



EE03-แบบรายงานความก้าวหน้า

นักศึกษา ☒ ปกติ ☐ สมทบ

รายงานความก้าวหน้าโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า
หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา

รหัสโครงการ : 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 ได้ตรวจโครงการแล้ว เห็นควร ☐ อนุมัติให้สอบได้ ☐ ปรับปรุงเนื้อหาหรือรูปแบบใหม่ ลงชื่อ (.....)	ความเห็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ได้ตรวจโครงการแล้ว เห็นควร ☒ อนุมัติให้สอบได้ ☐ ปรับปรุงเนื้อหาหรือรูปแบบใหม่ ลงชื่อ (ผศ.ชาญณรงค์ พงศ์รักธรรม)
---	--

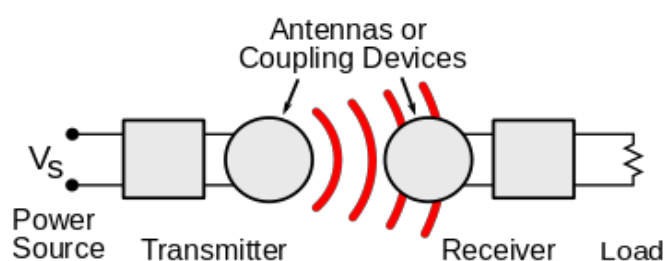
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาหัวข้อโครงการ

ทุกวันนี้เราอยู่อาศัยในเมืองที่อัดแน่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าปีละ 300 ล้านตันจาก การใช้ยานพาหนะบนท้องถนน เมื่อผนวกพร้อมกับคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมหาศาลจาก ภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือนด้วยแล้ว จึงส่งผลให้อุณหภูมิของโลกผันแปรและเกิดปัญหามลภาวะ ทาง อากาศชั้นรุนแรง ทั่วโลก เริ่มต้นตัวและออกมาตราการรวมถึงความร่วมมือต่าง ๆ อย่างจริงจังใน การช่วยลดปัญหาข้างต้น เรียกได้ว่าเป็นการจับมือพร้อมใจก้าวไปในทิศทางเดียวกัน ในการรักษาโลก ให้หายป่วย เปลี่ยนบรรยากาศของโลกใบนี้ให้บริสุทธิ์ ซึ่งทางเลือกหนึ่งในการช่วยลดปัญหา คือ ช่วยกันรณรงค์การใช้ยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งใช้เป็น “พลังงานสะอาด” จึงเป็นที่กล่าวถึงกันมากทั่วโลกใน ฐานะทางเลือกในการขจัดปัญหาดังกล่าว 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 ยานยนต์ไฟฟ้าวรรณถึงเทคโนโลยีการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless Power Transfer : WPT) [2]



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 เพื่อสร้างชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า จำนวน 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 ออกแบบชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า จำนวน 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 ชัยบดินทร์ อัครเวฬุกุล และ สายชล หน่อชาย. (2557). **การส่งพลังงานไฟฟ้าโดยหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก**. ได้ศึกษาการส่งพลังงานไฟฟ้าโดยหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำพื้นฐานของวงจรเรโซแนนซ์ (Resonance) แบบขนาน มีจุดประสงค์หลักเพื่อส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านอากาศไปยังหลอดไฟแอลอีดีขนาด 3 โวลต์ ให้ส่องสว่าง ซึ่งการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านอากาศถือเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังถูกนำมาใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน เช่น การชาร์จแบตเตอรี่โทรศัพท์หรือแปรงสีฟันไฟฟ้า โดยไม่จำเป็นต้องต่อสายไฟโดยตรง เพื่อความสะดวกและปลอดภัยจากการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลตามสายไฟ โดยวงจรต้นแบบที่พัฒนาจะเปลี่ยนรูปแบบของพลังงาน จากพลังงานไฟฟ้าที่ภาคส่งเป็นพลังงานแม่เหล็กด้วยวงจรกำเนิดความถี่ 50 กิโลเฮิร์ต ที่ต่อกับวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานและส่งไปยังภาครับซึ่งเป็นวงจรเรกติไฟเออร์แบบขั้วบนันได ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กกลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งเพื่อจ่ายให้กระแสไฟฟ้ากับหลอดไฟแอลอีดีขนาด 3 โวลต์

จากผลการทดลองที่ได้จะพบว่า เมื่ออุปกรณ์ภาคส่งและอุปกรณ์ภาครับออกห่างจากกันจะเกิดการสูญเสียพลังงาน โดยจะเห็นได้จากการลดลงของแรงดันและกระแสที่คร่อมหลอด เมื่อทำการเพิ่มระยะห่าง หลอดแอลอีดีจะส่องสว่างลดลง ซึ่งระยะที่หลอดแอลอีดียังคงส่องสว่างได้ดีอยู่ที่ระยะ 5 เซนติเมตร และเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นหลอดแอลอีดีจะส่องสว่างลดลงจนกระทั่งไม่มีกระแสไฟที่จะทำให้หลอดแอลอีดีส่องสว่าง [5]

2.1.2 ธนพล ตรีธรรมานุรักษ์, จิรณัฐ ทัดจำปา, ศุภวิชญ์หลักบุญ, สรอรจ เทียมศรีทัศนาก, 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 ซึ่งความถี่ที่ให้ประสิทธิภาพได้ดีที่สุดคือความถี่เรโซแนนซ์ (49.2kHz) [6]

2.1.3 ชาญณรงค์ 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 [7]

2.1.4 บุญทัน สนั่นน้ำหนัก, อติสร นวลอ่อน, สรายุตร์ 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 วิจารณ์พงศ์. (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 [4]

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 [9]

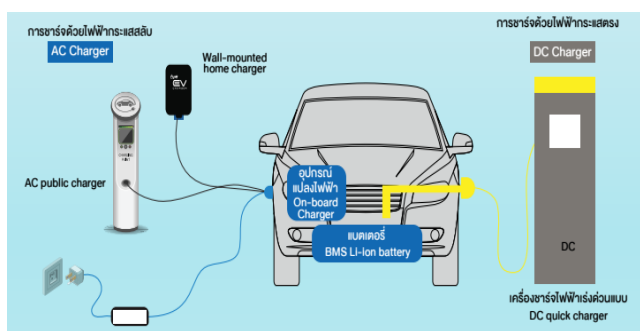
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

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 [9]

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) [9]

2.2.1.1 การอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวนำ (Conductive Charging) หรือการอัดประจุไฟฟ้าแบบใช้สายไฟฟ้า (Wire Charging) หรือการชาร์จผ่านตัวรับ-ตัวเสียบทั่วไป เป็นวิธีใช้ทั่วไป สะดวกลงทุนต่ำและมีประสิทธิภาพที่สุดเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่น ซึ่งการอัดประจุไฟฟ้าแบบใช้สายไฟฟ้ามักมีความไม่ปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน เมื่อฉนวนของสายไฟฟ้า เสื่อมสภาพหรือถูกของมีคมบาดอาจเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลและเป็นอันตรายได้ อีกทั้งการอัดประจุไฟฟ้า ต้องใช้เวลานานและต้องจอดอยู่กับที่ตลอดการอัดประจุไฟฟ้า โดยสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทตามประเภทกระแสไฟฟ้า ได้แก่ การชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Charger) และการชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (DC Charger) [10]

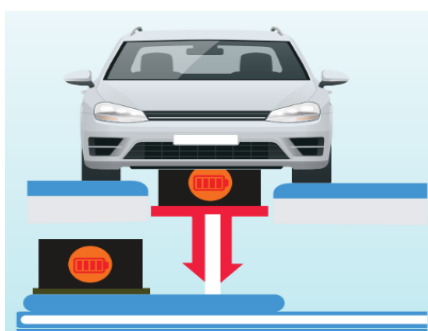


ภาพที่ 2-1 การอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวนำ (Conductive Charging)

ตารางที่ 2-1 เปรียบเทียบการชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ

ชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ แบ่งเป็น 2 ระดับ	ชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรง
● แบบ 1 เฟส 230 โวลต์ จะทำให้กำลังไฟฟ้าประมาณ 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 ทางหลวง หรือสถานีบริการน้ำมัน

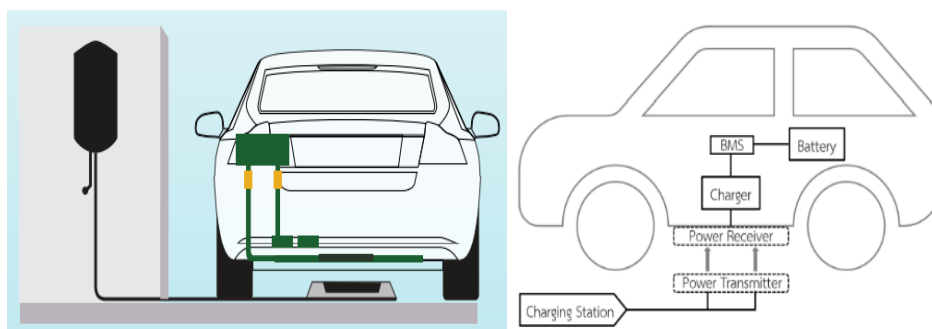
2.2.1.2 การอัดประจุไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Battery Swapping) เป็นวิธีการชาร์จพลังงานที่เร็วที่สุด เหมาะกับการเดินทางไกล แต่ต้องลงทุนสูงมาก และ อาศัยการบริหารจัดการที่ค่อนข้างซับซ้อน และ รถยนต์ที่สามารถเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้นั้น ต้องมีดีไซน์ที่เฉพาะ ทั้งนี้ Tesla ได้หยุดการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ เนื่องจากไม่ได้รับความนิยมและเห็นว่ามี Supercharger ก็เพียงพอแล้ว [10]



ภาพที่ 2-2 การอัดประจุไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Battery Swapping)

2.2.1.3 การอัดประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Inductive Charging) หรือการอัดประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless Charging หรือ Wireless Power Transfer) แบตเตอรี่ภายในรถสามารถชาร์จไฟได้ โดยไม่ต้องใช้สายชาร์จ อาศัยหลักการเหนี่ยวนำของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างจุดชาร์จกับจุดรับบนตัวรถ ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกสบายและมีค่าบำรุง รัักษาน้อย การอัดประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย

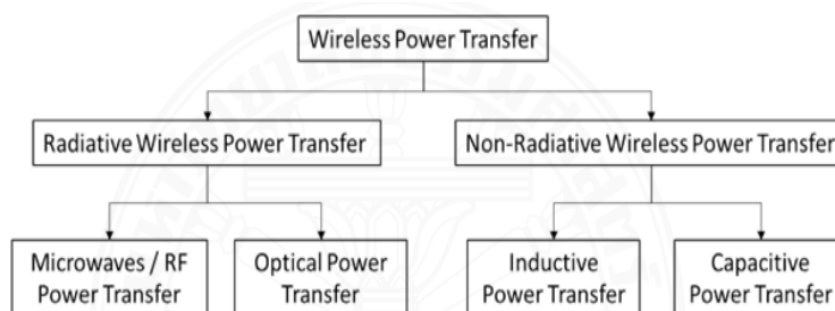
สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ 1) การอัดประจุไฟฟ้าไร้สายแบบอยู่กับที่ เป็นวิธีการอัดประจุไฟฟ้าในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้าจอดอยู่กับที่ตลอดการอัดประจุไฟฟ้า ซึ่งข้อด้อยที่สำคัญของการอัดประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย คือ มีประสิทธิภาพต่ำซึ่งทำให้เวลาที่ใช้ในการอัดประจุไฟฟ้ายังคงมีมากกว่าหรือเท่ากับการอัดประจุไฟฟ้าแบบใช้สายไฟฟ้า 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 2-4 บล็อกจำแนกวิธีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

2.2.2.1 การส่งพลังงานแบบแผ่รังสี (Radiative WPT) เป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) ผ่านทางสายอากาศ (Antenna) ส่งต่อไปยังตัวกลาง เช่น อากาศ หรือ สุญญากาศ โดยที่ปลายทางอีกด้านจะมีสายอากาศรับและแปลงกลับไปเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกต่อหนึ่ง ลักษณะเด่นของการส่งแบบไร้สายชนิดนี้คือ สามารถส่งพลังงานได้ระยะไกล และมีความหนาแน่นกำลังงานสูง จึงนิยมใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีอวกาศและกองทัพโดยเฉพาะ แต่เนื่องจากลักษณะการส่งพลังงานดังกล่าวมีการแผ่รังสีที่มีความหนาแน่นกำลังงานสูง จึงไม่นิยมใช้ในชุมชน [11]

2.2.2.2 การส่งพลังงานแบบไม่แผ่รังสี (Non-Radiative WPT) เป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าในลักษณะการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ๆ ซึ่งระยะส่งพลังงานดังกล่าวจะสั้นกว่าการส่งพลังงานแบบแผ่รังสี โดยที่เทคโนโลยีการส่งพลังงานแบบไม่แผ่รังสีนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ดังต่อไปนี้ [11]

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

2.2.3 การส่งพลังงานไร้สายแบบสนามแม่เหล็ก (Inductive Power Transfer: IPT)

การส่งพลังงานแบบ IPT สามารถจำแนกออกเป็น 2 ชนิด คือ

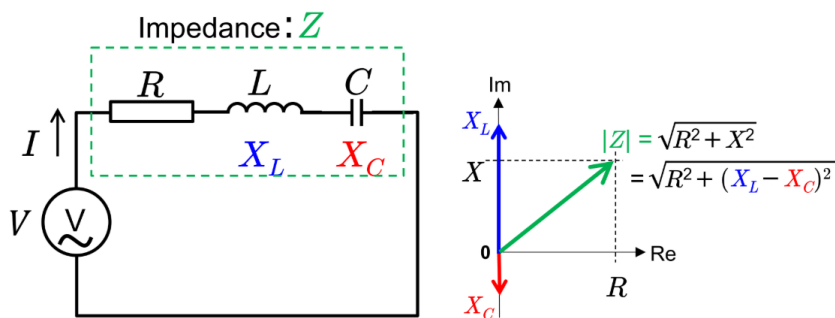
2.2.3.1 การส่งพลังงานแบบ IPT ชนิดไม่อาศัยการกำธร (Non-Resonant IPT: NR-IPT) การส่งพลังงานแบบ NR-IPT เป็นการส่งพลังงานไร้สายเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กขั้นพื้นฐานที่สุด อาศัยหลักการคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) ต่างเพียงแค่มิมีแกนแม่เหล็กห่อหุ้ม ขดลวดส่ง ซึ่งลักษณะเช่นนี้ทำให้ค่าการเหนี่ยวนำต่ำและสูญเสีย ระบบส่งพลังงานแบบ NR-IPT มีโครงสร้างการทำงานเรียบง่าย จะใช้งานเมื่อมีแรงดันตกคร่อมไม่สูงมาก และการส่งกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลด (R_o) ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [11]

2.2.3.2 การส่งพลังงานแบบ IPT ชนิดอาศัยการกำธร (Resonant IPT: R-IPT) เป็นการส่งพลังงานไร้สายเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กที่อาศัยหลักการกำธร (Resonance) ในระบบเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบได้ดีขึ้น โดยเฉพาะด้านกำลังและพลังงานในการรับส่ง ซึ่งทำได้โดยเพิ่มขดลวด (Inductors) และตัวเก็บประจุ (Capacitors) เข้าไปในชุดวงจร แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แบบอนุกรม (Series Resonant) และแบบขนาน (Parallel Resonant) เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจรเรโซแนนซ์ ผลที่จะเกิดขึ้นอยู่เกี่ยวกับลักษณะการต่อของวงจรเรโซแนนซ์ว่าเป็นแบบอนุกรมหรือขนานแต่ผลที่เหมือนกัน คือ เมื่อความถี่สูงค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า (X_L) จะมากและค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (X_C) จะต่ำ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะมีค่าที่สวนทางกัน ดังนั้น หากมีค่าความถี่ที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน จะทำให้ค่ารีแอคแตนซ์ หักล้างกันหมดจึงเหลือเฉพาะค่าความต้านทาน [9,11]

2.2.4 วงจรเรโซแนนซ์

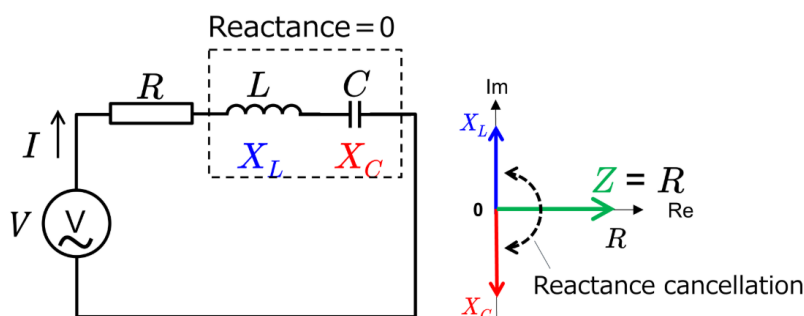
หมายถึงวงจรไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบของวง R, L, C เพื่อทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่เฉพาะ มักจะมีคุณสมบัติพิเศษที่มีประโยชน์ในการทำงานหลายอย่าง วงจรเรโซแนนซ์มี 2 ประเภท คือ

2.2.4.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม



ภาพที่ 2-4 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

เงื่อนไขของการเรโซแนนซ์คือ เมื่อรีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและความจุเท่ากัน ดังนี้



ภาพที่ 2-5 เงื่อนไขของการเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

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

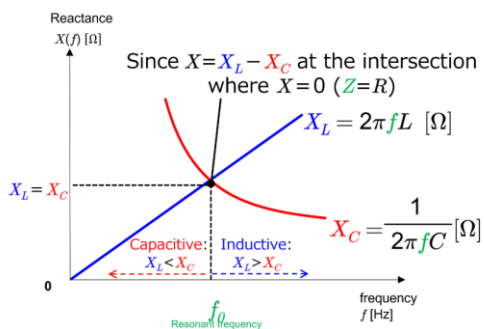
$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2-1)$$

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

สรุปได้ว่า ในสถานะเรโซแนนซ์ของวงจร RLC แบบอนุกรม อิมพีแดนซ์ (Z) จะเป็นดังนี้ :

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

$$Z = R$$

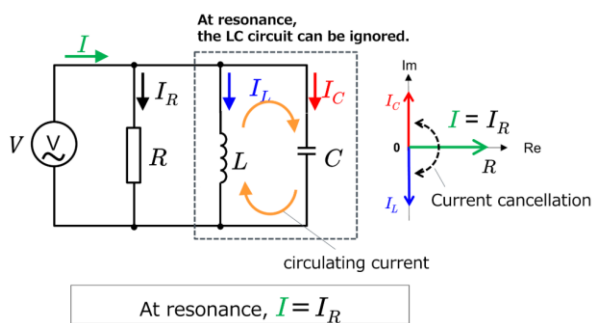


ภาพที่ 2-6 สถานะเรโซแนนซ์ของวงจร RLC แบบอนุกรม

ส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ลดลง และกระแสไฟภายในวงจรจะถึงค่าสูงสุด

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

2.2.4.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน



ภาพที่ 2-7 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรนี้จะได้จากสูตร (2-3) ดังนี้

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

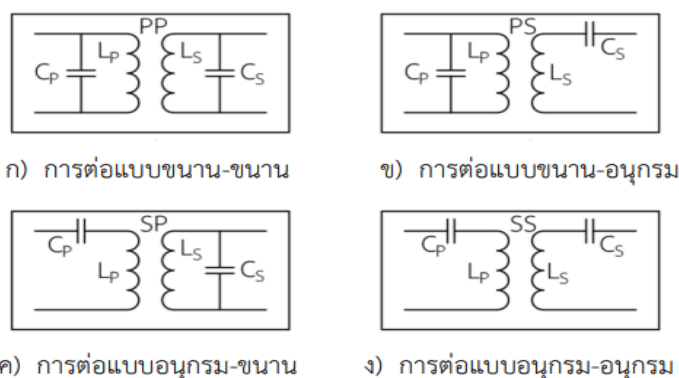
ในวงจรเรโซแนนซ์ RLC แบบขนาน คล้ายกับวงจรเรโซแนนซ์ RLC แบบอนุกรม ที่เรโซแนนซ์รีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุหักล้างกันออกไป

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

$$Z = R$$

ผลของค่าความต้านทานรวมจะสูงขึ้นมากที่ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งการกระตุ้นของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานมีผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงตกคร่อมอิมพีแดนซ์และกระแสที่ไหลภายในวงจรมีค่าต่ำสุด (ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล ทำให้คล้ายกับวงจรเปิด)

ซึ่งอาจจำแนกลักษณะการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าและขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่งกำลังไฟฟ้า และภาครับกำลังไฟฟ้าในวงจรเรโซแนนซ์มี 4 รูปแบบ [9]

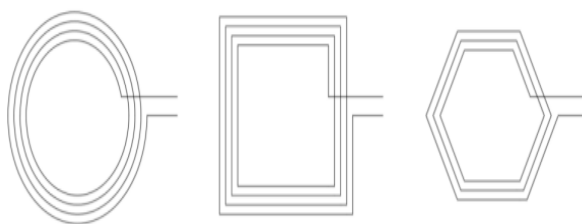


ภาพที่ 2-9 ลักษณะการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าและขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า

2.2.5 ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า

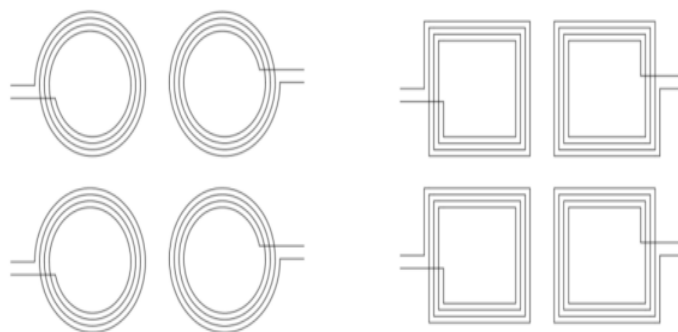
รูปทรงขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้ในวงจรเรโซแนนซ์ สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท

2.2.5.1 รูปทรงแบบดั้งเดิม โดยปกติจะใช้แบบภาคส่งกำลังไฟฟ้า 1 ชุด ต่อภาครับกำลังไฟฟ้า 1 ชุด ซึ่งขนาดของภาคส่งกำลังไฟฟ้าและภาครับกำลังไฟฟ้าอาจมีขนาดเท่ากัน หรือต่างกันก็ได้



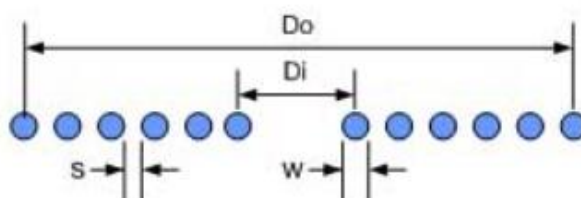
ภาพที่ 2-10 รูปทรงขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบดั้งเดิม

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 [9]



ภาพที่ 2-11 รูปทรงการจัดเรียงขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบหลายขด

โครงการนี้เลือกใช้ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบวงกลม ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1-1) และเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1-2) [9]



ภาพที่ 2-12 ระยะของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบวงกลม

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

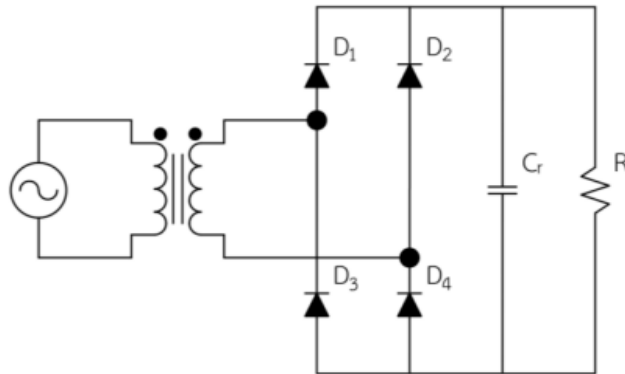
$$A = \frac{D_i + N(W + S)}{2} \quad (1-2)$$

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)

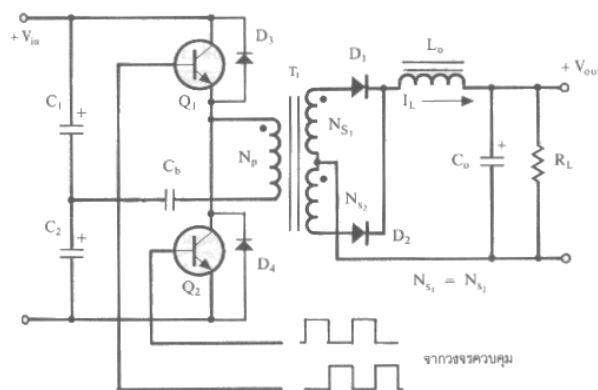
2.2.6 วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

2.2.6.1 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้า (Rectifier Circuit) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยมี ไดโอดจะเป็นตัวเรียงกระแสไฟฟ้าสลับ ซึ่งมีคลื่นด้านบวกและลบให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีเฉพาะคลื่นด้านบวกหรือลบเพียงด้านเดียว [9]



ภาพที่ 2-13 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น (Rectifier Circuit)

2.2.6.2 วงจรอินเวอร์เตอร์กำลัง (Inverter Circuit) เป็นวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรง เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC to AC Converter) ตามขนาดและความถี่ที่ต้องการ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสามารถตั้งค่าให้คงที่หรือปรับค่าได้ตามต้องการที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งหรือเปลี่ยนความถี่ได้ [9]



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

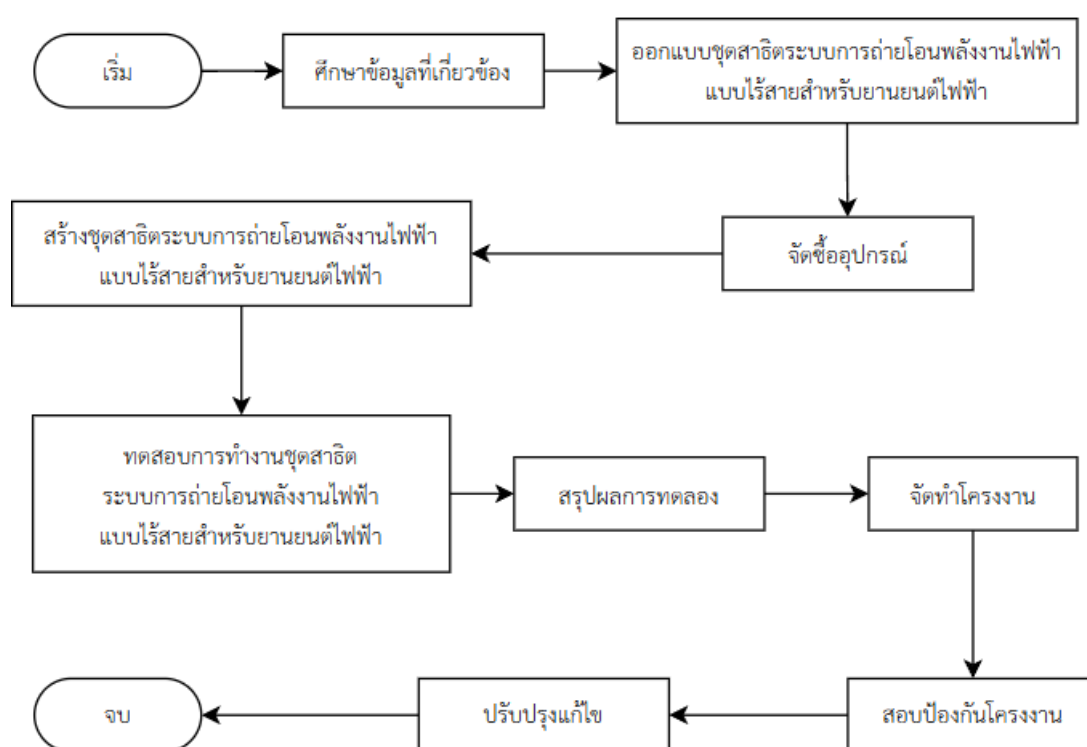
2.2.6.4 ระบบอัดประจุแบตเตอรี่ ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าที่ลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้า ให้มีค่าเหมาะสมสำหรับการอัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ โครงการนี้ใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 VDC 6 AH จำนวน 2 ลูกอนุกรมกัน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการ

ในบทความนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการ และส่วนของการออกแบบสร้างชิ้นงาน การเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับประกอบชิ้นงาน วงจรการทำงาน รวมไปถึงการสร้างและประกอบโครงสร้างของชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อให้เป็นไปตามขอบเขตของโครงการที่ได้กำหนดไว้

สามารถเขียนเป็นแผนผังการดำเนินงานของโครงการได้ ดังนี้



ภาพที่ 3-1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการโครงการ

3.1 การคำนวณเพื่อการออกแบบโครงสร้างชิ้นงาน

3.1.1 การคำนวณกระแสที่จะชาร์จแบตเตอรี่รถสกู๊ตเตอร์ ยี่ห้อ Free Rider จากข้อมูลสเปกของรถสกู๊ตเตอร์ ยี่ห้อ Free Rider



ข้อมูลจำเพาะ

ความจุน้ำหนัก	350 ปอนด์
น้ำหนัก (สกู๊ตเตอร์และแบตเตอรี่)	214.9 ปอนด์
แบตเตอรี่	กรดตะกั่ว 2x 50AH
ฟิลล์	20 ไมล์
ความเร็วสูงสุด	6 ไมล์ต่อชั่วโมง
ความยาว	48"
ความกว้าง	28 นิ้ว
น้ำหนัก (สกู๊ตเตอร์)	146.7 ปอนด์
เครื่องชาร์จแบตเตอรี่	เครื่องชาร์จจอกบอร์ต 4 แอมป์
ระยะห่างจากพื้น	2.6 นิ้ว
รัศมีวงเลี้ยว	53.25 นิ้ว
ความชันสูงสุด	6°
ล้อ/ยาง	ด้านหน้าและด้านหลัง: 10" PU Flat Free
ระบบขับเคลื่อน	มอเตอร์ DC 24 โวลต์, มีนิทรานแอ็กเชิลแบบปิดผนึก, ขับเคลื่อนล้อหลัง
การรับ	โซ่คัปหน้า-หลัง

ภาพที่ 3-2 ข้อมูลสเปกของรถสกู๊ตเตอร์ ยี่ห้อ Free Rider

จะใช้แบตเตอรี่แห้ง ชนิดตะกั่วกรด ขนาด 12 V.DC 50 Ah จำนวน 2 ลูก เป็นแหล่งพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ DC 24 V แต่เนื่องจากเป็นชุดสาธิตที่จะศึกษาแนวโน้มของการส่งพลังงานแบบไร้สายและยังนำมาใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ได้ จึงได้เปลี่ยนขนาดแบตเตอรี่เป็นแบตเตอรี่แห้ง ชนิดตะกั่วกรด 12 V.DC 7 Ah



Specifications

Nominal Voltage		12 V
Rated Capacity (20 hours rate)		7.2Ah
Dimensions (± 2mm)	Total Height (with terminals)	101 mm
	Length	151mm
	Width	65mm
	Height	93mm
Approx. Weight		2.9 kg
Terminal	Standard	F1
	Optional	F2

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

■ Characteristics			
Capacity (25°C)	10 hour rate	(670mA)	6.7AH
	5 hour rate	(1.22A)	6.1AH
	1 hour rate	(4.3A)	4.3AH
	15 min rate	(12.8A)	3.2AH
Internal Resistance	Fully charged Battery 25°C		Approx. 25m
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		91%
	Capacity after 6 months storage		82%
	Capacity after 12 months storage		64%
Charge Method (Constant Voltage)	Cycle use	Initial Current	2.25A or smaller
		Control Voltage	14.5 to 15.0V (25°C)
	Standby use	Initial Current	2.25A or smaller
		Control Voltage	13.6 to 13.8V (25°C)

ภาพที่ 3-4 Datasheet แบตเตอรี่แห้ง ชนิดตะกั่วกรด 12 V.DC 7 Ah

3.1.2 หลักการชาร์จแบตเตอรี่

ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงประกอบด้วย

3.1.2.1 ขนาดความจุแบตเตอรี่ Ah

โดยปกติแบตเตอรี่ 12V โหมดการชาร์จ ทั้ง Float charge (stand-by use) คือการชาร์จที่แรงดัน 13.6-13.8V และ Equal charge (cycle use) คือการชาร์จที่แรงดัน 14.2-14.9V และจะใช้กระแสชาร์จที่ 10 % ของความจุแบตเตอรี่ (Ah)

วิธีคำนวณ

กระแสที่ควรชาร์จ = 10% x ขนาดความจุแบตเตอรี่ (Ah)

จะได้ กระแสที่ควรชาร์จ = 10% x 7.0 (Ah)
= 0.7-1.1 A

3.1.2.2 ความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ก่อนชาร์จครั้งต่อไป

ส่วนใหญ่เมื่อแบตเตอรี่หมดประจุ จะเหลือความจุแบตเตอรี่ Ah ประมาณ 35% ดังนั้นจึงต้องชาร์จเพิ่มอีก 65% เพื่อให้แบตเตอรี่เต็ม

วิธีคำนวณ

จำนวน Ah ที่ต้องชาร์จเพิ่ม = 65% x ขนาดแบตเตอรี่ (Ah)

จำนวนชั่วโมงชาร์จ = จำนวน Ah ที่ต้องชาร์จเพิ่ม x กระแสที่ควรชาร์จ

จะได้ จำนวน Ah ที่ต้องชาร์จเพิ่ม = 65% x 7 (Ah)
= 4.55 Ah

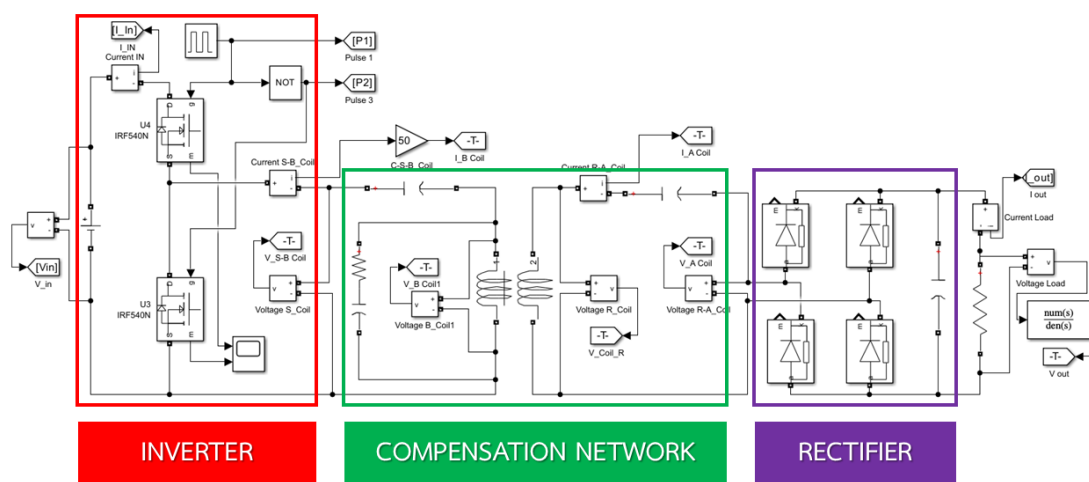
จำนวนชั่วโมงชาร์จ = 4.55 Ah x 0.7-1.1 A

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 แต่สำหรับแบตเตอรี่รถสกู๊ตเตอร์ ยี่ห้อ Free Rider จะใช้แรงดันใช้งานอยู่ที่ 24 V โดยขนาดแรงดันที่ควรชาร์จจะอยู่ในช่วง 26.4-27.4 V เพื่อยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่

3.1.3 จำลองระบบการถ่ายโอนพลังงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

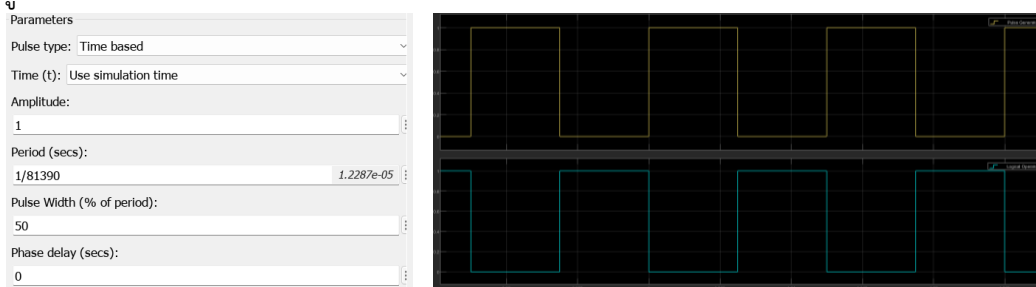


ภาพที่ 3-5 วงจรที่จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

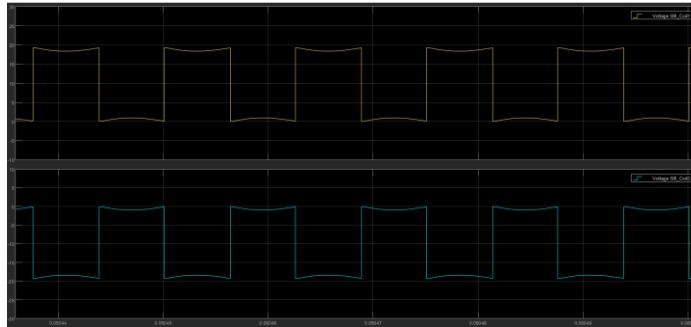
3.1.3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

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

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



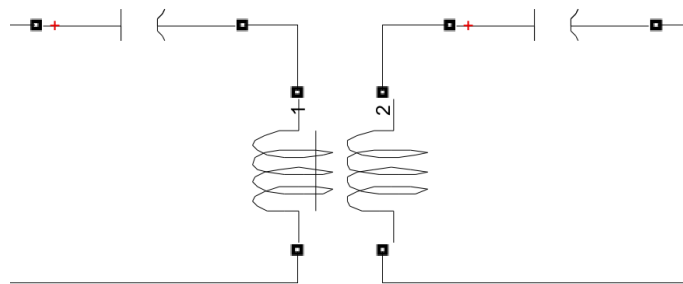
ภาพที่ 3-6 Pulse Gennerator ขับขา Gate Mosfet



ภาพที่ 3-7 Output เมื่อผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์

3.1.3.2 วงจร Compensation Network

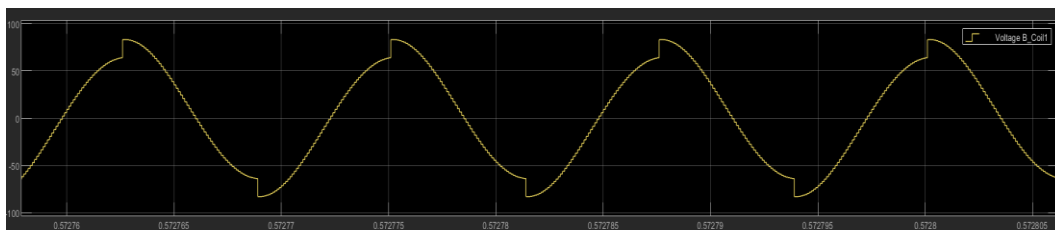
จากข้อมูลลักษณะการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าและขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่งกำลังไฟฟ้า และภาครับกำลังไฟฟ้าในวงจรเรโซแนนซ์มี 4 รูปแบบ ซึ่งจากพิจารณาจากแหล่งข้อมูลพบว่า รูปแบบที่เหมาะสมและดีที่สุด จะเป็นการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าอนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าทั้งภาคส่งและภาครับ



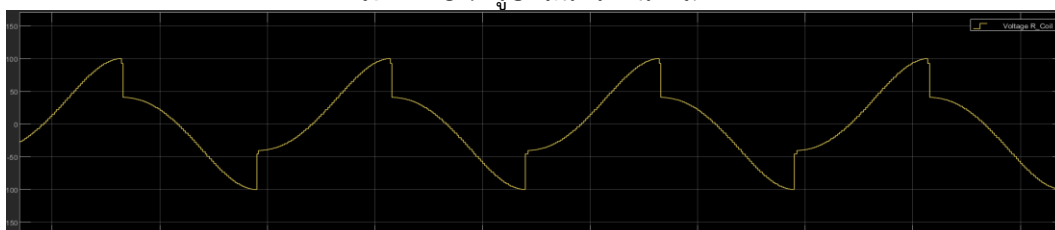
ภาพที่ 3-8 การต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าอนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าทั้งภาคส่งและภาครับ

การตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าและขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่งกำลังไฟฟ้า และภาครับกำลังไฟฟ้า ดังรูป

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



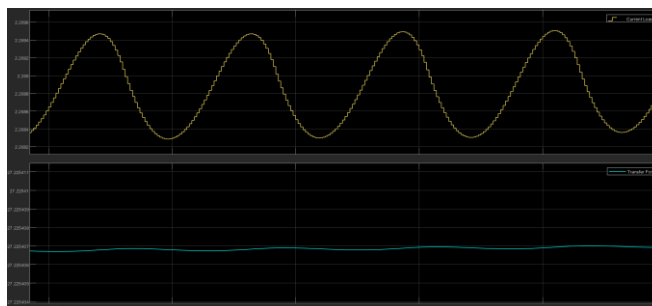
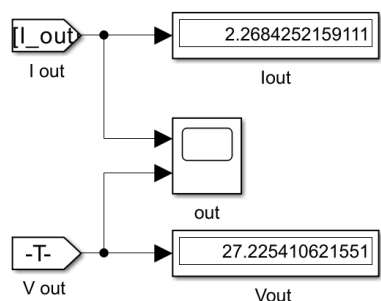
ภาพที่ 3-9 รูปคลื่นแรงดันฝั่งส่ง



ภาพที่ 3-10 รูปคลื่นแรงดันฝั่งรับ

3.1.3.3 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

คือ วงจรที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากขดลวดฝั่งรับที่เกิดจากการถ่ายโอนพลังงานมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อชาร์จเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ที่แบตเตอรี่ แต่ในวงจรที่จำลองใน MATLAB Simulink จะจำลองโดยใช้โหลดค่าความต้านทาน ขนาด $12\ \Omega$ ได้ผลลัพธ์ ดังรูป



ภาพที่ 3-11 ผลลัพธ์ของแรงดันและกระแสที่ได้จากการจำลองผ่านโปรแกรม Matlab Simulink

จะได้ว่าหากนำค่าแรงดันและค่ากระแสที่ได้จากการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink ไปพิจารณากับปัจจัยที่ต้องคำนึงในการชาร์จแบตเตอรี่ก่อนหน้านี้ คือ

ตารางที่ 3-1 เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณจากทฤษฎีและการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink

ข้อมูล	ปัจจัยที่ต้องคำนึง	กระแสที่ควรชาร์จ (ค่ากระแส)	ขนาดแรงดันที่ควรชาร์จ (ค่าแรงดัน)
	การคำนวณจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	0.7-1.1 A	26.4-27.4 V
	การจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink	2.0-2.2 A	27.0-27.3 V

ดังนั้น จากข้อมูลข้างต้นที่ได้จากการคำนวณจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และจากการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink แล้ว พบว่าผลที่ได้ออกมา นั้นมีความใกล้เคียงกัน โดยสามารถใช้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว มาอ้างอิงในการทำงานจริง เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของโครงการ

จากการทดสอบและคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในระบบการถ่ายโอนพลังงาน สรุปพารามิเตอร์ที่ใช้ได้ ดังนี้

ตารางที่ 3-2 ค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรม MATLAB Simulink

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
แรงดันที่แหล่งจ่ายวงจรอินเวอร์เตอร์	19.30 V.DC
Duty cycle (Inverter)	50 %
PWM Switching Frequency	80 kHz
L1	12 μ H
C1	0.334 μ F
L2	37 μ H
C2	0.102 μ F

3.1.4 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

Flat spiral coil inductor calculator

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

$$L (\mu H) = r^2 \cdot A^2 / (30 \cdot A - 11 \cdot D_i)$$

$$A = (D_i + N \cdot (w + s)) / 2$$

...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 = 2,54cm = 25,4mm.

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

Coil inner diameter (D_i): mm

Number of turns (N):

Wire Diameter (w): mm

Spacing between turns (s): mm

Inductance (L): μ H

Outer diameter (D_{out}): mm

Wire length (WL): m

Calculate Clear

ภาพที่ 3-12 หน้าเว็บ Flat spiral coil inductor calculator

Multi layer air core inductor calculator

Formula used in this calculation is from Wheeler's 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....
 $L(\mu H)$ = Inductance in microHenries
 N = Total Number of turns
 r_1 = Radius of the inside of the coil in meters
 r_2 = 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 μH

N เท่ากับ 8 รอบ

D_i เท่ากับ 65 mm.

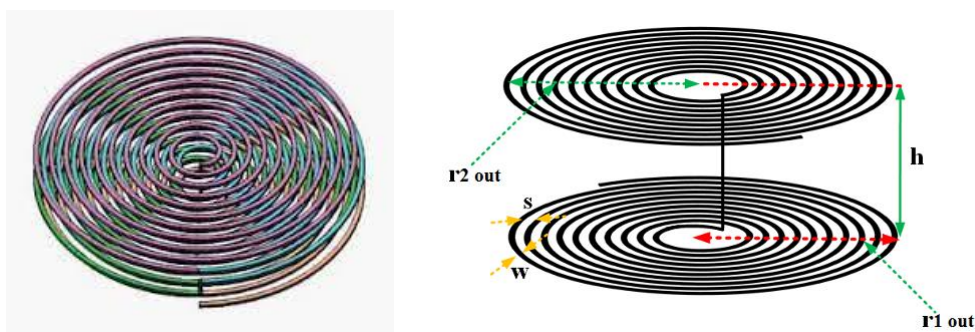
D_o เท่ากับ 33.64 mm.

w เท่ากับ 2.54 mm.

s เท่ากับ 14.25 mm.

W_l เท่ากับ 5.01 m.

ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับกำลังไฟฟ้า ในส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับกำลังไฟฟ้าจะเป็นแบบ multilayer planar spiral inductors คือ ตัวเหนี่ยวนำแบบขดลวดเกลียวแบนเช่นกัน แต่มีการเพิ่มชั้นขึ้นมามีดังรูป



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. ตัวนำทองแดงแกนเดียว 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



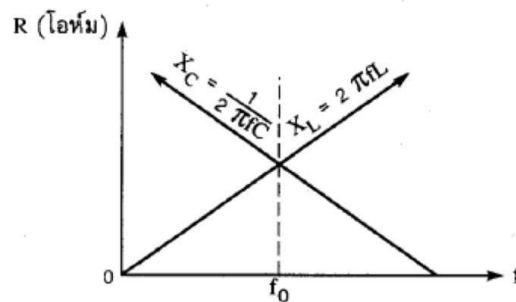
ภาพที่ 3-15 เครื่อง LCR Meter ยี่ห้อ Digicom รุ่น LCR-841

ตารางที่ 3-3 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

3.1.5 การคำนวณค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า

ที่สภาวะเรโซแนนซ์ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า (X_L) จะมาก และค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (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

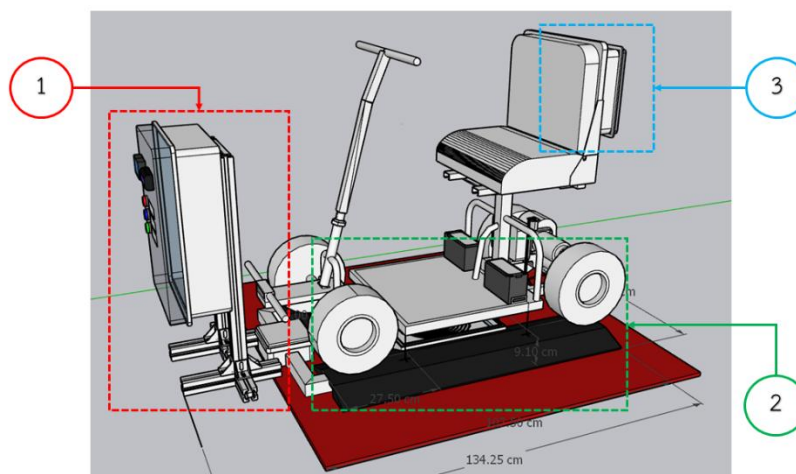
- 1.) ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าของภาคส่งกำลังไฟฟ้า ใช้ 0.334 μF 630 V
- 2.) ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าของภาครับกำลังไฟฟ้า ใช้ 0.1 μF 630 V



ภาพที่ 3-17 ตัวเก็บประจุ

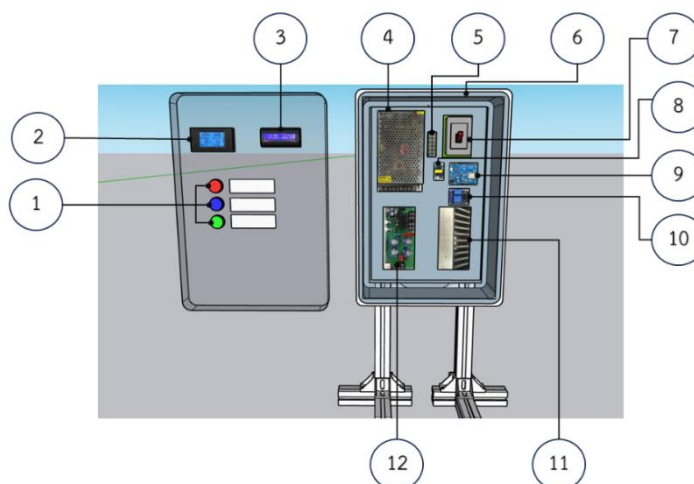
3.2 การออกแบบโครงสร้างชิ้นงาน

3.2.1 การออกแบบโครงสร้างชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า การออกแบบประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ



ภาพที่ 3-18 โครงสร้างชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

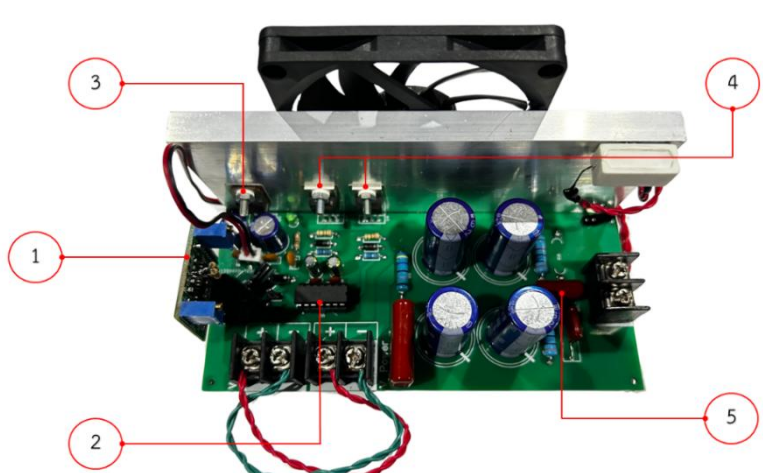
3.2.1.1 ชุดควบคุมการส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่ง



ภาพที่ 3-19 ชุดควบคุมการส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่ง

ตารางที่ 3-4 ตำแหน่งอุปกรณ์ชุดควบคุมการส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่ง

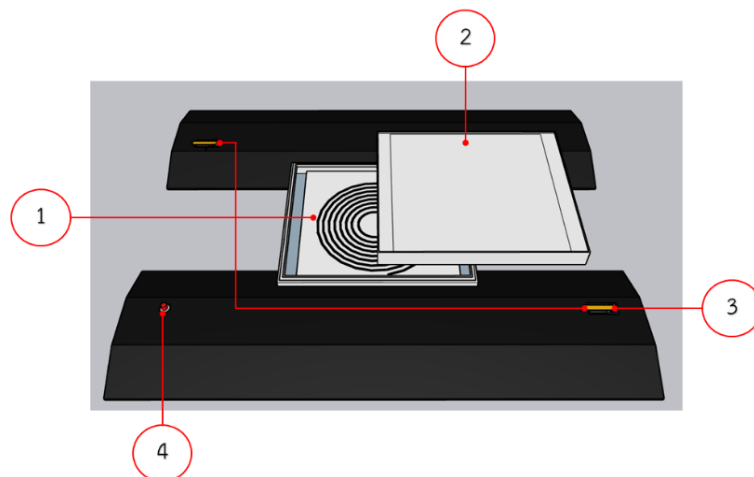
หมายเลข	รายละเอียดอุปกรณ์
1	Pilot Lamp
2	PZEM-022 100A AC Digital Power Meter มิเตอร์วัดการใช้พลังงาน
3	DC Watt Meter 60V 150A (DC วัดวัตต์มิเตอร์)
4	Switching Power Supply 24 VDC 10 A
5	Terminal Block
6	Buzzer 5 V
7	Safety Breaker 220 V 10 A 2 Pole
8	วงจรแปลงไฟ AC 220V เป็น DC 5V 700mA
9	WEMOS D1 R2 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



ภาพที่ 3-20 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

3.2.1.2 ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งกำลังไฟฟ้า และขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับกำลังไฟฟ้า

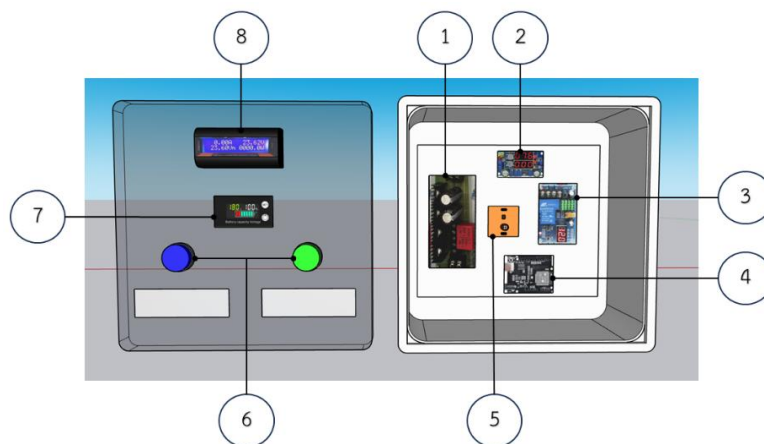


ภาพที่ 3-21 ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งกำลังไฟฟ้า และขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 3-5 ตำแหน่งอุปกรณ์ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งกำลังไฟฟ้า และขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับกำลังไฟฟ้า

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

3.2.1.3 ชุดแสดงค่าพร้อมควบคุมขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับ



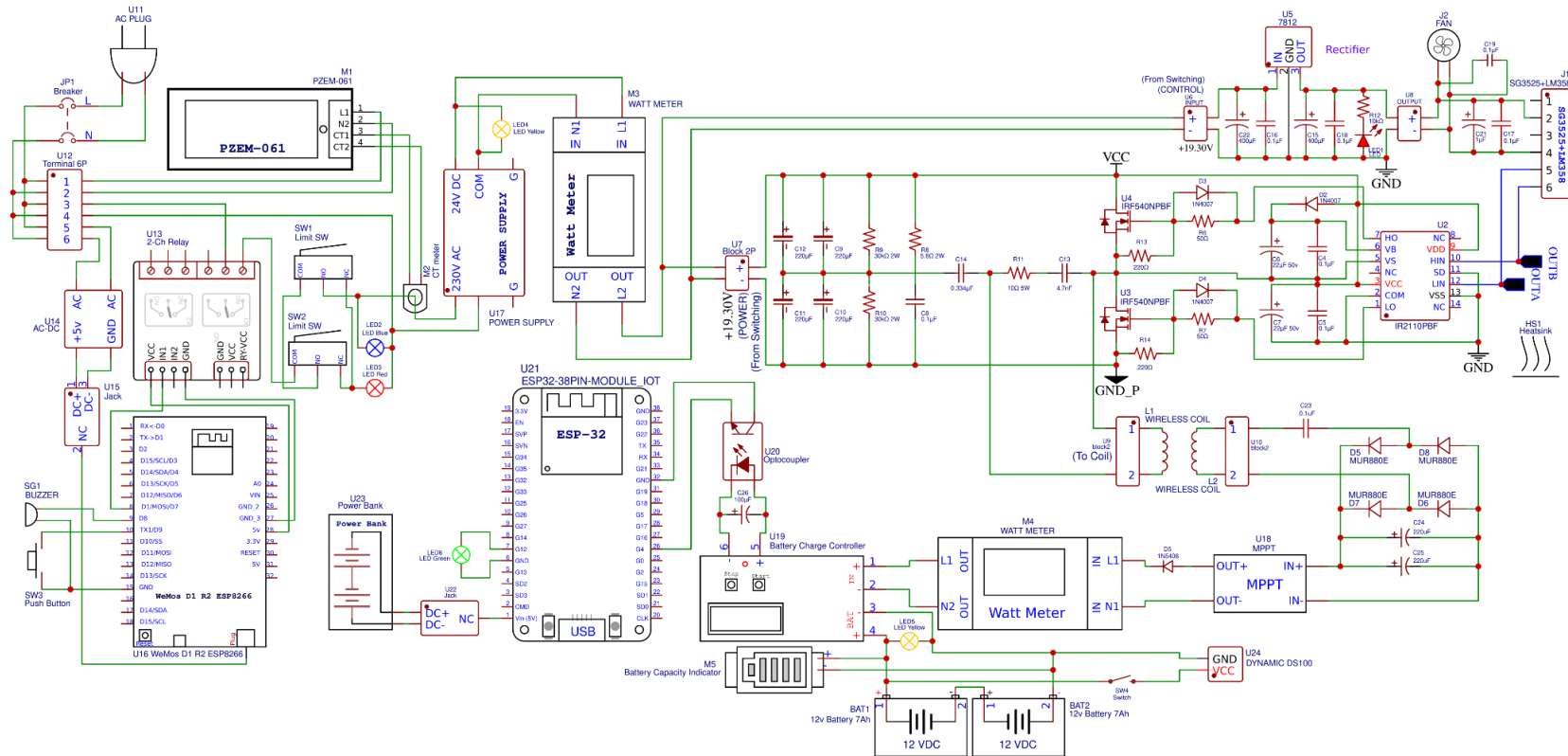
ภาพที่ 3-22 ชุดแสดงค่าพร้อมควบคุมขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับ

ตารางที่ 3-6 ตำแหน่งอุปกรณ์ชุดแสดงค่าพร้อมควบคุมขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับ

หมายเลข	รายละเอียดอุปกรณ์
1	ชุดวงจรเรียงกระแส (Rectifier)
2	DC MPPT Controller 5A DC-DC Step Down
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	Battery Charger Control Module XH-M604 DC 6-60V

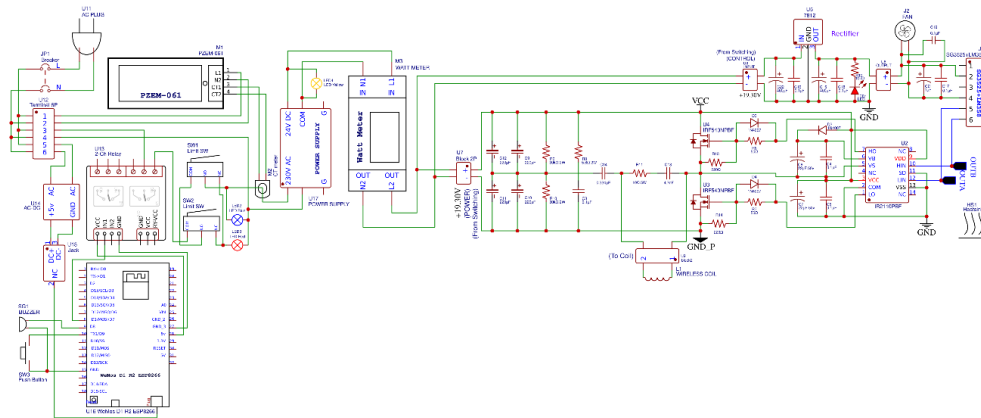
3.2.2 การออกแบบวงจรและการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

วงจรเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า การออกแบบประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ



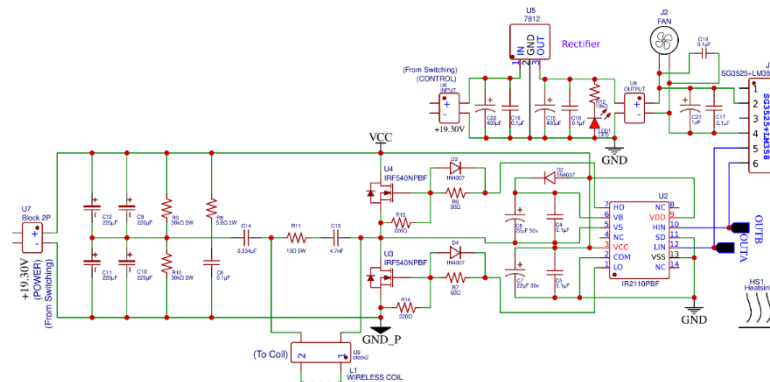
ภาพที่ 3-23 วงจรเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า

3.2.2.1 วงจรชุดควบคุมการส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่ง

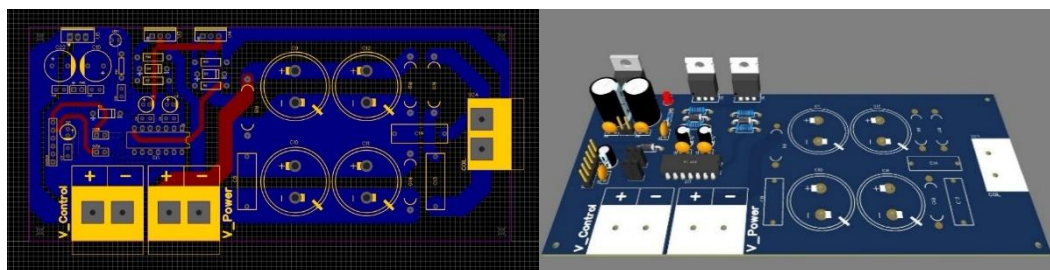


ภาพที่ 3-24 วงจรชุดควบคุมการส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาคส่ง

1.) วงจรอินเวอร์เตอร์ภายในแผ่น PCB ที่ส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า

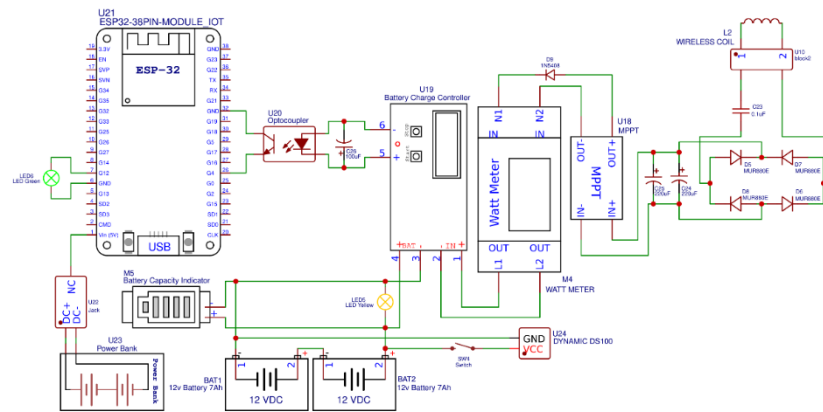


ภาพที่ 3-25 วงจรอินเวอร์เตอร์ภายในแผ่น PCB ที่ส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า



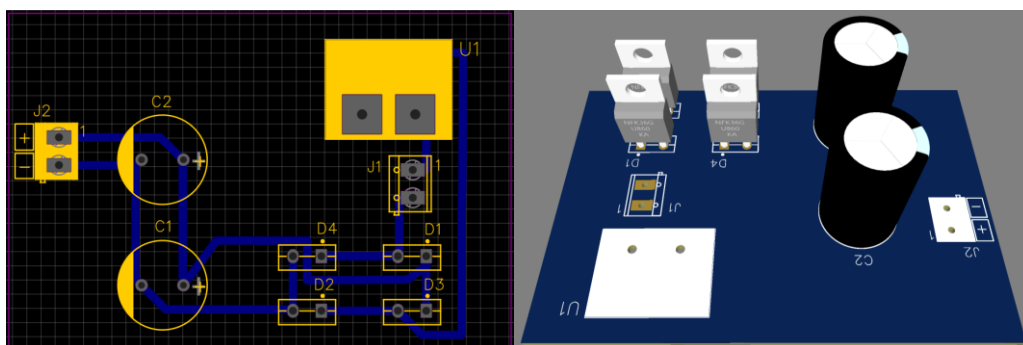
ภาพที่ 3-26 ลาย PCB และ 3D ของวงจรอินเวอร์เตอร์ภายในแผ่น PCB ที่ส่งกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยโปรแกรม EasyEDA

2.) วงจรชุดแสดงค่าพร้อมควบคุมขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับ



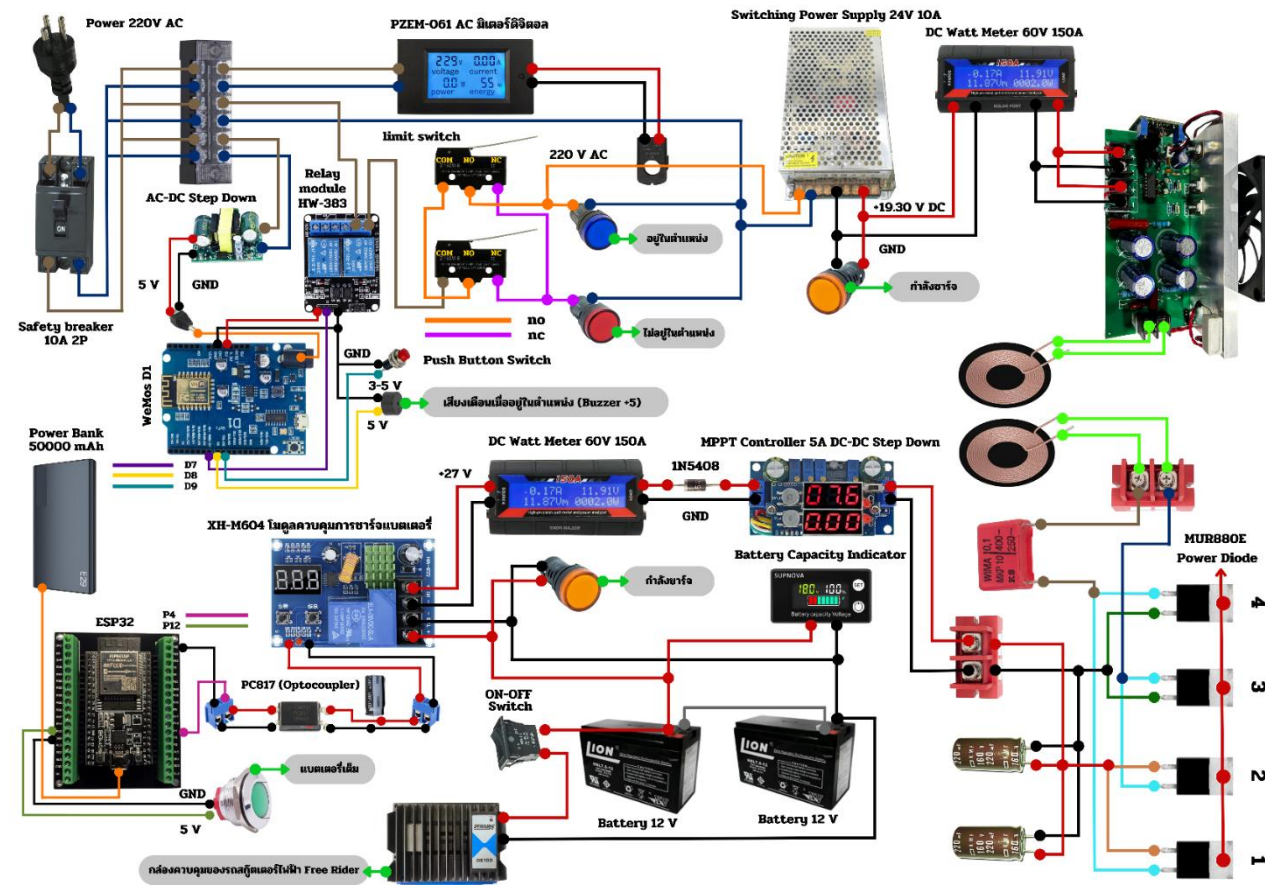
ภาพที่ 3-27 วงจรชุดแสดงค่าพร้อมควบคุมขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าของภาครับ

PCB ที่ออกเป็นโปรแกรม EasyEDA ได้จะเป็นแค่วงจร Rectifier



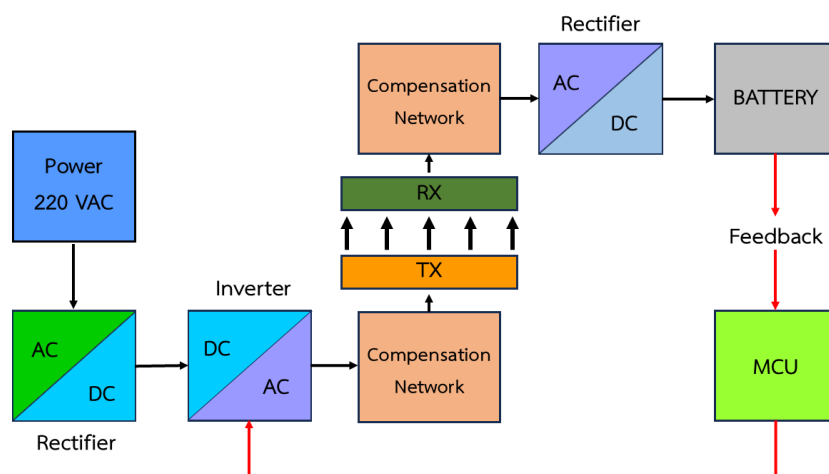
ภาพที่ 3-28 ลาย PCB และ 3D ของวงจร Rectifier โดยโปรแกรม EasyEDA

3.2.3 วงจรแสดงการต่อใช้งานของอุปกรณ์จริง

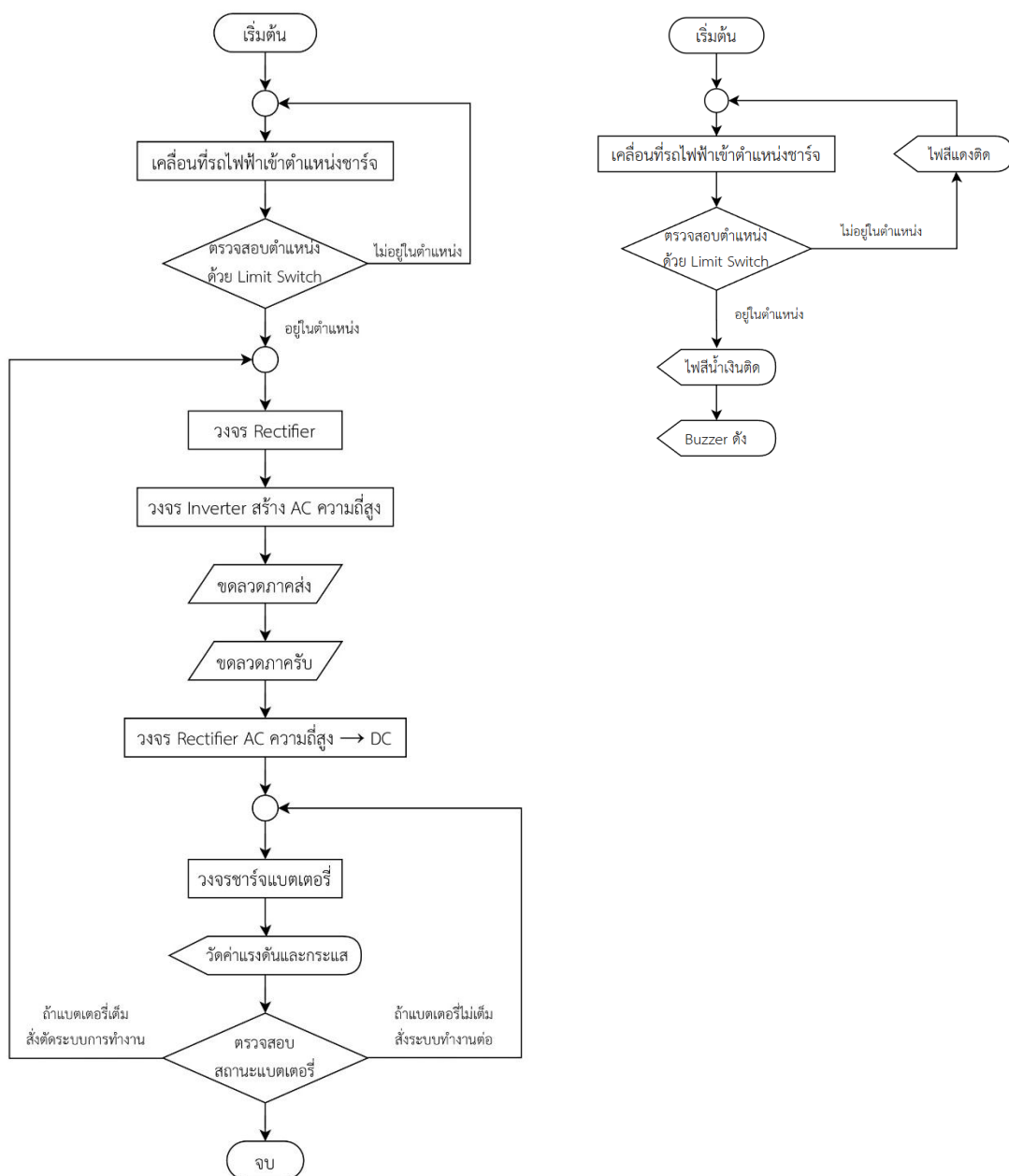


ภาพที่ 3-29 วงจรแสดงการต่อใช้งานของอุปกรณ์จริง

3.3 หลักการทำงาน



ภาพที่ 3-30 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย
สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า



ภาพที่ 3-31 แผนผัง Flowchart การทำงาน

3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

3.4.1 SafetyBreaker 220 V 15 A 2 Pole



ภาพที่ 3-32 SafetyBreaker 220 V 15 A 2 Pole

เป็นอุปกรณ์ที่ป้องกันการใช้กระแสไฟฟ้าเกินกำหนด เน้นความปลอดภัยในการใช้งาน ควบคุมและป้องกันความเสียหายที่เกิดจากความผิดพลาดของระบบไฟฟ้า

3.4.2 Switching Power Supply 24 VDC 10 A



ภาพที่ 3-33 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 มีขนาดที่เล็กกระทัดรัด และมีคุณสมบัติครอบคลุมในเรื่องของความปลอดภัยด้วย อีกทั้งยังสามารถติดตั้งได้กับอุปกรณ์หลายประเภท

3.4.3 AC-DC 5V 700mA



ภาพที่ 3-34 AC-DC 5V 700mA

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

ตารางที่ 3-7 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

3.4.4 WEMOS D1 R2 WIFI ESP8266 Shield Arduino Compatible



ภาพที่ 3-35 WEMOS D1 R2 WIFI ESP8266 Shield Arduino Compatible

WeMos-D1R2 เป็นไมโครโปรเซสเซอร์ที่รองรับ WiFi ที่ใช้ ESP8266-12 บนฐานของ Arduino-UNO ซึ่งหมายความว่าบอร์ดนี้มีลักษณะและการทำงานเหมือนกับ UNO เห็นได้ชัดว่าซิลด์, เซ็นเซอร์, และอุปกรณ์เอาต์พุตหลายตัวที่ผลิตขึ้นสำหรับแพลตฟอร์ม Arduino จะทำงานบน WeMos-D1R2 ได้พร้อมกับข้อได้เปรียบเพิ่มเติมคือมี WiFi ในตัว บอร์ดนี้ใช้งานได้กับ Arduino IDE และ NodeMCU นอกจากนี้ D1 R2 ยังมีแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ซึ่งบนบอร์ดซึ่งช่วยให้คุณจ่ายไฟให้บอร์ดจากแหล่งจ่ายไฟได้สูงสุด 12V

ตารางที่ 3-8 ข้อมูลจำเพาะของ WEMOS D1 R2 WIFI ESP8266 Shield Arduino Compatible

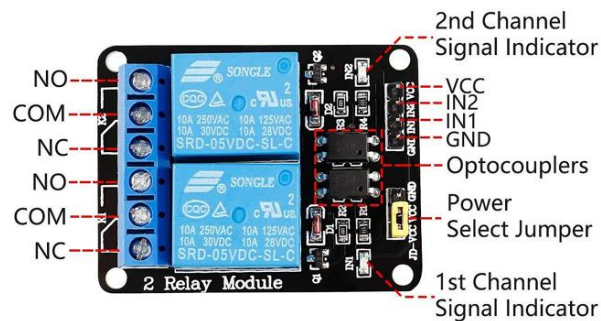
ข้อมูลจำเพาะ			
Microcontroller	ESP8266EX	Operating Voltage	3.3V
Flash Memory	4MB	Input Voltage Range	9V to 12V
Output	5V at 1A Max	Board Dimensions	68.6 x 53.4 มม.
Weight	21.8 กรัม	Analog Input Pins	1 (3.2V max input)
Digital I/O Pins	11 (all I/O pins have interrupt/pwm/I2C/one-wire capability, except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

3.4.5 2 Channel 5V Optical Isolated Relay Module



ภาพที่ 3-36 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 และมีอินเทอร์เฟซมาตรฐานที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมได้โดยตรง



ภาพที่ 3-37 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 คอนแทกแบบปกติเปิด (NO) ของรีเลย์จะเชื่อมต่อกับขั้วกลาง (COM)
- JD-VCC : พินนี้ใช้สำหรับแหล่งจ่ายไฟของรีเลย์ การเชื่อมต่อ JD-VCC และ VCC ด้วยฟิวส์เปเปอร์ แสดงว่ารีเลย์ได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟของบอร์ดควบคุมหลัก นอกจากนี้ ยังสามารถเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟภายนอกเข้ากับพินนี้เพื่อจ่ายไฟให้รีเลย์ได้

3.4.6 Limit Switch Z-15GW-B



ภาพที่ 3-38 Limit Switch Z-15GW-B

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

3.4.7 DC Watt Meter 60V 150A (DC วัดวัตต์มิเตอร์)



ภาพที่ 3-39 DC Watt Meter 60V 150A (DC วัดวัตต์มิเตอร์)

เครื่องวัดวัตต์ ได้รับการออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับ การตรวจสอบประสิทธิภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องวัดนี้สามารถตรวจสอบพารามิเตอร์ไฟฟ้าได้ 8 รายการ ได้แก่: แอมป์ โวลต์ วัตต์ แอมป์-ชั่วโมง วัตต์-ชั่วโมง แอมป์สูงสุด โวลต์ต่ำสุด (sag) และวัตต์สูงสุด ด้วยความจุ 60 โวลต์และ 150 A จะแสดงผลสีน้ำเงินที่มีความคมชัดสูง 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 3-40 ข้อมูลจำเพาะ DC Watt Meter 60V 150A

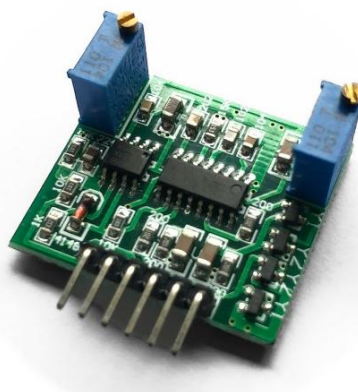
3.4.8 PZEM-022 100A AC Digital Power Meter มิเตอร์วัดการใช้พลังงาน



ภาพ 3-41 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

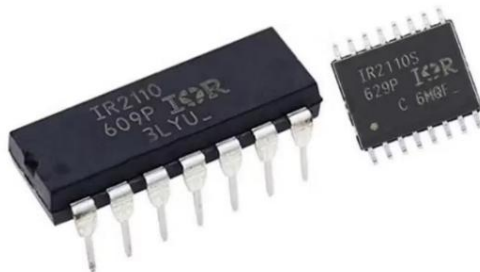
3.4.9 โมดูล วงจร SG3525 + LM358



ภาพที่ 3-42 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

3.4.10 IC IR2110PBF



ภาพที่ 3-43 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

3.4.11 MOSFET IRF540N

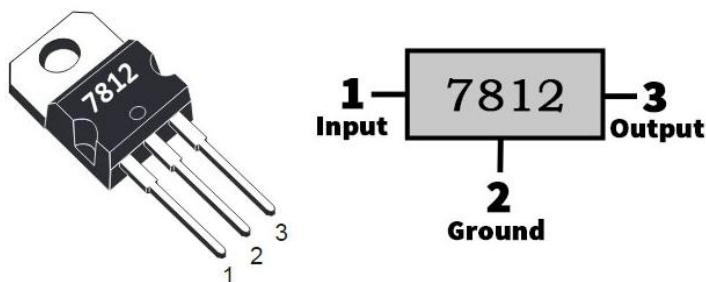


ภาพที่ 3-44 MOSFET IRF540N

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

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 ($R_{ds(on)}$): $0.077\ \Omega$ (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)

3.4.12 IC Voltage Regulator 7812



ภาพที่ 3-45 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

3.4.13 WIMA Film Capacitor



ภาพที่ 3-46 WIMA Film Capacitor

Film Capacitor อิเล็กทรอนิกส์จะไม่ถูกนำมาใช้กับตัวเก็บประจุแบบโลหะ แต่จะพันด้วยไดอิเล็กทริกในรูปแบบของฟิล์มโลหะ เนื่องจากความต้านทานแบบอนุกรมที่ต่ำกว่า โครงสร้างฟิล์มส่วนใหญ่ใช้สำหรับตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุที่เล็ก ข้อดีของส่วนประกอบที่ผลิตด้วยวิธีนี้คือ อิเล็กทรอนิกส์ฟิล์มโลหะที่สัมผัสได้ง่าย 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

3.4.14 Pilot Lamp



ภาพที่ 3-47 Pilot Lamp

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

3.4.15 Push Button Switch



ภาพที่ 3-48 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 แต่เมื่อปล่อยมือออกจาก Push button Switch หน้าสัมผัสจะถูกล็อกไว้โดยกลไกของสวิตช์ ซึ่งสามารถกลับสู่สภาวะปกติในตำแหน่งเดิมได้โดยกด Push button Switch อีกครั้งทำให้คลายล็อก จะมีแรงผลักดันจากสปริงให้ Push button Switch เข้าสู่สภาวะปกติ

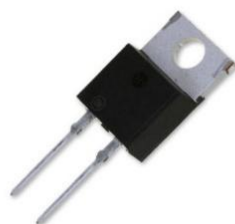
3.4.16 Buzzer 5 V



ภาพที่ 3-49 Buzzer 5 V

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

3.4.17 MUR880E Power Diode



MUR880E Power Diode

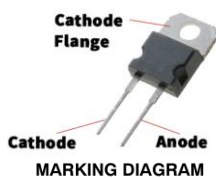
ภาพที่ 3-50 MUR880E Power Diode

คือ ไดโอดเรียงกระแสแบบสวิตช์โหมดกึ่งความเร็วพิเศษ ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้ใน แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ อินเวอร์เตอร์ และไดโอดแบบฟรีวีลลิ่ง

คุณสมบัติ

- 20 ม. J Avalanche Energy รับประกัน
- การป้องกันที่ยืดเยื้อต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าใน วงจรโหลดเหนี่ยวนำแบบสลับ
- 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

MUR880E Pinout



A = Assembly Location
Y = Year
WW = Work Week
G = Pb-Free Package
U8xxx E = Device Code
xxx = 100 or 80
KA = Diode Polarity

ตารางที่ 3-9 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 μ s	อุณหภูมิรีเฟล็กซ์สูงสุดตามเวลา	30 s

3.4.18 DC MPPT Controller 5A DC-DC Step Down



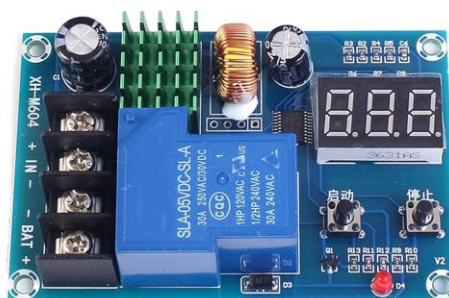
ภาพที่ 3-51 DC MPPT Controller 5A DC-DC Step Down

ตัวควบคุม MPPT แบบจอแสดงผลดิจิทัล DC ขนาด 5A ด้วยเทคโนโลยี Maximum Power Point Tracking (MPPT) ขั้นสูง ตัวควบคุมนี้ปรับเอาต์พุตพลังงานให้เหมาะสมที่สุด จอแสดงผลดิจิทัลขนาด 5A ให้ข้อมูลแบบเรียลไทม์ ช่วยให้ควบคุมกระแสไฟได้อย่างแม่นยำ สามารถปรับ CC CV (กระแสคงที่ แรงดันคงที่) ช่วยให้ใช้งานได้หลากหลาย

ตารางที่ 3-10 ข้อมูลจำเพาะของ DC MPPT Controller 5A DC-DC Step Down

ข้อมูลจำเพาะ			
Output Voltage Range	1.25-32V continuously adjustable	MPPT Voltage Setting Range	6-36V
Output Constant Current Range	0.05-5A	Output Turning Light Range	0.01-5A
Conversion Efficiency	Upto 95%	Working Frequency	180KHz
Working Temperature	-40~+85 °C	Default Output Voltage	5V
Total Output Constant Current	3A	Range of Output Turning Light	0.01-5A

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



ภาพที่ 3-52 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)

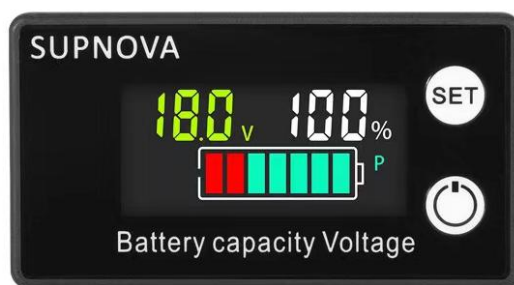
3.4.20 แบตเตอรี่แห้ง ยี่ห้อ Lion ชนิดตะกั่วกรด 12 V.DC 7 Ah



ภาพที่ 3-53 แบตเตอรี่แห้ง ยี่ห้อ Lion ชนิดตะกั่วกรด 12 V.DC 7 Ah

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

3.4.21 Battery Capacity Indicator



ภาพที่ 3-54 โวลต์มิเตอร์วัดความจุแบตเตอรี่ DC

เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่และแสดงปริมาณความจุของแบตเตอรี่ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ (Battery Capacity Indicator) เหมาะสำหรับใช้งานในระบบแบตเตอรี่ เช่น รถไฟฟ้า, โซลาร์เซลล์, 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)

3.4.22 ON-OFF Switch



ภาพที่ 3-55 ON-OFF Switch

เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ใช้ควบคุมวงจรกระแสไฟฟ้า ทำหน้าที่เปิดกระแสไฟหรือตัดกระแสไฟ ไม่ให้ไหลเข้าสู่เครื่องใช้ไฟฟ้า หลอดไฟ เครื่องมือ เครื่องจักรที่ใช้ไฟฟ้า สวิตช์ไฟถูกออกแบบมาให้ติดตั้งได้ง่าย ใช้งานง่าย

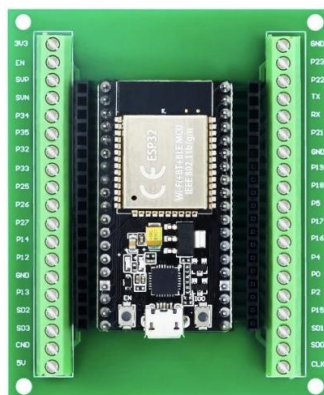
3.4.23 PC817 (Optocoupler)



ภาพที่ 3-56 PC817 (Optocoupler)

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

3.4.24 ESP32



ภาพที่ 3-57 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 ซึ่งข้อดีของชิปรุ่นนี้ก็มีดังนี้ 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 3-58 ข้อมูลจำเพาะของ ESP32

3.4.25 Power Bank 50000 mAh



ภาพที่ 3-59 Power Bank 50000 mAh

คือ อุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ชาร์จแบตเตอรี่หรือจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา เช่น สมาร์ทโฟน แท็บเล็ต กล้องดิจิทัล และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ได้ ในกรณีที่ไม่สามารถเข้าถึงแหล่งจ่ายไฟโดยตรงได้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงสิ่งที่ได้คำนวณ สิ่งที่ได้คำนวณออกมา นำมาทดลองและเก็บผลการทดลองของชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อจะได้ทราบถึง

4.1 ต้นแบบชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

4.1.1 สร้างต้นแบบชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

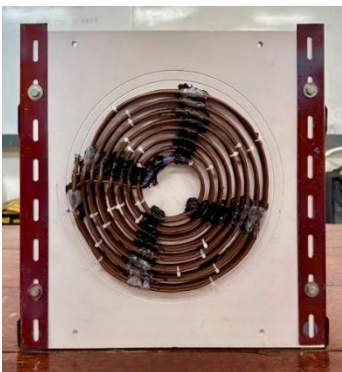
ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง มี 3 รูปแบบ คือ

ตารางที่ 4-1 รูปแบบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง

รูปแบบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง		
แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
ใช้สาย THW เบอร์ 4 Sq.mm ตัวนำทองแดงแกน (ปลอกฉนวน) 8 รอบ	ใช้สาย THW เบอร์ 6 Sq.mm ตัวนำทองแดงหลายแกน (ปลอกฉนวน) 8 รอบ	ใช้ขดลวดสำเร็จของเตา Induction 3500 W
		
ภาพที่ 4-1 รูปแบบขดลวด เหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง แบบที่ 1	ภาพที่ 4-2 รูปแบบขดลวด เหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง แบบที่ 2	ภาพที่ 4-3 รูปแบบขดลวด เหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง แบบที่ 3

ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับ มี 4 รูปแบบ คือ

ตารางที่ 4-1 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
	
ภาพที่ 4-4 รูปแบบขดลวด เหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับแบบที่ 1	ภาพที่ 4-5 รูปแบบขดลวด เหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับแบบที่ 2
แบบที่ 3	แบบที่ 4
ใช้ขดลวดสำเร็จของเตา Induction 3500 W	ใช้ขดลวดสำเร็จของเตา Induction 2000 W
	
ภาพที่ 4-6 รูปแบบขดลวด เหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับแบบที่ 3	ภาพที่ 4-7 รูปแบบขดลวด เหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับแบบที่ 4

4.1.2 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 $12\ \Omega$ 15 W แทนแบตเตอรี่ เพื่อดึงพลังงานภายในวงจร

จากการทดลองรูปแบบของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง และรูปแบบของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับ ดังกล่าว

วิเคราะห์ ได้ว่า รูปแบบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งแบบที่ 2 กับรูปแบบของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับแบบที่ 1 คือ ชุดต้นแบบของขดลวดที่ถ่ายโอนพลังงานได้ดี และเหมาะสมที่สุด โดยมีผลการทดลอง ดังนี้

ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ขดลวดฝั่งส่งเป็นสายไฟชนิด THW ขนาด 6 Sq.mm. ตัวนำทองแดงหลายแกน ปลอกฉนวนออก พันเป็นวงกลมกันหอย จำนวน 8 รอบ ซึ่งมีระยะห่างในแต่ละรอบ 14.25 มม. และขดลวดฝั่งรับใช้สายไฟชนิด THW 4 Sq.mm. ตัวนำทองแดงแกนเดียว ไม่ปลอกฉนวนออก 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 4-3

ตารางที่ 4-2 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของขดลวดฝั่งส่งและฝั่งรับ

รายการ	ฝั่งส่ง (Tx)	ฝั่งรับ (Rx)
ค่าความเหนี่ยวนำ (L)	11.688 μH	37.13 μH
ค่าความต้านทานภายในของ L (R)	0.136 Ω	0.247 Ω
ค่าตัวเก็บประจุที่คำนวณได้ (C)	327.08 nF	102.96 nF
ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้จริง (C)	341.2 nF	102.70 nF
ค่าความต้านทานภายในของ C (R)	0.271 Ω	0.043 Ω
ความถี่เรโซแนนซ์ที่คำนวณได้จากค่า LC ที่ใช้จริง	79.70 kHz	81.50 kHz

ตารางที่ 4-3 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ความถี่ 80.43 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	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 4-4 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ความถี่ 83.58 kHz

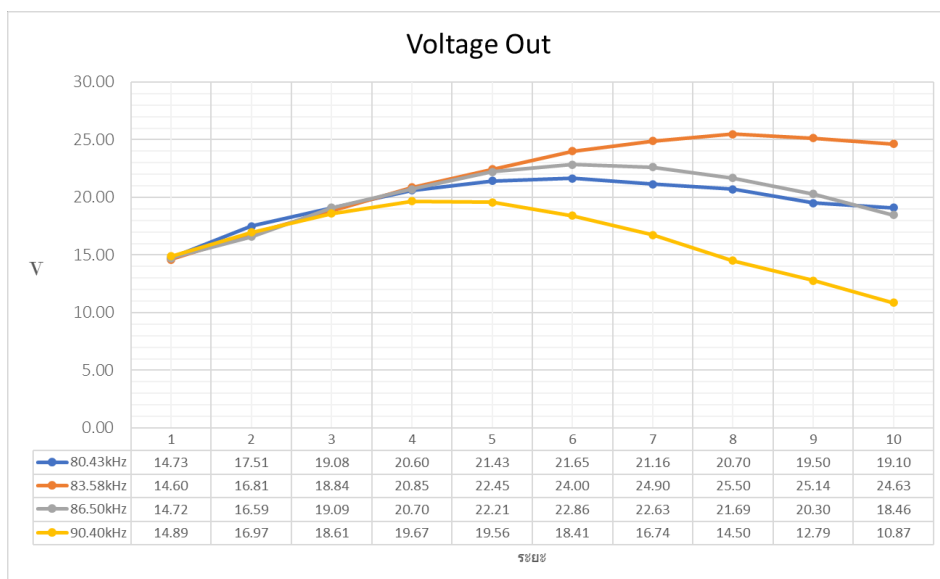
ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			η→EFF (ประสิทธิภาพ) DC	η→EFF (ประสิทธิภาพ) AC
	ก่อนเข้า Switching (AC)			หลัง Switching ก่อนเข้าวงจร (DC)			หลังวงจร เรียงกระแส (DC)				
	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{in}	I _{in}	P _{in}	V _{out}	I _{out}	P _{out}		
1	225	0.36	41.3	19.30	1.39	26.83	14.60	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 4-5 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ความถี่ 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 _{in}	I _{in}	P _{in}		
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 4-6 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ความถี่ 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 _{in}	I _{in}	V _{in}		
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 4-8 Voltage Out

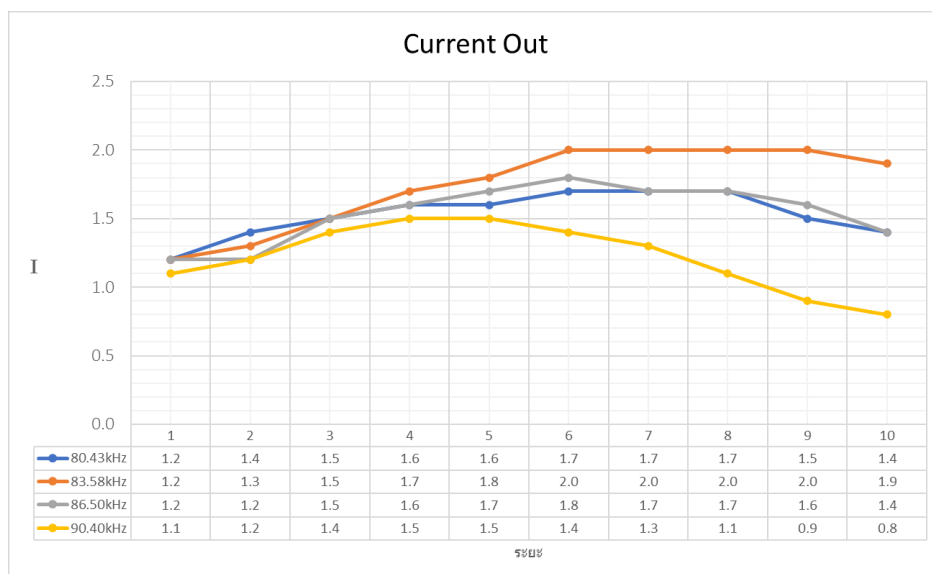
ที่ความถี่ 80.43 kHz พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตั้งแต่ระยะที่ 1 (14.73 V) ไปจนถึงระยะที่ 8 ซึ่งค่าแรงดันสูงสุดอยู่ที่ 21.65 V ก่อนจะเริ่มลดลงเล็กน้อยในระยะที่ 9 และ 10 เป็น 19.50 V และ 19.10 V ตามลำดับ โดยการลดลงนี้ค่อนข้างช้าและมีลักษณะเสถียร

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 4-9 Current Out

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

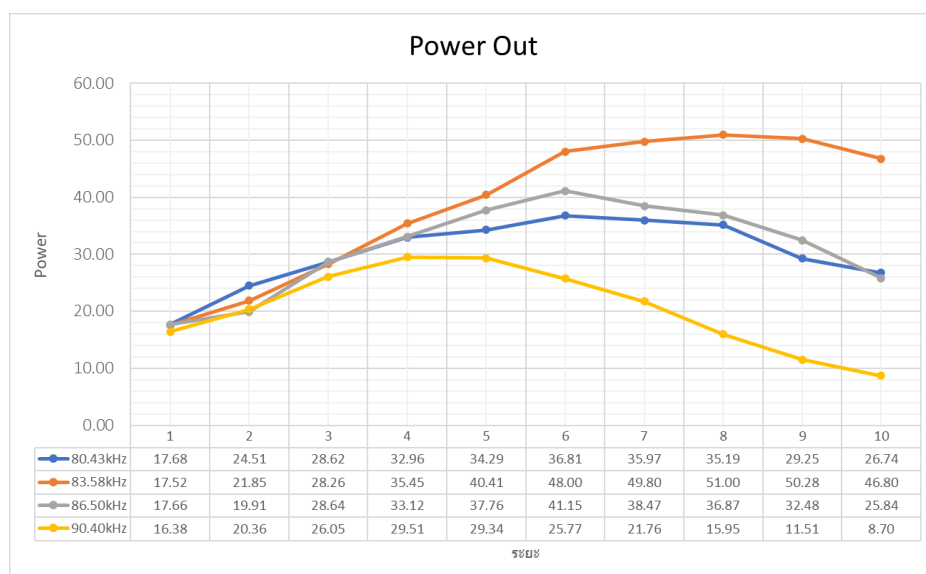
ที่ความถี่ 83.58 kHz พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 1.2 A และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าสูงสุดที่ 2.0 A ที่ระยะที่ 6 และสามารถรักษาระดับค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดนี้ได้อย่างเสถียรเป็นระยะเวลายาวนาน (ระยะที่ 6-9) ก่อนที่จะลดลงเพียงเล็กน้อยเป็น 1.9 A ที่ระยะที่ 10 ลักษณะกราฟแสดงให้เห็นถึงความเสถียรที่สูงมากและประสิทธิภาพการทำงานที่ดีเยี่ยมแม้ในระยะไกล

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 แสดงประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุดในการรักษากระดับค่ากระแสไฟฟ้าขาออกให้สูงและเสถียรมาก

ระยะไกล 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 4-10 Power Out

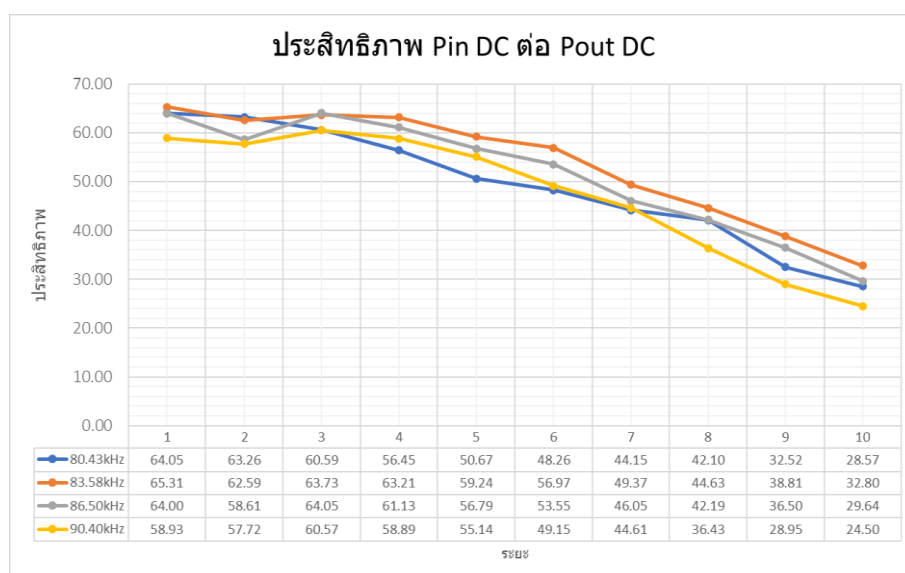
ที่ความถี่ 80.43 kHz พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าขาออกที่มีลักษณะเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และลดลงในช่วงหลัง โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 17.68 W และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดสูงสุดที่ 36.81 W ที่ระยะที่ 6 หลังจากนั้นกำลังไฟฟ้าเริ่มลดลงไปจนถึง 26.74 W ที่ระยะที่ 10

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 หลังจากนั้นกำลังไฟฟ้ามลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 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 4-11 ประสิทธิภาพ Pin DC ต่อ Pout DC

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

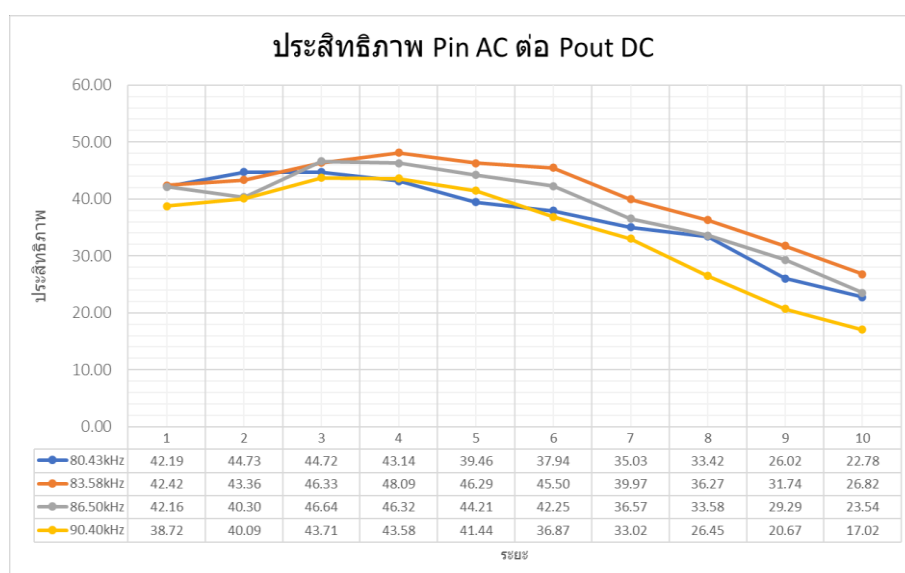
ที่ความถี่ 83.58 kHz พบว่าค่าประสิทธิภาพเริ่มต้นที่ 65.31 % ซึ่งสูงกว่าความถี่อื่นๆ และสามารถรักษาระดับประสิทธิภาพสูงกว่า 60% ได้ถึงระยะที่ 4 (63.21 %) นอกจากนี้ ยังรักษาระดับ

ประสิทธิภาพได้ดีกว่าความถี่อื่นๆ 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 และยังมีประสิทธิภาพที่ดีเยี่ยมในระยะไกล โดยมีค่าประสิทธิภาพ 32.80 % ที่ระยะที่ 10 ซึ่งสูงกว่าความถี่อื่นๆ ในขณะที่ความถี่ 90.40 kHz แสดงประสิทธิภาพเพียง 24.50 % ในระยะเดียวกัน



ภาพที่ 4-12 ประสิทธิภาพ Pin AC ต่อ Pout DC

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 ความถี่นี้คือมีการตอบสนองที่ดีในระยะใกล้ถึงปานกลาง (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 และยังมีความเสถียรที่ดีเยี่ยมในระยะไกล โดยมีค่าประสิทธิภาพ 26.82 % ที่ระยะที่ 10 ซึ่งสูงกว่าความถี่อื่นๆ ในขณะที่ความถี่ 90.40 kHz แสดงประสิทธิภาพเพียง 17.02 % ในระยะเดียวกัน

ดังนั้น จากการวิเคราะห์รูปแบบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่งแบบที่ 2 กับรูปแบบของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับแบบที่ 1 ในด้านค่าแรงดัน ค่ากระแส ค่ากำลังไฟฟ้า และค่าประสิทธิภาพ ช่วงความถี่ที่ดีที่สุดอยู่ในช่วง 80.00 – 83.00 kHz และระยะการถ่ายโอนพลังงานที่ดีอยู่ที่ระยะ 5-8 cm. ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จึงเลือกต้นแบบนี้มาสร้างเป็นชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

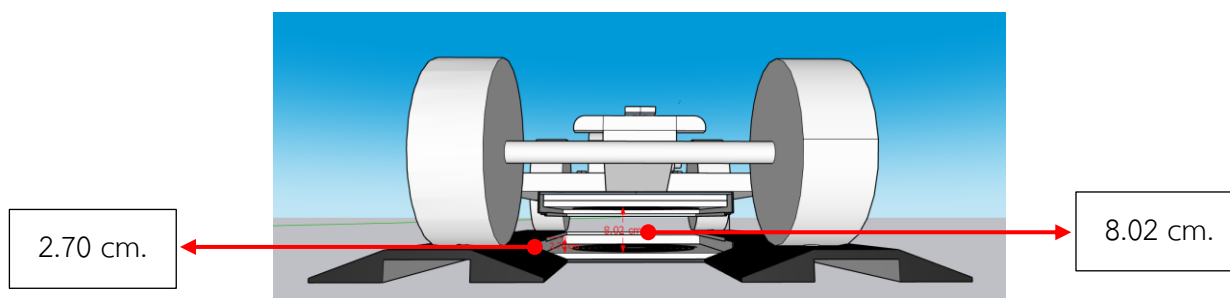
4.2 ชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

4.2.1 สร้างชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า



ภาพที่ 4-13 ชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

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



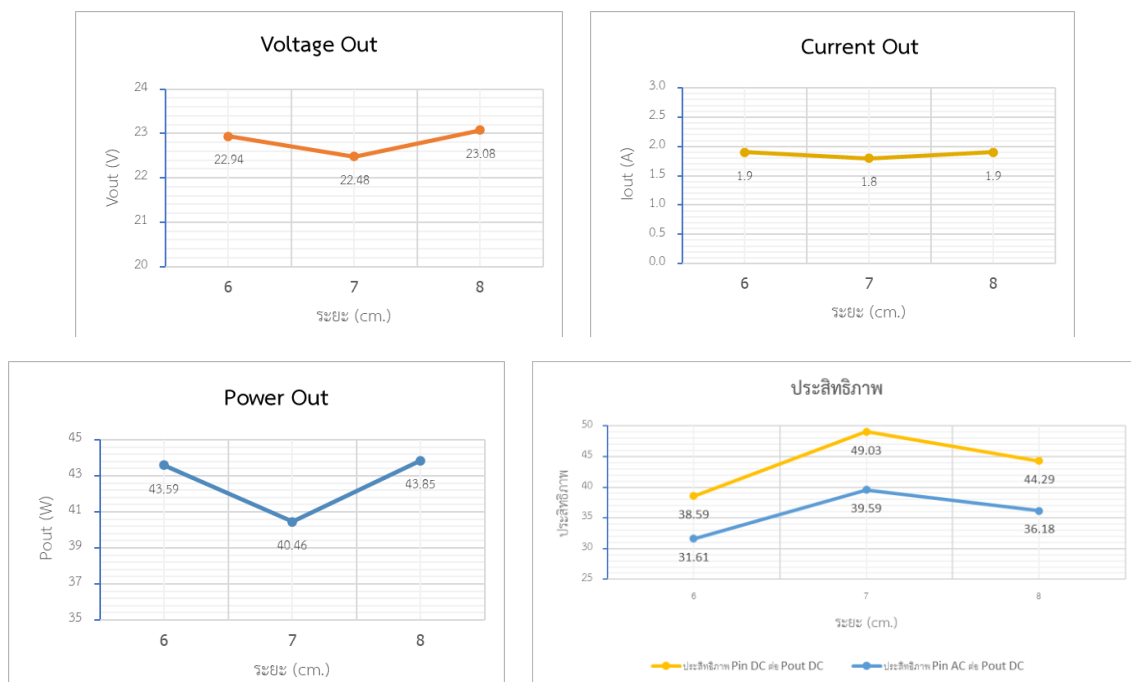
ภาพที่ 4-14 ระยะห่างของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาคส่ง กับขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าภาครับ

4.2.2 ทดลองชุดสาธิตระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

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

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

ระยะห่าง ของขดลวด (cm.)	ฝั่งขดส่ง						ฝั่งขดรับ			$\eta \rightarrow$ EFF (ประสิทธิภาพ) DC	$\eta \rightarrow$ 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 4-15 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

เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] Xiaolin Mou, and Hongjian Sun. (2015). “Wireless Power Transfer: Survey and Roadmap”. *IEEE Wireless Communications*, 20(4), 140-145.
- [3] 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.
- [4] Pichet Wisartpong. (2021) “A Review of Wireless Power Transfer”. *ENGINEERING TRANSACTION*. 24(51), 162-169.
- [5] ชัยปดินทร์ อัครเวฬุกุล และสายชล หน่อชาย. (2557). *การส่งพลังงานไฟฟ้าโดยหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก*. [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [6] ธนพล ตริธรรมานุรักษ์, จิรณัฐ ทัดจำปา, ศุภวิชญ์หลักบุญ, สรอรจ เทียมศรีทัศนากร, ภูมิ ศิลาพันธ์ และ วินัย ใจกล้า. (2564). *การสร้างและทดสอบเครื่องส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย*. วารสารงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์โดยสมาคม ECTI, 64(1), 28-33.
- [7] ชาญณรงค์ เรืองขจร. (2562). *แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า*. [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [8] บุญทัน สนั่นน้ำหนัก, อติศร นวลอ่อน, สรายุตร์ สวัสดิ์วงษ์ชัย, วันทนา สุขุมณี, บุญยัง สิงห์เจริญ, สันติ साแก้ว และพงศกร ตอรัมย์. (2566). *ชุดสาธิตการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย*. วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี, 66(2), 23-33.
- [9] ภริดา จีบกล้า. (2563). *การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัตด้วยความถี่เรโซแนนซ์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก*. [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [10] ผ่านสื่อและภาพลักษณ์องค์กร บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). (2561). *รถไฟฟ้าเปลี่ยนโลก*. ปตท.
- [11] ทวีศักดิ์ สมานชื่น, กมล จิรเสรีอมรกุล, ไชยรินทร์ อัครวโรตม, สาธิต มังคลาจารย์, และ ธรรมวฤทธิ์ สิงห์วิลัย. (2563). *รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการ “การส่งพลังงานไร้สายสำหรับการประจุพลังงานยานยนต์ไฟฟ้า (ระยะที่ 1)”*. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.