on your scooter with free wheel in the disengaged position. When the free device is disengaged, you have no braking function of your scooter. Do not park your scooter on a slope with free wheel device disengaged.
2. If the scooter is in the free wheel mode, when turn on your machine and depress your speed control, you will not be able to move under motor power. Dismount and re-engage the drive.
3. "Always" check that the free wheel device is in the drive position before attempting to drive your machine after it has been left unattended for a period of time. Failure to observe this warning may result in an accident.



General Note: If you are able to push your scooter the drive to the transmission brake is disconnected. Do not attempt to drive your scooter. Please check once more the above mentioned procedure for re-engaging the drive.

Warning: Yellow warning notice label situate on your rear cover located under your seat.



Please take extreme care

SAFETY INSTRUCTIONS & WARNINGS

GENERAL



Warning: Do not attempt to operate your new Scooter for the first time without completely reading and understanding all of the facts in this Users Instruction Manual.

Your Scooter is a state-of-the-art device designed to enhance and increase your mobility. **Freerider** provides a range of Scooters to best suit the individual needs and circumstance of the Scooter user.

Please be aware that the final selection and purchasing decision regarding the model of Scooter to be used is the responsibility of the Scooter user who is capable of making such a decision with assistance from his/her healthcare professional (i.e. medical doctor, physical therapist etc.)

The contents of this Users Instruction Manual are based on the expectation that the mobility device Expert has properly fitted the Scooter to the user and Has assisted the prescribing healthcare professional and/or

The authorized **Freerider** Distributor in the instruction process for the safe use of the scooter.

There are certain situations, including some medical conditions, where the Scooter user will need to practice operating the Scooter in the presence of a trained attendant. A trained attendant can be defined as a family member or care professional specially trained in assisting a Scooter user in various daily living activities.

When you begin to use your Scooter, you will probably encounter situations in which you will need some practice. Simply take your time and you will soon become confident and in control as you manoeuvre through doorways, on and off elevators, up and down ramps and over moderate terrain. Below are some tips, precautions and other safety measures that will help you to become accustomed to the safe operation of your Scooter.

Your Scooter is fitted with a number of "Safety & Warning Instruction labels"(see page 16).

These labels communicate important warnings or instructions - Please familiarize yourself with their location.

SAFETY CHECK

Get to know the feel of your Scooter and it's capabilities. **Freerider** recommends that you perform a safety check before each use to make certain your Scooter operates smoothly and safely. For details on how to perform these necessary inspections, see the Care and Maintenance section of this manual. Perform the following inspection prior to using your Scooter.

- Check tyre inflation, maintain at 30 p.s.i. (210 kpa)
- Check all battery connections, make certain they are serviceable and not corroded.
- Check front basket is fitted correctly.
- Check batteries have been fully charged.
- Check operation of brakes.

 **Warning:** It is critical that the pressure in the pneumatic tyres is maintained at 30 p.s.i. (210 kpa) at all times. Failure to observe this warning may result in a serious failure of the tyre or wheel, causing serious personal injury and/or damage to your Scooter.

 **Warning:** Do not carry passengers on your **Freerider** Scooter. Your Scooter is designed for a single occupant which complies with legal requirements for pavement vehicles. Carrying passengers on your Scooter may result in personal injury and/or property damage.

WEIGHT LIMIT

Your Scooter is designed for a maximum user weight limit of 136kg (300lbs).

 **Warning:** Exceeding the weight limit will void your warranty and may result in personal injury and damage to your scooter. **Freerider** will not be held responsible for injuries and/or property damage resulting from failure to observe these weight limitations. Please also remember when carrying heavy objects that this will increase your total weight and may make your Scooter unstable.

CORNERING

Excessively high cornering speeds can create the possibility of tipping. Factors which affect the possibility of tipping include, but are not limited to, cornering speed, steering angle (how sharply you are turning), uneven surfaces, inclined surfaces (such as heavily cambered pavements), riding from an area of low traction to an area of high traction (such as passing from grass areas to a paved area - especially at high speed while turning), and abrupt directional changes. Do not corner at high speed! If you feel that you may tip over in a corner, reduce your speed and steering angle to prevent your Scooter from tipping.

 **Warning:** When cornering sharply, reduce your speed. When using your **Freerider** Scooter at higher speeds, anticipate

Changes in the road surface. This will greatly reduce the possibility of a tip or fall. To avoid personal injury or property damage, always exercise common sense when cornering.

BRAKING

Your **Freerider** Scooter is equipped with one powerful brake system:
Electric/Mechanical Disc Park Brake: Located on the end of your drive motor it activates mechanically after the regenerative brake slows your Scooter to a near stop, or when power is removed from the drive system for any reason, as in the case of switching your machine off!
Brake engagement is far more abrupt at higher speeds. It is important that you anticipate when the brakes will engage and that you are braced for the resulting deceleration.

 **Warning:** Your Scooter can decelerate very quickly. Do not decelerate or turn abruptly when traveling at high speed unless absolutely necessary. If it is necessary to decelerate or turn abruptly when driving at high speed, brace yourself by gripping the steering handlebar tightly and positioning your feet firmly on the floorboard. Users who cannot grip the handlebar tightly and/or place their feet firmly against the footboard should avoid deceleration from or turning abruptly at high speed, and therefore should avoid travelling at high speed. Failure to observe this warning could result in serious personal injury and property damage. Always brace yourself firmly when decelerating your Scooter.

Never drive down slopes at full speed, always adjust your speed to the driving condition and allow for gradual descents on inclines.

OUTDOOR DRIVING SURFACES

Your Scooter is designed to provide optimum stability under normal driving conditions i.e. dry, level surfaces composed of concrete or asphalt. However **Freerider** recognizes that there will be times when you will encounter other surfaces such as packed soil, grass and gravel. These surfaces may not be sound and fail to give good traction, caution should be considered before driving on this type of surface to prevent stability problems resulting in injury or damage to your Scooter.

- Reduce your Scooters speed when driving on uneven terrain or soft surfaces.
- Avoid long and unsafe grass that can become tangles in the running gear or may hide debris and holes.
- Avoid snow, this can quickly build up around your wheels.
- Avoid loosely packed sand and gravel.
- If you feel unsure about a driving surface, please anticipate and avoid that surface.

STREET AND ROADWAY DRIVING

 **Warning:** Your Scooter has not been designed for operation on public streets and roads. It is designed for operation on pedestrian pavements and traffic free shopping areas. Your Scooter must be driven with due care and compliance with the Road Traffic Acts and conditions of the Highway

Code. Always obey all local pedestrian traffic rules. Wait until your path is clear of traffic, and then proceed with extreme caution. Note: Always wear light or illuminating clothing When driving your Scooter. Be aware that it may be difficult for traffic to see you when you are seated on your Scooter. Only drive your Scooter on the road when a public pavement is not available (i.e. in the countryside) or when crossing the roadway from one pavement to another.

INSURANCE

Although it is not a legal requirement for accident insurance cover (third party), it is a sensible precaution. Your **Freerider** Authorized Agent will be able to give you details of specialist insurance companies or you own insurance company will be able to advise you.

WEATHER PRECAUTIONS

 **Warning:** Freerider recommends that you do not operate your Scooter in icy or slippery conditions or on salted surfaces i.e. Roads and Pavements etc. Such use may result in accident, personal injury or adversely affect the performance and safety of your Scooter.

 **Warning:** Freerider recommends that you do not expose your Scooter to any tyre of heavy moisture at any time i.e. rain, snow or power washer. Such exposure can damage your Scooter. Never drive through deep water or expose your Scooter to sea water. Do not operate your Scooter if it has been exposed to heavy moisture until it has been thoroughly dried out.

FREEWHEEL YOUR SCOOTER

Your Scooter is equipped with a manual freewheel device for convenience when you need to push it. See the Freewheeling your Scooter section on page 12 of this manual.

 **Warning:** Do not use your Scooter in the freewheel mode without an attendant present. Personal injury may result.

 **Warning:** Do not attempt to personally disengage your Scooter in the freewheel mode while seated on it. Personal injury may result. Ask an attendant for assistance if necessary

 **Warning:** Do not place your Scooter in freewheel mode while on an incline. The Scooter could roll uncontrollably on its own, causing personal injury.

TYRE INFLATION

If your Scooter is equipped with pneumatic tyres, you should check their condition on a daily basis. Have the tyre pressure checked and if necessary inflated to 30 p.s.i. (210 kpa) at least once a week. Properly inflated tyres will help ensure a smooth, stable ride with minimum rolling resistance for your motor, it will also prolong the tyre's life and resistance to punctures..

 **Warning:** Always inflate your tyres from a regulated air

source. Over inflation from an unregulated air source could Over inflate your tyres resulting in "blow out" or personal injury. It is critically important that pneumatic tyres are inflated to 30 p.s.i. (210 kpa). Do not over inflate your tyres to the maximum inflation pressure of 50 p.s.i. (350 kpa) indicated on the tyre cover, failure to observe this warning could damage your Scooter wheels.

MOTOR VEHICLE TRANSPORTATION

Currently there are no standards approved for "tie down" systems in a moving vehicle of any tyre to transport a person while seated in a Scooter.

Although your Scooter may be equipped with a positioning belt *, this is not designed to provide proper restraint during motor vehicle movements.

Anyone travelling in a motor vehicle should be properly secured in the motor vehicle seat with a safety belt fastened securely.

Warning: Do not sit on your Scooter while it is in a moving vehicle. Personal injury may result. 

Warning: Always make certain that your **Freerider** Scooter is properly secured when being transported. Failure to comply may result in personal injury and/or damage to your Scooter. 

* POSITIONING SAFETY BELT (NOT SUPPLIED)

Your authorized **Freerider** Agent, therapist and other healthcare professionals are responsible for determining your requirement for a positioning belt in order to operate your Scooter safely.

Warning: If you require a positioning belt to safely operate your Scooter, make certain it is adjusted and fastened securely. Serious personal injury may result if you fall from your Scooter. 

ACCESSING YOUR SCOOTER

Getting on and off your Scooter requires a good sense of balance. Please observe the following tips when getting on or off your Scooter:

- Make certain your **Freerider** Scooter is switched off at the power switch, and the power key is removed.
- Ensure your **Freerider** is not in the freewheel mode (see page 12 Freewheeling your Scooter)
- Make certain the seat and handlebars are locked firmly into position.
- The seat armrests can be lifted up to make access easier. Make certain you do not attempt to drive with the armrests raised.

Warning: Position yourself as far back into the Scooter seat as possible to prevent tipping and causing injury. 

Warning: Avoid using the armrests for weight bearing purposes, such use may cause the Scooter to tip and cause personal injury and/or damage to the Scooter. 

 **Warning:** Avoid putting weight onto the steering handlebars, such use may cause the Scooter to tip and cause personal injury and/or damage to the Scooter.

 **Warning:** Avoid putting all of your weight onto the footboard, such use may cause the Scooter to tip and cause personal injury.

MODIFICATIONS

Freerider has designed your Scooter to provide maximum mobility. A range of accessories are available from Authorised Freerider Agents, to further customise your Scooter needs. However, under no circumstances should you modify, add, remove or disable any feature, part or function of your machine.

 **Warning:** Failure to observe this warning may result in personal injury and/or damage to your Scooter.

INCLINES

More and more modern buildings are designed with disability access in mind. Ramps have specified percentage of inclination, designed for easy and safe access. Some ramps may have turning switchbacks (180 degree turns) that require you to have good cornering skills on your Scooter.

- Proceed with extreme caution as you approach the downgrade of a ramp or other incline, sit right back in your seat, brace your arms on the handlebars and your feet on the floorboard
- Take a wide arc with your Freerider's front wheel around tight corners, your rear wheels will follow preventing you from cutting the corner short and bumping or getting hung up on raised kerbs.
- When descending an incline keep your speed adjustment set to the slowest speed setting to ensure a safely controlled descent and driving in a forward direction only. If your Scooter descent is quicker than you anticipated allow the Scooter to completely stop, then progress at a slower speed setting.

 **Warning:** Never drive down an incline at full speed.

- When climbing an incline, try to keep your Scooter moving, if you must stop, start up again slowly and then accelerate smoothly with caution. Avoid sudden stop starts, lean forward towards your handlebars to increase stability and prevent rearward tipping.

 **Warning:** When climbing an incline, do not zig-zag or drive at an angle up the face of the incline. Drive your Scooter smoothly up the incline without stopping, this greatly reduces the possibility of a tip or fall.

 **Warning:** You should not travel over a potentially hazardous incline i.e. areas covered with ice or snow, cut grass or wet leaves or any unstable surface.

 **Warning:** Do not overload your Scooter at the rear when climbing an incline. Always lean forward to Provide the best stability and prevent rearward tipping.

 **Warning:** Any attempt to climb or descend an incline steeper than shown in the Scooter Specification at the rear of this manual may put your Scooter in an unstable position and cause it to tip, resulting in personal injury. Never remove the anti-tip wheels of your Scooter, they are an important part of your Scooters design. See also Control on an Incline page 19.



STAIRS AND ESCALATORS

 **Warning:** Scooters are not designed to travel up or down stairs or escalators. Always use an elevator. Failure to observe this warning may result in injury to yourself and others and damage your Scooter.

PREVENTING UNINTENDED MOVEMENT

 **Warning:** If you anticipate being seated in a stationary position for an extended period of time turn off the power key switch, this will prevent unexpected motion due to inadvertent movement of the direction control (wig-wag) lever. Failure to observe this warning may result in personal injury.

DISPOSAL OF ELECTRO-MOBILE SCOOTER

In time when your Scooter becomes unusable it must be disposed of in accordance with the laws implemented at that time. For further information regarding the recycling arrangements for this type of vehicle and its batteries, contact your local authority or government department, details of this can be found in your telephone directory.

ALWAYS TAKE CARE AND BE SAFE

SAFETY WARNING & INSTRUCTION LABELS

The following labels are positioned on your Freerider, they communicate important warnings or instructions regarding the safe operation of your scooter. Please familiarize yourself with their location.



Control console label



Located on the top of the Scooter's rear cover (under seat)



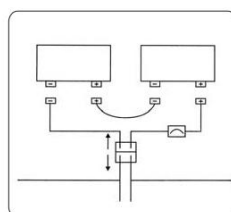
Data serial plate located on front wheel cross member



Located on right of handlebar cover



Located on front wheel cross member



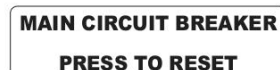
Wiring diagram for batteries located under rear cover



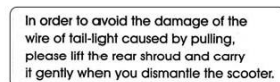
Located at the left or right hand rear cover of Scooter



Located at right rear of handlebars near charging socket



Located on the top left side of the rear cover (under seat).



Yellow label located on the top of the rear cover

LEARNING TO GET ABOUT

Warning: If you are not an accomplished outdoors mobility product driver, we strongly recommend that you first practice in an open area, free from traffic and preferably with an attendant who can assist you.

MOUNTING

For your first drive make certain that you and your new Scooter are on a level surface. Put the power on/off key into its slot, but leave it turned off. Stand behind the Scooter's seat, and reach down to the 'Seat Lock Lever'. It will be on the left side directly under the armrest.

Grasp the 'black' knob on the lever and pull up, releasing the Seat (Fig 15). It will now turn easily to meet you. If need be, you can lock the seat into position to make it steady before you sit down. You can also lift up the armrest to assist this procedure. Seat yourself and swing the seat to face the handlebars. Make sure you are straight, then release the spring assisted lever, making certain that it locks your seat

stop simply release the lever, the brakes will be automatically applied firmly in position. Next, turn the 'Speed Adjustment Dial' to minimum (min), and turn the 'on/off' key to 'on' (Fig 10, page 10). (The battery state indicator will move and the green status light will illuminate). Gently press the right thumb control lever (Fig 12, page 11) to start you in a forward direction. To stop simply release the lever, the brakes will be automatically applied.

Warning: Please take care not to have your thumb on the forward/reverse control lever when you switch 'on' your Scooter; this will result in your machine going into a fault mode. Switch 'off' then 'on' again to clear the fault.

Warning: If your Scooter has been adapted for left hand, forward operation then this procedure will be reversed: i.e. pressing with the left thumb for forward direction and the right thumb for reverse direction.

Warning: If your Scooter has been converted with a "Delta" tyre control system, please refer to the separate



instructions provided with this accessory (see also page 40 of this manual)

DISMOUNTING

Always switch off your Scooter before dismounting. Locate the seat lever and pull up (Fig 15). Now you can swing the seat away, lock it, and ease yourself onto your feet.

If you prefer you can swing the armrests back to allow you to pivot on your seat and then ease yourself onto your feet.



Caution: Do not use the handlebars as a crutch to lever yourself out of your seat. Failure to observe this warning may damage the handlebar mechanism and make the Scooter unstable.



PARKING IN PUBLIC

If you need to park and leave your Freerider Scooter, simply remove your key. This will keep the brake on and make your Scooter more difficult to move. It is best to leave it in sight of someone like a store assistant etc. who can watch it for you. Another precaution is to you're your serial number and the date of purchase.

Your serial number can be found on a plate attached to the front cross member located under the body cover.

BASIC DRIVING

Make certain you are comfortably seated on your Scooter and both armrests are down. Ensure that the 'Speed Adjustment Dial' (Fig 10, page 10) is turned to minimum for your first drive. When you have become more confident you can increase the setting to a higher speed. Push the right 'Thumb Lever Control' (Fig 12, page 11), as described earlier. You will very gently move forwards. Release the lever, and you will gently stop. Practice these two basic functions until you get used to them.

Steering the Scooter is easy and logical by turning the handle bars in the direction you wish to manoeuvre. Be sure to remember to give a wide clearance when turning so that the rear wheels follow the path of the front one, instead of cutting short.

Cutting short on pavement corners or 'cut outs' can mean

that a back wheel will go off the pavement, causing a stability problem. Avoid this at all times by steering an exaggerated wide arc around the obstacle.

If you must steer in a tight spot, such as entering a doorway or when turning around, stop, turn the handlebars to where you want to go, then apply the power gently. This will make the Scooter turn sharply. It will still go gently, and with complete stability. Practice in an open area, until you are proficient.

Reversing requires attention. Be sure your 'Speed Adjustment Dial' is turned to minimum before you reverse (Fig 10, page 10). Push the left thumb reverse control lever (Fig 13, page 11). Remember, when you reverse you have to steer in the opposite direction to the way you want to go. Practice is required here, again use that open space. Please note as a safety requirement reverse speed is half of forward speed.

Note: If your Scooter is set up for left forward driving the afore mentioned description is reversed.

REMEMBER: If it is a tight turn, turn your steering column before applying power. Steer wide of all corners and obstacles, please move slowly and with care.

Warning: Do not turn your 'on-off' power key switch to the 'off' position when your Scooter is in motion, failure to observe this warning may irreparably damage the main electronic speed control unit or drive transmission. Always first slow your Scooter down to a stationary position before you switch your Scooter off.



CONTROL THROUGH TIGHT SPOTS

When you start using your Scooter you will meet some obstacles that will require some practice to drive through smoothly.

Here are some common problems, with tips that will help you master them quickly. You will soon be in control through doors and up and down ramps with surprising ease by following these tips.

CONTROL THROUGH DOORS

Approach an unfamiliar door slowly, sizing it up. Does it have a knob or push bar? Does it open toward you or away? Think in terms of using the power of the Scooter to do the work for you! You need not strain.

Hold the doorknob or bar in one hand and apply power with the other hand. (Remember that you can drive forwards by using your left thumb to move the wig-wag lever towards you.) If the door is self closing, you can go through, allowing the door to close behind you, if you go quickly enough. If not, just stop when you're clear of the door and push it closed.

If the door opens toward you, hold the knob or bar with one hand and gently let the reverse power do the work. When

the door is open wide enough, go ahead quickly, leaving the hand on the door to keep it free of the Scooter and letting go as you pass the doorjamb. It is an easy technique. Practice makes perfect. Remember - your Scooter can do the work without wearing you out!

Going through doors, with the back wheels: If you're not moving, your rear wheel is probably caught. Reverse and try again. Take your time - relax - enjoy yourself.

CONTROL ON AN INCLINE

More and more buildings have ramps for wheelchair access. Some have a change of direction in the middle, and good cornering is required.

Make a wide manoeuvre with your front wheel around tight corners so that your back wheels follow a wide arc to stay clear of the corner.

If you stop while facing uphill, the automatic parking brake will hold you safe. To start again, slowly push the forward direction lever, the parking brake will release and you will start to move.

When you approach an incline, it is best to lean forward, (Fig 16.17). This moves the centre of gravity of your Scooter towards the front of the Scooter for improved stability.

When going down an incline, keep your speed slow. This will keep you in a safely controlled descent. It is best to lean backwards, this moves the centre of gravity of your Scooter towards the rear of the scooter for improved stability. If you wish to stop completely, release the control lever, and you will come to a gentle stop, avoid sudden stop starts.



Warning: Do not exceed the incline guidelines or any other specifications presented in this manual.

CONTROL OVER STATIONARY OBSTACLES

Stationary obstacles (steps, kerbs etc) must be avoided where possible. Your Scooter has small wheels and a ground clearance of 4.0cm. Proceed with extreme caution when driving near raised surfaces, unprotected ledges and/or drop-offs such as kerbs, porches, stairs etc.

Most new pavements have wheelchair access ramps at intersections, use these at all times. Plan your route where possible to avoid poor and uneven surfaces. Do not attempt to ride up or down kerbs as you may ground your Scooter and damage its construction.

CONTROL OVER GRASS & GRAVEL ETC.

Care must be taken when attempting to drive over soft surfaces such as those found in parks etc. The surface may look level, but this can be deceiving and hidden dangers may make your Scooter become unstable or grounded. Avoid unkept grass, loose deep gravel or sand, do not exceed the capabilities of your Scooter.

Always have an attendant to assist you in circumstances

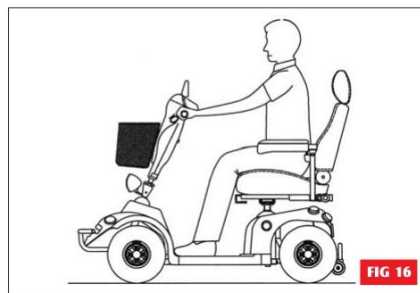


Fig16:Normal driving position

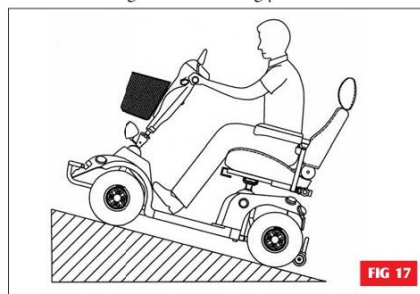


Fig17:Normal driving position

where you are not certain of the terrain. Always anticipate and think safety.

Caution: Because of the power of your Freerider Scooter, you will be able to climb inclines. But The maximum safe gradient limit is 10 degrees. The reason for this is to ensure good stability. Always have the anti-tipping wheels fitted to your machine (Fig 18) when climbing angles or obstacles. Always avoid turning on slopes or climbing kerbs.



Always make certain that your Scooter is in full working order before attempting to drive. Never attempt to drive beyond the design capability of your Freerider Scooter. Observe weather conditions. Tyres can slip on wet or icy surfaces.

DO NOT DRIVE THROUGH DEEP WATER OR LEAVE YOUR FREERIDER EXPOSED TO HEAVY RAIN.

i.e. During or after a thunderstorm.

Do not attempt to turn when negotiating an incline, only turn when all wheels are fully on or off the incline; failure to observe this warning could result in the machine becoming unstable and toppling over.

Always lean forward when ascending an incline and backwards when descending an incline. This will enable you to maintain good stability and will eliminate any chance of an upset.



PLEASE NOTE: The rear stability of your Scooter is dependent on a number of factors which you should consider before attempting to climb an incline or other obstacle: (a) your height; (b) the height of your seat; (c) your weight and (d) the angle of the incline you are attempting to climb. All of these factors can affect the rear stability of your **Freerider** Scooter. If you are unsure of your capability to climb an obstacle, then try another route - always think 'safety first'.

Please take care and be safe

✓ TRANSPORTING YOUR SCOOTER

Whether it is for a holiday, a day out to visit family or friends, or a trip to the shop, your scooter can be taken along too.

Depending on the size or model of your car you will be able to load your scooter in one of the following methods.

1. With the aid of a car hoist. Your dealer will be able to advise on suitable equipment.
2. With the aid of ramps. Ramps will aid you to drive your scooter straight into a people carrier or estate car, if the rear opening is low you may have to remove your scooter seat and lower handlebars. You will also require a suitable folding ramp to lift your scooter into your car. Your **Freerider** Distributor will be able advise you of suitable for this purpose (See Fig 19).
3. Small hatchback or estate or estate car (See Fig 20.21).
4. If your car is small or has a conventional boot, your scooter can be dismantled into six basic parts (See Fig 29).



LOADING YOUR SCOOTER

1. Remove your seat or fold down the backrest as necessary (Fig 22).
2. Lower the steering handlebars sufficiently to allow the handlebars clearance under the top of your tail gate entry, lock handlebars into position with black locking lever (See Fig 9 page 10).
3. Set your speed 'min-max' adjustment dial (See Fig 10 page 10).
4. Switch Scooter 'on' and gently operate the speed control lever, to make a slow and controlled ascent of ramp.
5. When you have safely loaded your scooter into your vehicle switch off the power switch. Load ramp into vehicle.

To unload your scooter from your car follow points to 5 in reverse order.



Warning:

- Always make certain that you are on level ground when loading and unloading your scooter from your carrying



vehicle. Always keep your body clear of your scooter to prevent entrapment.

- Always make certain your scooter tyres and your ramp surface is dry, failure of observe this warning could make your scooter unstable and put you in a dangerous situation.
- Always make certain your ramps are at a sufficiently low angle to maintain good stability and climbing adhesion. Failure to observe this warning could put you in a dangerous situation.
- Never ride on your scooter when loading it into a vehicle, warning could put you in dangerous situation.
- Always make certain that your scooter and any ancillary art is correctly strapped into your carrying vehicle to prevent forward or reward movement during normal driving or in the case of severe braking. Most of modern vehicles have 'loading eyes' situation in the carrying vehicles floor, use these with suitable straps to prevent your scooter moving.



Warning: Always make certain your scooter drive system is in the engaged position.

DISMANTLING YOUR SCOOTER FOR JOURNEYS AWAY

For convenience, you may want to dismantle your scooter to allow it to be transported in a smaller space. Your scooter can be dismantled into six individual parts (See Fig 29, Page 21). To enable scooter to be dismantled and transported follow these simple instructions. This procedure can be carried out without tools.

1. Drive your scooter close to the vehicle into which you are about to load it. You may need some assistance to life the components once your machine is dismantled.
2. Switch off your scooter. First remove the seat by releasing the 'black' locking lever. Rotate the 90° to the right or left (See Fig 1.4), lift the seat upwards slightly twisting. This will release it from its mounting tube.
3. Lift up the rear cover, disconnect the rear light plug and socket (See Fig 23), please safely to one side. Note the cover is secure by Velcro tyre material at each side at the front and in the centre. Unfasten the battery straps by parting Velcro fastening.
4. Battery Plugs: Disconnect the two shrouded battery plugs be gently pulling apart. These plugs are polarized and only be fitted together one way. Do not force together when reassembling.
5. Carefully lift up each battery with the handle provided. Use two hands for this operation, one to steady the battery .



Note: Make certain that the carry handles is fastened tightly prior to lifting the battery. Please the batteries on a firm and safe surface. Your batteries are sealed and cannot spill if tipped over. Always carry the batteries upright.

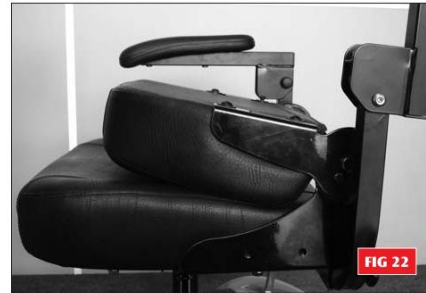
Warning: Do not place metal objects over open battery terminals. **BEWARE** of short circuits. Make certain the terminals are covered by the red and black plastic protectors at all times.

6. Lift the front wire basket from the mounting bracket on the handlebar cover, you will note this mounts on three clips (Fig 24).

7. Lower the handlebars by releasing the locking lever.

The handlebar will rest on the floor mat. Note place a soft piece of material under the painted console for protection.

8. Electric Plugs: disconnect the 12 pin and 3 pin 'white' connectors (Fig 25) by squeezing the small latch and carefully pulling apart. These connectors are polarized and



can only be reconnected together one way. Note the locating lugs on the connectors, do not force these connectors together when refitting.

9. A: De-Docking Lock Pin (FR510DX2/FR510DXs2):

The de-docking lock pin locates the rear motive powered unit to the front steering platform. The locking pin locates through holes in the front square chassis tube bracket and the rear chassis location tube. The locking pin is held for convenience at one end by a ring and chain. At the lower end of the locking pin is a spring loaded clip. When secured through the two chassis parts, the de-docking locking pin (Fig 26) is prevented from removal by the spring loaded clip.



Warning: It is good practice to visually check this locking pin weekly for correct location through the two chassis points. Visual access to the locking pin can be viewed under the rear body cover.



B: Locking Mechanism (FR168-4/4S/3/3S): The front of and rear chassis components are locked into position with a spring loaded pin (Fig 27). The spring loaded into a hole in the rear of the front chassis unit preventing the two chassis components from lifting apart driving.

To unlock the two chassis parts rotate the locking mechanism knob in an anti-clockwise direction indicated by the "loosen arrow". Turn the knob approximately four full turns until you can lift it upwards against the spring pressure. Carefully separate the two halves of your Scooter (Fig 28) by holding the 'C' shape handle on rear of the Scooter so that the rear chassis remains level. With your other hand, lift the seat post vertical until the front and rear sections have separated.

NOTE: This operation is made easier if you first lower and lock the tiller. You will find the front section is better balanced in this position.



10. You are now ready to separate the two halves of your Scooter.



Warning: Before you carry out this operation, have you remembered to unfasten all of the connectors and plugs? Failure to observe this could result in unnecessary damage.



Caution: Please keep the rear chassis level at all times during the de-docking operation, failure to observe this caution will result in the two sections jamming together.

The Scooter is now dismantled into its 6 basic parts (Fig 29).

- | | |
|-----------------|----------------------------|
| ① The Seat | ④ Rear Motive Powered Unit |
| ② The Batteries | ⑤ Steering Platform |
| ③ The Basket | ⑥ Rear Cover |

You can now load your Scooter into a suitable car.



Caution: Protect clothing when lifting Scooter parts, some components may have lubricating fluids on their surfaces.

Work out the best practice to stow each part of your machine, this will vary with different car designs. An old blanket can be used to stop the various parts rubbing against each other. It is good practice to stand the batteries upright and locate them so they do not fall over and touch the battery posts on any metal framework. Your Scooter will increase the



load in Your car, please remember this and adjust your driving to suit this condition.

Note: In some midsize cars the scooter seat may need to be stowed on the front seat of the vehicle. Use the cars safety belt to secure the seat in position.



Caution: The body mouldings on your Scooter have not been designed for lifting your machine. Use the firm metal lifting handles only.



Warning: Take care when lifting heavy parts. If in doubt always seek assistance when lifting parts in or out of your vehicle.

HOW TO RE-ASSEMBLE YOUR SCOOTER

Your Scooter is very easy to re-assemble once you reach your destination. To re-assemble, follow the preceding procedure in reverse order, noting the following:

1. When re-assembling the front and rear sections of your Scooter, make certain you are on firm, level ground. Place the front and rear units close together with the channel of the rear motive unit. With one hand support the rear motive unit at the seat post keeping it level. With your other hand lift the rear of the front steering section by the seat post and lower it into the 'U' shaped channel (See Fig 30), simultaneously locate the locking pins brackets together.

A: Fit the safety locking pin through the location holes, make certain that the spring loaded safety 'clip' is firmly located into the safety "locking pin"

B: 1. When re-assembling the front and rear section of your three wheels scooter, make certain you are on firm, level ground. Please the front and rear chassis units close together with the round tube of the front steering section facing the 'u' shaped channel of the rear motive unit.

2. Pivot the rear chassis unit background onto the anti-tipping wheels and pull down the central support leg, lower the rear chassis onto the support leg (3 wheels scooter).



Warning: Do not pivot the rear chassis this warning will damage the paint finish.

3. Lock the two chassis sections together by pushing forward on the seat mounting post, this allows the rear support leg to pivot upwards under spring pressure and the two chassis sections lock together. You will note the locking mechanism with an audible "click".

4. The front and rear chassis parts can now be fully locked together by rotating the locking mechanism in a clockwise direction indicated by the "tighten" (See Fig 31). Fully tighten the locking mechanism (approximately four full turns) until the locking pin is fully located. Pull backwards and forwards on the seat mounting post to determine that the two chassis parts are correctly located together, no movement in the two chassis parts should be found.



Warning: Failure to fully engaged the safety pin



mechanism correctly could result in an accident, please take particular care.

5. Connect the white six pin electrical plug together (See Fig 25 Page20). DO NOT FORCE TOGETHER, you may have connected it the wrong way round.
6. Replace the two batteries onto the chassis making certain they are correctly located onto the velcro fastener. Replace the two battery plugs into their connectors
7. When you have re-assembled your scooter and fitted the rear cover and seat, switch the power key to the 'on' position. The battery level gauge will move and the 'green' status light will illuminate. This will indicate that you have re-connected the battery connectors correctly. If the battery level indicator and status light do not illuminate then you have not connected the wiring connectors correctly (See Fig 23,25 Page 20).

Test the drive function of your machine. Does your scooter move forwards correctly? If your scooter does not drive, the freewheel lever may be in the 'disengaged' position, see section 'Freewheeling your scooter' Page in this manual.

Important Notice: Your scooter has been designed for pavement use only. IT IS NOT A DIRECT REPLACEMENT FOR A SEAT IN A MOVING VEHICLE.

Now enjoy your Freerider.

BATTERIES & BATTERY CHARGING

BATTERY INSTALLATION

Your Scooter is equipped with two maintenance free 12 volt batteries. The batteries are linked together by wiring cables to supply the electronic system with 24 volts of power.



Warning: It is imperative that the two batteries are connected correctly to prevent a short circuit between the two batteries.

When first installing the batteries follow these assembly instructions.

1. Connect the red wire of the battery cable to the positive (+) terminal of the battery, with the screw, nut and washer provided.
2. Connect the black wire of the battery cable to the negative (-) terminal of the battery, with the screw, nut and washer provided.
3. Repeat this procedure on the second battery making certain the plastic red/black terminal covers are secured over each terminal.
4. Secure the two batteries into position with the velcro ® hold down adhesive technique.
5. Connect the two black plugs of the batteries into the two black sockets of the wiring circuit.
6. Switch on your Scooter, the battery meter will now move to show the state of charge in the batteries and your Scooter is ready to drive.
7. Switch off your Scooter, fit the battery cover and seat.

BATTERY CONNECTIONS



Warning: Batteries are heavy, always handle with two hands. Do not allow metal tools to touch both battery terminals together, this will cause an electrical short and may damage the battery and injure you. Make certain the red and black battery wires are correctly attached to the '+' and '-' terminals as the diagram below. Failure to observe this warning may cause an explosion, short circuit, fire or injury to your person.

BATTERY CHARGING

Your Scooter has a lot of power for a small Scooter. Keeping it working to its maximum potential means that its two batteries must be maintained with full power. Nightly recharging, after use, will help you to give them a longer life and will ensure your Scooter is always ready to go when you are.

BATTERIES

Your Scooter is fitted with two sealed maintenance-free Batteries, especially designed for motive traction use. This means that you do not have to worry about topping up the cells.

Warning: Do not attempt to remove the safety valves situated in the top of the battery. Failure to observe this warning will invalidate your battery guarantee.



Your Scooter batteries are virtually Maintenance-free because the electrolyte is immobilized in a special form and therefore will not leak out, even if the battery is accidentally overturned. Because your Freerider batteries are sealed they are more likely to be accepted for carriage on aircraft. Please consult your carrier prior to departure, as they will need advance warning that you wish them to carry batteries. Please note: Each carrier reserves the right not to carry what may be termed 'HAZARDOUS CARGO'. Freerider cannot be held responsible for their final decision.



BATTERY CHARGER

The battery charger supplied, is special to your Scooter and it may not be suitable for any other powered mobility product. Only use the charger supplied with your Scooter; other makes of charger may permanently damage your batteries and would invalidate the Guarantee.

YOUR GUIDE TO SAFE AND LASTING BATTERIES

1. For longest life, your batteries should be re-charged after use. Preferably over night.
2. If your Scooter is not used for a period of time, a refreshing charge should be given every month. Never leave your batteries in a discharged condition. This is particularly important with sealed batteries as fitted to your Scooter. If your batteries discharge below a total terminal voltage of 12 volts (6 volts per battery), the charger supplied with your Scooter will not operate. Please consult your Freerider dealer.
3. If your Scooter has been stored away for some time, re-charge your batteries before re-using it.
4. Every six months, check the connections on the batteries, making sure they are tight and clean, make certain the red/black terminal covers are maintained.
5. Batteries carry a limited guarantee from the original manufacturer which is subject to a stringent wear and

tear clause. Any battery faults due to a defect in the original manufacture will normally become obvious within the first two months. Any gradual deterioration in performance after this period is normally associated with fair wear and tear, mis-use or accidental damage and, as such, is not covered by the manufacturer's warranty. (This does not affect your statutory rights).

Note: If one battery becomes faulty during the guarantee period only that battery from the pair will be replaced.

CHARGING YOUR BATTERIES AWAY FROM YOUR SCOOTER



For convenience your Scooter is supplied with an off board charging cable. In circumstances when your Scooter is stowed in your car etc., your two batteries can be recharged away from your Scooter with the aid of the 'off board' charging cable (PK90-0401). The cable links together your batteries and Charger. Simply connect the two black connectors on your batteries to the link cable and the 3-pin plug of your Charger to the 3-pin socket of the link cable. Connect your Charger to a convenient wall socket, switch on, your batteries are now being recharged away from your Scooter.

FREQUENTLY ASKED QUESTIONS

Why do my batteries require recharging?

Batteries are the fuel tank for your Scooter. They provide the vital energy to power your vehicle. When you ride your Scooter, the drive motor consumes the energy stored in the batteries. The battery's energy is gradually reduced over the period of driving time and will need to be replaced before you can use your Scooter again.

Similar to the situation with a motor car, in that you need to replenish the petrol as it is used up as energy, likewise with your Scooter, you need to replace the used battery energy by re-charging the discharged battery cells.

How does my Charger work?

Your battery Charger is an intelligent automatic charging Instrument. Your Charger's robust framework contains a number of quality components; namely a transformer, rectifier and complex control circuitry.

The Charger receives the 90/230 volts domestic electricity supply via a standard 3-pin wall plug and reduces this voltage down to 24volts via a transformer. At the same time it rectifies the A.C., alternating domestic current into D.C., direct current. This matches exactly, the voltage characteristics stored by your Scooter's batteries.

Your Charger automatically controls the re-charge cycle from the moment that you switch it on to the moment the green 'Charge Complete' light on the face of your Charger illuminates.

When your battery's voltage is very low, the Charger will work extremely hard to replenish the spent energy. This is called the 'Bulk Charging' stage. As the battery voltage approaches 90% of the full charge capacity, the Charger reduces its output for the final stage of the re-charge cycle. The time taken from switch-on to the end of the bulk charging will vary, depending on the amount that the batteries have been used, or in time their age. At this point a timer is automatically started, to regulate the final stage of the charging cycle, this set time ensures maximum capacity and battery life.

The length of time to re-charge your batteries will vary from 8 up to 12 hours. This variation in time is due to the following factors:

1. Depth of discharge - The amount of energy you have removed from your batteries when driving your Scooter.
2. Battery age - This is due to the changes in their internal electrical resistance. Note very old batteries may take longer to fully recharge.

Where can I re-charge my batteries?

In most safe domestic environments, i.e. your house, garage or shed. **Do not expose to rain or spray - for indoor use only.** Later on in this information, there is reference to the way temperature variations can affect the performance of your vehicle. When charging your batteries where reasonably practicable, ensure that the battery Charger is close to the vehicle being charged so that the temperature of the battery Charger and batteries are almost compatible.

For example, a vehicle may be outside whilst the battery

Charger is inside. It is possible in this situation that the battery Charger will sense the inside temperature, whereas the batteries on the vehicle will be at the outside temperature, resulting in an undercharged situation. This situation must be avoided.

How often must I re-charge my batteries?

Many factors come into play when deciding how often to

charge your batteries. You may use your vehicle all day on a Daily basis or you may not use it for weeks at a time. Other factors such as driver and baggage weight, smooth or rough terrain, flat areas or inclines and speed must all be considered.

With these variables you should concern yourself with two questions: HOW OFTEN should I charge and for HOW LONG? The Charger is designed so that it is impossible to overcharge your batteries. If you follow the guidelines below, your batteries will provide safe and reliable operation.

1. If you use your vehicle during the day. Put it on charge as soon as you have finished using it. The Charger is fully automatic so it will not overcharge your batteries. Your vehicle will be ready each morning to give you several hours use. It is recommended that you charge your batteries after daily use until the green 'Charge Complete' light illuminates.
2. If you use your vehicle infrequently (once a week or less) you should charge it at least once per week until the green 'Charge Complete' light illuminates. Remember: Keep your batteries fully charged and avoid deeply discharging them.
3. Storing batteries: Batteries should always be stored fully charged. Check once a month and recharge fully if needed. Sealed batteries can hold their charge for approx. 6 months. If they are left connected on the Scooter, remember key switches, meters and electronic circuits can drain the batteries rapidly. It is advisable to disconnect the batteries for prolonged storage. Store in a warm, dry room.

How can I ensure maximum battery life?

Simply put, a fully charged battery is a happy battery! A fully charged battery will provide reliable performance and extended battery life, so keep your batteries fully charged whenever possible.

Handling your batteries

Extra care must be taken when handling batteries, if you decide to dismantle your vehicle for transportation etc. Dropped batteries, even from a very small height, can lead to damage of the internal components, causing premature cell failure. Your batteries are sealed and do not require maintenance. Do not force open the valves in the battery top.



Disposal



Caution: Used batteries must not be disposed of by means of a domestic refuse disposal unit (dustbin) etc. Please contact your Dealer to dispose of used batteries. Please note, he may charge for this service.

BATTERY WARRANTIES

The batteries fitted to your vehicle are guaranteed against a manufacturing or material defect for 6 months. Any battery faults due to a defect in manufacture or materials will be obvious within a few weeks of use. Your batteries are not guaranteed to

perform to full capacity for 12 months. This will, of course be dependent on the actual use of the vehicle and how often the batteries are cycled i.e. discharged and charged.

Gradual deterioration in performance and reduction in range is normal and associated with fair wear-and-tear, misuse or accidental damage. Under these circumstances, the warranty will not apply. **It is a fact that some users due to their hectic lifestyle, weight or operating conditions, may wear their batteries out during the original battery manufacturer's guarantee period due to extensive use of their Scooter.** This is termed 'Cycle Life'. Batteries have a defined number of discharge cycles they can make i.e. the more times you use your Scooter the more cycles your battery will make - the shorter their life span.

If you take time to run-in your batteries properly, it will be worth it. Remember: how long your batteries will provide service is quite often a reflection of the care they receive. This is how to run-in your new batteries:

1. Fully recharge any new batteries prior to your initial use. This will bring your battery up to about 88% performance.
2. Ride your vehicle around the house or garden. Do not venture too far away until you become accustomed to the controls and feel of the vehicle. This will gently run-in your batteries.
3. Give your batteries another full charge and run the vehicle again. The batteries will now perform to over 90% of their full potential.
4. After ten to fifteen charging cycles, the batteries will top off at 100% charge and last for an extended period due to your patience and care in the first few days of operation.

How can I get the maximum operating time per charge?

Rarely do we have an ideal driving situation such as a smooth, flat, hard terrain with no wind or curves and warm temperatures. More often, we are presented with hills, uneven and loosely packed surfaces, curves, wind, cold and heavy loads. All of these factors will affect the distance or running time per battery charge.

Here are a few suggestions for obtaining the maximum range per charge:

1. Always charge your batteries fully prior to your trip. It is a good idea to keep your Charger connected when the 'Charge Complete' (green) light is illuminated in the 'Top-Up' maintains mode.
2. Maintain relevant tyre-pressures as stated in the Technical Specifications of this Users Instruction Manual.
3. Plan your trip in advance to avoid inclines, kerbs and soft surfaces.
4. Limit your baggage weight to essential items.
5. Try to maintain an even speed to avoid stop and start driving.
6. Ensure recommended routine servicing of the vehicle's components, i.e. motors, brakes, electrical connections etc., is carried out as instructed in this Users Instruction Manual.



Warning: When working or disposing of your batteries

1. Always make certain the terminals of your batteries are covered with the red/black terminal protectors. Do not allow metal objects to short out the terminals, your battery could explode causing you injury.
2. Do not allow your batteries to freeze. If frozen allow them to naturally thaw out before charging, failure to observe this warning may damage the batteries.
3. If you need to replace your batteries, contact your

Freerider Agent. Only batteries supplied as original equipment on your machine will give you the best performance. When charging batteries make certain the positive and negative terminals are correctly assembled. Failure to observe this warning may cause an explosion, short circuit or fire.

4. Always handle batteries carefully, they are heavy. Wear protective gloves and glasses when handling.
5. Dispose of worn out batteries carefully, contact your local waste disposal authority for advice.



CARE & MAINTENANCE

Your Scooter like any other electro-mechanical machine will benefit from regular servicing by your Freerider dealer.

You too, can help keep your Freerider in tip-top condition by following a simple guide to home maintenance.

Note: Only competent people should carry out service work.

SEAT UPHOLSTERY

A damp cloth and a little soapy water will keep your seat, backrest and arms looking smart. Do not use abrasive cleaners as this will damage the coating. Upholstery can be damaged by chemical cleaners. The coating material can also degrade over a period of time due to contamination by natural oils in the hair and skin.

Ultra-violet light can also reduce the life of the upholstery coating material. This is a normal ageing process and cannot be guaranteed (see exclusions in the Guarantee Terms).

BODYWORK

The painted bodywork on your Scooter can be lightly washed with clean soapy water. Do not use abrasive cleaners or strong detergents. This could fade the colour, an auto tyre shampoo works well. **Remove salt contact as this is very corrosive to bright metal parts.**



Caution: Do not hose down your Scooter with a powerful cleaner. Water could be forced into the electronics and cause permanent damage.

On the painted finish, be cautious not to wash with a dirty cloth as this could scratch the paint finish. Auto polish can be used to keep the paintwork and bright chrome parts in pristine condition.

The metal framework of your Scooter should be cleaned once a year and any paintwork damaged should be treated to prevent further attack from the elements.

Do not store your Scooter in damp conditions. This may affect the electronics if left for very long periods of time. Moisture, if left unattended can cause deterioration on metal

work, protect with proprietary cleaners.

ELECTRONICS

Servicing of the drive electronics and charger should only be carried out by your local Freerider service dealer. These units are sealed and should not be opened. **BROKEN SEALS WILL INVALIDATE YOUR GUARANTEE.**

Do not operate your Freerider Scooter in exceptional weather conditions i.e. very heavy rain. Cover your machine up, if it is to be left unattended and outside for a long period of time. Do not drive through deep water with your Scooter. This could damage the electronic speed controller. Sea and road salts are very corrosive and should be neutralized quickly.

MOTOR

The motor on your Freerider Scooter is fitted with long-life brushes. The brushes should be inspected for wear every 12 months or more frequently if you use your Scooter daily for long periods. The brushes should be changed when they have worn down to approximately 8mm in length. Access to these brushes can only be made by dismantling the motor body.

Caution: Only competent people should service the motor's components.



DRIVE TRANSMISSION LUBRICATION

This unit is factory filled and will not normally need additional lubrication.

Note: Your Freerider Scooter transmission is filled with a special lubricant. Do not attempt to force grease into the transmission as this will contaminate the original lubrication and will invalidate your guarantee.

Caution: Take care when lifting the transmission, keep well away from clothing. It is normal to find a light film of lubrication around this part.



MOTOR BRAKES

Safety Note: For your own safety, we recommend that you check the function of your Scooter brakes prior to a journey.

Motor Brake: If the motor brake is functioning correctly and the drive is engaged you will not be able to push your machine when it is switched off. Or switched on with the speed control lever in the 'zero speed', central position.

If your machine can be pushed as described above, the motor brake could be faulty, or the freewheel system has been disengaged. Please do not use, contact your local **Freerider** distributor.

Note: Check the Freewheeling Instructions on page 12 of this manual.



Driving Brake: Warning: When you drive your **Freerider** Scooter and you let go of the speed control lever your Scooter should reduce speed very quickly. If you notice a change in the normal slowing/braking condition, and your Scooter does not slow down quickly, please do not use your machine, contact your **Freerider** distributor.

HANDLE BAR BEARINGS

The bearings which control the movement of the steering handle bar may need to be adjusted if up and down movement is noticed in your steering handle bars, and those are accessed at the base of your handle bars.

The bearings are adjusted by first releasing the locking nut anti-clockwise one full turn with a suitable spanner (Fig35).

Turn the upper bearing adjustment nut clockwise, one flat at a time until all of the up and down movement in the handle bars is removed. Retighten the lock nut clockwise into position with a second spanner. Do not over tighten the bearing adjustment nut, as this will damage the bearing tracks.

The handle bar bearings are NOT 'Sealed for life' and may require lubrication with a general purpose bearing grease on an annual basis.

TYRES

Check the condition of your tyres regularly. Look for signs of wear, cuts and foreign objects lodged in the tread. Also, maintain the tyre pressures at all times; failure to comply with this can lead to poor performance of your machine and could make your machine unsafe and/or unstable.



Warning: Your **Freerider** is designed with 'split' wheel rims. Do not remove wheel bolts with the wheel inflated. Maintain pneumatic tyres at 30 p.s.i. (210 kpa). Failure to observe this warning may result in personal injury. Note low or unequal tyre pressures can make your Scooter become unstable and reduce battery / motor performance.

TYRE SERVICING REAR WHEEL

To remove a rear wheel from your **Freerider** Scooter for the

service of a tyre or tube carry out the following instructions (only competent people should carry out this procedure).

1. Switch off your Scooter and remove the key.
2. Using a suitable body stand, lift the side of the vehicle you wish to service off the ground. Place the stand under the metal chassis. Care must be taken when lifting heavy loads, you may need a friend to help you. Care should also be taken when working on a stand. Please be safe. Do not lift by the plastic bodywork.
3. With the aid of a 19mm spanner (not supplied) remove the centre hub nut and washer (see fig 33). Slide the wheel from the mounting axle. Rear wheels are fitted to the drive axle via a hub which locates onto a key.
4. These wheels fit tight onto the axle and may need some pressure from a bearing puller onto the wheel hub to release them from the axles. Look for spacing washers and take care not to mislay the drive key which fits between the wheel hub and the axle shaft.
5. First deflate the air from the wheel assembly by removing the valve core from the valve with a suitable valve key



(purchased from auto shops).

Warning: Please note the rims of your wheel are a split rim system, do not dismantle the wheel from the hub without first letting air out of the tyre.

With the aid of 13mm spanners (not supplied) remove the four nuts and washers from the rear of the wheel hub.

6. Remove the four wheel bolts and part the hub from the wheel rims. Part the inner and outer wheel rim from the side wall of the tyre.

To re-assemble the wheel and hub simply follow the above procedure in reverse order noting the following points:

1. Make certain you have tightened the two wheel rims to the centre hub.
2. Make certain your tyre is re-inflated to the recommended pressure 30 p.s.i. (210 kpa)
3. Make certain that you replace any spacing washers and keys in the order that they were removed.
4. Locking Nut: The special nylon 'locking' centre hub nut may lose its effectiveness when it has been removed over a number of times. If the plastic locking ring at the end of the nut becomes worn or damaged, then the nut should be replaced with a new part obtained from your **Freerider** Agent.





TYRE SERVICING FRONT WHEEL

The tyre should be exchanged when the tread has worn out. Remove the wheel from the fork with the aid of 19mm and 21mm spanners. The front wheel has two bearings which may have various spacing washers between the fork, please note the order of these washers.

Remove the tyre from the wheel by following point 6 above for Rear Wheels, using a 13mm spanner and hex key. For re-assembly, just reverse procedure making certain that all washers supplied are replaced correctly.

TYRE PRESSURES

The Scooter wheels are pneumatic and their pressure needs to be maintained at 30 p.s.i. (210 kpa)

 **Warning:** Pressures exceeding those recommended will result in an uncomfortable ride. Underinflation will result in poor battery and motor performance. Do not exceed the maximum pressures marked on the side wall of the tyre, this could damage the tyre or wheel rim.

 **Caution:** The fitting of solid inserts into the wheels to replace the pneumatic tube (puncture proofing) is not recommended as these products detract from the natural cushioned ride produced from 'air' filled tyres. If you require puncture proof tyres, your dealer can, at an extra cost, insert a liquid puncture proofing agent.

BATTERIES

Keep your batteries well charged (see Battery Charging section of this manual). Keep batteries clean and in a dry frost-proof place. Keep battery terminals tight. Your **Freerider** Agent will be able to test your batteries for their state of service.

Note: a charge may be made for this service.

IMPORTANT: It is not possible to predict the life expectancy of your batteries. This is mainly due to the different workloads a battery can be subjected to.

Some **Freerider** Scooter users will use their vehicle every day and for long periods of time. Their batteries will receive a near total discharge, and the life of the batteries will be short (less than 12 months in some cases).

Other Scooter users will use their machines less frequently, putting their batteries through a less demanding discharge lifestyle. These batteries will probably have a longer life in excess of 12 months. This can only be a general guide and one cannot be more specific, due to other factors such as: motor loads, tyre pressures, general service factors, working conditions, periods of non-use and abuse etc.



When you need to purchase batteries, always insist on the model fitted as standard equipment to your Scooter. Do not use less expensive car starter batteries. If in doubt, consult your local **Freerider** authorised agent.

Warning: Correct disposal of exhausted batteries is advised.



Please note: The charger supplied with your **Freerider** Scooter is specifically designed for sealed type batteries and may not work correctly with other battery designs. (See also Batteries and Battery Charging section of this manual).

LUBRICATION

The **Freerider** Scooter has been designed with low maintenance in mind. Wheel bearings and steering bearings are sealed for life. The following points will need checking/lubricating at the following service intervals:

RECOMMENDED SERVICE INTERVALS DAILY

Check the following:

- Operation of motor brakes
- Operation of driving brake
- Operation of seat lock
- Tyre condition
- Front basket and any carrying accessory is firmly attached
- Batteries are fully charged

Caution: Only drive your **Freerider** Scooter if it is in full working order.



WEEKLY Check the following and adjust as necessary:

- Check chassis locking mechanism (see Fig 27 page 21)
- Arm rest tightening knobs (see Fig 2 page 8)
- Tyre pressures 30 p.s.i. 210 (kpa)
- Battery fastening
- Allow battery charger to go through a full recharge cycle until the green light is illuminated (see page 23)
- Clean paintwork with auto shampoo. Do not use a high pressure hose. Wax painted and bright metal parts.

SIX MONTHS Check and adjust as necessary:

- Tyre wear, replace as necessary
- All fasteners and fittings for sound function
- Tension of handle bar lock and hinge bolt
- Battery connections
- Inspect all electrical plugs and sockets for damage and good contact and fit.

Lubricate the following:

- Wig-wag accelerator lever pivot point (see Fig 34)

- Spray metal parts with moisture repellent (Wd40)
- Seat lock lever pivot bolt
- Seat rotation, grease face of seat post and pivot pin at base of seat.
- Seat arm hinges
- Inspect, lubricate and adjust upper handle bar steering bearings

ANNUALLY Check the following and adjust as necessary:

- Motor carbon brush wear (minimum brush length 8mm)
- Front wheel bearings for wear
- Handle bar bearings
- Chassis for sound welds
- Rear Drive wheel hub keys
- All wheel bolts
- Drive axle securing bolts
- Motor mounting bolts
- Magnetic motor brake disc and function
- Main control box electrical connections
- Main wiring loom for damage
- All steering components
- Clean chassis and repaint any exposed parts
- Lubricate on/off power key barrel
- Replace any damaged axle seals
- Cycle test charger for full operation function
- Cycle test batteries for operating capacity (This test can be performed by your Freerider Agent)

Note: the items listed under weekly and six months should be incorporated into this annual inspection.

LUBRICATION

Use a general purpose light lubricating oil on moving parts. All wheel bearings are factory sealed and should not normally need lubricating. Handle bar bearings should be lubricated with a general purpose bearing grease. However, your drive axle is factory filled with a special lubricant and will not normally need replacing.



Caution: Do not mix other lubricants with this factory fitted drive axle lubricant. Failure to observe this caution will invalidate your guarantee.



Please note: These service intervals are a guide, more frequent use of your Scooter may require adjustment to these suggested intervals.

RECOMMENDED AREAS FOR ADJUSTMENT STEERING COLUMN ADJUSTMENT

The steering column locking system works on a 'cam' principle to lock the column in the desired driving position (see Fig 9 page 10).

If you notice the column is not firmly held when the black cam operating lever is fully down, follow this procedure to readjust the 'cam' tension:

1. Push steering column forward as far as it will go with the locking lever released, i.e. pushed upwards. Support steering column.
2. With a 10mm spanner (not supplied) loosen the locking nut positioned on the opposite side to the black locking lever (Fig 32).
3. Next to the locking nut is a chrome threaded 'clamping nut' this has a slightly tapered shape. Turn this clamping nut clockwise approximately a quarter of a turn.
4. Push the 'black' clamping lever down and test that the tiller is tightly held in place; adjust 'clamp nut' until correct tension is achieved on clamp plates.
5. Tighten locknut with 10mm spanner.



BASIC FAULT FINDING

If your Freerider Scooter will not start:

1. Check the power key switch is turned 'on'. If it is, the battery condition indicator meter will be operating. If the green status light on your console is flashing once per second, charge your batteries.

If the battery condition meter and the green status light fail to operate when the key switch is in the 'on' position, check the following:

1. Make sure the battery charger is not plugged into the tiller charge socket, this will prevent drive.
2. Check both battery connectors.
Check battery terminal condition.
3. Check the 'circuit breaker' (Fig 36): If your Scooter stops for no apparent reason, it is probably due to the circuit breaker disconnecting from the speed control electronic box.

On rare occasions, a temporary overload on the electric circuit can occur - for instance when climbing a steep incline. If this happens, the circuit breaker, which is located under your Freerider's rear cover and beneath your seat will trip and pop out. To reset the circuit breaker wait for two minutes to allow the temperature activated switch to cool down. Locate the plunger on the circuit breaker through the access hole (Fig 36). Place a finger onto the circuit breaker and press down on the plunger until it remains down. You are now ready to drive again.

If the circuit breaker trips up again wait for 5 minutes and try again.



Caution: If you find the circuit breaker is continually tripping out, contact your authorised Freerider dealer.

The battery condition indicator meter operates and the green status light flashes, your Freerider does not drive:

Check the 'white' plug's, located under the rear cover and positioned in the main controller module (see Fig 25 page 20). Check also the status fault codes (page 32) indicated by the green L.E.D. on your console flashing.

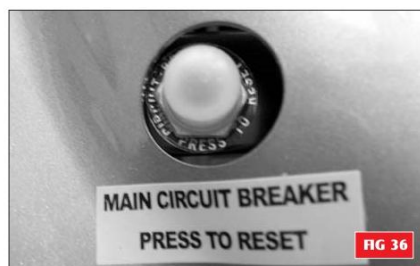
If your Freerider does not slow down or behaves erratically:

1. Turn off the power 'on' key switch.
2. Inform your authorised Freerider dealer.



Warning: If you find for any reason your Scooter does not reduce speed when you let go of the forward-reverse speed lever . Switch your Scooter 'off' with the on/off key.

The parking brake will activate immediately and stop your Scooter. Beware the scooter will stop very suddenly, brace yourself with the handlebars, sit back in your seat.



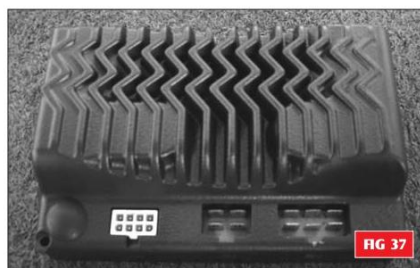
Warning: This operation should only be carried out in an emergency; continual use of this facility will damage the drive transmission and motor brake.

Inform your authorised Freerider dealer before using your machine again.

Warning: If you feel for any reason that your Scooter is not driving correctly or making an unusual noise, stop using the machine. Be safe, contact your Freerider dealer, he will be able to advise you.

IMPORTANT SPEED CONTROLLER INFORMATION GENERAL DESCRIPTION

The speed controller system incorporates a sophisticated micro-processor design (Fig 37). It is located under the rear cover of your Scooter. The in-built micro-controller continually monitors the Scooter's systems to ensure safe and reliable operation.



SAFETY CONDITIONS MONITORED INCLUDE

- Speed control system integrity
- Internal voltages and circuits
- Motor voltages and circuits
- Freewheel speed limiting downhill.
- Battery voltage

When the battery voltage is low, the 'status' indicator light situated on the control console (a green light positioned next to the battery state indicator meter (Fig 10 page 10) will flash

slowly as a warning to recharge your batteries. If the 'speed controller' detects a fault the green light will flash rapidly, with the number of flashes indicating the nature of the fault. For example, the controller will not operate if the speed thumb lever (wig-wag) is not in the zero speed position with the Scooter switched 'on'. Return the speed lever (Wig-Wag) to the zero speed position, when the scooter will be allowed to operate normally once again.

If your Scooter is turned 'on' but not operated for a set period of time (15 minutes approx) the speed controller system will automatically turn itself 'off' to conserve valuable battery energy. It can be turned on again by turning the on/off switch to 'off', and then to 'on' again.

FAULT DIAGNOSIS

Faults with the main speed controller are rare. Most faults on powered vehicles are associated with wiring or misconnections due to poor maintenance or incorrect installation of connectors when assembling the Scooter after transportation in a car.

If your Scooter should fail to operate you will be assisted in diagnosis and locating the area of the fault by observing the number of flashes emitted from the 'green' status light on your control console (fig 10 page 10).

If your Scooter fails to operate and the green status light is not illuminated, first check the points aforementioned under 'FAULT FINDING'.

If your green status indicator light is flashing, first switch your Scooter to 'off' and back to 'on' again to see if the problem will clear. If the 'status' light continues to flash and your Scooter will not drive, refer to the 'STATUS FAULTS CODE' on page and take the appropriate remedial action as advised in the 'comments' column. If in doubt consult the dealer from whom you purchased your Freerider Scooter.

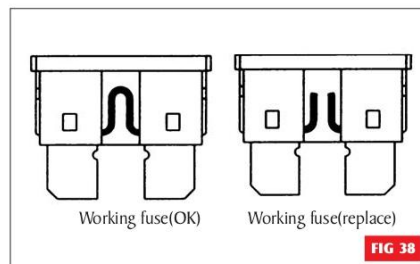
CHARGING CIRCUIT FUSE

One fuses protect your Scooter charging circuit from receiving an overload of electrical current. The fuse used in the Scooter is the same type which is found on automobiles. In the unlikely event that a fuse should 'blow' and needs replacing (Fig 38) use only a fuse of a 10amp rating. Please note this size of fuse has been selected to give your Scooter the best protection without premature blowing.



Warning: Do not use fuses with a higher rating than 10amps as this may cause permanent failure to the wiring and wiring connectors or personal injury.

The 10amp fuses are located under the Scooter's rear body cover (Fig 39). The fuse is positioned in a black plastic housing which is sealed by a hinged lid.



For access to a fuse remove the four screws located in the rear body cover, lift cover. Locate and lift the fuse block on it's wire, lift up the fuse lid and withdraw the 'read' fuse. Replace the blown fuse with recommended 10amp (pink) fuse, close fuse lid and replace fuse block.

Reposition rear body cover, refit four screws. **If the fuse continually fails, contact your Freerider supplier.**

STATUS FAULT CODES

FLASH CODE (No. of flashes)	FAULT DISPLAYED BY PROGRAMMER	FREERIDER SCOOTER CONDITION	COMMENT
1 Flash	Battery needs recharging	Driving still possible	The battery voltage has dropped below 23.3 volts in neutral. Recharge the batteries soon.
2 Flashes	Battery voltage too low	Drive inhibited	The battery voltage at Controller has dropped to 16.5 volts. Check the battery condition and the connections.
3 Flashes	Battery voltage too high	Drive inhibited	The battery voltage at the controller is greater the 32 volts. Check the battery condition and the connections. Suspect a charger malfunction.
4 Flashes	Current limit time out	Drive inhibited	The Controller has detected a shorted or overworked motor. Check the loom for shorts or check out the motor. Contact your Service Agent.
5 Flashes	Brake fault	Drive inhibited	Check the Freewheel Lever is fully engaged. Check the Park Brake and wiring for open or short circuits. Contact your Service Agent.
6 Flashes	Out of neutral when power switched on at key switch	Drive inhibited. Drive possible if neutral selected within 10 secs.	Return the speed lever to neutral. Re-adjust the speed lever neutral if necessary. Consult your Service Agent.
7 Flashes	Speed pot error (wig wag)	Drive inhibited	Check speed pot wiring for open or short circuits. Speed pot may not be correctly set up. Contact your Service Agent.
8 Flashes	Motor volts error	Drive inhibited	Motor or wiring is faulty. Contact your Service Agent.
9 Flashes	Other internal error	Drive inhibited	Contact your Service Agent.

SPEED CONTROLLER SETTINGS

The forward-reverse speed Controller (Fig 37 page 30) is a state-of-the-art microprocessor designed to give smooth and safe operation. For maximum performance, protection and convenience the Controller is housed in a solid die cast aluminium case situated under the rear body cover.

The speed Controller, 'Dynamic' model DS72KO1 (Rhino 70amp) is programmed by Freerider to obtain the maximum performance and safety for your Scooter.



Warning: Performance adjustments should not be made which could put the operator in a serious situation of control or braking. Performance adjustments should only be made by a person fully trained and conversant with the programming process and it's capabilities. Warning: Incorrect settings could cause injury to the Scooter operator and/or to bystanders, or damage to the vehicle and/or surrounding property. If in doubt consult your Freerider Manufacture

The original manufacturer's settings for this Scooter are:

	168-3	168-3S	168-4	168-4S	168-4S2b	510DX2	510DX2
SETUP MENU DESCRIPTION SETTINGS							
Acceleration	1	1	1	1	1	1	1
Deceleration	6	6	6	6	6	8	8
Forward Speed	10	10	10	10	10	8	10
Reverse Speed	4	4	5	4	4	4	5
Reduce Speed	4	4	4	4	4	4	4
Buzzer Volume	10	10	10	10	10	10	10
Motor Resistance	60	60	60	60	60	60	60
Sleep Time	15	15	15	15	15	15	15
Maximum Current	70	70	70	70	110	70	70
Park Brake Delay	6	6	6	6	6	6	6
OPTION MENU DESCRIPTION SETTINGS							
Single-Ended Pot	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Standard Speed Pot	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Motor Reverse	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Pot Reverse	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Brake Checking	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
Load Compensation	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
Enable Sleep	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
Check for Slope	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Current Limit Tim	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON

✓ TECHNICAL SPECIFICATION

Model Code:FR168-4



SPECIFICATION:

Overall length	120cm/47inches
Overall width	58cm/23inches
Ground clearance	6.5cm/2.5inches
Maximum load	136kgs/300lbs
Range up to	32km/20ml(26Amp batteries)
Total weight(excl.batteries)	53.5kgs/118 lbs
Heaviest port	21kgs/46 lbs
Wall to wall turning radius	104.5cm/42inches
Maximum Speed	8.8km/5.5mph(10 inches rear tires)
Battery	26Amp/36Amp/50Amp

Model Code:FR168-4S/FR168-4S2b



SPECIFICATION:

Overall length	120cm/47inches
Overall width	58cm/23inches
Ground clearance	6.5cm/2.5inches
Maximum load	136kgs/300lbs
Range up to	40km/25ml(36Amp batteries)
Total weight(excl.batteries)	53.5kgs/118 lbs
Heaviest port	21kgs/46 lbs
Wall to wall turning radius	104.5cm/42inches
Maximum Speed	9.6km/6mph(12 inches rear tires)
Battery	26Amp/50Amp

Model Code:FR168-3



SPECIFICATION:

Overall length	113cm/44.5inches
Overall width	61.5cm/24.2inches
Ground clearance	8cm/3.2inches
Maximum load	136kgs/300lbs
Range up to	32km/20ml(26Amp batteries)
Total weight(excl.batteries)	49.5kgs/109lbs
Heaviest port	21kgs/46lbs
Wall to wall turning radius	94cm/37inches
Maximum Speed	10km/6.25mph
Battery	26Amp/36Amp/50Amp

Model Code:FR168-3S



SPECIFICATION:

Overall length	113cm/44.5inches
Overall width	62cm/24.4inches
Ground clearance	8cm/3.2inches
Maximum load	136kgs/300lbs
Range up to	40km/25ml (36Amp batteries)
Total weight(excl.batteries)	50kgs/110lbs
Heaviest port	21kgs/46 lbs
Wall to wall turning radius	94cm/37inches
Maximum Speed	9.6km/6mph(12"rear tire)
Battery	26Amp/36Amp/50Amp

Model Code:FR510DX2/510DXs2



SPECIFICATION:

Overall length	138cm/54.7inches
Overall width	63cm/24.5inches
Ground clearance	8.5cm/3.4inches
Maximum load	136kgs/300lbs
Range up to	40km/25ml(36Amp batteries)
Total weight(excl.batteries)	68kgs/150 lbs
Heaviest part	23.5kgs/52 lbs
Wall to wall turning radius	116cm/45.5inches
Maximum Speed	10km/6.25mph
Battery	36Amp/50Amp

CLASSIFICATION Type 'B' indoor/with some outdoor capability (EN12184 : 1999) Class 2 (The use of invalid carriages on the highway regulations 1988)

Maximum safe climbing angle: 8° (136kg) rider



Warning: The safe climbing angle is measured with the seat in the highest position, and a rider weight of 300lbs (136kg). The motor on your scooter is powerful and may be able to climb a steeper incline than the maximum safe climbing angle.

Exceeding the safe climbing angle may put you at risk of injury. On no account must you attempt to climb an incline of more than 8°

Maximum speed: up to 4mph (6km/h) [+/- 10%] dependent on weight and manufacturing tolerances.

Range: Up to 10 miles (16km) between charges under ideal conditions. Note: Range varies with weight, terrain, temperature, battery condition etc. and is subject to manufacturing tolerances.

Recommended Tyre Pressure: Front solid, Rear 30psi (210 kpa). Do not exceed maximum inflation figure indicated on tyre wall.

Batteries: 2 x 12 volt. Maintenance free. 26AH sealed lead acid.

Charger: AC input. 230 volt. 50 Hz. 71w. 0.57A UK Plug 5 Amp f

use internal TIA. DC output 24 Volt. 2 Amp.
Conforms to: EN60335-2-29 and En12184.

Electrical System: 24 volt DC.

ADDITIONAL FEATURES

Drive system: Rear wheel, direct drive via sealed drive axle.

Motor: 24 volt DC. Permanent magnet, totally enclosed for outdoor use. Internal brushes. 3.0 Amp. (no load) 350W. 5100R.P.M.

Brake: Automatic dynamic regenerating braking system with spring activated magnetic solenoid parking brake. Free wheel facility.

Modular Design: Easily dismantled into six basic pieces for convenient transporting.

Adjustable Locking Tiller: for driving comfort.

Proportional Speed Control: State of the art design for safety and smooth operation; incorporating 'Fault' diagnosis.

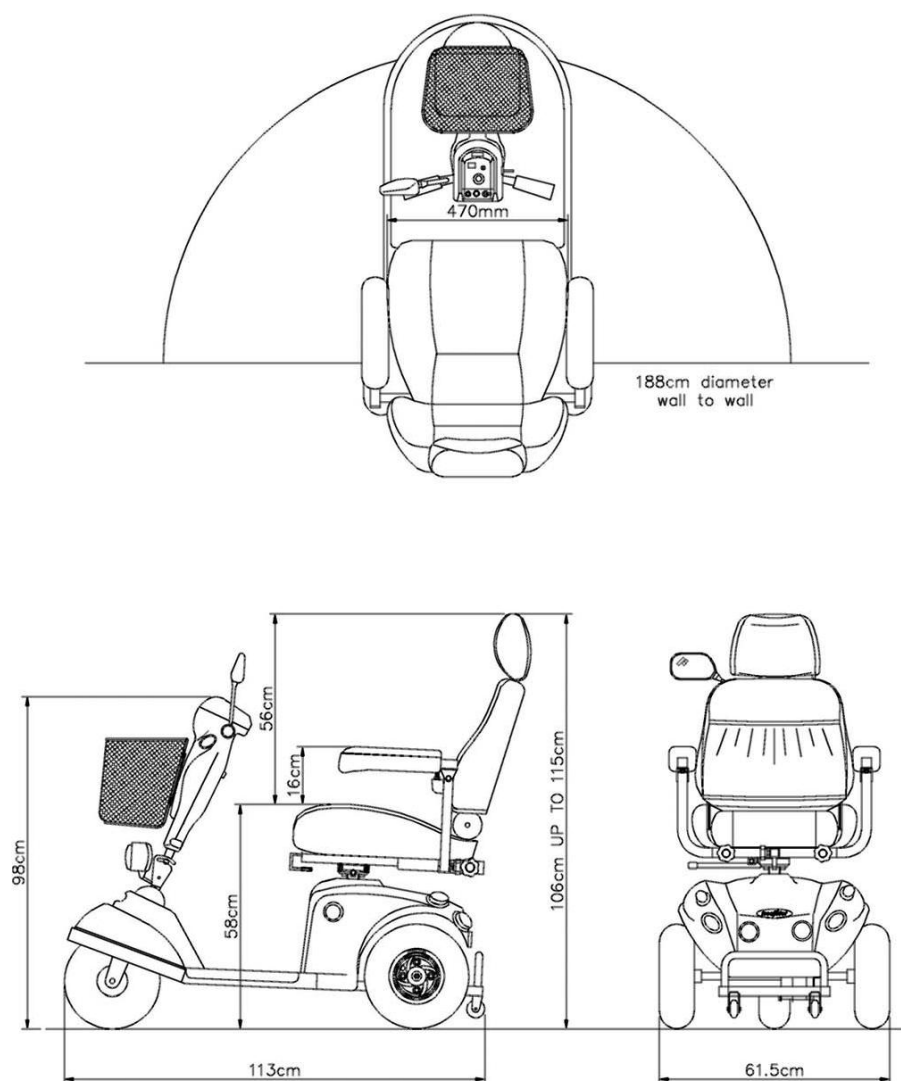
Contoured Seat: Adjustable for height, arm width and armrest angle. Swivels for easy access.

Automatic Charger: Charging point is on the rear cover.

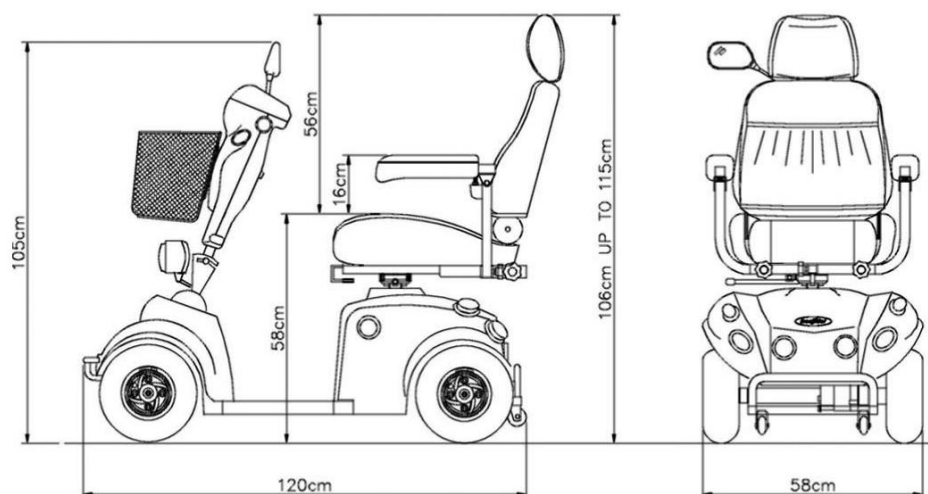
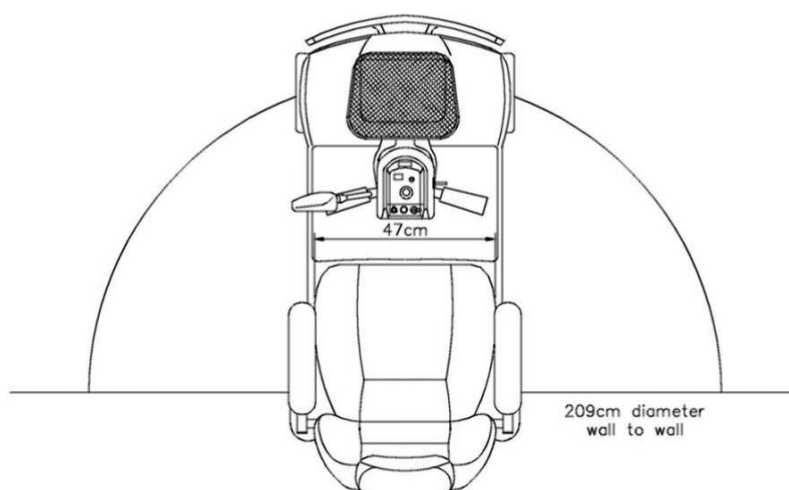


complies with E.M.C. Directive 89/336/EEC
complies with Medical Devices Directives 93/42/EEC

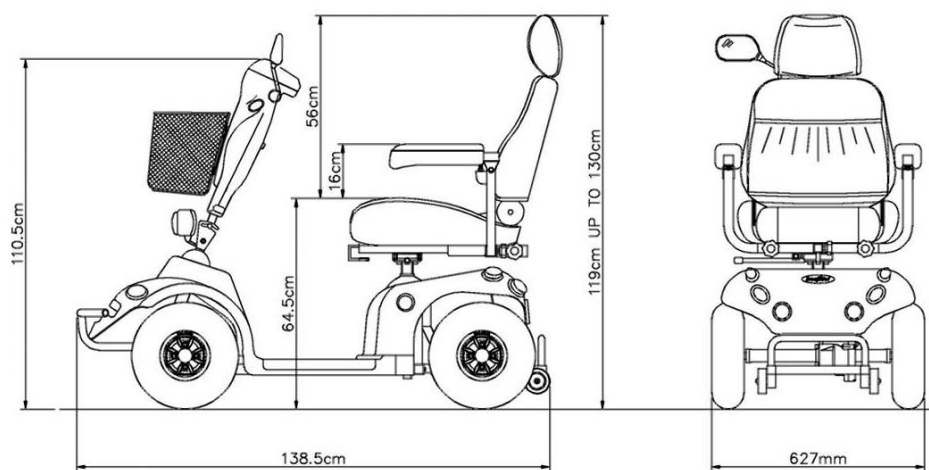
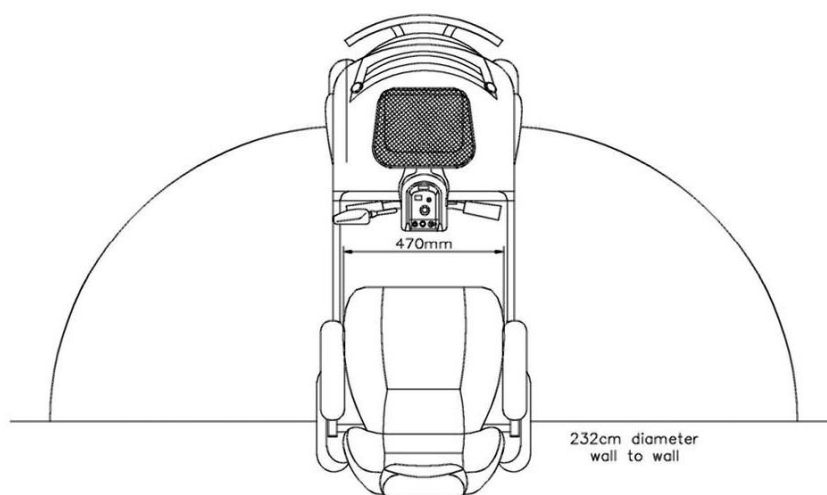
 SIZE SPECIFICATION-FR168-3/FR168-3S



 SIZE SPECIFICATION-FR168-4/FR168-4S

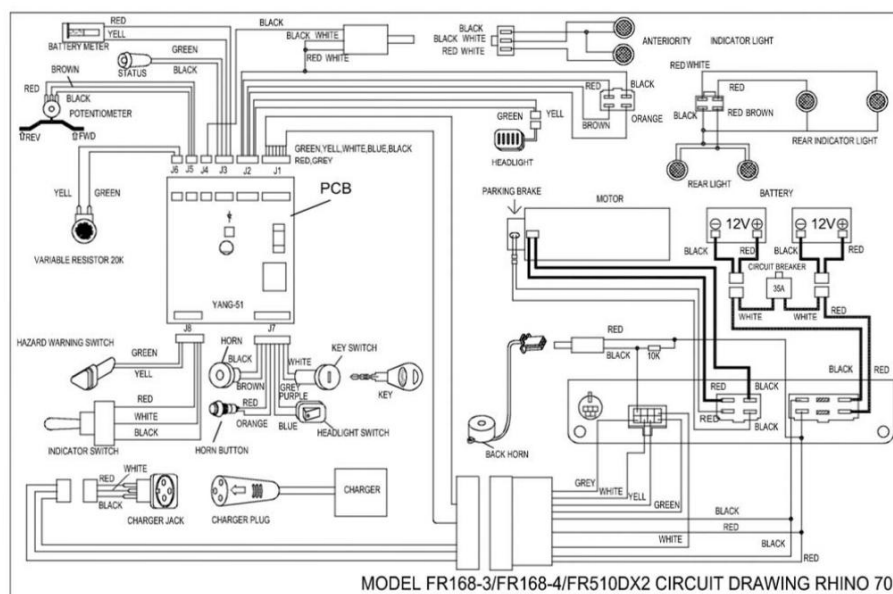


 SIZE SPECIFICATION-FR510DX2/FR510DXs2

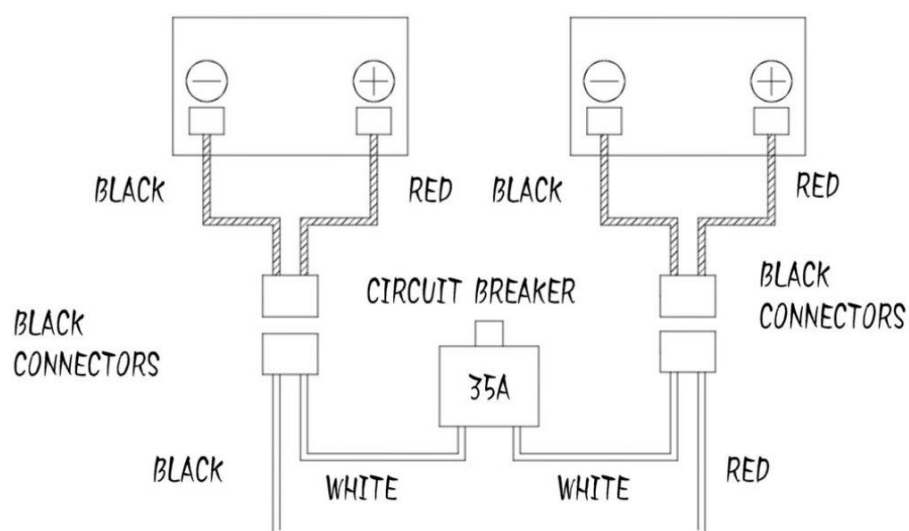


CIRCUIT DIAGRAMS

CIRCUIT DIAGRAMS



BATTERY WIRING DIAGRAM



ADVISORY SAFETY NOTICE



Warning: Radio wave sources may affect Scooter control. Your powered Scooter is designed to operate in appropriate environments, however radio wave sources such as radio or TV broadcasting stations, amateur (Ham) radio transmitters, two-way radios and cellular portable telephones can affect powered motorised Scooters.

The following warnings listed below should reduce the chance of unintended brake release or uncontrolled powered Scooter movement.

1. Do not turn on hand held personal communication devices such as citizen band (CB) radios and cellular phones, while your **Freerider** Scooter is turned on.
2. Be aware of nearby transmitters such as radio or TV stations, and try to avoid coming into close contact with them.
3. If unintended movement or brake release should occur, turn your **Freerider** OFF as quickly as it is safe to do so.
4. Be aware that adding accessories or components or modifying your **Freerider** Scooter may make it

more susceptible to interference from radio wave sources. Note: There is no easy way to evaluate their effect on the overall immunity of your powered Scooter.

5. Report all incidents of unintended movement or brake release to your **Freerider** supplier, noting if there is a radio wave source nearby. He will then be able to diagnose your Scooter to eliminate any possible Scooter component failure. Please note a charge may be made for this service. Your Scooter has been tested to the following standards with reference to EN12184. Emissions EN50022(B), Immunity IEC1000-4-3, E.S.D. IEC801-2

Note: All figures, speeds, measurements and capacities shown in this manual are approximate and do not constitute specifications. Our policy is one of continual improvement. We reserve the right to alter, without notice, any weights, measurements or other technical data shown in this manual. If you require specific accurate data, please contact your **Freerider** authorised dealer.

Enjoy your Scooter

FREERIDER SCOOTER SPARE PARTS

Your Scooter is an electro-mechanical machine. Some of its consumable components will need replacing due to normal wear and tear.

The following list of components can be purchased from your local **Freerider** Agent from whom you purchased your Scooter. Quoting model code

DESCRIPTION	PART number	DESCRIPTION	PART number
Handlebar Rubber Grip	PP02-0201	Charger Circuit Fuse (10amp)	PKE1-1002-1
Charger Socket Assembly	PAE1-0405	Battery Cable	PK90-0300-R
Front Basket	PM90-0100	Off Board accessory Charging Cable	PK90-0401
Anti-Tipping Wheel	PP07-0102	Power Key	PM90-0900
Drive Transaxle 168-4/168-4S	PM11-0206	Power Key Switch	PM01-0100
Drive Transaxle 168-3/168-3S, 510DX2/510DXS	PM11-0207	Horn Button	PKE1-0103
Motor	PM11-0316-SY51	Horn	PKE1-0603
Motor Brake	PM11-0101	Battery Meter	PKE1-0700
Motor Carbon Brush	PM11-0403-50	Top Control Board (P.C.B.)	PAE1-0300-B1
Motor Carbon Brush Cap	PP11-0201	Controller	PKE2-0100
Front Wheel Bearing (6202ZZ)	PM00-0303	Potentiometer 5k Assembly	PAE1-0201
Self Lock Nut Front/Rear Wheel M12	PU00-1202	Potentiometer Spring	PM02-0200
Arm Rest Pad	PP14-0101	Variable Resistor 20k (min-max speed)	PAE1-0100
Arm Tighten Knob	PP00-0200	Black Knob (min-max speed)	PP01-0500
		Circuit Breaker (35amp)	PKE2-0403

OPTAINAL ACCESSORIES

For information regarding these optional accessories please contact your Authorised Freerider Agent.

REAR BASKET

Provides easily accessible additional carrying capacity for shopping. Basket maximum load 4kg (9lbs)



LOCKABLE STORAGE BOX

This smart storage box allows you to lock away your valuable items when leaving your Scooter unsupervised. Maximum load 2kg (4.5lbs).



STICK/UMBRELLA HOLDER

Ideal way to carry walking aids.



DELTA CONTROLLER

For Scooter users with limited hand dexterity. Allows the user to control the Scooter by pulling the lever toward themselves.

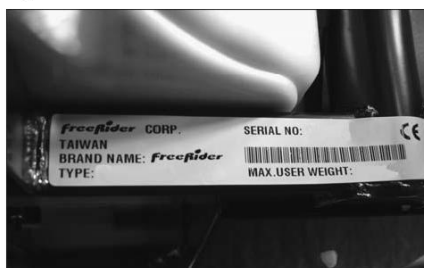
Warning: The rear basket and crutch/cane holder will extend the dimensions of your Scooter. Please allow for this when turning. Do not overload carrying accessories as this will make your Scooter less stable.

Please note : Accessories illustrated are displayed on various models of Freerider Scooters.

GUARANTEE TERMS

GUARANTEE TERMS

Please keep a note of your serial No.
(This is located on a plate on the front frame tube, under the front body cover).



Your Scooter is guaranteed for 12 months from the date of purchase against faults arising due to defects in manufacture or materials. This guarantee does not detract from, but is in addition to your legal rights. Parts replaced or repaired under the terms of this guarantee will be covered for the balance of the 12 months period. This guarantee applies only to parts supplied or approved by Freerider®.

Due to the individual prescription nature of this product. This guarantee is not transferable.

Note: Extended guarantee insurance can be arranged by your Freerider Distributor, he will be able to advise the extra cost of this cover.

WARRANTY REGISTRATION

To enable Freerider to handle any enquiries regarding the guarantee of your Scooter; please complete and return the pre-paid warranty registration card supplied with your Scooter at your earliest convenience. If you prefer use our website at www.freerider.com.tw

Exclusions: This guarantee does not extend to consumable items which may need replacing due to normal wear and tear, namely tyres, tubes, punctures, lubrication, carpets, oil seals, gaskets, screws, brake shoes, mirrors, bulbs, upholstery, motor brushes, fuses, batteries, handgrips etc. or to damage to the product caused by mis-use, neglect or accident for which Freerider or its agent cannot be held responsible.

This guarantee does not apply if your Freerider shows signs of excessive wear and abuse, or has been modified without the authority of Freerider.

This guarantee does not cover the following items:

1. Any noise or vibration, which does not effect the quality and function of the machine.
2. Damage due to lack of maintenance or improper use or operation or storage.
3. Fees for the regular service inspection and maintenance.
4. Any fees incurred as a result of warranty repair, losses or compensation because of the inability to use the Scooter (telephone use, shipping, car rental, travel fees etc.)

METAL WORK: Metal components, such as the framework and bright metal parts require special attention and may deteriorate in certain conditions. Moisture and salt may corrode parts left unattended, proprietary auto cleaner polishes should be used to prevent long term damage. Failure to clean and protect these components may void your warranty.

PAINT WORK: This guarantee does not cover deterioration of paintwork resulting from the lapse of time i.e. natural fading. It is the users responsibility to clean and protect the painted surfaces.

SPEED CONTROLLER: Servicing of the speed controller or battery charger must only be carried out by your local authorised Freerider distributor. Any attempt to open or dismantle these items render the guarantee void on that item.

BATTERIES: Batteries carry a limited 12 month guarantee from the original manufacturer which is subject to a stringent wear and tear clause. Any battery faults due to a defect in the original manufacture will normally become obvious within the first two months of use. (See batteries and battery charging section of this manual). Any gradual deterioration in the performance after this period is normal and associated with fair wear and tear, mis-use or accidental damage and as such is not covered by the manufacturers warranty. (Batteries are guaranteed as single parts, only the failed part is replaceable).

Warning: Do not attempt to open the battery vent plugs.



SERVICE CHECKS

In line with all mobility vehicles, your Freerider will benefit from regular service inspections to keep it in pristine condition. The frequency of these service inspections will depend on the amount of use your vehicle is put to. We strongly recommend you contact your local Freerider distributor to arrange for a service visit. (See Care & Maintenance Section of this manual).

Your Freerider product must be fully serviced at least every 12 months or more frequently if conditions and use require it.

Please contact your authorised Freerider distributor who will be able to advise you of his current costs affecting service visits. Please note: Non-warranty service costs are chargeable.

The warranty on your Freerider may not apply if routine maintenance is not carried out as defined in the 'Care and Maintenance' section in this manual.

WARRANTY SERVICE VISIT: If your Scooter should need attention due to failure as defined under the guarantee terms, please contact the distributor from whom you purchased your machine. The Scooter shown and described in this manual may not be exactly identical in every detail as your own Freerider. However, all instructions are still entirely relevant, irrespective of detail differences. If you are not sure of any details, please consult your Freerider Authorised Distributor before driving your Scooter.

DISCLAIMER

Freerider® disclaims all responsibility for any personal injury or property damage which may occur as a result of improper or unsafe use of its products. Mechanical or electrical defects will be dealt with on a contingency liability basis. The part or parts will be replaced or repaired but no responsibility for damage or injury can be implied to Freerider®.

Guidelines in this manual are intended to assist you in the safe operation of your Freerider powered Scooter. If you should have any questions about the correct operation of your Scooter, please contact your authorised Freerider dealer. Consult your doctor and therapist if you are in doubt about your ability to operate your Freerider Scooter.

It is the responsibility of the user to carry out daily inspections and regularly maintain and keep records of inspection and maintenance covered in this manual. The user is also responsible for the proper use of the Scooter as detailed in this manual.

ประวัติผู้จัดทำปริญญานิพนธ์

ประวัติผู้แต่ง



ปริญญานิพนธ์เรื่อง : ชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

หลักสูตรสาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา : วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะ : วิศวกรรมศาสตร์

ชื่อ : นายพีรตน์ บัวโท

ประวัติ

เกิดเมื่อวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ. 2543 ที่อยู่ เลขที่ 132 ถนนชุมชน ตำบลห้วยยอด อำเภอห้วยยอด จังหวัดตรัง 92130 จบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง จากวิทยาลัยการอาชีพห้วยยอด จังหวัดตรัง เบอร์โทรศัพท์ 095-0719591

ประวัติผู้แต่ง



ปริญญานิพนธ์เรื่อง : ชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

หลักสูตรสาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา : วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะ : วิศวกรรมศาสตร์

ชื่อ : นางสาวโชติรัตน์ จันทภาโส

ประวัติ

เกิดเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2542 ที่อยู่ เลขที่ 329 หมู่ที่ 11 ตำบลคูหาใต้ อำเภอรัตนภูมิ จังหวัดสงขลา 90180 จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย จังหวัดสงขลา เบอร์โทรศัพท์ 084-8629930