

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย
สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

MATHEMATICAL MODEL OF WIRELESS POWER TRANSFER
FOR ELECTRIC VEHICLE

ชาญณรงค์ เรืองขจร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย
สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

ชาญณรงค์ เรืองขจร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
ชื่อ – นามสกุล	นายชาญณรงค์ เรืองขจร
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

ปัจจุบันนี้ยานยนต์ไฟฟ้าถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายซึ่งยานยนต์ไฟฟ้าใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่แบบประจุใหม่ได้เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกลในการขับเคลื่อน ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาดมีผลดีต่อสภาพแวดล้อมแตกต่างกับยานยนต์ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อนดังนั้นความนิยมของยานยนต์ไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมยานยนต์จึงเพิ่มขึ้นอย่างแพร่หลาย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำพื้นฐานของฟาราเดย์และหลักการเหนี่ยวนำวงจรรเรโซแนนซ์ โดยงานวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นนี้จะเปลี่ยนรูปแบบพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานแม่เหล็กและส่งไปยังตัวรับพลังงานผ่านอากาศ ซึ่งตัวรับพลังงานจะเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กกลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อมาประจุให้กับแบตเตอรี่ ซึ่งจะให้หลักการนี้ออกแบบและสร้างวงจรประจุแบตเตอรี่ไร้สายให้กับยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งมีข้อดีคือ ทำให้เกิดความสะดวกสบายแก่ผู้ใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต

ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ไฟฟ้าของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ระยะตั้งแต่ 2 – 12 เซนติเมตร พบว่า ที่ระยะ 10 เซนติเมตร ให้ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า รวมถึง กำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด ที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 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

คำสำคัญ : การส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย วงจรรเรโซแนนซ์ ยานยนต์ไฟฟ้า

Thesis Title Mathematical Model of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications
Name – Surname Mr. Channarong Rueangkachon
Program Electrical Engineering
Thesis Advisor Associate Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
Academic Year 2019

ABSTRACT

Nowadays, electric vehicles are widely used by drawing electrical energy from a rechargeable battery. The change of electrical energy into mechanical energy for driving is environmental-friendly energy, compared to fuel cars. Therefore, the popularity of electric vehicles in the automotive industry has widely increased.

This study proposed a mathematical model of wireless electric energy transfer system for electric vehicle applications. Based on Faraday's law and the principle of resonance circuit, this can transform electrical energy to magnetic energy and transmit the power through air gap. The energy receiver transformed the magnetic energy back to electrical energy for charging the battery. The design of wireless power transfer for electric vehicles was convenient to the electric vehicles drivers in the future.

The result of simulation showed that the model of wireless power transfer system for electric vehicles was designed of various parameters at the distance of 2-12 cm. It was found that the optimal distance of air gap was 10 cm. The maximum output voltage was 104.84 V. while the output current was 10.48 A. The maximum power was 1,098.72 W. The efficiency was quite low at 35.5%. The best efficiency range in air gap was 2 cm. at the output voltage of 26.37 V., whereas the output current was 2.63 A. and the output power was 69.35 W. This study can be verified that the proposed method can be the principle design of wireless power transfer for electric vehicle in the future work.

Keywords: wireless power transfer, resonant circuit, electric vehicle

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือ คำแนะนำ สถานที่ สิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก จากท่าน อาจารย์ รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาอันมีค่ายิ่ง เพื่อให้คำแนะนำ ตลอดจนชี้แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอกราบ ขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.นภาพร พ่วงพรพิทักษ์และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประมุข อุณห เลขกะ ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความ สมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอา หลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจ และ สนับสนุนการเรียนการศึกษา ขอขอบคุณ ดร.ยุทธนา คงจิ้น ที่มอบองค์ความรู้ต่าง ๆ รวมถึงให้คำแนะนำ ในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ พี่ ๆ ชาว PSRC Lab ทุกคนที่คอยให้กำลังใจเสมอมา ขอขอบใจเพื่อน นักศึกษาระดับปริญญาโททุกคนที่ให้กำลังใจในการดำเนินกิจกรรมการวิจัยจนได้ความสมบูรณ์ของงาน ขอขอบคุณบุคลากร บัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของ การศึกษาและทำวิจัย

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มี พระคุณทุกท่าน

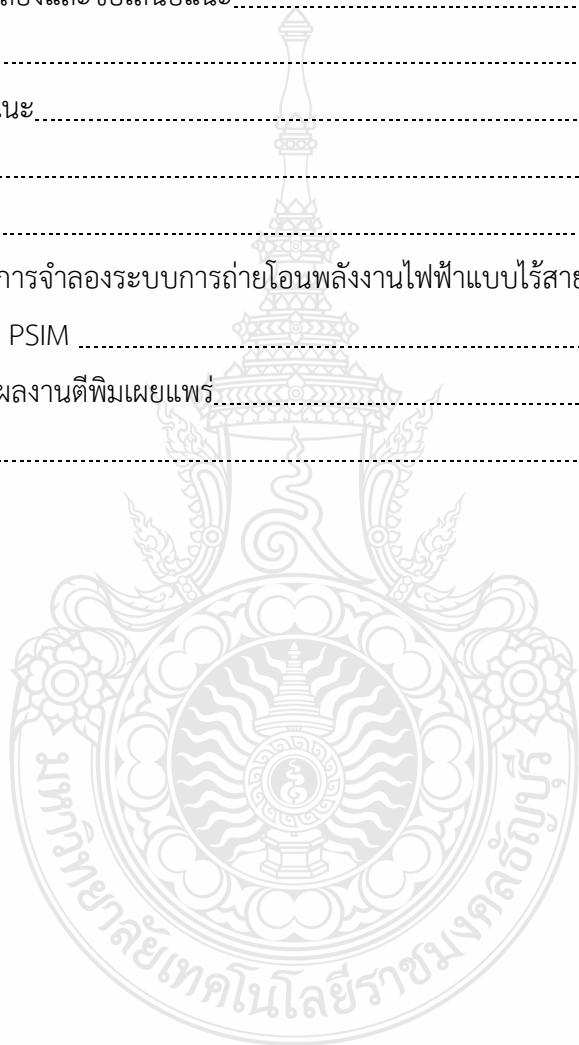
ชาญณรงค์ เรืองขจร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	[3]
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	[4]
กิตติกรรมประกาศ.....	[5]
สารบัญ.....	[6]
สารบัญรูป.....	[8]
สารบัญตาราง.....	[9]
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	12
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	13
1.3 สมมุติฐานงานวิจัย.....	13
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	13
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	14
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.2 ยานยนต์ไฟฟ้า.....	17
2.3 เทคโนโลยีการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย.....	19
2.4 วงจรเรียงกระแส.....	21
2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์หรือวงจรคอนเวอร์เตอร์.....	25
2.6 วงจรเรโซแนนซ์.....	27
2.7 ตัวเหนี่ยวนำ.....	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	39
3.1 การออกแบบระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย.....	37
3.2 วิธีการทดสอบ.....	43
3.3 สรุป.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	44
4.1 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย.....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการทดสอบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ระยะต่าง ๆ กับโหลดขนาด 1 กิโลวัตต์	45
4.3 สรุป	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	56
5.1 สรุป.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	57
บรรณานุกรม.....	58
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ข การจำลองระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย ด้วยโปรแกรม PSIM	62
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	77



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 เทคโนโลยีการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย	1
รูปที่ 2.1 ยานยนต์ไฟฟ้า.....	17
รูปที่ 2.2 ประเภทของยานยนต์ไฟฟ้า.....	18
รูปที่ 2.3 เทคโนโลยีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย	19
รูปที่ 2.4 โครงสร้างแบบอนุกรม-อนุกรม	20
รูปที่ 2.5 โครงสร้างแบบขนาน-ขนาน	20
รูปที่ 2.6 โครงสร้างแบบขนาน-อนุกรม	20
รูปที่ 2.7 โครงสร้างแบบอนุกรม-ขนาน	21
รูปที่ 2.8 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	22
รูปที่ 2.9 กราฟแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	22
รูปที่ 2.10 กราฟแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรกติไฟร์หลังใส่ C ฟิลเตอร์แรงดัน	24
รูปที่ 2.11 วงจรพื้นฐานของฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์	25
รูปที่ 2.12 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์	26
รูปที่ 2.13 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม	28
รูปที่ 2.14 กราฟระหว่างความต้านทานจินตภาพกับความถี่.....	28
รูปที่ 2.15 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมเมื่อ $Z_T = R$	29
รูปที่ 2.16 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน	30
รูปที่ 2.17 ตัวเหนี่ยวนำ	31
รูปที่ 2.18 เส้นฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดที่ 1 ส่งผลไปยังขดลวดที่ 2	31
รูปที่ 2.19 รูปวงจรสมมูลความเหนี่ยวนำ.....	33
รูปที่ 2.20 ฟลักซ์แม่เหล็กแบบเสริมกัน	33
รูปที่ 2.21 ฟลักซ์แม่เหล็กแบบหักล้างกัน	33
รูปที่ 2.22 ภาพตัดขวางของขดลวดเหนี่ยวนำแบบวงกลมแบน	35
รูปที่ 3.1 ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย	37
รูปที่ 3.2 แบบจำลองระบบถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย	48

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.3 จำลองวงจรเรียงกระแสในโปรแกรม MATLAB/Simulink.....	39
รูปที่ 3.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอินพุต/เอาต์พุตเมื่อผ่านวงจรเรียงกระแส.....	39
รูปที่ 3.5 จำลองวงจรอินเวอร์เตอร์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink.....	40
รูปที่ 3.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอินพุต/เอาต์พุตเมื่อผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์.....	41
รูปที่ 3.7 วงจรเรียงกระแสฝั่งรับ	42
รูปที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่าง 2 เซนติเมตร	45
รูปที่ 4.2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่าง 4 เซนติเมตร	45
รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่าง 6 เซนติเมตร	46
รูปที่ 4.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่าง 8 เซนติเมตร	46
รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่าง 10 เซนติเมตร	47
รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่าง 12 เซนติเมตร	47
รูปที่ 4.7 กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ภาคส่ง	49
รูปที่ 4.8 กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ภาครับ	49
รูปที่ 4.9 สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ระยะ 2 เซนติเมตร	50
รูปที่ 4.10 สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ระยะ 4 เซนติเมตร	50
รูปที่ 4.11 สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ระยะ 6 เซนติเมตร	51
รูปที่ 4.12 สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ระยะ 8 เซนติเมตร	51
รูปที่ 4.13 สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ระยะ 10 เซนติเมตร	52
รูปที่ 4.14 สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ระยะ 12 เซนติเมตร	52
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกับระยะห่างระหว่างขดลวด	54
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ประสิทธิภาพและระยะห่างระหว่างขดลวด	54

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
ตารางที่ 2.2 การถ่ายโอนอำนาจและประสิทธิภาพสำหรับประเภทของการชดเชยที่แตกต่างกัน ...	21
ตารางที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้า และ กระแสไฟฟ้า ที่ระยะช่องว่างอากาศ 2 - 12 เซนติเมตร	44
ตารางที่ 4.2 กำลังไฟฟ้าที่ระยะ 2 - 12 เซนติเมตร	48
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย	53



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

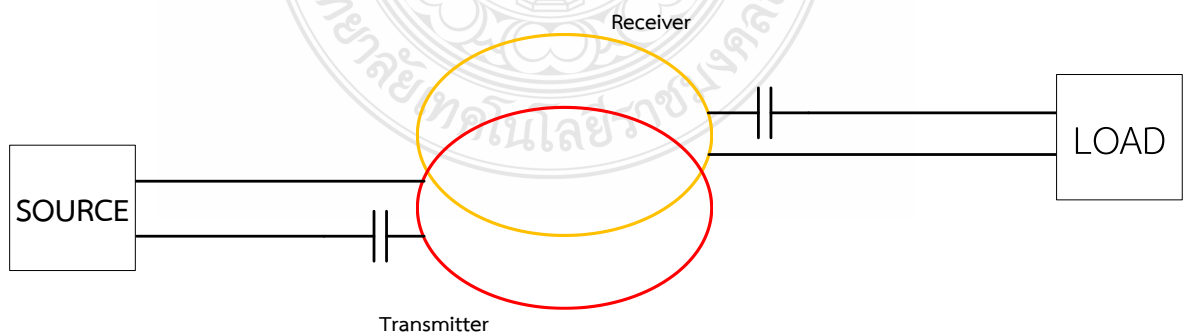
\vec{B}	ขนาดของสนามแม่เหล็ก (เทสลา หรือ เวเบอร์ต่อตารางเมตร)
ϕ	ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่ A (เวเบอร์)
A	พื้นที่ที่ฟลักซ์พุ่งผ่าน (ตารางเมตร)
θ	มุมระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กกับเส้นตรงฉากกับพื้น
B	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (T)
μ_0	ความซึมแม่เหล็ก ($4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb} / \text{A.m}$)
a	ระยะห่างขดลวด (m)
I	กระแสไฟฟ้า (A)
N	จำนวนขดลวด
I_{dc}	ค่ากระแสเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
I_m	ค่ากระแสสูงสุดของสัญญาณไฟสลับ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
V_{dc}	ค่าแรงดันเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
V_m	ค่าแรงดันสูงสุดของสัญญาณไฟสลับ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
I_{rms}	ค่ากระแสอาร์เอ็มเอส มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
V_{rms}	ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
f_0	ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในวงจร มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)
L	ค่าของขดลวดในวงจร มีหน่วยเป็น เฮนรี (H)
C	ค่าของตัวเก็บประจุในวงจร มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)
M	ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดทั้งสอง
K	ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมร่วม
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในขดลวด
W	เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด
S	ระยะห่างระหว่างรอบของขดลวด

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทุกวันนี้เราอยู่อาศัยในเมืองที่อัดแน่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าปีละ 300 ล้านตันจากการใช้ยานพาหนะบนท้องถนน เมื่อผนวกรวมกับคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมหาศาลจากภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือนด้วยแล้ว จึงส่งผลให้อุณหภูมิของโลกผันแปรและเกิดปัญหามลภาวะทางอากาศขั้นรุนแรงทั่วโลก เริ่มต้นตัวและออกมาตรการรวมถึงความร่วมมือต่าง ๆ อย่างจริงจังในการช่วยลดปัญหาข้างต้น เรียกได้ว่าเป็นการจับมือพร้อมใจก้าวไปในทิศทางเดียวกัน ในการรักษาโลกให้หายป่วย เปลี่ยนบรรยากาศของโลกใบนี้ให้บริสุทธิ์ ซึ่งทางเลือกหนึ่งในการช่วยลดปัญหา คือช่วยกันรณรงค์การใช้ยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งใช้เป็น “พลังงานสะอาด” จึงเป็นที่กล่าวถึงกันมากทั่วโลกในฐานะทางเลือกในการจัดปัญหาดังกล่าว และเนื่องด้วยปริมาณเชื้อเพลิงปิโตรเลียมที่มีอยู่จำกัดและกำลังหมดไปเรื่อย ๆ หลายประเทศรวมถึงประเทศไทยพยายามพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น เช่น การลดความดังเสียงเครื่องยนต์ สตาร์ทเครื่องได้ง่ายขึ้น ระยะการเดินทางยาวไกลขึ้น ต้นทุนที่ลดลง ตลอดจนการร่วมมือกันส่งเสริมการวิจัย พัฒนาและลงทุนในอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า และการเพิ่มจำนวนสถานีชาร์จไฟฟ้า ฯลฯ เหนือสิ่งอื่นใด สิ่งที่จะต้องเตรียมพร้อมอย่างมากที่สุด คือการสร้างความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้าให้กับสาธารณชน ซึ่งในปัจจุบันยานยนต์เริ่มมีการจัดจำหน่ายกันอย่างแพร่หลาย แต่รูปแบบการชาร์จยังเป็นการชาร์จแบบ ปลั๊ก-อินไฮบริด (Plug-in Hybrid) [1] คือการชาร์จพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธีการเสียบปลั๊กชาร์จพลังงาน ซึ่งในปัจจุบันมีการนำเสนอเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่ช่วยในการชาร์จพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้ารวมถึงเทคโนโลยีการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless Power Transfer : WPT) [2]



รูปที่ 1.1 เทคโนโลยีการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (EV) ซึ่งใช้ไฟฟ้าพลังงานเป็นแหล่งพลังงานเสริมพลังงานอุปกรณ์ (เครื่องชาร์จ) [3] เทคโนโลยีการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายนั้นจะเข้ามาช่วยในการลดปัญหาในการที่ต้องเดินสายไฟฟ้าจากตู้ชาร์จเจอร์มายังยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันมีงานวิจัยต่าง ๆ ที่ตอบสนองเทคโนโลยีการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายนั้น ด้วยข้อปัญหาหลังของระบบการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายคือพลังงานที่สูญเสียในช่องว่างอากาศ (Air Gap) กล่าวคือเมื่อระยะของช่องว่างอากาศที่เพิ่มมากขึ้นเท่าไร ทำให้พลังงานยิ่งสูญเสีย ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพลดลงตามลำดับ

จากรายละเอียดข้างต้นผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงมีแนวคิดในการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (Mathematical Model OF Wireless Power Transfer For Electric Vehicle) ขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายขึ้น ซึ่งเป็นแนวคิดในการพัฒนาการเทคโนโลยีทางด้านยานยนต์ไฟฟ้า และลดปัญหาความยุ่งยากในการเสียบปลั๊ก

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดสองชุด

1.2.2 เพื่อจำลองระบบการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ของระบบถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

1.2.3 เพื่อศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพของระบบถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาและวิเคราะห์ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมกับยานยนต์ไฟฟ้า

1.3.2 ศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

1.3.3 ออกแบบและจำลองระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายในโปรแกรม PSIM

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านช่องว่างอากาศที่ระยะห่างระหว่างขดลวดที่ระยะ 10 เซนติเมตร

1.4.2 ออกแบบหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กของขดลวดสองชุดในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

1.4.3 วิเคราะห์ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ขนาด 1 กิโลวัตต์

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาและจำลองการทำงานของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมกับยานพาหนะไฟฟ้า โดยทำงานจำลองในโปรแกรม PSIM ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

1.5.2 ศึกษาการจำลองระบบการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย โดยการคำนวณ และ โปรแกรม PSIM

1.5.3 นำผลที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ มาวิเคราะห์ ทำการสรุป วิเคราะห์ผลการทดลอง และอภิปรายผลการวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เข้าใจถึงหลักการทำงานของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

1.6.2 เข้าใจถึงการจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

1.6.3 เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองคณิตศาสตร์ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยจะประกอบด้วยดังนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันได้รับความสนใจอย่างมาก โดยสามารถนำเสนอบทสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและนำเอาองค์ความรู้สาระสำคัญนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอโดยสามารถนำเสนอได้ตามลำดับดังนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2014	Werachet Khan-ngern และ Heinz Zenkner [4]	นำเสนอระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยส่งกำลังโดยใช้ความถี่ 6.78 MHz ที่ช่องว่างอากาศ 10 ซม. ถึง 20 ซม. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพสูงสุดมากถึง 80% จากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ ซึ่งการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้การส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายโดยสาธิตกำลังชาร์จ ที่ 10 W
2016	Tomoki Onishi และคณะ [5]	นำเสนอ ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าที่ออกแบบเพื่อใช้งานให้เหมาะสมกับโหลดยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งการออกแบบระบบอยู่ที่ 1 kW. ที่ความถี่ 85 kHz. โดยใช้การเชื่อมโยงแบบ อนุกรม – ขนาน (Series – Paralle)
2016	Erdem Asa และคณะ [6]	นำเสนอ ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายแบบไดนามิก ทดสอบระบบที่ช่องว่างอากาศ 8 นิ้ว อินพุต 120 V. สร้างเอาต์พุต 0 – 100 V. ที่โหลดขนาด 700 W. ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 150 kHz.

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี	นักวิจัย	สาระสำคัญ
2018	Seog Y. Jeong Van X. Thai Jun H. Park และ Chun T. Rim [7]	นำเสนอ metal object detection (MOD) System และ foreign object detection (FOD) ที่สามารถตรวจจับของเครื่องส่ง (transmitter) ในระบบการชาร์จพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งระบบของ MOD ทำงานที่ 85 kHz. ซึ่งแรงดันเอาต์พุตลดลงร้อยละ 22.7 ที่ช่องว่างอากาศ 5 mm.
2018	Zhumeng Zhu Chuanlin Zhang และ Dong Li [8]	นำเสนอการออกแบบและปรับแต่งพารามิเตอร์แบบใหม่ วิธีการสำหรับระบบการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย โดยการจำลองการทำงานของระบบลงในโปรแกรม MATLAB / SIMULINK โดยประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง กำลังขับของระบบคือ 5 W และประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย อยู่ที่ 79.5% นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่ออกแบบได้นำไปใช้งานร่วมกับการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ผลที่ได้ที่ กำลังขับโหลดเท่าเดิม คือ 5 W ประสิทธิภาพการส่งพลังงาน 89.4% และค่าการเหนี่ยวนำ 6.35 μ H

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นทำให้ทราบถึงรูปแบบของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ออกแบบมาเพื่อใช้งานกับยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งการออกแบบระบบไฟฟ้าจำเป็นต้องมีตัวแปรต่าง ๆ เช่นค่าตัวเหนี่ยวนำ ค่าตัวเก็บประจุ ความถี่เรโซแนนต์ รวมถึงระยะห่างระหว่างขดลวดฝั่งส่ง และฝั่งรับ ซึ่งตัวแปรที่ได้กล่าวมานั้นมีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือเมื่อค่าตัวแปรใด ๆ เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลทำให้ตัวแปรส่วนที่เหลือต้องมีการคำนวณเพื่อเปลี่ยนแปลงตาม เพื่อให้ค่าประสิทธิภาพได้ผลดีที่สุด ซึ่งในจัดทำวิทยานิพนธ์ให้ครั้งนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อออกแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

2.2 ยานยนต์ไฟฟ้า

ยานยนต์ไฟฟ้า คือ รถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งเป็นพลังงานไฟฟ้าจะเก็บอยู่ในรูปแบบของแบตเตอรี่ หรืออุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอื่น ๆ และด้วยข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ให้แรงบิดได้ทันทีทำให้รถพลังงานไฟฟ้ามีอัตราเร่งที่เรียบและรวดเร็วโดยจะมีชุดอุปกรณ์หลักคือ ตัวแบตเตอรี่ที่มีความจุพลังงานไฟฟ้าสูงซึ่งเก็บไว้ในรถและตัวมอเตอร์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนโดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ส่วนมากเรื่องของระยะเวลาและระยะทางของรถไฟฟ้าจะมากขึ้นหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดความจุของแบตเตอรี่เป็นสำคัญ [9]



รูปที่ 2.1 ยานยนต์ไฟฟ้า [9]

2.2.1 ประเภทของยานยนต์ไฟฟ้า

ยานยนต์ไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้อยู่ 5 ประเภท

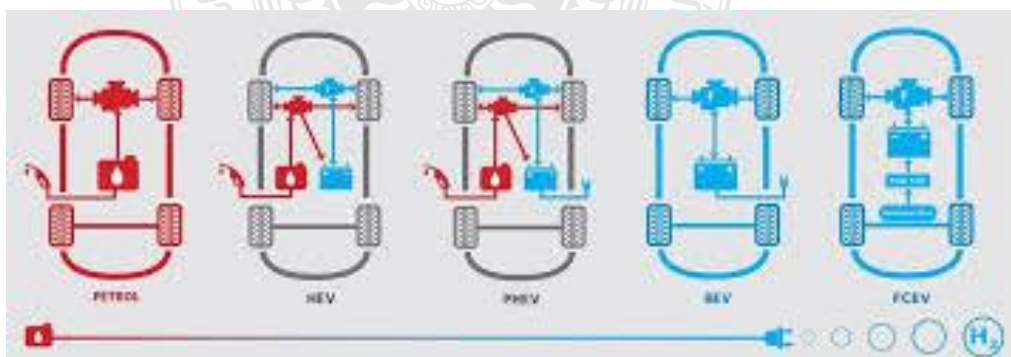
1) ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด (Hybrid Electric Vehicle, HEVs) ประกอบด้วยเครื่องยนต์ลูกสูบเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนหลัก ซึ่งใช้เชื้อเพลิงที่บรรจุในยานยนต์และทำงานร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อเพิ่มกำลังของยานยนต์ให้เคลื่อนที่ ทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จึงมีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่ายานยนต์ปกติ กำลังที่ผลิตจากเครื่องยนต์และมอเตอร์ไฟฟ้า ทำให้อัตราเร่งของยานยนต์สูงกว่ายานยนต์ที่มีเครื่องยนต์ลูกสูบขนาดเดียวกัน รวมทั้งยังสามารถนำพลังงานกลที่เหลือหรือไม่ใช้ประโยชน์เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเก็บในแบตเตอรี่ [10]

2) ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดปลั๊กอิน (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEVs) เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่พัฒนาต่อมาจากยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด โดยสามารถประจุพลังงานไฟฟ้าได้จากแหล่งภายนอก (Plug-in) ทำให้อานยนต์สามารถใช้พลังงานพร้อมกันจาก 2-แหล่ง จึงสามารถวิ่งในระยะทางและความเร็วที่เพิ่มขึ้นด้วยพลังงานจากไฟฟ้าโดยตรง [11]

3) ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle, BEVs) เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่มีเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังให้ยานยนต์เคลื่อนที่ และใช้พลังงานไฟฟ้าที่อยู่ในแบตเตอรี่เท่านั้น ไม่มีเครื่องยนต์อื่นในยานยนต์ดังนั้นระยะทางการวิ่งของยานยนต์จึงขึ้นอยู่กับการออกแบบขนาดและชนิดของแบตเตอรี่ รวมทั้งน้ำหนักบรรทุก อย่างไรก็ตามในปัจจุบันบริษัทรถยนต์ได้มีการผลิตและจำหน่ายยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ขึ้นในประเทศพัฒนาแล้ว เช่น ญี่ปุ่น ยุโรป และสหรัฐอเมริกา เป็นต้น ทำให้เทคโนโลยีรถยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่มีความเป็นไปได้มากขึ้น [12]

4) ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEVs) เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่มีเซลล์เชื้อเพลิง(Fuel cell) ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง รถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงมีข้อดีหลายๆ ประการ ข้อดีที่สำคัญที่สุดคือ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าสูงถึง 60% และความจุพลังงานจำเพาะที่สูงกว่าแบตเตอรี่ที่มีอยู่ในปัจจุบัน รถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นเทคโนโลยีที่บริษัทรถยนต์เชื่อว่าเป็นคำตอบที่แท้จริงของพลังงานสะอาดในอนาคต อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในเรื่องการผลิตไฮโดรเจนและโครงสร้างพื้นฐาน [13]

5) รถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มระยะ (Extended Range Electric Vehicle : EREV) เป็นรถยนต์ไฟฟ้าอีกประเภทหนึ่ง ที่ขนาดของแบตเตอรี่มีค่อนข้างมีขนาดใหญ่ ซึ่งจะต่อร่วมกับเครื่องยนต์ที่มีขนาดเล็กลง เนื่องจากเครื่องยนต์มีหน้าที่ช่วยในการกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเท่านั้น ซึ่งพลังงานขับเคลื่อนส่วนใหญ่จะมาจากแบตเตอรี่เป็นหลัก [14]



รูปที่ 2.2 ประเภทของยานยนต์ไฟฟ้า [14]

2.3 เทคโนโลยีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

เทคโนโลยีการการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายนั้นเริ่มต้นมาตั้งแต่ ค.ศ. 1831 ตอนที่นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ Michael Faraday คิดค้นการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแม่เหล็กหรือ Electro-Magnetic Induction ซึ่งใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductor) เป็นหัวใจหลักการชาร์จแบบใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ หรือ Inductive Charging นั้น โดยหลักการจะมี 2 ขดลวดเหนี่ยวนำที่ถ่ายโอนพลังงานกันด้วยสนามแม่เหล็ก ขดลวดหนึ่งฝังไว้ในยานยนต์ไฟฟ้า EV ส่วนอีกขดลวดหนึ่งฝังไว้ที่ใดก็ได้ แต่ส่วนมากจะฝังไว้ให้ใกล้กับขดลวดแรกตอนชาร์จ เพื่อให้การชาร์จมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อนำไฟฟ้าที่มาจากเต้าเสียบ ผ่านขดลวดแรก ขดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมา สนามแม่เหล็กนี้จะไปคล้องกับขดลวดที่สองที่อยู่ภายในยานยนต์ไฟฟ้าการที่ขดลวดที่สองมีเส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่าน จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้น และทำให้ขดลวดที่สองมีกระแสไฟฟ้า ที่ไปชาร์จแบตเตอรี่ภายในยานยนต์ไฟฟ้า



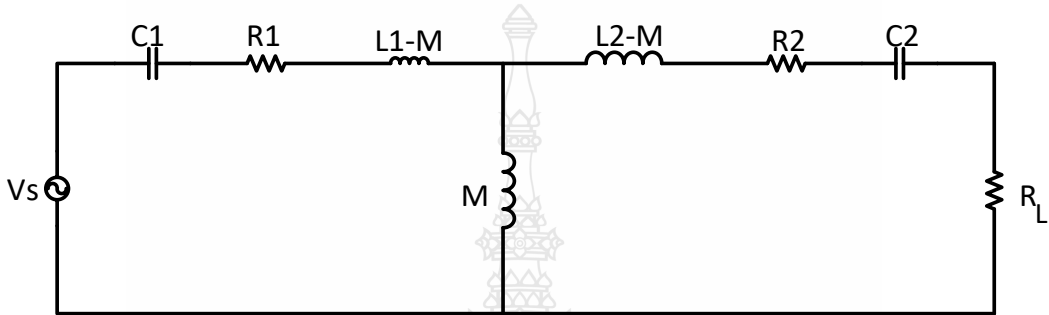
รูปที่ 2.3 เทคโนโลยีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย [15]

2.3.1 การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก

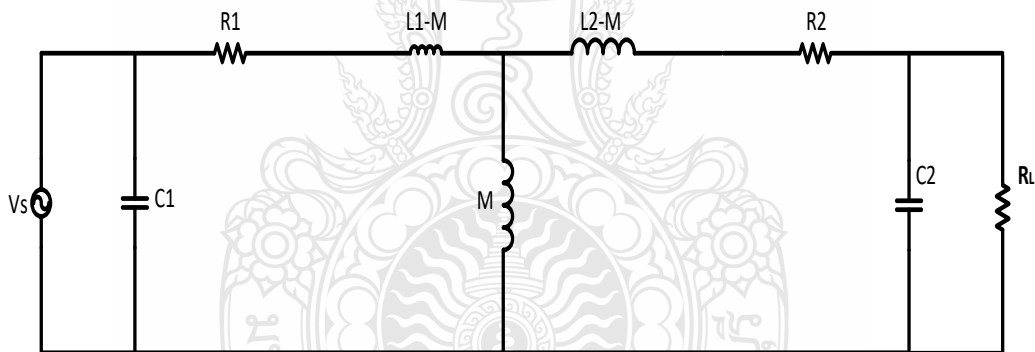
การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กนี้ อาศัยพฤติกรรมของการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าเมื่อสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับปรากฏที่สายอากาศ สนามแม่เหล็กนี้เมื่อเคลื่อนผ่านตัวนำหรือสายอากาศที่ฝังรับ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น โดยกระแสไฟฟ้าที่ได้มีลักษณะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเช่นกันพฤติกรรมของการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กนี้โดยมากอาศัยลักษณะสนามใกล้ (near field) ซึ่งต่อมา นิโคโนา เทสลา ได้พัฒนาการเหนี่ยวนำที่มีความถี่เรโซแนนซ์ขึ้น เพื่อให้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กมาก ทำให้สามารถส่งพลังงานไร้สายได้ในระยะไกลขึ้น อย่างไรก็ตามระยะทางที่ได้จากการส่งพลังงานไร้สายโดยอาศัยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กนี้ มักจะอยู่ในระยะกลาง (medium range) กล่าวคือมีระยะทางไม่เกิน 1 เมตร

การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ความถี่เรโซแนนซ์นี้ เป็นการสร้างให้พฤติกรรมของแหล่งกำเนิด (หรือนิยมเรียกว่า เครื่องส่ง) และ ปลายทาง (หรือนิยมเรียกว่า

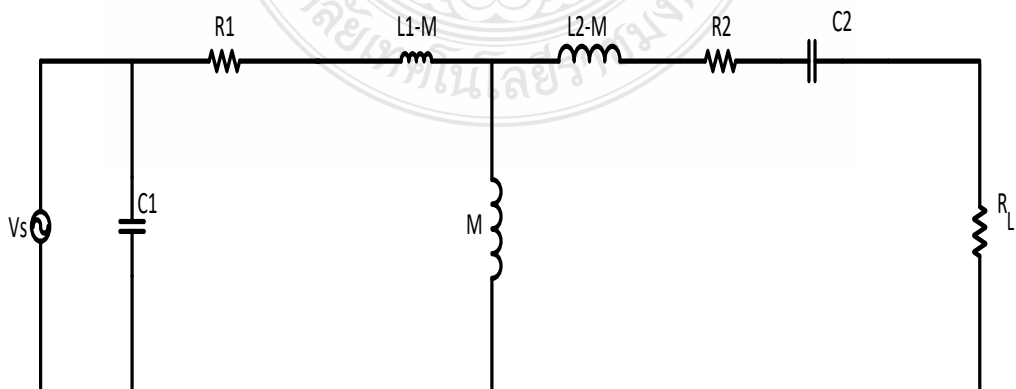
เครื่องรับ) เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่หนึ่งๆโดยองค์ประกอบของการเกิดเรโซแนนซ์ ขึ้นกับค่าความเหนี่ยวนำ (inductance) ค่าความประจุ (capacitance) ของระบบเครื่องส่งและเครื่องรับในขนาดเดียวกัน ดังกล่าวนี้ทำให้สามารถพิจารณาโครงสร้างของระบบส่งพลังงานไร้สาย ด้วยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก โดยจำแนกโครงสร้างการเรโซแนนซ์ได้ 4 ชนิด ได้แก่ โครงสร้างอนุกรม-อนุกรม , โครงสร้างอนุกรม-ขนาน,โครงสร้างขนาน-อนุกรมและโครงสร้างขนาน-ขนาน [16]



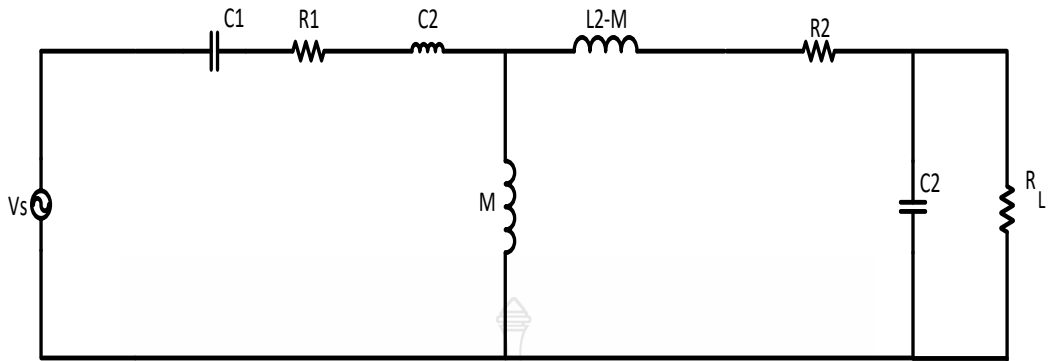
รูปที่ 2.4 โครงสร้างแบบอนุกรม-อนุกรม



รูปที่ 2.5 โครงสร้างแบบขนาน-ขนาน



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแบบขนาน-อนุกรม



รูปที่ 2.7 โครงสร้างแบบอนุกรม-ขนาน

ตารางที่ 2.2 การถ่ายโอนอำนาจและประสิทธิภาพสำหรับประเภทของการชดเชยที่แตกต่างกัน

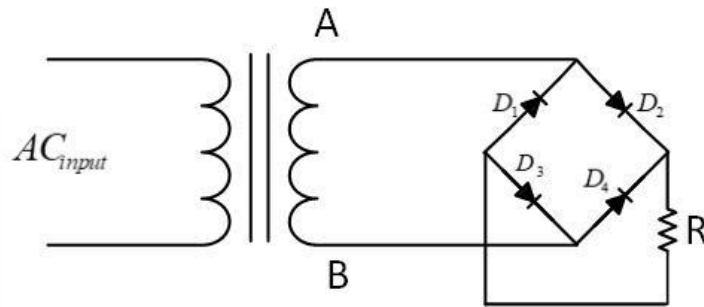
เทคโนโลยี	ถ่ายโอนพลังงาน	ประสิทธิภาพ
ไม่มีตัวชดเชย	$\frac{\omega^2 M^2 (R_2 + R_L)}{\omega^2 M^2 + (R_2 + R_L)} I_1^2$	$\frac{R_L}{R_L + R_2 + R_1 \left(\frac{R_L + R_2 + R_1}{\omega_0^2 M^2} \right)}$
SS	$\frac{\omega^4 C_2^2 M^2 (R_2 + R_L)}{(\omega^2 C_2 L_2 - 1)^2 + \omega^2 C_2^2 (R_2 + R_L)^2} I_1^2$	$\frac{R_L}{(R_L + R_2) \left(1 + R_1 \left(\frac{R_L + R_2}{\omega_0^2 M^2} \right) \right)}$
SP	$\frac{M_2 \omega^2 (R_2 + R_L - \omega^2 R_L C_2 L_2)}{(R_2 + R_L - \omega^2 R_L C_2 L_2)^2 + \omega^2 (L_2 + R_L C_2 R_2)} I_1^2$	$\frac{R_L}{R_L + R_2 + \frac{R_2 R_2^2}{\omega_0^2 L_2^2} + \frac{R_1 R_2^2}{\omega_0^2 M_2} + \frac{R_1 \left(L_2 \omega^2 + \frac{R_2 R_L}{\omega^2 L_2} \right)^2}{\omega_0^2 M^2}}$
PS	$\frac{\omega^4 C_2^2 M^2 (R_2 + R_L)}{(\omega^2 C_2 L_2 - 1)^2 + \omega^2 C_2^2 (R_2 + R_L)^2} I_1^2$	$\frac{R_L}{(R_1 + R_2) \left(1 + \frac{R_1 (R_2 + R_L)}{\omega_0^2 M^2} \right)}$
PP	$\frac{M^2 \omega^2 (R_2 + R_L - \omega^2 R_L C_2 L_2)}{(R_2 + R_L - \omega^2 R_L C_2 L_2)^2 + \omega^2 (L_2 + R_L C_2 R_2)^2} I_1^2$	$\frac{R_L}{R_L + R_2 + \frac{R_1 L_2^2}{M^2} \left(1 + \frac{R_2 R_L^2 M^2 + R_1 R_2^2 L_2^2}{\omega_0^2 M^2 L_2^2} \right)}$

หมายเหตุ S = อนุกรม P = ขนาน

2.4 วงจรเรียงกระแส

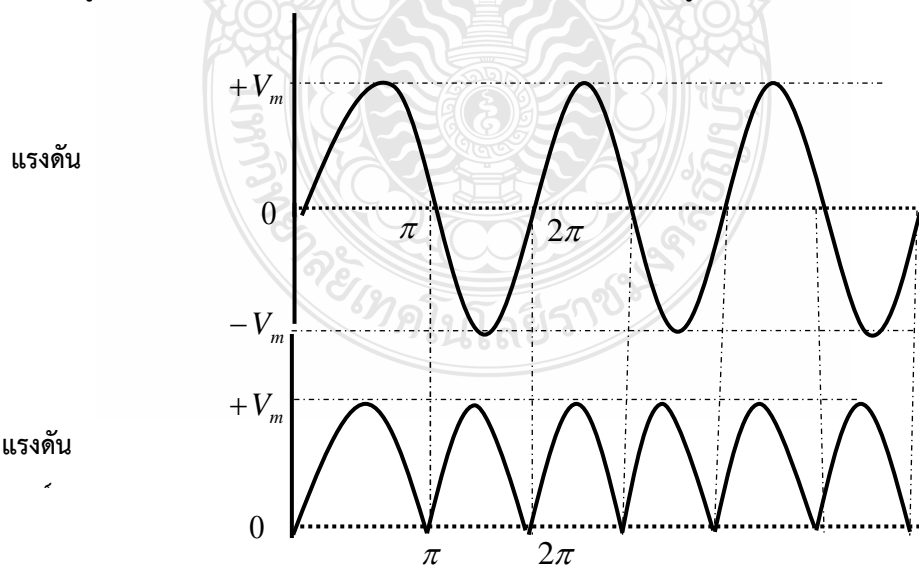
2.4.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Bridge Full Wave Rectifier) [17]

วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier) เรียกอีกแบบหนึ่ง คือวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะต่อเข้ากับ สองมุมของวงจรบริดจ์และเอาต์พุตจะถูกนำออกที่ สองมุมที่เหลือ ดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

สมมติว่าเมื่อขั้ว A ของขดทุติยภูมิมีค่าเป็นบวก และขั้ว B มีค่าเป็นลบการนำกระแสของไดโอดจะเริ่มจากจุดไดโอด D_2 และ D_3 อยู่ในลักษณะไปอัสตรงตั้งนั้นกระแสจึงไหลครบวงจรจากขั้ว A ผ่านไดโอด D_2 ผ่านตัวต้านทานโหลดและผ่านไดโอด D_3 แล้วกลับเข้าสู่ขั้ว B ของหม้อแปลง และเมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนข้างมาเป็นขั้วบวกที่ขั้ว B และเป็นค่าลบที่ขั้ว A การนำกระแสของไดโอดจะเปลี่ยนไป โดยเริ่มจากจุด B ของขดทุติยภูมิผ่าน D_4 ผ่านตัวต้านทานโหลดและผ่าน D_1 กลับเข้าขั้ว A ของหม้อแปลง ดังนั้นรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นจะได้สัญญาณเอาต์พุตทุกรูปคลื่นของสัญญาณอินพุต ซึ่งการคำนวณหาค่าโดยใช้สมการเดียวกันแต่จะให้ผลลัพธ์ดังนี้

$$I_{dc} = \frac{2I_m}{\pi} = 0.636I_m \quad (2.1)$$

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = 0.636V_m \quad (2.2)$$

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (2.4)$$

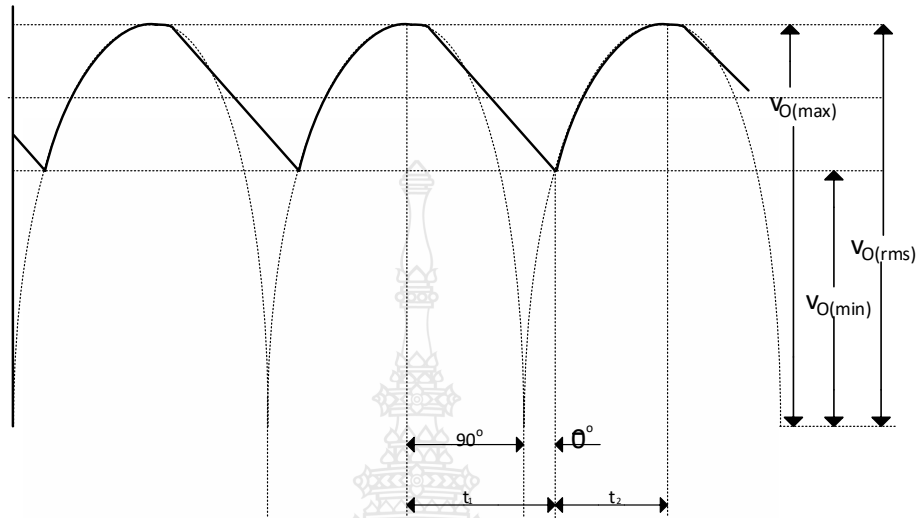
$$\text{ไดโอด } PIV = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (2.5)$$

- เมื่อ I_{dc} คือ ค่ากระแสเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
 I_m คือ ค่ากระแสสูงสุดของสัญญาณไฟกระแสสลับ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
 V_{dc} คือ ค่าแรงดันเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
 V_m คือ ค่าแรงดันสูงสุดของสัญญาณไฟกระแสสลับ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
 I_{rms} คือ ค่ากระแสอาร์เอ็มเอส มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
 V_{rms} คือ ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
 ไดโอด PIV คือ ขนาดแรงดันของไดโอด

2.3.2 วงจรฟลูเวฟฟิลเตอร์

ฟิลสเซตติงดีซีที่ได้จากวงจรเรกติไฟรนั้นเป็นค่าแรงดันเฉลี่ยหรือแรงดันดีซีก็ตามแต่ก็ยังไม่สามารถที่จะนำไปใช้งานได้ เนื่องจากแรงดันที่ได้ยังคงมีลักษณะเป็นคลื่นอยู่ ซึ่งมีผลต่อการทำงานในวงจรขยายเพราะจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการได้ ดังนั้นเมื่อนำไปใช้งานจะต้องนำเอาฟิลสเซ

ติดตั้งไปทำการกรองกระแสและแรงดันให้เรียบเสียก่อนโดยใช้วงจรฟลเตอร์ อุปกรณ์ที่ใช้ ในวงจรฟลเตอร์ ที่นิยมมากที่สุดคือ ตัวเก็บประจุซึ่งเรียกว่าตัวเก็บประจุฟลเตอร์ (capacitor filter) [18]



รูปที่ 2.10 กราฟแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรกติไฟร์หลังใส่ C ฟลเตอร์แรงดัน

วงจรฟลเตอร์เรกติไฟร์ที่ใช้เก็บประจุฟลเตอร์ รูปที่ 2.8 แสดงแรงดันเอาต์พุตของวงจรฟลเตอร์เรกติไฟร์ เวลาคายประจุของตัวเก็บประจุฟลเตอร์และแรงดันรีปเปิลจะมีค่าน้อยกว่าวงจรฮาลฟเวฟเรกติไฟร์ ดังสมการ

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{V_{O(\min)}}{V_{O(\max)}} \right) \quad (2.6)$$

$$t_1 = \text{time}_{90^\circ} + \text{time}_{\theta_1} \quad (2.7)$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{I_L \times t_1}{v_r} \quad (2.8)$$

- เมื่อ C คือ ค่าความจุของคาปาซิเตอร์ (μF)
 I_L คือ ค่ากระแสของโหลดสูงสุด มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
 v_r คือ ค่าแรงดันรีปเปิล มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

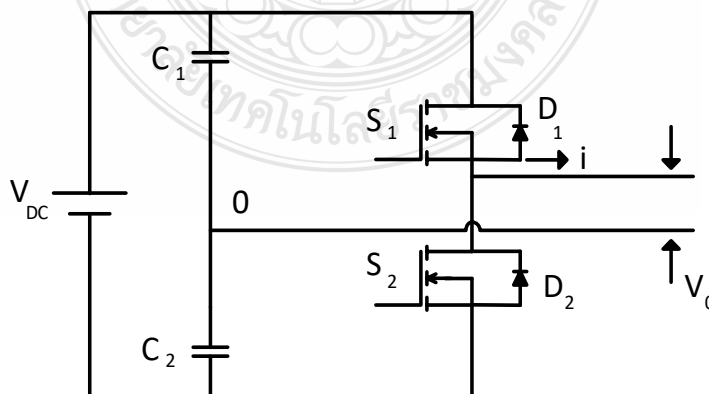
- t_1 คือ คาบเวลาในการคายประจุของตัวเก็บประจุฟิเตอร์ (ms)
- $V_{o(min)}$ คือ ค่าแรงดันกระแสเพื่อเอาต์พุตต่ำสุด (V)
- $V_{o(max)}$ คือ ค่าแรงดันกระแสเพื่อเอาต์พุตต่ำสุด (V)

2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์หรือวงจรคอนเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ คือ วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC to AC Converter) ทำงานโดยการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ตามขนาดและความถี่ที่ต้องการ แรงดันเอาต์พุตสามารถตั้งค่าให้คงที่หรือปรับค่าได้ตามต้องการที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง หรือเปลี่ยนความถี่ไปก็ได้ หากต้องการเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ สามารถทำได้โดยการรักษาระดับอัตราการขยายของอินเวอร์เตอร์ให้คงที่ด้วยการคงค่าความถี่ แล้วปรับแรงดันอินพุต ในทางตรงกันข้าม หากคงค่าแรงดันอินพุตแล้วเปลี่ยนแปลงอัตราการขยายของ อินเวอร์เตอร์โดยการปรับค่าความถี่ก็สามารถปรับเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุตได้เช่นกัน อัตราการขยายของอินเวอร์เตอร์สามารถหาได้จาก อัตราส่วนระหว่างค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เอาต์พุตต่อค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุต [19]

2.5.1 วงจรฮัลฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์

วงจรฮัลฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์จัดอยู่ในตระกูลเดียวกับพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์ แต่ลักษณะการจัดวงจรทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรมีแรงดันตกคร่อมขณะหยุดนำกระแสเพียงค่าแรงดันอินพุตเท่านั้น ทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ที่ใช้มีราคาถูก และหาได้ง่ายกว่า และลดข้อจำกัด เมื่อใช้กับระบบแรงดันไฟสูงได้มาก รวมทั้งยังไม่มีปัญหาการไม่สมมาตรของฟลักซ์ในแกนเฟอร์ไรต์ของหม้อแปลงได้ด้วย

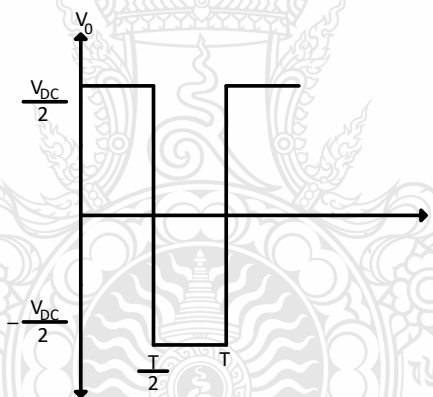


รูปที่ 2.11 วงจรพื้นฐานของฮัลฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์

จะเห็นได้ว่าหากเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งนำกระแส ค่าแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ตัวที่เหลือจะมีค่าเพียงแรงดันอินพุตเท่านั้น เมื่อ Q_1 และ Q_2 สลับกัน กระแสผลที่ได้จะมีลักษณะเดียวกับการทำงานของพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์ ยกเว้นค่าแรงดันตกคร่อม ขณะทำงานของขดไพรมาร์ี่จะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันอินพุต เนื่องจากผลของการต่อตัวเก็บ ประจุ C_1 และ C_2 เพื่อแบ่งครึ่งแรงดัน กระแสที่ไหลผ่านขดไพรมาร์ี่จึงมีค่าสูง ซึ่งเป็นการจำกัด กำลังงานสูงสุดของคอนเวอร์เตอร์ โดยกำลังงานสูงสุดที่ฮัลฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์สามารถทำได้จะอยู่ในช่วงไม่เกิน 500 วัตต์ แรงดันและกระแสสูงสุดของอุปกรณ์ที่ใช้สวิตซ์ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์จะหาได้จากสมการที่ 2.9 และสมการที่ 2.10

$$V_T = V \quad (2.9)$$

$$I_T = I_{O(peak)} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.12 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรฮัลฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 2.14 เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ของวงจรฮัลฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะทำงานสลับกันเพื่อสร้างสัญญาณออกเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม เช่น ช่วงเวลา 0 ถึง 0.5 คาบ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ 1 จะต่อวงจร เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ 2 ตัดวงจร ช่วงเวลา 0.5 ถึง 1 คาบ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ 1 ตัดวงจร เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ 2 ต่อวงจร แรงดันออกที่ได้มีลักษณะเป็นคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีขนาดค่ายอดเท่ากับขนาดแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันเดียวกัน

2.6 วงจรเรโซแนนซ์

เรโซแนนซ์ (Resonance) เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นไม่เฉพาะกับวงจรไฟฟ้าเท่านั้น หากแต่เกิดกับวัตถุสงของตามธรรมชาติทั่วไป เช่น เมื่อเราเคาะวัตถุอันหนึ่งวัตถุหนึ่งจะเกิดเสียงดังที่สุดที่ความถี่อันหนึ่งเท่านั้น โดยความถี่นี้จะเปลี่ยนไปตามรูปร่างมวลหรือโครงสร้างของวัตถุนั้นเช่น สายซอหรือสายกีตาร์ สายเส้นเล็กจะให้ความถี่สูงหรือเสียงแหลมกว่าสายเส้นใหญ่ เป็นต้น การที่วัตถุอันหนึ่งให้เสียงได้ดีที่ความถี่หนึ่ง เนื่องจากวัตถุนั้นสั่นได้ดีที่ความถี่นั้น ซึ่งเรียกความถี่ที่วัตถุสั่นได้ดีที่ความถี่ธรรมชาตินี้เรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ ในทางวงจรไฟฟ้านั้นเกิดเรโซแนนซ์ก็ คือ การเกิดปรากฏการณ์จากแรงดันที่จ่ายให้วงจรกับกระแสรวมในวงจรเกิดการอินเฟสกันดังนั้นที่จุดเรโซแนนซ์ อิมพีแดนซ์ในวงจรจะมีเพียงค่าตัวต้านทานเท่านั้น [20]

2.6.1 ปัจจัยในการเกิดความถี่เรโซแนนซ์

วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ RLC จะเกิดเรโซแนนซ์ได้ก็ต่อเมื่อวงจรและแหล่งจ่ายมีปัจจัยดังนี้

1) แหล่งจ่ายและกระแสต้องมีเฟสเดียวกันซึ่งหมายความว่าค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรมีค่าจำนวนจริงหรือกล่าวได้ว่าในวงจร RLC จะเหมือนมีแต่ R เพียงอย่างเดียวเท่านั้นดังสมการที่ 2.11

$$X_L = X_C \quad (2.11)$$

2) ความชันของกราฟระหว่างค่าอิมพีแดนซ์รวมกับตัวแปรของวงจรรวมเท่ากับศูนย์

$$\frac{\partial}{\partial X}(Z_T) = 0 \quad (2.12)$$

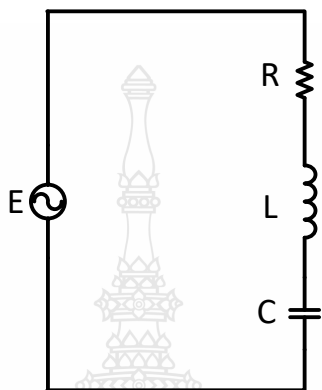
เมื่อ Z_T คือ ค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจร (Ω)

X คือ ตัวแปรของวงจรเช่น f หรือ ω

2.6.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

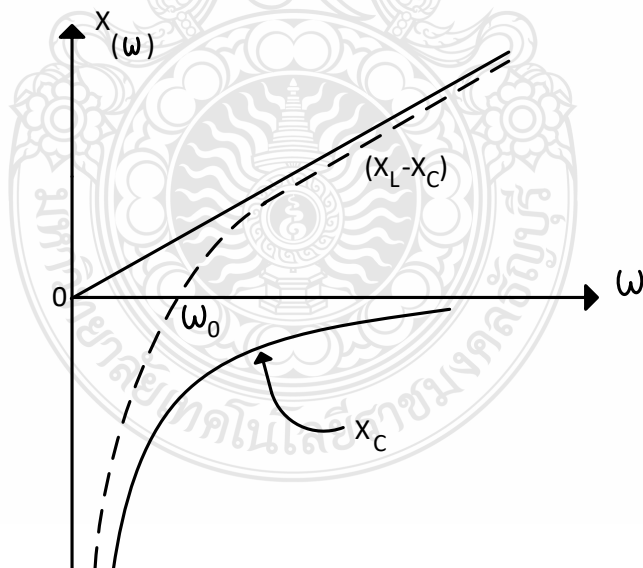
วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (The series resonance circuit) นั้น หาความต้านทานเชิงซ้อนได้จากสมการที่ 2.13

$$Z_T = R + j(X_L - X_C) = Z \angle 0^\circ \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.13 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

เมื่อเกิดเรโซแนนซ์จะได้ $X_L = X_C$ ซึ่งจะได้กราฟของ X_L , X_C และ $X_L - X_C$ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กราฟระหว่างความต้านทานจินตภาพกับความถี่

จากรูปที่ 2.16 ที่ $\omega = 0$ จะเห็นได้ว่าค่า X_C ใหญ่กว่า X_L แต่เมื่อความถี่ (ω) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า X_C เพิ่มขึ้นและค่า X_L ลดลง ในกรณีที่ $X_L = X_C$ พอดี จะได้ความถี่เรโซแนนซ์ดังสมการ

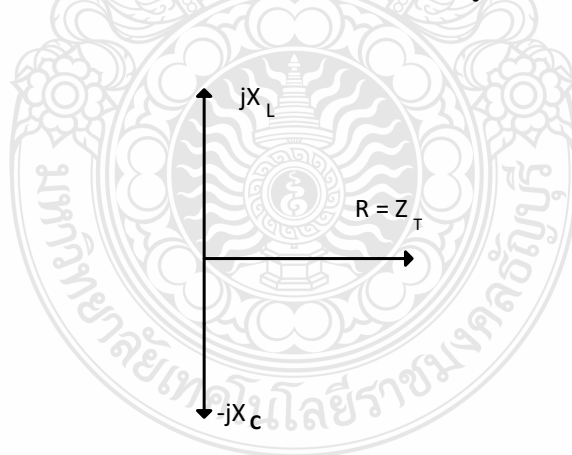
$$X_L = X_C \quad (2.14)$$

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.15)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.16)$$

- เมื่อ f คือ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในวงจร มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)
 2π คือ ค่าคงที่
 L คือ ค่าของขดลวดในวงจร มีหน่วยเป็น เฮนรี่ (H)
 C คือ ค่าของตัวเก็บประจุในวงจร มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)

เมื่อเกิดเรโซแนนซ์จะได้ $Z_T = R$ ซึ่งจะได้เฟสเซอร์ไดอะแกรมดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.15 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมเมื่อ $Z_T = R$

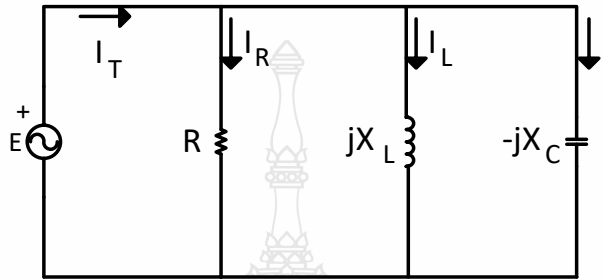
จากรูปที่ 2.17 จะได้ $X_L = X_C$ ก็ต่อเมื่อ $\omega = \omega_0$ เท่านั้น กรณีที่ ω ไม่เท่ากับ ω_0 จะมี 2 ลักษณะคือ

- 1) เมื่อ $\omega < \omega_0$ จะได้ $X_L > X_C$ วงจรมีลักษณะเหมือนวงจร RC

2) เมื่อ $\omega > \omega_0$ จะได้ $X_L < X_C$ วงจรมีลักษณะเหมือนวงจร RL

2.6.3 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน (parallel resonance) ที่จะได้กล่าวถึงต่อไปนี้เป็นวงจร RLC แบบขนาน คือ L จะเป็นตัวเหนี่ยวนำไม่มีความต้านทานภายใน และ C ก็เป็นตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.16 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

จากรูปวงจร RLC แบบขนานกับแรงดันกระแสสลับนั้นแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์แต่ละตัวมีค่าเท่ากับกับแรงดัน E และมีเฟสเดียวกันด้วย ส่วนกระแส I_R มีเฟสเดียวกัน E , I_L นำหน้า E อยู่ 90° และ I_C ตามหลัง E อยู่ 90°

2.7 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

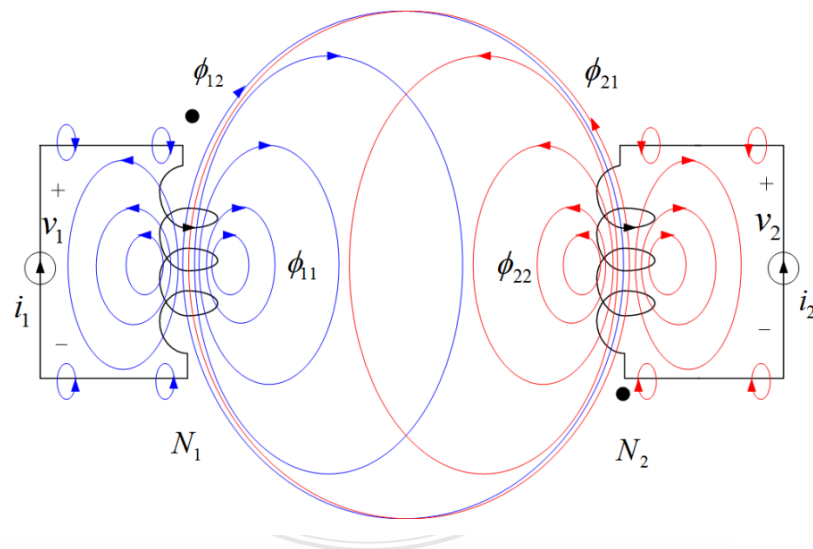
ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวดจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น ตัวเหนี่ยวนำเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อินдукเตอร์หรือเรียกย่อ ๆ ว่าตัวแอล (L) หน่วยของการเหนี่ยวนำคือ เฮนรี่ (Henry) ตัวเหนี่ยวนำนั้มนิยมนำไปใช้ในการปรับความถี่โดยอาศัยหลักการของลวดทองแดงนำมาขดหลายๆ รอบที่เรียกว่าคอยล์ (Coil) แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไป เพื่อให้แสดงคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ โครงสร้างประกอบด้วยขดลวด (Coil) พันรอบแกน (Core) ซึ่งแกนนี้อาจจะเป็นแกนอากาศ แกนเหล็กหรือแกนเฟอร์ไรต์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการเหนี่ยวนำไฟฟ้าและลักษณะการพัน เส้นลวดตัวนำแตกต่างกัน ทำให้ตัวเหนี่ยวนำแตกต่างกัน เมื่อนำเส้นลวดตัวนำมาพันเป็นขดจะส่งผล ให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบเส้นลวดตัวนำเกิดการเสริมแรงกันเกิดเป็นสนามแม่เหล็กขึ้นและ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความเข้มเพิ่มมากขึ้น ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็ก [21]



รูปที่ 2.17 ตัวเหนี่ยวนำ [22]

2.7.1 การเหนี่ยวนำร่วม

การเหนี่ยวนำร่วมในขดลวดหนึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสในขดลวดอีกขดหนึ่งเสมอ จากรูปที่ 2.19 เมื่อมีกระแสไฟฟ้า I_1 ไหลในวงจрд้านซ้ายทำให้เกิดฟลักซ์ ϕ_{12} ขึ้น และเป็นค่าแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้า I_1 [23]



รูปที่ 2.18 เส้นฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดที่ 1 ส่งผลไปยังขดลวดที่ 2 [24]
จะได้สมการเป็น

$$\phi_{12} = M_{12}I_1 \quad (2.17)$$

ในการทำงานเดียวกันถ้ามีกระแสไฟฟ้า I_2 ไหลในวงจรด้านขวาก็จะทำให้เกิดฟลักซ์

$$\phi_{21} = M_{21} I_2 \quad (2.18)$$

ค่า M_{12} และ M_{21} นี้มีค่าเท่ากับ M ถ้ากระแสไฟฟ้าในวงจรที่ 1 เปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่วงจร 2 จะได้ว่า

$$emf_2 = - \frac{d\phi_2}{dt} \quad (2.19)$$

หรือ

$$emf_2 = -M \frac{dI_1}{dt} \quad (2.20)$$

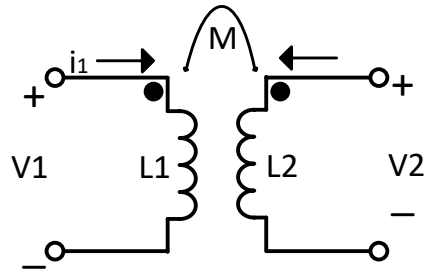
ถ้ากระแสไฟฟ้า I เปลี่ยนแปลงก็จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ขดจะได้สมการ

$$\phi = -M \frac{dI}{dt} \quad (2.21)$$

จากการศึกษาในเรื่องพลังงานสะสมในวงจรที่มีการเชื่อมโยงทางสนามแม่เหล็กพบว่า

$$M = M_{12} = M_{21} \quad (2.22)$$

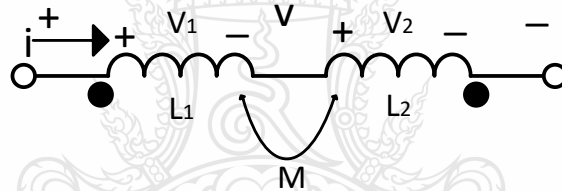
โดยสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 รูปวงจรสมมูลความเหนี่ยวนำ

ลักษณะการเชื่อมต่อของขดลวด ฟลักซ์แม่เหล็กเสริมกัน มีลักษณะการต่อดังรูปที่ 2.23

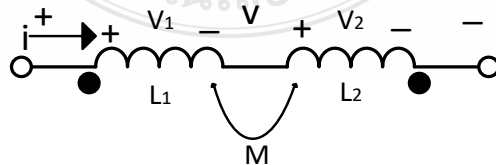
$$L = L_1 + L_2 + 2M \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.20 ฟลักซ์แม่เหล็กแบบเสริมกัน

ฟลักซ์แม่เหล็กหักล้างกัน มีลักษณะการต่อดังรูปที่ 2.21

$$L = L_1 + L_2 - 2M \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.21 ฟลักซ์แม่เหล็กแบบหักล้างกัน

- เมื่อ L_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดชุดที่ 1
 L_2 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดชุดที่ 2
 L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทั้งสองชุดเชื่อมต่อกัน
 M คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดทั้งสอง

การเหนี่ยวนำร่วมเป็นปรากฏการณ์ที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อกระแสที่ผ่านวงจรขดลวดแปรเปลี่ยนตามเวลา จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างวงจรทั้งสองเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ การเปลี่ยนแปลงของกระแสเทียบกับเวลาจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเกิดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ตัวเหนี่ยวนำคือ

$$P = emf \times I \quad (2.25)$$

จะได้

$$P = L \frac{dI}{dt} \times I \quad (2.26)$$

งานที่ส่งให้ขดลวดในเวลา dt วินาทีคือ $dW = Pdt$ ในช่วงกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง 0 ถึง I คือ

$$W = L \int_0^I IdI \quad (2.27)$$

ดังนั้น

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad (2.28)$$

ดังนั้นจะได้พลังงานที่สะสมในวงจรที่มีการเชื่อมโยงทางแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ

$$W = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 \pm MI_1 I_2 \quad (2.29)$$

สัมประสิทธิ์การเชื่อมร่วมโดยสมมติว่ากระแสไฟฟ้า I_1 และ I_2 มีค่าเป็นบวกหรือลบทั้งคู่ สมการของพลังงานนี้จะมีโอกาสที่จะมีค่าเป็นลบเมื่อ

$$W = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 - M I_1 I_2 \quad (2.30)$$

โดยพลังงานต้องมากกว่าศูนย์เสมอ ดังนั้น

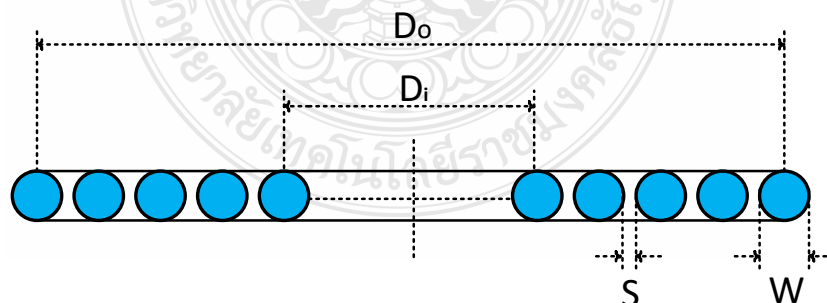
$$0 \leq M \leq \sqrt{L_1 L_2} \quad (2.31)$$

สัมประสิทธิ์การเชื่อมร่วม

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2.32)$$

2.7.2 การประมาณค่าความเหนียวนำตัวเอง

ในการประมาณค่าความเหนียวนำตัวเองของขดลวดเหนียว ได้ใช้การวิเคราะห์โครงสร้างของขดลวด โดยแสดงเป็นภาพตัดขวางของขดลวดเหนียวนำ ดังรูปที่ 2.23 โดยที่สมการการประมาณค่าความเหนียวนำตัวเองเป็นไปตามสมการที่ 2.33 และสมการที่ 2.34



รูปที่ 2.22 ภาพตัดขวางของขดลวดเหนียวนำแบบวงกลมแบน

$$L = \frac{n^2 \times A^2}{30A - 11D_i} \quad (2.33)$$

โดยที่

$$A = \frac{D_i + n(W + S)}{2} \quad (2.34)$$

- เมื่อ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (μH)
 n คือ จำนวนรอบของขดลวด
 D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวด
 W คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด
 S คือ ระยะห่างระหว่างรอบของขดลวด



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

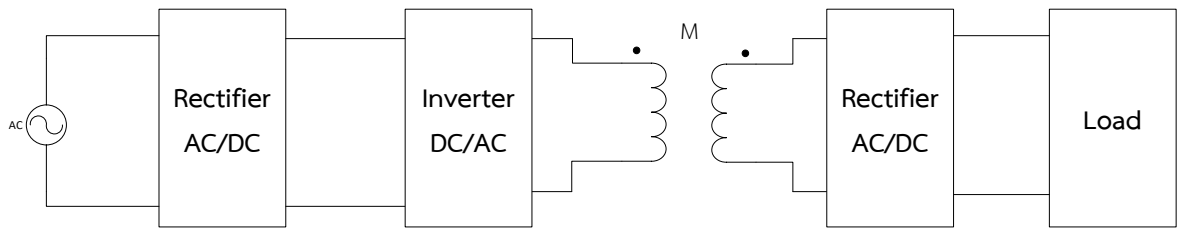
การออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งใช้หลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ เพื่อทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านอากาศ จากรูป 3.1 การออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ประกอบด้วย 1.ชุดส่ง (Transmitter) 2.ชุดรับ (Receiver) เพื่อจะจำลองระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายด้วยสมการคณิตศาสตร์



รูปที่ 3.1 ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย [25]

3.1 การออกแบบระบบถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

การออกแบบระบบถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายนั้น ประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ ภาควงจรเรียงกระแส (Rectifier) ภาควงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ขดลวด และ ฟิลเตอร์ โดยมีรายละเอียดในการออกแบบดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 แบบจำลองระบบถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

วิทยานิพนธ์นี้ให้ความสำคัญในจำลองแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย ซึ่งมีส่วนประกอบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า วงจรกำลัง หม้อแปลงไฟฟ้าสวิตชิงแกนอากาศ และวงจรเรียงกระแส

3.1.1 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

การออกแบบวงจรเรียงกระแสในวิทยานิพนธ์นี้นั้น เพื่อทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อไป จากการออกแบบวงจรเรียงกระแส ออกแบบโดยกำหนดแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 220 Vac หลังจากนั้นออกแบบวงจรเรียงกระแสโดยใช้ไดโอดแบบ ฟูลบริดจ์ (Full Bridge Rectifier) เพื่อทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งการออกแบบวงจรไดโอดแบบ ฟูลบริดจ์สามารถคำนวณได้ดังนี้

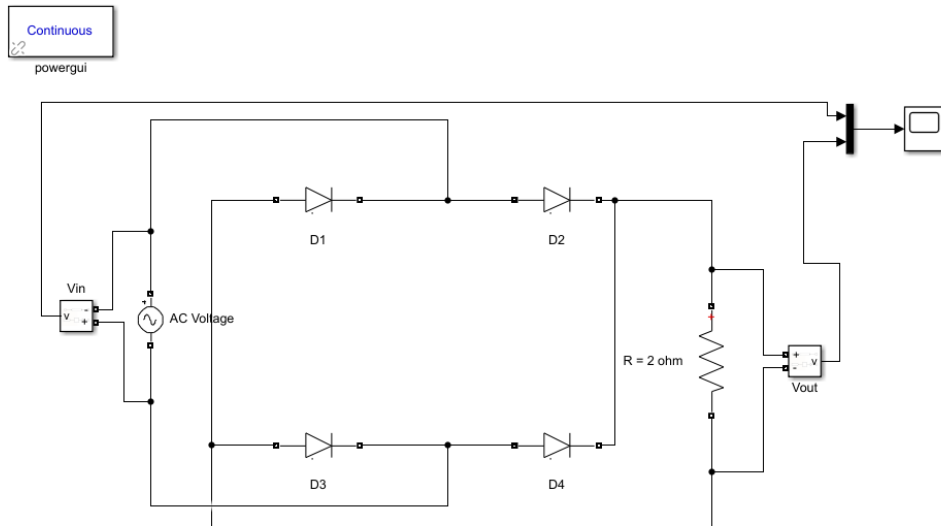
ขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวงจรเรียงกระแส

$$V_{dc} = 1.414 \times V_{ac} \quad (3.1)$$

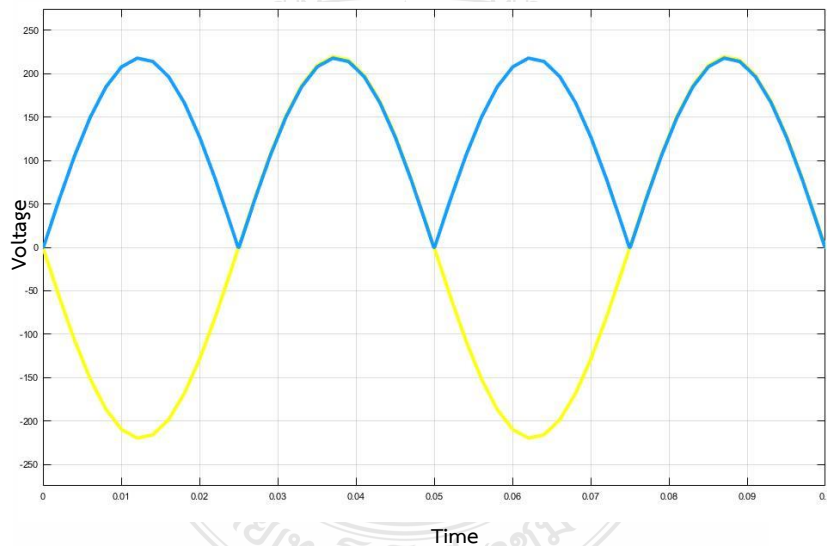
$$V_{dc} = 1.414 \times 220$$

$$V_{dc} = 311.08 V_{dc}$$

จากการคำนวณเพื่อหาขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ได้ขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 311.08 V_{dc} หลังจากได้คำนวณแล้วนำมาจำลอง MATLAB/Simulink



รูปที่ 3.3 จำลองวงจรเรียงกระแสในโปรแกรม MATLAB/Simulink

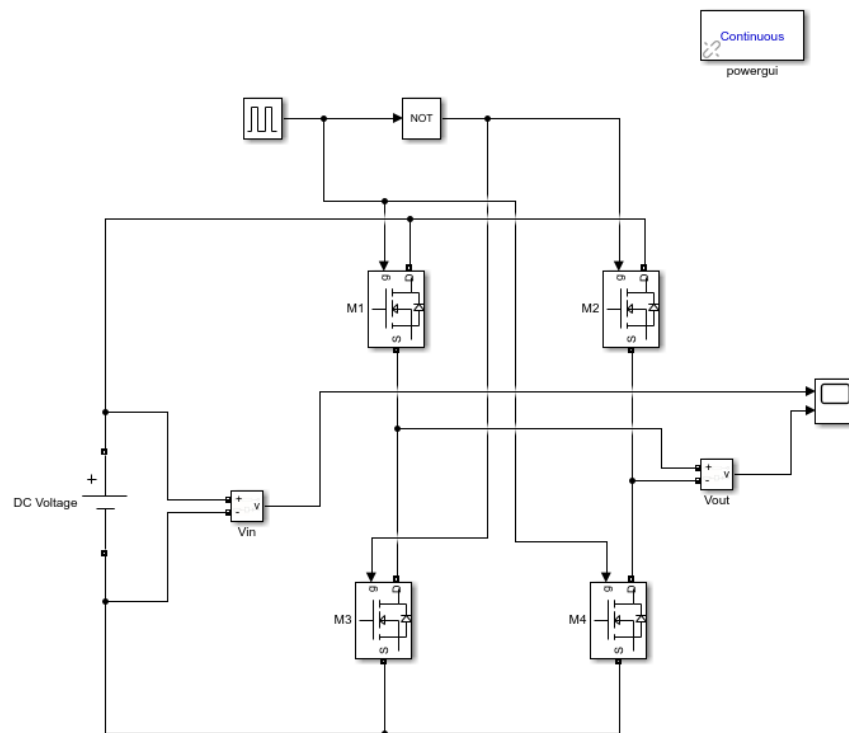


รูปที่ 3.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอินพุต/เอาต์พุตเมื่อผ่านวงจรเรียงกระแส

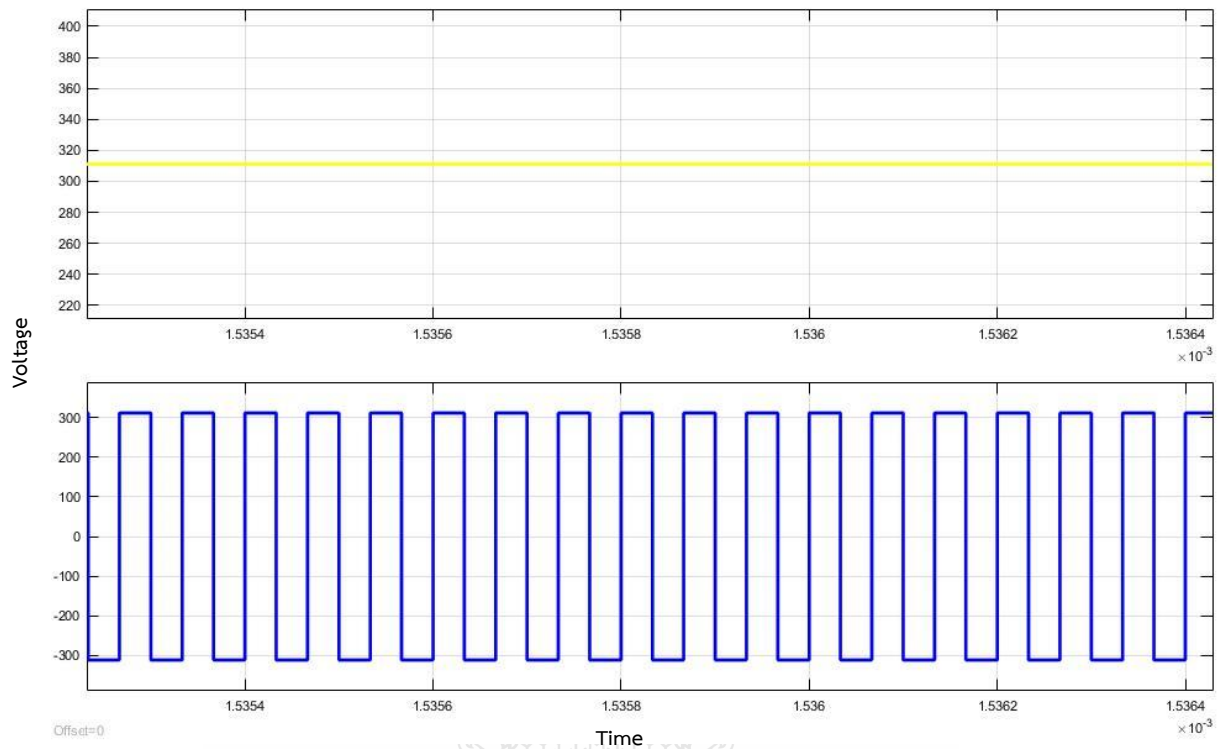
3.1.3 วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ คือ วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC to AC Converter) ทำงานโดยการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ตามขนาด และความถี่ที่ต้องการ แรงดันเอาต์พุตสามารถตั้งค่าให้คงที่หรือปรับค่าได้ตามต้องการที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง หรือเปลี่ยนความถี่ไปก็ได้ หากต้องการเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุต ของอินเวอร์เตอร์สามารถทำได้โดยการรักษา

ระดับอัตราการขยายของอินเวอร์เตอร์ให้คงที่ด้วยการคงค่าความถี่ แล้วปรับแรงดัน อินพุต ในทางตรงกันข้าม หากคงค่าแรงดัน อินพุตแล้วเปลี่ยนแปลงอัตราการขยายของอินเวอร์เตอร์โดยการปรับค่าความถี่ก็สามารถปรับเปลี่ยนค่าแรงดัน เอาต์พุต ได้เช่นกัน อัตราการขยายของอินเวอร์เตอร์สามารถหาได้จาก อัตราส่วนระหว่างค่า ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเอาต์พุตต่อค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุต



รูปที่ 3.5 จำลองวงจรอินเวอร์เตอร์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink



รูปที่ 3.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอินพุต/เอาต์พุตเมื่อนำวงจรอินเวอร์เตอร์

จากภาพที่ 3.4 และ 3.5 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่แรงดันไฟฟ้าจากการออกแบบได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ 907.165 nH และค่าตัวเก็บประจุ 124 pF ซึ่งค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรจะทำให้ค่า $X_L - X_C = 0$ เพื่อช่วยให้กับขดลวดตัวส่ง (Transmitter) โดยความถี่เรโซแนนซ์ที่ทำให้ ค่า $X_L - X_C = 0$ คือ 15 MHz สามารถคำนวณได้จาก

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.2)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(907.156 \times 10^{-9})(124 \times 10^{-12})}}$$

$$f = 15,006,041.6 \text{ Hz}$$

$$f \approx 15 \text{ MHz}$$

3.1.3 ขดลวดตัวส่ง (Transmitter) และขดลวดตัวรับ (Receiver)

1) ขดลวดตัวส่ง (Transmitter) และขดลวดตัวรับ (Receiver) คือ ขดลวดสร้างเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อส่งพลังงานไปยังขดลวดตัวรับ (Receiver) ในที่นี้ใช้การส่งผ่านพลังงานแบบแกวอากาศ ซึ่งระยะห่างในการออกแบบอยู่ที่ 10 cm. ซึ่งหากต้องการให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดต้องหลีกเลี่ยงการรั่วไหลของฟลักซ์ให้น้อยที่สุด โดยจากออกแบบขดลวดตัวส่งและขดลวดตัวรับ ค่าตัวเหนี่ยวนามีค่าเท่ากับ 907.165 nH และตัวเหนี่ยวนามีค่า 124 pF ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} \quad (3.3)$$

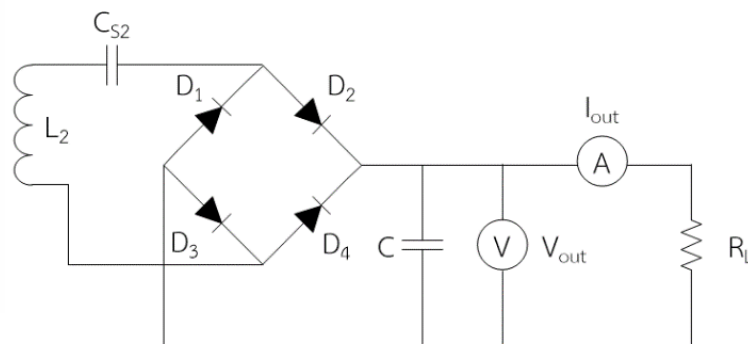
หาต้องการค่าความเหนี่ยวนำ จะได้

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad (3.4)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi 15 \times 10^6)^2 \times 124 \times 10^{-12}} = 907.895 \text{ nH}$$

3.1.4 วงจรเรียงกระแส ของฝั่งรับ

โดยทำการออกแบบให้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุ มีค่าเท่ากับฝั่งส่งโดยวงจรทั้งสองจะนำค่าตัวเก็บประจุมาต่ออนุกรมกับค่าของตัวเหนี่ยวนำ หรือวงจรเรโซแนนซ์ LC อนุกรม หลังจากนั้นใช้วงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง



รูปที่ 3.7 วงจรเรียงกระแสฝั่งรับ

3.1.5 ระยะห่างของช่องว่างอากาศ (Air Gap)

เนื่องจากระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย คือ การส่งผ่านพลังงานโดยผ่านช่องว่างอากาศ ซึ่งในที่นี้กำหนดค่าช่องว่างอากาศเป็นค่า M โดยค่าของช่องว่างอากาศเปลี่ยนแปลงไป

ตามผลของระยะห่าง โดยที่เมื่อระยะห่างยิ่งมากส่งผลให้ค่าของ M มากตามลำดับ ซึ่งหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$M = k\sqrt{L_1L_2} \quad (3.5)$$

ซึ่งค่า k หาได้จาก

$$k = \frac{1}{\left[(1+2)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{D}{\sqrt{R^2}} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3.6)$$

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 ออกแบบวงจรระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

3.2.2 คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ระยะช่องว่างอากาศที่ 10 เซนติเมตร โหลด 1 กิโลวัตต์ และความถี่เรโซแนนซ์ 15 MHz. แล้วบันทึกค่า

3.2.3 เพิ่มระยะห่าง คำนวณหาค่า M ใหม่ เพื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณนำลงในโปรแกรมที่ค่าพารามิเตอร์ส่วนอื่น ๆ คงที่ ดูค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า แล้วบันทึกค่า

3.2.4 หาค่าประสิทธิภาพของระบบถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

3.3 สรุป

จากการคำนวณเพื่อออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายนั้น ประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง เพื่อส่งพลังงานให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อแปลงแรงดันกลับจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับแต่เปลี่ยนความถี่ในการส่งออกเพื่อทำให้ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากชุดส่งไปยังชุดรับโดยมีอากาศเป็นตัวกลางในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า และเข้าวงจรเรียงกระแสอีกครั้งเพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงจ่ายให้กลับโหลดขนาด 1 กิโลวัตต์

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ซึ่งจะมีการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

จากการคำนวณทางสมการคณิตศาสตร์ของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ระยะช่องว่างอากาศ 2 - 12 cm. และ ความถี่เรโซแนนซ์อยู่ที่ 15MHz. จะได้ค่าพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้

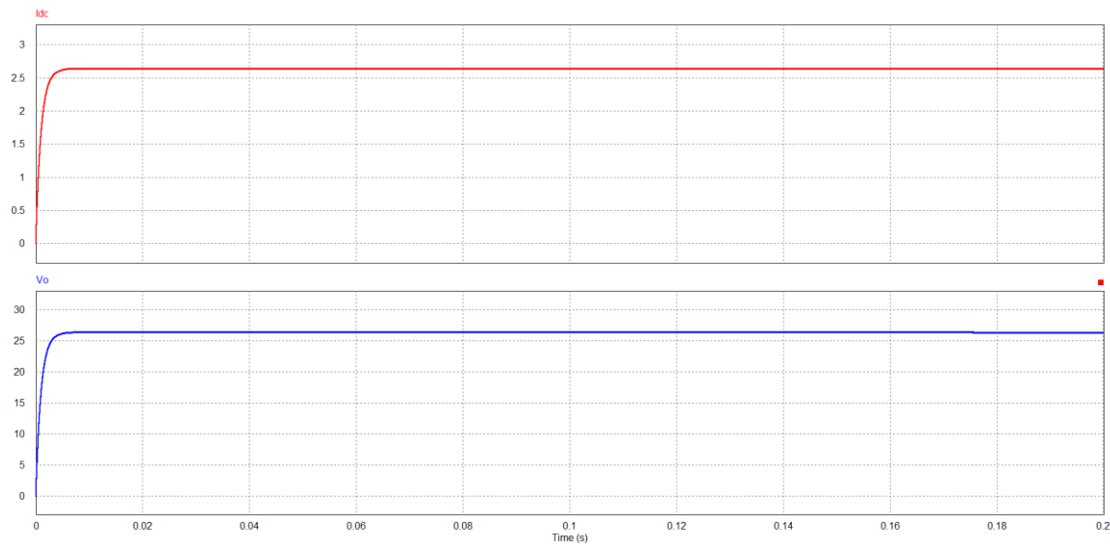
ตารางที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้า และ กระแสไฟฟ้า ที่ระยะช่องว่างอากาศ 2 - 12 cm.

Gap cm.	V_{in} V.	V_{dc} V_{dc} .	V_{out} V_{dc} .	I_{out} A.	L_M nH
2	220	311.08	26.37	2.63	768.538
4	220	311.08	39.31	3.39	510.24
6	220	311.08	60.5	6.06	308.59
8	220	311.08	91.5	9.15	186.542
10	220	311.08	104.84	10.48	116.77
12	220	311.08	97.36	9.736	76.319

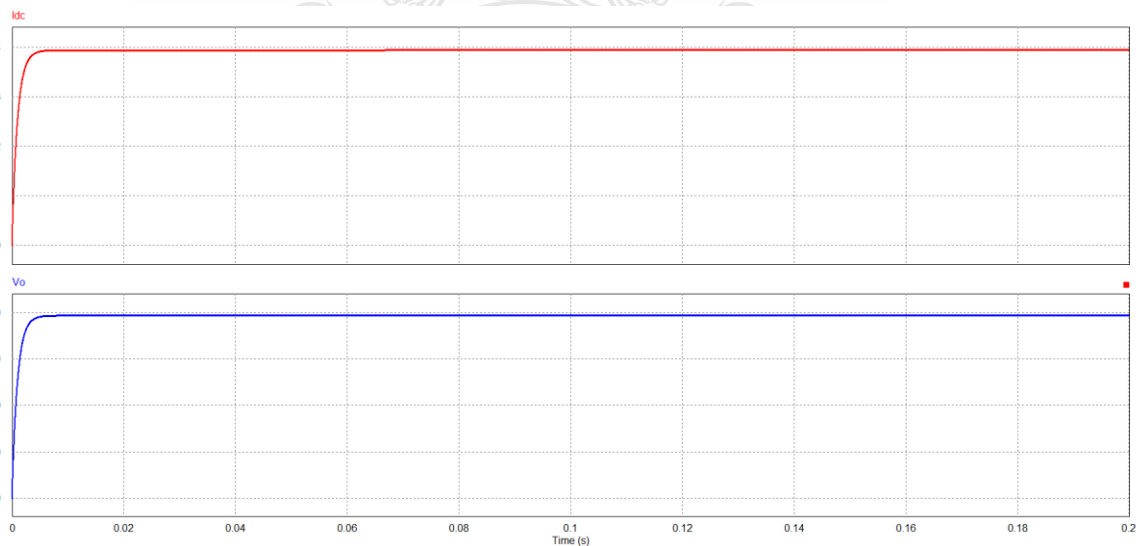
จากตารางที่ 4.1 ทำการเพิ่มระยะห่างที่ช่องว่างอากาศ จาก 2- 12 เซนติเมตร โดยที่คงค่าพารามิเตอร์ไว้เพื่อหาค่าของช่องว่างอากาศ L_M โดยระบบได้ทำการออกแบบช่องว่างอากาศไว้ที่ระยะ 10 เซนติเมตร จะเห็นว่าค่า V_{dc} อยู่ที่ 311.08 V_{dc} กระแสอยู่ที่ 14.59 A. ได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอยู่ที่ 104.84 V_{dc} กระแสอยู่ที่ 10.48 A.

4.2 ผลการทดสอบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ระยะต่าง ๆ กับโหลดขนาด 1 kW.

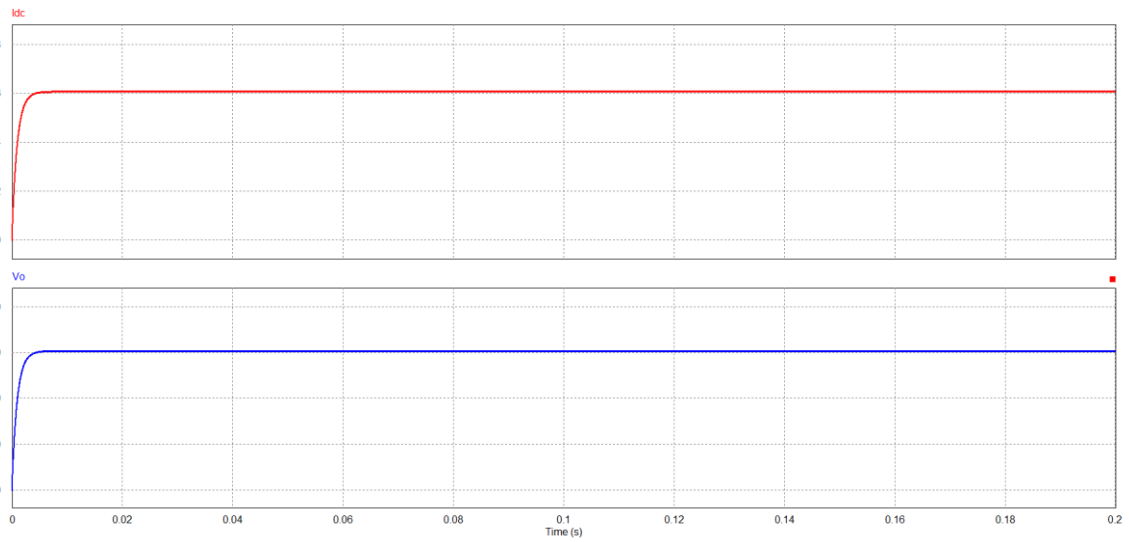
4.2.1 สัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ฝั่งขดลวดด้านรับ จ่ายให้กับโหลดขนาด 1 kW. ที่ระยะห่าง 2 – 12 cm. ของขดลวดทั้ง 2 ชุด



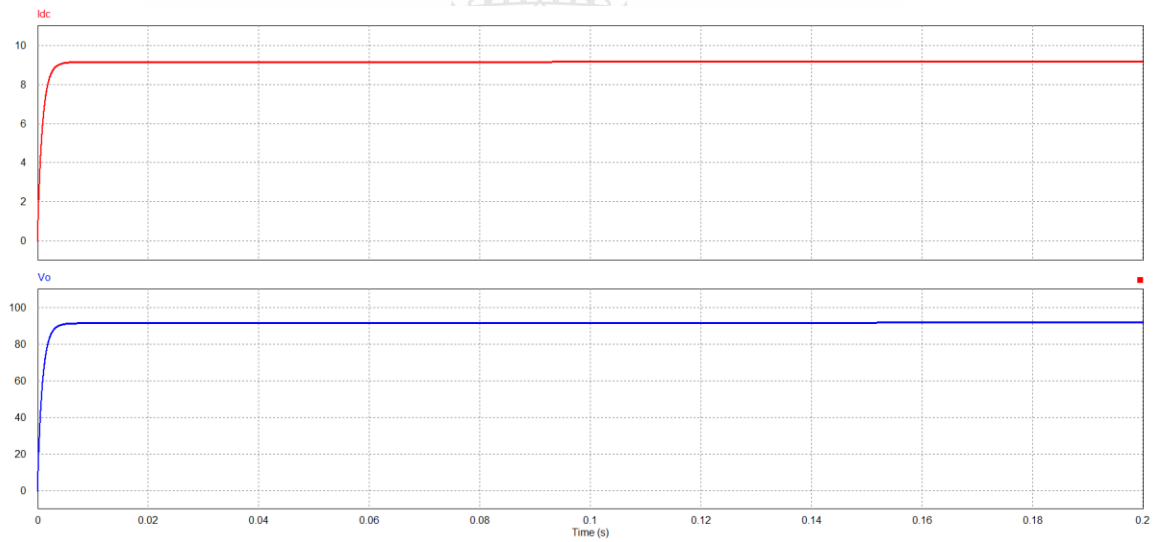
รูปที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่าง 2 cm.



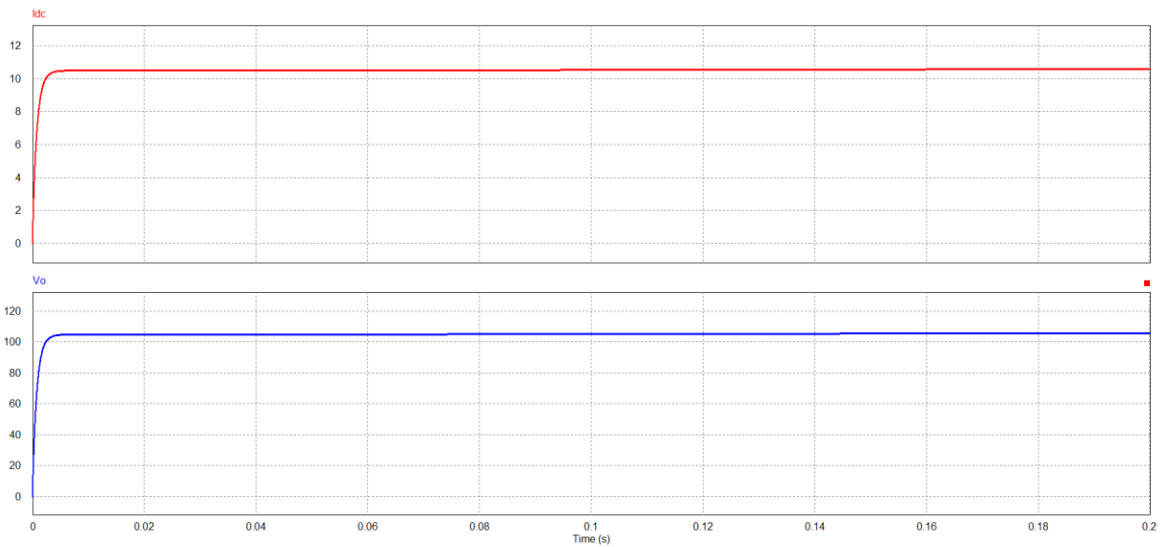
รูปที่ 4.2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่าง 4 cm.



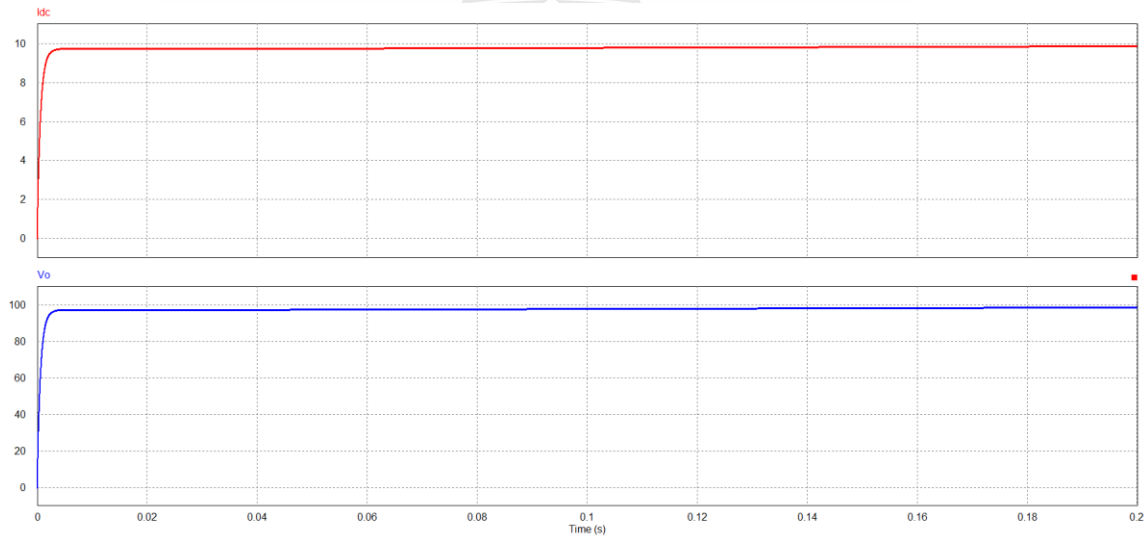
รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่าง 6 cm.



รูปที่ 4.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่าง 8 cm.



รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่าง 10 cm.



รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่าง 12 cm.

จากการวัดสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่โหลด ดังภาพที่ 4.1 – 4.6 จากภาพแสดงให้เห็นรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ซึ่งแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตอยู่ที่ $220 V_{ac}$ ที่ $311.08 V_{dc}$ โดยที่ระยะ 2 cm. แรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ $26.37 V_{dc}$ ที่ระยะ 4 cm. แรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ $39.31 V_{dc}$ ที่ระยะ 6 cm. แรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ $60.6 V_{dc}$ ที่ระยะ 8 cm. แรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ $91.5 V_{dc}$ ที่ระยะ 10 cm. แรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ $104.84 V_{dc}$ และที่ระยะ 12 cm. แรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ $97.36 V_{dc}$ ค่า

แรงดันไฟฟ้าที่ดีที่สุดอยู่ที่ ระยะห่าง 10 cm. ของขดลวดทั้ง 2 ชุด เนื่องจากระบบออกแบบพารามิเตอร์ที่ระยะห่างช่องว่างอากาศ 10 cm. จากการทดลองสามารถนำมาหาค่าประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าอินพุตได้ดังสมการที่ 4.1 และหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้ดังสมการที่ 4.2

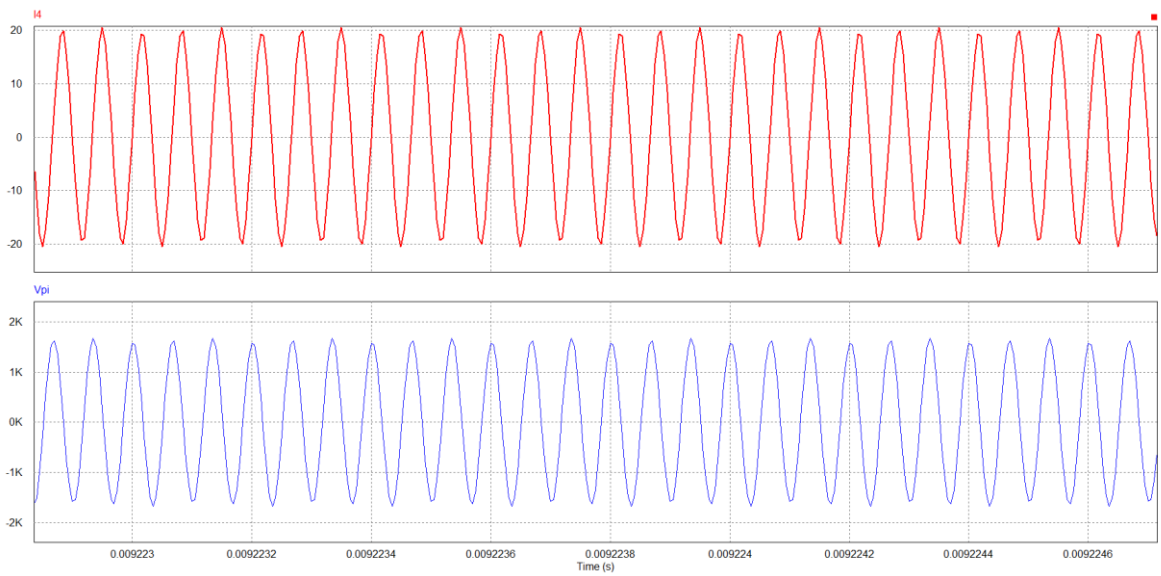
$$P_{out} = V_{out} \times I_{out} \quad (4.1)$$

$$P_{out} = V_{out} \times I_{out} \quad (4.2)$$

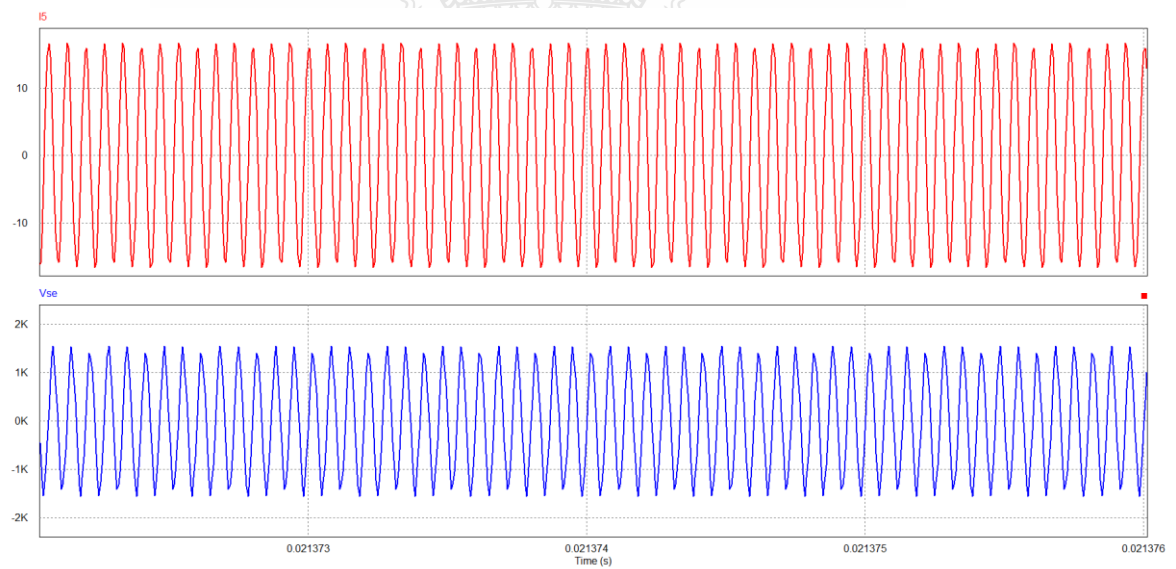
4.2.2 สัญญาณของกำลังไฟฟ้าที่ฝั่งขดลวดด้านรับ จ่ายให้กับโหลดขนาด 1 kW. ที่ระยะห่าง 2 – 12 cm. ของขดลวดทั้ง 2 ชุด

ตารางที่ 4.2 กำลังไฟฟ้าที่ระยะ 2 – 12 cm.

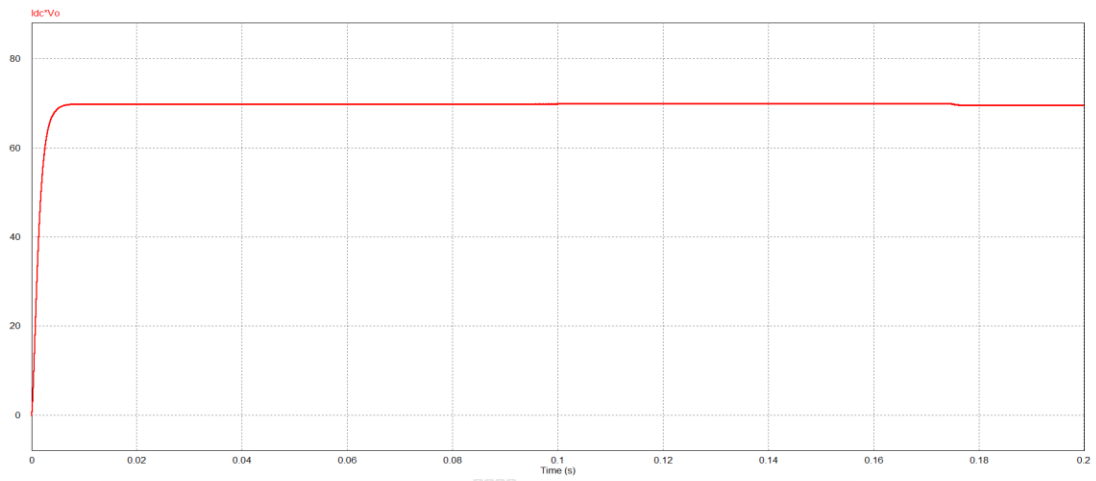
<i>Gap</i> <i>cm.</i>	V_{in} <i>V.</i>	I_{in} <i>A.</i>	P_{in} <i>W.</i>	V_{out} V_{dc}	I_{out} <i>A.</i>	P_{out} <i>W.</i>	L_M <i>nH</i>
2	220	0.604	133.176	26.37	2.63	69.3531	768.538
4	220	1.304	288.119	39.31	3.39	133.261	510.24
6	220	3.24	713.351	60.5	6.06	367.236	308.59
8	220	7.55	1665.98	91.5	9.15	837.225	186.542
10	220	14.59	3216.66	104.84	10.48	1098.72	116.77
12	220	21.5	4736.67	97.36	9.736	947.897	76.319



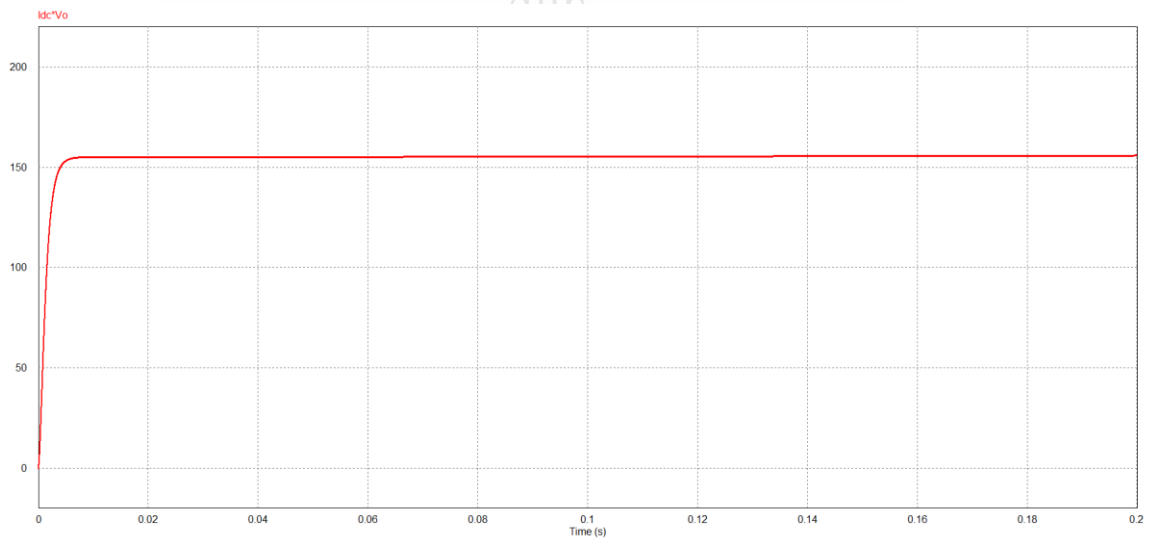
รูปที่ 4.7 กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ภาคส่ง



รูปที่ 4.8 กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ภาครับ

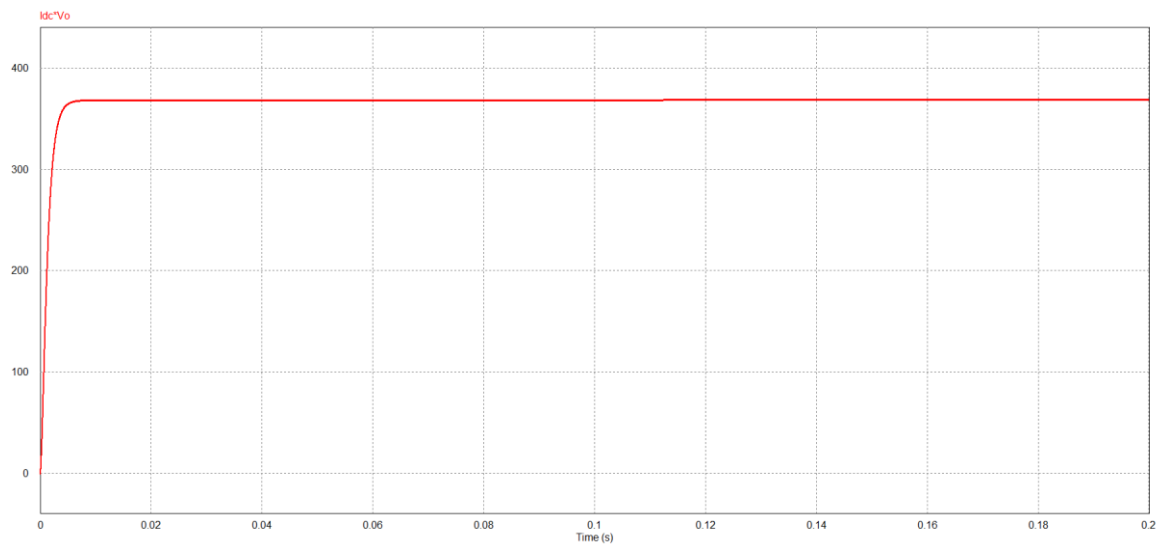


รูปที่ 4.9 สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ระยะ 2 cm.

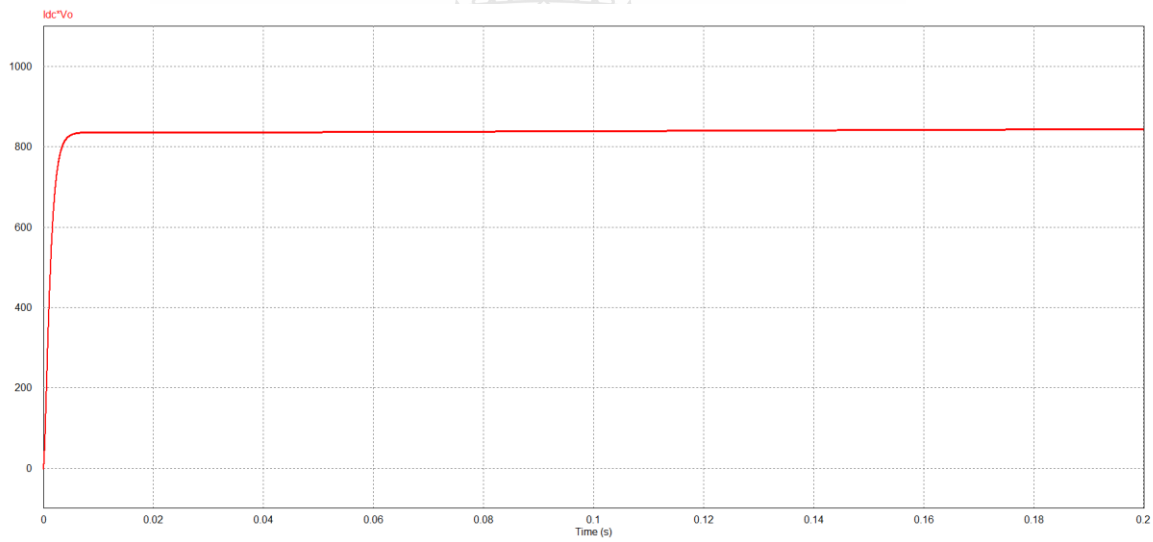


รูปที่ 4.10 สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ระยะ 4 cm.



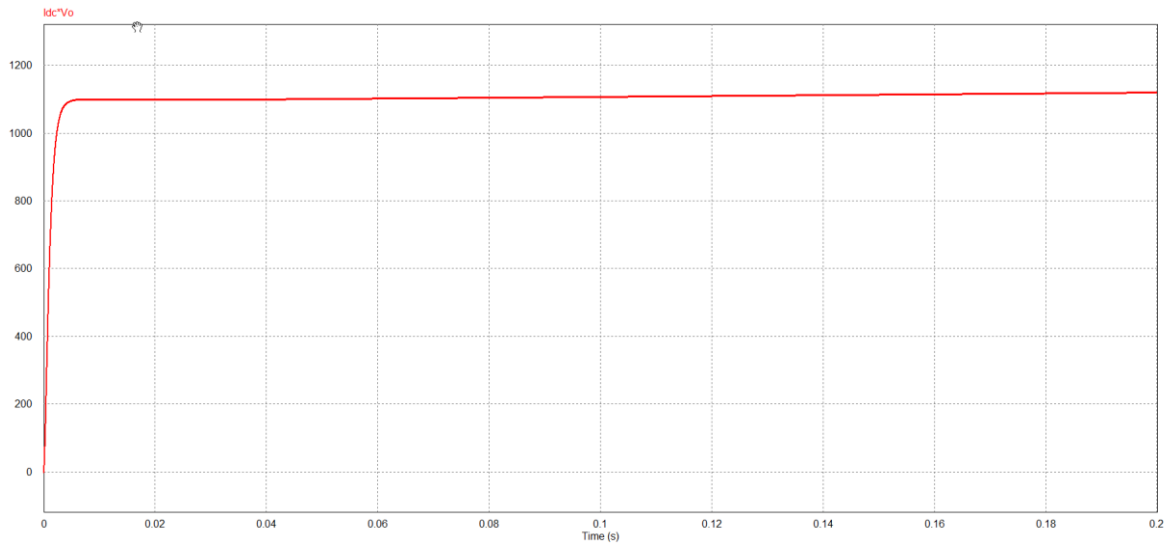


รูปที่ 4.11 สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ระยะ 6 cm.

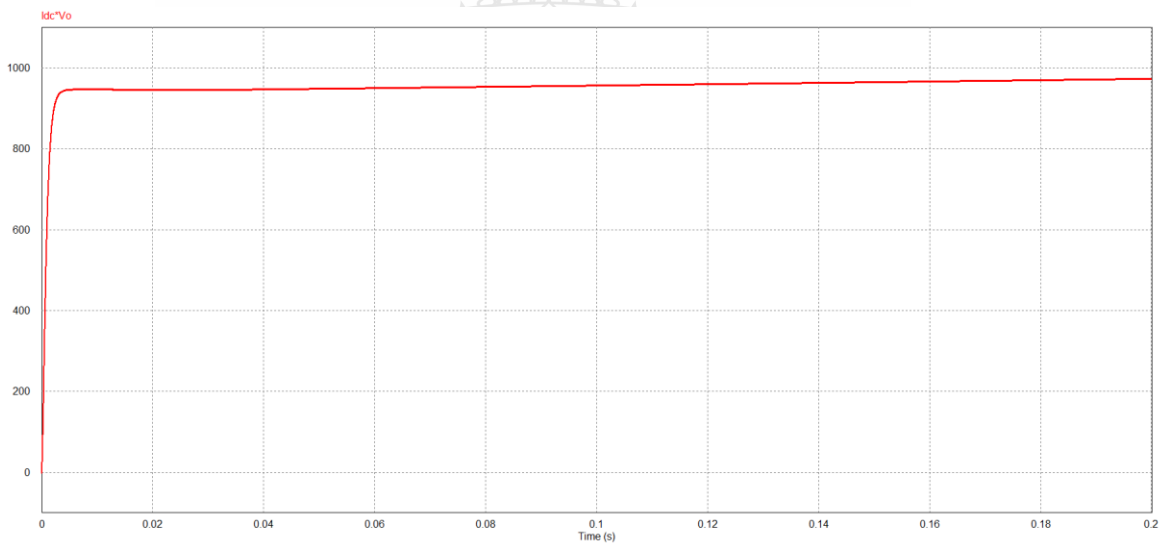


รูปที่ 4.12 สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ระยะ 8 cm.





รูปที่ 4.13 สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ระยะ 10 cm.



รูปที่ 4.14 สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ระยะ 12 cm.

จากการวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดที่โหลด ดังภาพที่ 4.7 – 4.11 จากภาพแสดงให้เห็นสัญญาณของกำลังไฟฟ้า ซึ่งระยะ 2 cm. กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 69.353 W. ระยะ 4 cm. กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 133.261 W. ระยะ 6 cm. กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 367.236 W. ระยะ 8 cm. กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 837.225 W. ระยะ 10 cm. กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 1098.72 W. ระยะ 12 cm. กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 947.897 W. ค่ากำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดอยู่ยู่ที่ ระยะห่าง 10 cm. ของขดลวดทั้ง 2 ชุด เนื่องจากระบบออกแบบพารามิเตอร์ที่ระยะห่าง

ของช่องว่างอากาศ 10 cm. จากผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า สามารถนำมาทดสอบค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย ได้ดังสมการที่ 4.3

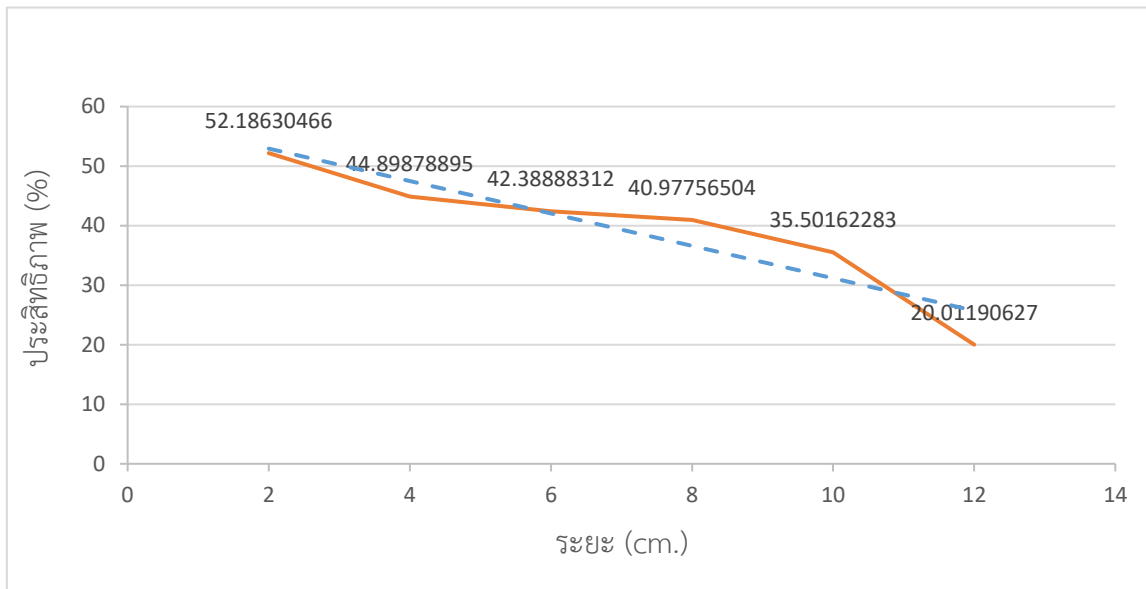
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (4.3)$$

ข้อมูลของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ระยะห่าง 2 – 12 cm. ได้แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพ จากการเก็บข้อมูลได้แสดงดังตารางที่ 4.3

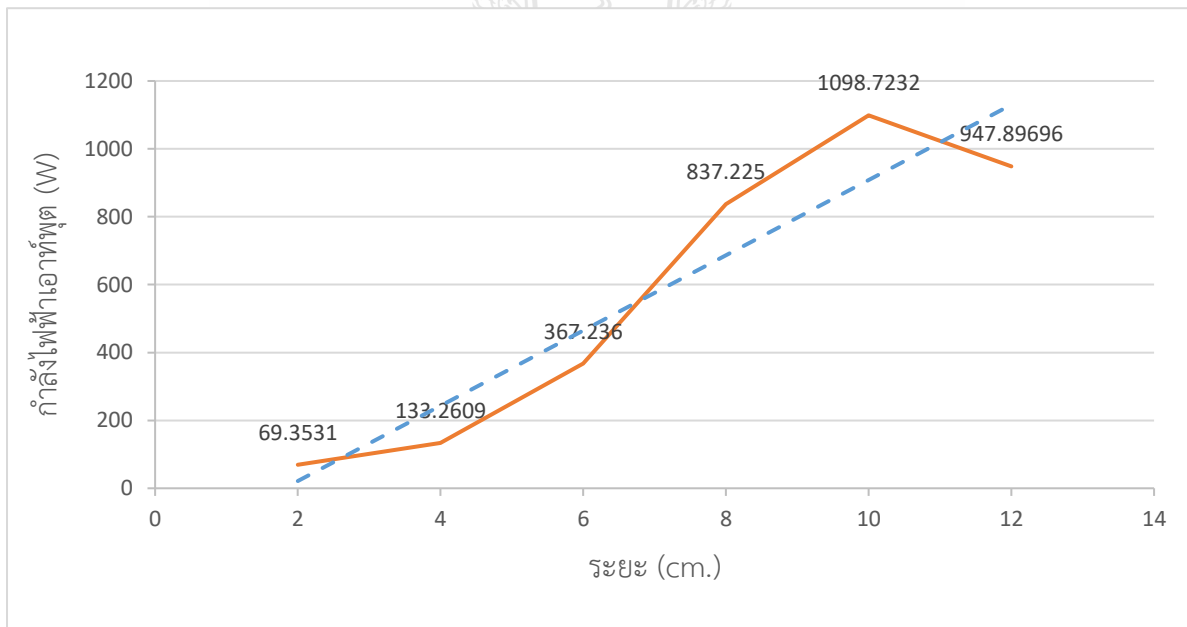
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

Gap cm.	P_{in} W.	P_{out} W.	η (%)
2	133.176	69.3531	52.186
4	288.119	133.261	44.898
6	713.351	367.236	42.388
8	1665.98	837.225	40.977
10	3216.66	1098.72	35.501
12	4736.67	947.897	20.011

จากตารางที่ 4.3 พบว่าระยะ 2 cm. ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 52.186 % ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุด มีกำลังไฟฟ้าอินพุตอยู่ที่ 133.176 W. และกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุต อยู่ที่ 69.176 W และยังพบว่าระยะยิ่งไกลมากขึ้นเท่าไรประสิทธิภาพยิ่งลดลงตามลำดับ ซึ่งในที่นี้ ประสิทธิภาพที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ ระยะ 20 cm. ประสิทธิภาพอยู่ที่ 20.011 % กำลังไฟฟ้าด้านอินพุต อยู่ที่ 4736.67 W และกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตอยู่ที่ 947.897 W โดยสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ของ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกับระยะห่าง และประสิทธิภาพรับระยะห่าง ดังภาพที่ 4.12 และ 4.13



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกับระยะห่างระหว่างขดลวด



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ประสิทธิภาพและระยะห่างระหว่างขดลวด

4.3 สรุป

ผลการทดลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไฟฟ้าของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแต่ละ ระยะพบว่า ระยะที่ 10 cm. ให้ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า รวมถึง กำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด ที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต $104.84 V_{dc}$ กระแสเอาต์พุต $10.48 A$. กำลังไฟฟ้า $1098.723 W$. แต่ประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำอยู่ที่ 35.501% ซึ่งระยะที่ทำประสิทธิภาพดีที่สุดอยู่ที่ระยะ 2 cm. ที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต $26.37 V_{dc}$ กระแสเอาต์พุต $2.63 A$. กำลังไฟฟ้า $69.353 W$.



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการออกแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยทำการจำลอง ทดสอบ ค่ากำลังไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า รวมถึงการหาค่าประสิทธิภาพของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายอีกด้วย ซึ่งระยะที่ได้ทำการทดสอบอยู่ที่ 2- 12 cm. หลังจากนั้นทำการทดสอบ เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินผลการออกแบบระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า และหาข้อบกพร่องในการทำงาน เพื่อหลีกเลี่ยงอุปสรรคที่จะเกิดขึ้นในครั้งต่อไป

5.1 สรุป

จากการบันทึกผลจะเห็นการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายนั้นพบว่า มีตัวแปรที่สำคัญอยู่หลายประการ เช่น ความถี่เรโซแนนซ์ ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ ขนาดของตัวเก็บประจุ รวมถึงระยะของขดลวดทั้ง 2 ชุด ซึ่งตัวแปรแต่ละตัวมีผลถึงกันทั้งวงจร

ซึ่งจากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ประกอบด้วยความถี่เรโซแนนซ์ ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ ขนาดของตัวเก็บประจุ การกำหนดระยะห่างระหว่างขดลวดทั้ง 2 ชุด ส่งผลทำให้ตัวแปรแต่ละตัวมีค่าที่เปลี่ยนแปลงกันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการทดลองครั้งนี้พิจารณาพารามิเตอร์ที่ระยะการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ระยะห่างระหว่างขดลวดทั้ง 2 ชุดอยู่ที่ 10 cm. เพื่อนำไปคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อนำมาทดสอบจ่ายพลังงานให้กับโหลด พบว่าที่ระยะต่างกันมีผลต่อกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายอย่างมาก ซึ่งการทดสอบตั้งแต่ระยะที่ 2 - 12 cm. พบว่าที่ระยะ 10 cm. ให้แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า รวมถึงกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดคืออยู่ที่ $104.84 V_{dc}$ $10.48 A$. และ $1098.723 W$. แต่ประสิทธิภาพกับลดต่ำลง เนื่องจากระยะที่ห่างมากซึ่งประสิทธิภาพอยู่ที่ 35.501% ห่างพิจารณาถึงระยะที่ประสิทธิภาพดีที่สุด พบว่าที่ระยะ 2 cm. ให้ประสิทธิภาพได้ดีที่สุดคืออยู่ที่ $26.37 V_{dc}$ $2.63 A$. และ $69.58 W$. ที่ประสิทธิภาพอยู่ที่ 52.186% และระยะที่ที่ห่างเพิ่มมาเท่าใดจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพลดต่ำลง จากการทดลองระยะที่ไกลสุด คือ 12 cm. ให้แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า รวมถึงประสิทธิภาพที่ต่ำที่สุด คืออยู่ที่ $97.36 V_{dc}$ $9.736 A$. และ $947.99 W$. และประสิทธิภาพอยู่ที่ 20.011% จะเห็นว่าค่าของตัวแปรต่าง ๆ มีผลต่อพลังงานที่จะส่งออกมา และประสิทธิภาพ จากค่าที่ได้มาจะสรุปได้ว่าระยะห่างส่งผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย

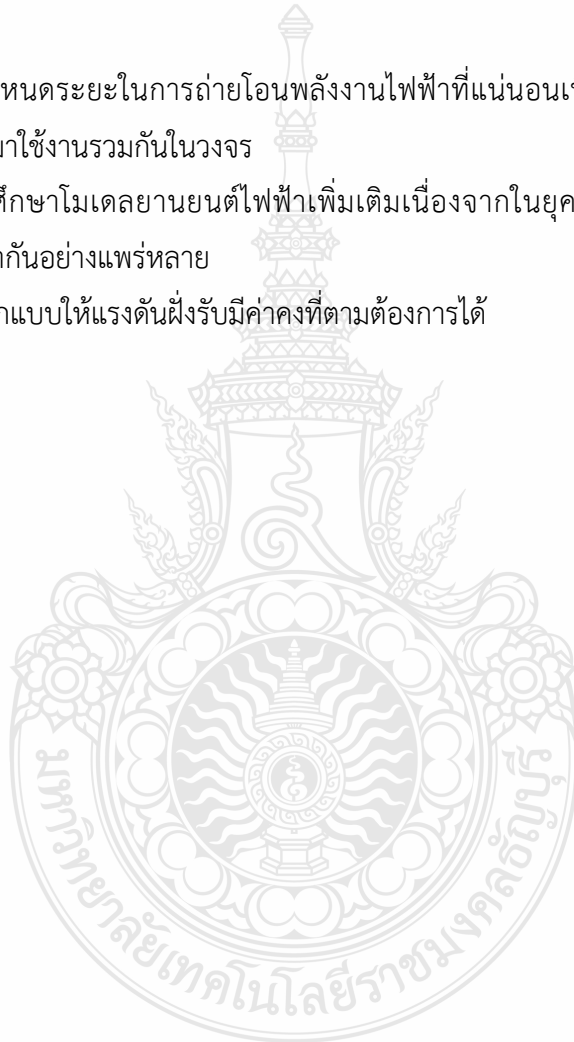
ตั้งที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น ในส่วนของแนวทางในการจัดทำวิทยานิพนธ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าจะเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจเพื่อที่จะนำแนวคิดของวิทยานิพนธ์นี้ไปทำการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นจนอาจจะมีการนำมาประยุกต์หลักการทำงานเพื่อที่จะสามารถสร้างในระบบที่เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะต่าง ๆ ได้ ซึ่งอาจจะเป็นประโยชน์ในด้านของการใช้พลังงานทดแทน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรกำหนดระยะในการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าที่แน่นอนเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่นำมาใช้งานรวมกันในวงจร

5.2.2 ควรมีศึกษาโมเดลยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มเติมเนื่องจากในยุคปัจจุบันผู้ผลิตเริ่มมีการจัดจำหน่ายยานยนต์ไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย

5.2.3 ควรออกแบบให้แรงดันฝั่งรับมีค่าคงที่ตามต้องการได้



บรรณานุกรม

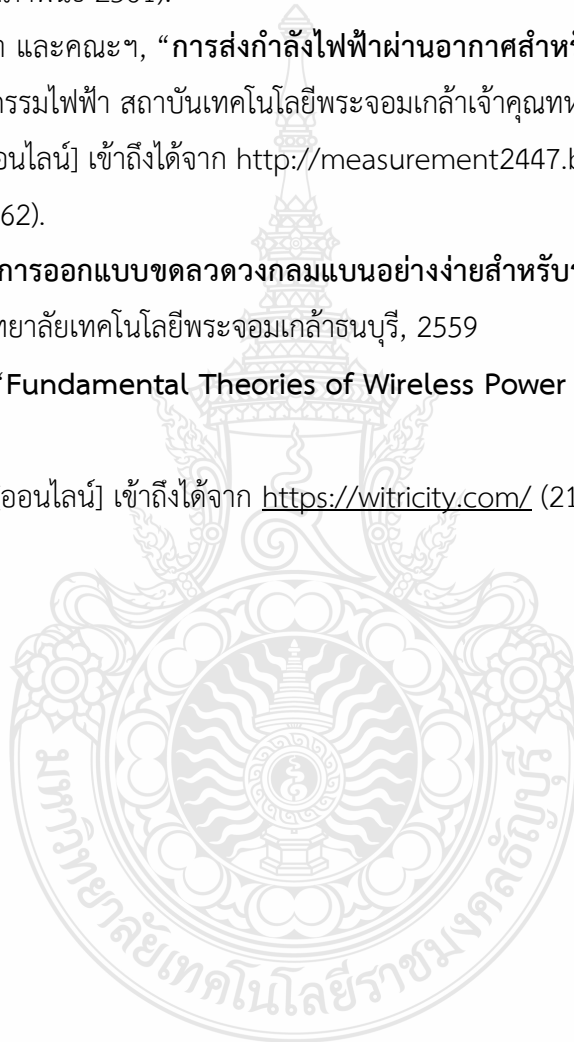
- [1] Dragos Niculae, Mihai Iordache¹, Marilena Stanculescu, Maria Lavinia Bobaru, and Sorin Deleanu², **“A Review of Electric Vehicles Charging Technologies Stationary and Dynamic,”** International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering March 28 – 30 2019
- [2] Xiaolin Mou, and Hongjian Sun, **“Wireless Power Transfer: Survey and Roadmap,”** IEEE Wireless Communications, vol. 20, no. 4, pp. 140–145, August 2013
- [3] Chunbo Zhu, Kai Liu, Chunlai Yu, Rui Ma, and Hexiao Cheng, **“Simulation and Experimental Analysis on Wireless Energy Transfer Based on Magnetic Resonances,”** IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September 3-5, 2008,
- [4] Werachet Khan-ngern and Heinz Zenkner, **“Wireless Power Charging on Electric Vehicles,”** in Proceedings of the International Electrical Engineering Congress 2014
- [5] Tomoki Onishi, Jin Jia, Hideki Omori, Noriyuki Kimura, Toshimitsu Morizane, Mutsuo Nakaoka, Naoki Inoue, **“A New Wireless EV Charger with Communication Function by S/SP Transfer Circuit,”** 978-1-5090-1546-7/16/\$31.00 ©2016 IEEE
- [6] Erdem Asa, Kerim Colak and Dariusz Czarkowski, **“Analysis of Cascaded Multi-Output-Port Converter for Wireless Plug-in Hybrid/On-Board EV Chargers,”** 978-1-4673-9550-2/16/\$31.00 ©2016 IEEE
- [7] Seog Y. Jeong, Van X. Thai, Jun H. Park, and Chun T. Rim, **“Metal Object Detection System with Parallelmistuned Resonant Circuits and NullifyingInduced Voltage for Wireless EV Chargers,”** The 2018 International Power Electronics Conference
- [8] Zhumeng Zhu, Chuanlin Zhang and Dong Li, **“A Novel Parameter Design and OptimizationMethod for Wireless Power Transfer System,”** 978-1-5386-8136-7/18/\$31.00 copyright 2018 IEEE

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] สถาบันยานยนต์ กระทรวงอุตสาหกรรม, “โครงการศูนย์การเรียนรู้เทคโนโลยีและนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า สถาบันยานยนต์,” ม.ป.ป
- [10] สำนักงานส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ ณ นครแฟรงก์เฟิร์ต “นวัตกรรมรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicles – Evs) ในเยอรมนี,” 5 กุมภาพันธ์ 2559
- [11] ผศ.ดร.ยศพงษ์ ลออนวล และคณะ, “การศึกษาการพัฒนาของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า และผลกระทบที่เกิดขึ้นสำหรับประเทศไทย,” สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2558
- [12] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, การไฟฟ้านครหลวง, และ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, “โครงสร้างพื้นฐานด้านไฟฟ้าเพื่อรองรับยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทย,” ม.ป.ป
- [13] นรฤทธิ์ เสนาจิตร, “ยานยนต์ไฟฟ้า(Electric Vehicles : EV),” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 1 กุมภาพันธ์ 2561
- [14] ฝ่ายสื่อสารและภาพลักษณ์องค์กร บริษัท ปตท. จำกัด(มหาชน), “รถยนต์ไฟฟ้าเปลี่ยนโลก,” ธันวาคม 2561
- [15] เทคโนโลยีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก [https://www.carmagazine.co.uk/electric/what-is-electric-car-wireless-charging-wevc-and-how-does-it-work-/](https://www.carmagazine.co.uk/electric/what-is-electric-car-wireless-charging-wevc-and-how-does-it-work/) (21 ตุลาคม 2562)
- [16] Ihssen Jabri, Fethi Ghodbane, Adel Bouallegue and Adel Khedher, “**Analysis of the Coreless Transformer in Wireless Battery Vehicle Charger,**” 2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)
- [17] วงจรเรียงกระแส, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.neutron.rmutphysics.com/physicsboard/forum/index.php?action=dlattach;topic=1053.0;attach=4461> (1 ตุลาคม 2562).
- [18] วงจรเรกติไฟร์และวงจรฟิลเตอร์. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.neutron.rmutphysics.com/physicsboard/forum/index.php?action=dlattach;topic=689.0;attach=4504> (1 ตุลาคม 2562).

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [19] ปรีดิ์ป ปิ่นวันนา และ ภาณุวัฒน์ ราชสีห์, “การประจุแบตเตอรี่แบบไร้สายสำหรับสถานีประจุยานยนต์ไฟฟ้า”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2560.
- [20] วงจรรีโซแนนซ์, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://montri.rmutl.ac.th/assets/circuit-week-11.pdf> (6 กุมภาพันธ์ 2561).
- [21] ภัทรธร เผ่าจินดา และคณะ, “การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [22] ตัวเหนี่ยวนำ, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://measurement2447.blogspot.com/2013/11/1> (1 ตุลาคม 2562).
- [23] ณัฐ ราชกรม, “การออกแบบขดลวดวงกลมแบบอย่างง่ายสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2559
- [24] Chun T. Rim, “Fundamental Theories of Wireless Power Transfer,” IEEE Webinar 2018
- [25] ยานยนต์ไฟฟ้า, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <https://witricity.com/> (21 ตุลาคม 2562)

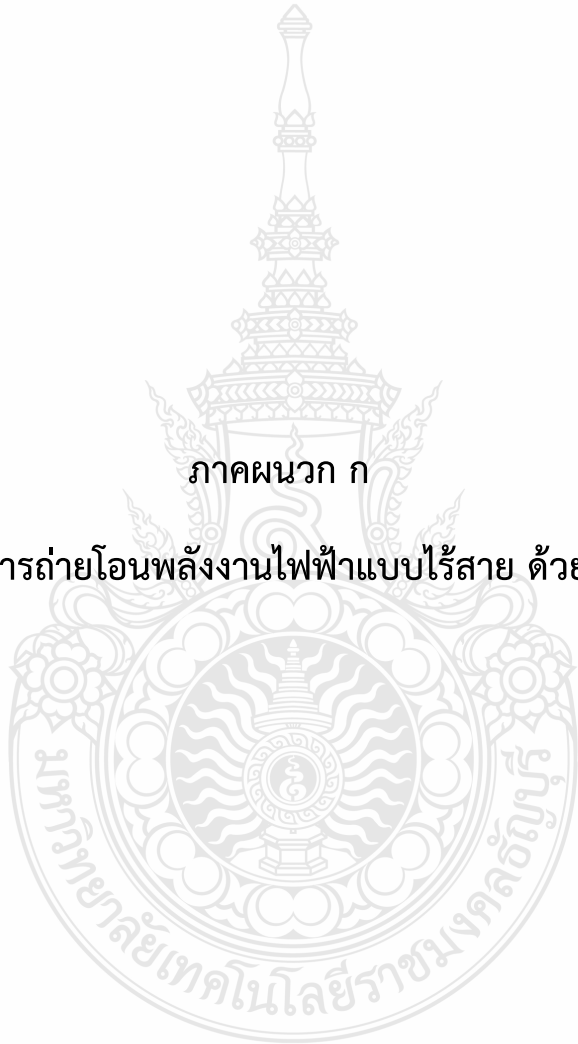


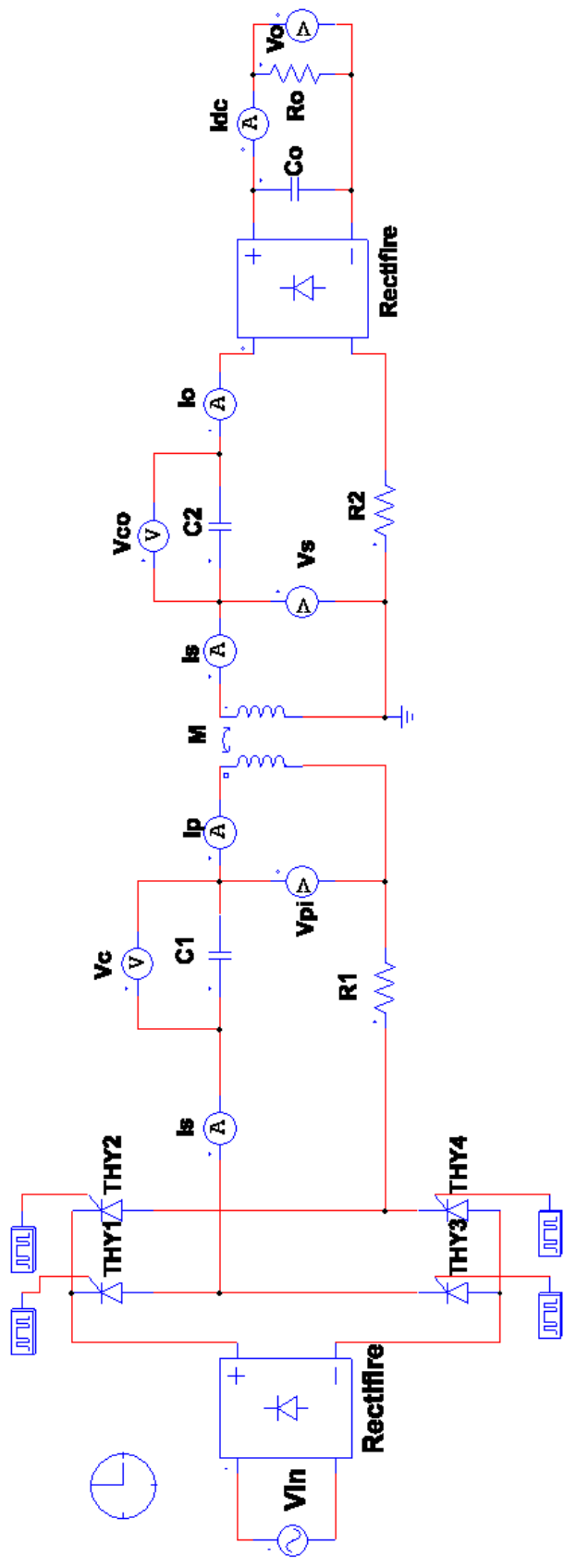
ภาคผนวก



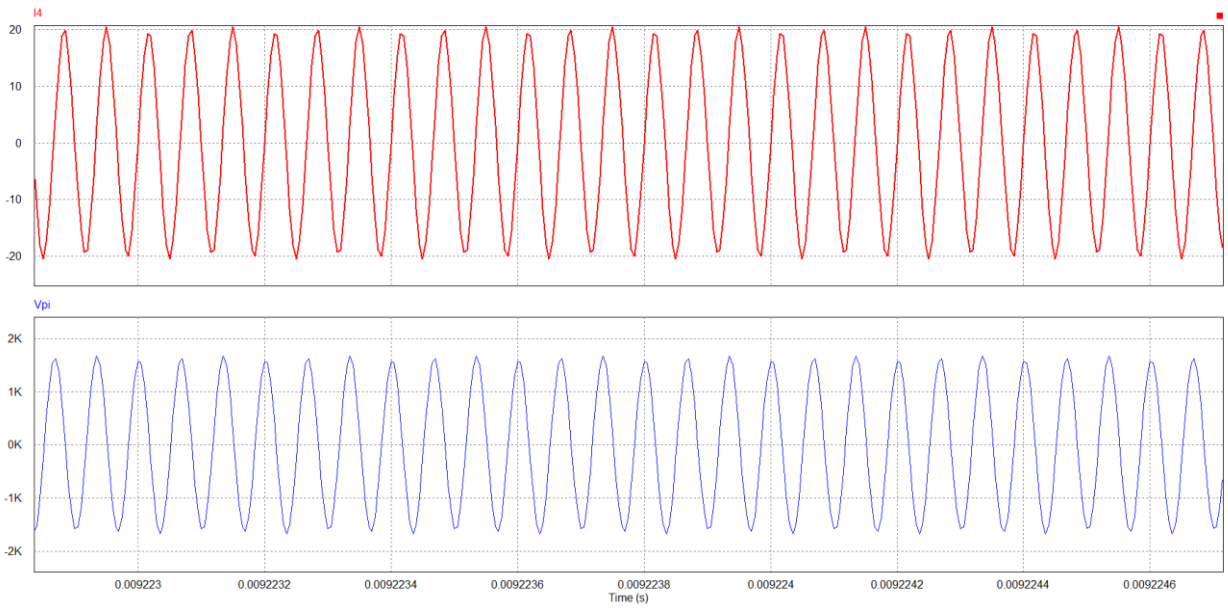
ภาคผนวก ก

การจำลองระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย ด้วยโปรแกรม PSIM

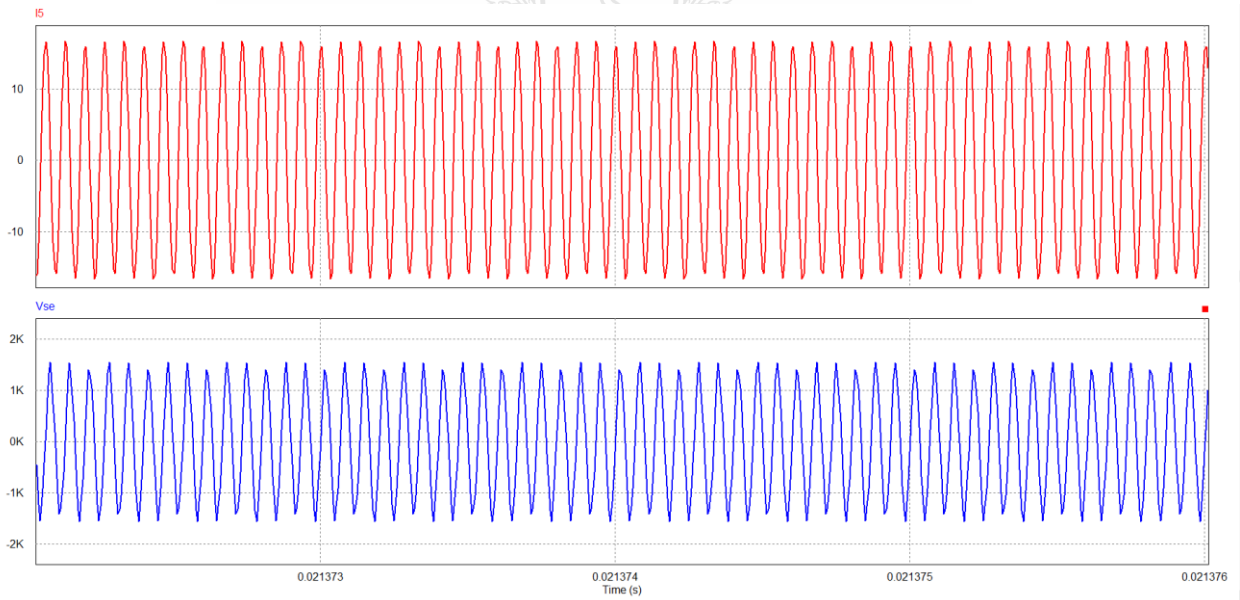




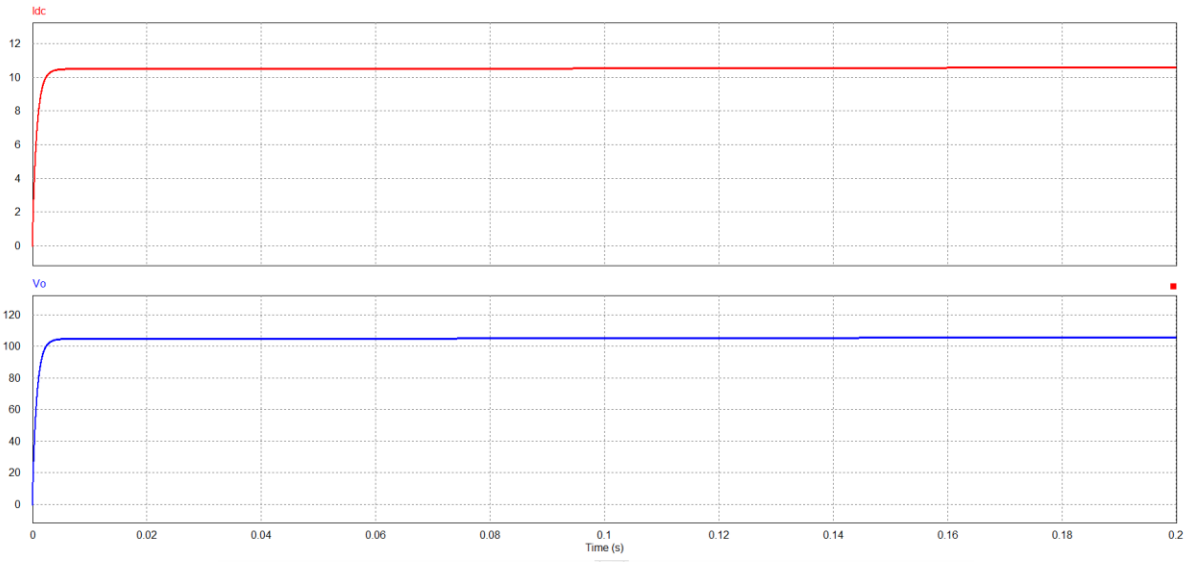
การจำลองระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย ด้วยโปรแกรม PSIM



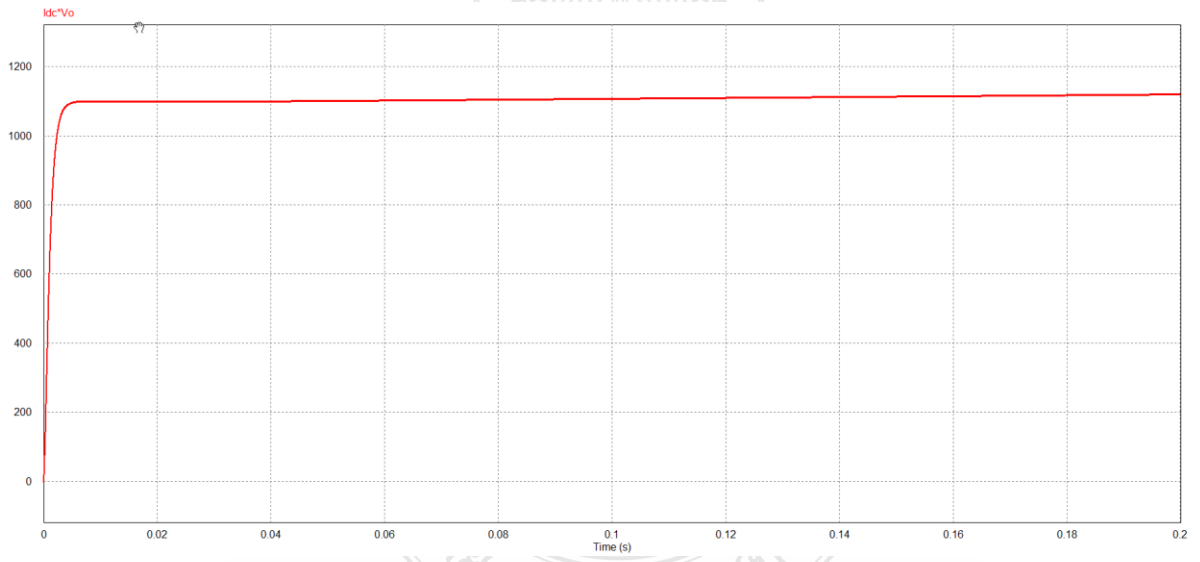
กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภาคส่ง



กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภาครับ



กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ระยะห่าง 10 เซนติเมตร



กำลังไฟฟ้าที่ระยะห่าง 10 เซนติเมตร



ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



**ELECTRICAL
ENGINEERING
NETWORK 2019**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 11

The 11th Conference of Electrical Engineering Network 2019

วันที่ 15-17 พฤษภาคม พ.ศ. 2562

ณ โรงแรมกรุงศรีริเวอร์ อำเภอ พระนครศรีอยุธยา

จังหวัด พระนครศรีอยุธยา

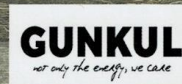


Conference Topics

1. ไฟฟ้ากำลัง (Electrical Power : PW)
2. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics : PE)
3. พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (Energy and Energy Saving : ES)
4. ระบบควบคุมและการวัด (Control Systems and Instrumentation ; CT)



5. คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (Computer and Information Technology : CP)
6. วงจรอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสาร (Electronics Circuit and Communication : EC)
7. นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (Innovation and Invention : IN)
8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (General Electrical Engineering : GN)
9. หัวข้อพิเศษด้านวิศวกรรมไฟฟ้า (Special Session on Electrical Engineering : SS)



วันพฤหัสบดี ที่ 16 พฤษภาคม 2562				
ลงทะเบียน (Registration)				
นำเสนอผลงานวิชาการ (Presentation 3)				
Room	ช่วงเวลา 1	ช่วงเวลา 2	กล่าวถึง	แม่สี
Session	PW-B	IN-C	GN-C	ES-B
Paper IDs	PW06-PW09	IN11-IN14	GN11-GN14	ES06-ES09
Session Chair	ผศ.ดร.ณัฐวิทย์ โสภณเกษียรทรัพย์ (ในตราสัญลักษณ์) อ.จิรวัฒน์ พานอง (ในตราสัญลักษณ์)	ดร.อภิญญา นวลน้อย (ในตราสัญลักษณ์) อ.ชานนท์ ชูพงษ์ (ในตราสัญลักษณ์)	ดร.วิเชษฐ์ ธีระภักดิ์ (ในตราสัญลักษณ์) อ.บุษยพัทธ์ สันเกต (ในตราสัญลักษณ์)	ผศ.ไพโรจน์ กอสง่า (ในตราสัญลักษณ์) อ.ทองจันทร์ สุเมธา (ในตราสัญลักษณ์)
Coffee Break 2				
นำเสนอผลงานวิชาการ (Presentation 4)				
Room	ช่วงเวลา 1	ช่วงเวลา 2	กล่าวถึง	แม่สี
Session	PW-C	IN-D	GN-D	ES-C
Paper IDs	PW10-PW13	IN15-IN18	GN15-GN18	ES10-ES13
Session Chair	รศ.ดร.บุษยิณี ปนัสถียร (ในตราสัญลักษณ์) ผศ.สิริชัย แดงแดง (ในตราสัญลักษณ์)	ดร.ประจักษ์ นวลน้อย (ในตราสัญลักษณ์) อ.ชานนท์ ชูพงษ์ (ในตราสัญลักษณ์)	ผศ.ดร.กฤษเดช ขวัญใหญ่ (ในตราสัญลักษณ์) อ.นรมาศ วงษ์ศิลป์ (ในตราสัญลักษณ์)	รศ.ชัยณรงค์ นิตยภัทน์วิชัย (ในตราสัญลักษณ์) อ.ทองจันทร์ สุเมธา (ในตราสัญลักษณ์)
รับประทานอาหารกลางวัน (Lunch 2)				
นำเสนอผลงานวิชาการ (Presentation 5)				
Room	ช่วงเวลา 1	ช่วงเวลา 2	กล่าวถึง	แม่สี
Session	PW-D	IN-E	EC-A	ES-D
Paper IDs	PW14-PW18	IN19-IN23	EC01-EC05	ES14-ES18
Session Chair	ผศ.ดร.วราณี ศรีสวัสดิ์ (ในตราสัญลักษณ์) อ.ณัฐพร พงษ์ไธสง (ในตราสัญลักษณ์)	รศ.ดร.กฤษณ์นภี ภูมิภักดิ์พิชญ์ (ในตราสัญลักษณ์) อ.สุเมธิต์ ชัยทรัพย์นงนิจ (ในตราสัญลักษณ์)	อ.อภิษฎา พงษ์ทรัพย์ (ในตราสัญลักษณ์) อ.สิริชัย โสภณ (ในตราสัญลักษณ์)	ผศ.ดร.ไพโรจน์ นิตยภัทน์วิชัย (ในตราสัญลักษณ์) ผศ.สิริชัย แดงแดง (ในตราสัญลักษณ์)
Coffee Break 3				
นำเสนอผลงานวิชาการ (Presentation 6)				
Room	ช่วงเวลา 1	ช่วงเวลา 2	กล่าวถึง	แม่สี
Session	PW-E	IN-F	EC-B	CT-A
Paper IDs	PW19-PW23	IN24-IN28	EC06-EC9	CT01-CT05
Session Chair	ผศ.ดร.สุนทรี วรรณการ (ในตราสัญลักษณ์) อ.ณัฐพร พงษ์ไธสง (ในตราสัญลักษณ์)	ผศ.เกษียรดี พงษ์เกษม (ในตราสัญลักษณ์) อ.ชานนท์ ชูพงษ์ (ในตราสัญลักษณ์)	ผศ.ดร.นรเศรษฐ์ วัลย์พารณีย์ (ในตราสัญลักษณ์) ดร.กฤษณา พงษ์วรรณ (ในตราสัญลักษณ์)	ผศ.ดร.วราณี ศรีสวัสดิ์ (ในตราสัญลักษณ์) อ.พวงดีศรี ช่างกา (ในตราสัญลักษณ์)
รับประทานอาหารว่าง (Banquet) วันพฤหัสบดี 2				

บทความสาขาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)

รหัส	ชื่อเรื่อง	หน้า
PE-01	วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบฟูล-พูลเรโซแนนซ์ที่มีอัตราขยายแรงดันด้านออกสูงบนพื้นฐานที่มีการต่อยอดกับวงจรเรียงกระแสแบบทวิแรงดันสำหรับแหล่งผลิตพลังงานแรงดันต่ำ <i>รวีธรา บุญทับ, ทศสิน อิ่มศิริ, นนทิยา ทรัพย์าคม, วิโรจน์ ธงอาจ และ ธนุศักดิ์ ปิงงาม</i> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	117
PE-02	ความถูกต้องของโดเมนเวลาในรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์กำลังบนพื้นฐานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรโซแนนซ์คลาสอีสำหรับเสาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำภายในครัวเรือน <i>ปฏิพงษ์ เจริญเรืองเหนือ และ สันติ ทรัพย์ทานโค</i> สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	121
PE-03	การประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 32 บิตต้นทุนต่ำเพื่อควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์เต็มคลื่นชนิดเลื่อนเฟสของเครื่องชาร์จแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า <i>ณัฐพงษ์ แก้วมาลี, กฤษณ์ เฉลยไข, วิชชา ชำนาญโพธิ์, อังคณา เจริญมี และ ไบรดา เฉลยไข</i> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	125
PE-04	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สาย สำหรับการประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า <i>ชาตุมงคล เรืองขจร และ กฤษณ์ชาญ ภูมิภักดีพิชญ์</i> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	131
PE-05	วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดห้ากึ่งสำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสสองขั้วโดยวิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม <i>นารี รุจิธรรมพ์ และ เวศิน นิธิรัตน์</i> มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	137
PE-06	การควบคุมดิจิทัลลดเสียงรบกวนของการแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงรีโซแนนซ์แบบ LLC สำหรับหลอดแอลอีดีส่องถนน <i>สาธิต มิ่งกลางจารย์, โชนวิวัฒน์ อัครวิโรฒ, สุวัฒน์ สุภรณ์และ, กมล จินตรีอมรกุล และ Kohji Higuchi</i> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	139
PE-07	การควบคุมกระแสแบบเวกเตอร์สำหรับระบบเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟสด้วยคาสเคดอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ <i>ศศิภาณุ บุญทวี, อัครวิทย์ โชเชนกุลวัฒน์, เฉลิมชาติ มานพ และ วิจิตร กิณเรศ</i> สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	143
PE-08	การสร้างอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ ชนิดเซมิบริดจ์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส <i>ประพจน์ กองสุข, กิ่งชาติ โคฬัง, มนต์วี คุณอริยะเมธี, วิจิตรวิบูลย์ บุญช่วย และ วิจิตร กิณเรศ</i> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	147
PE-09	ระบบรีเลย์สำรองควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างสาธารณะเพื่อแก้ปัญหาไฟฟ้าแสงสว่างสาธารณะไม่ทำงาน <i>วินัย มะลิทอง, วิวัฒน์ ภูฏานุกุล และ ศิริวัฒน์ หงษ์ทอง</i> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	151
PE-10	การศึกษาสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเฟส <i>บริบูรณ์ มาโชติ, วิจิตร กิณเรศ และ เฉลิมชาติ มานพ</i> สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	155
PE-11	การศึกษาผลกระทบของการเริ่มหมุนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบนิ่มนวลที่ส่งผลต่อแรงบิดแม่เหล็ก <i>วิษณุ อธิยานวิทย์, วิจิตร กิณเรศ และ อานันท์วิวัฒน์ คุณากร</i> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตถนนนคร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	159



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 11

The 11th Conference of Electrical Engineering Network 2019 (EENET2019)

ขอมอบเกียรติบัตรฉบับนี้ให้เพื่อแสดงว่า

นายชาญณรงค์ เรืองขจร

ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความเรื่อง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สาย

สำหรับการประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า

ระหว่างวันที่ 15-17 พฤษภาคม พ.ศ. 2562

ณ โรงแรม กรังด์ปรีซ์ ริเวอร์ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ
ประธานคณะกรรมการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

เจ้าอาภาภาติ ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล
ประธานดำเนินการจัดการประชุมครั้งที่ 11

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สาย สำหรับการประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า

Mathematical Modelling of Wireless Power Transfer System for Neighborhood Electric Vehicles

ชาญณรงค์ เรืองขจร¹ และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี โทรศัพท์ 0-2549-3420 E-mail: Channarong_r@mail.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สายสำหรับการประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานระบบการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สายได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในสองสามปีที่ผ่านมา เนื่องมาจากการพัฒนาอุปกรณ์ต่าง ๆ เกี่ยวกับเทคโนโลยีนี้เป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ การประจุแบตเตอรี่ผ่านระบบการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สายก็มีการทำวิจัยโดยใช้หลักการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สายเทคนิคการเหนี่ยวนำ เรโซแนนซ์แม่เหล็กที่มีการส่งผ่านพลังงานได้ระยะห่างระหว่าง 5 – 10 เซนติเมตร บทความนี้จึงนำเสนอการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้พารามิเตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎีและยืนยันผลโดยการทดลองในห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ: ระบบการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สาย ยานยนต์ไฟฟ้า, เรโซแนนซ์แม่เหล็ก, แบตเตอรี่, ยานยนต์ไฟฟ้า

Abstract

This paper presents mathematical modelling of wireless power transfer system for neighborhood electric vehicles. According to the research on developing the applications of wireless power transfer system has increased considerably during last few years. Due to functional and environmental benefits, charging of electric vehicles via wireless power transfer system has been contemplated in academic and industrial research. The wireless power transfer system based on magnetic resonant coupling technique is considered as an efficient way for contactless power transfer over medium distances (up to about 5 to 10 centimeters). This paper presents a comprehensive computer programme based model for such a system using the parameters of the model that are derived from mathematical equations. The performance of the model is also verified experimentally.

Keywords: wireless power transfer, electric vehicles, magnetic resonant, battery, electric vehicle

1. บทนำ

เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle Technology) เป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในอนาคตอย่างมากเนื่องจากการปล่อยมลพิษต่ำ ไม่ต้องพึ่งพาเครื่องยนต์ในการขับเคลื่อน ซึ่งยานยนต์ไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญคือ มอเตอร์ไฟฟ้า ระบบควบคุมมอเตอร์ และแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า โดยมีการประจุแบตเตอรี่จากระบบไฟฟ้าภายนอกผ่านเครื่องประจุไฟฟ้า เทคโนโลยีการประจุแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการประจุแบตเตอรี่โดยตรง (Direct charger) การประจุแบตเตอรี่แบบนี้ได้ทำการเชื่อมต่อยานยนต์ไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยตรงผ่านการเสียบปลั๊ก ของยานยนต์ไฟฟ้า หรือเรียกว่าระบบปลั๊กอิน (Plug-in) ซึ่งการประจุแบตเตอรี่โดยตรงนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ

- 1) การประจุแบตเตอรี่แบบปกติ (Normal charging)
- 2) การประจุแบตเตอรี่แบบเร็ว (Quick charging)

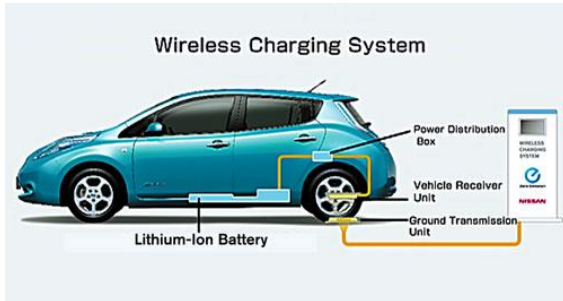
การประจุแบตเตอรี่แบบปกตินั้นเหมาะสำหรับการติดตั้งเพื่อประจุแบตเตอรี่ที่บ้าน สามารถประจุแบตเตอรี่ทิ้งไว้ในระยะเวลาสั้น ๆ แต่เนื่องจากการประจุแบตเตอรี่แบบปกติจำเป็นต้องใช้เวลานานในการประจุแบตเตอรี่จนเต็ม จึงได้มีการพัฒนาระบบประจุแบตเตอรี่แบบเร็วซึ่งจะใช้เวลาในการประจุแบตเตอรี่ประมาณ 15-20 นาที และสามารถประจุได้ถึงระดับ 80% ซึ่งเหมาะสำหรับการตั้งเป็น สถานีประจุไฟฟ้า (Charging station) แต่อย่างไรก็ตามวิธีการประจุแบตเตอรี่โดยตรงเป็นวิธีการที่ยู่ยาก ซึ่งไม่สะดวกสบายเป็นอย่างมาก แต่การประจุแบตเตอรี่ยังมีอีกวิธีที่สะดวกสบายและปลอดภัยกว่าวิธีดังกล่าว คือ การประจุแบตเตอรี่แบบไร้สาย รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างระบบการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สายของกลุ่มวิจัยบริษัท Mazda ประเทศญี่ปุ่น โดยได้รับพลังงานไฟฟ้าจากกริดมาที่จุดสถานีประจุไฟฟ้าแล้วทำการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 11

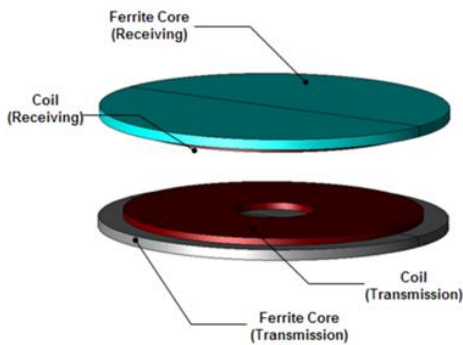
11th Conference of Electrical Engineering Network 2019 (EENET 2019)

ของระบบโอนย้ายพลังงานไร้สายแบบสนามแม่เหล็กเพื่อไปประจุแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้านออกของระบบโอนย้ายพลังงานไร้สาย [1]



รูปที่ 1 ตัวอย่างระบบการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สาย [1]

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ทำให้คณะวิจัยเกิดความคิดที่จะออกแบบระบบโอนย้ายพลังงานไร้สาย จึงได้จัดทำการศึกษาและจัดสร้างต้นแบบระบบโอนย้ายพลังงานไร้สายขึ้น ซึ่งได้จำลองระบบการทำงานของระบบที่มีโหลดเป็นยานยนต์ไฟฟ้าโดยองค์ประกอบต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นเป็นพิกัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ พิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อน ขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับการประจุไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2 หลักการโอนย้ายพลังงานผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 2 แสดงหลักการของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless Power Transfer) อาศัยหลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างขดลวดตัวนำ 2 ชุด ขดลวด A (Transmission coil) รับพลังงานงานจากแหล่งจ่ายโดยการนำกระแสจากแหล่งจ่ายพลังงานดังกล่าวสร้าง

สนามแม่เหล็กขึ้นรอบขดลวด A ซึ่งขดลวด A จะถูกออกแบบมาพิเศษเพื่อให้สนามแม่เหล็กส่งผ่านอากาศไปได้ไกลที่สุด ขดลวด B (Receiving coil) ทำหน้าที่รับเส้นแรงแม่เหล็กที่ส่งผ่านมาทางอากาศแล้ว เหนี่ยวนำเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าและเกิดพลังงานไฟฟ้าเพื่อป้อนให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำผ่านสนามแม่เหล็ก หรือการเคลื่อนที่แม่เหล็กผ่านขดลวดตัวนำ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดตัวนำนั้น พลังงานที่ได้ใช้การพันของขดลวดมาช่วยเพื่อให้เกิดคลื่นพลังงานออกมาในรูปแบบและขนาดของคลื่นพลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันขดลวด [2] ดังนั้นการออกแบบการพันขดลวดเป็นสิ่งที่สำคัญ บทความนี้จึงต้องการศึกษาหลักการการทำงานและออกแบบของการประจุแบตเตอรี่แบบไร้สายสำหรับสถานีประจายานยนต์ไฟฟ้าโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการโอนย้ายด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยจะผ่านวงจรควบคุมและแปลงไฟฟ้าส่งเข้าไปประจุแบตเตอรี่ ในการเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด เกิดเป็นพลังงานแม่เหล็ก ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กก็จะคล้องผ่านขดลวดอีกฝั่ง คือเกิดฟลักซ์เกี่ยวคล้องกันทำให้สามารถเหนี่ยวนำให้อีกฝั่งเกิดกระแสไฟฟ้า ขึ้นมาไหลไปยัง พลังงานแบบไร้สายสำหรับการประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า และจำลองการทำงานของระบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์และสร้างต้นแบบเพื่อพิสูจน์ผลการจำลองการทำงานจริง

2. ระบบการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สาย (Wireless Power Transfer)

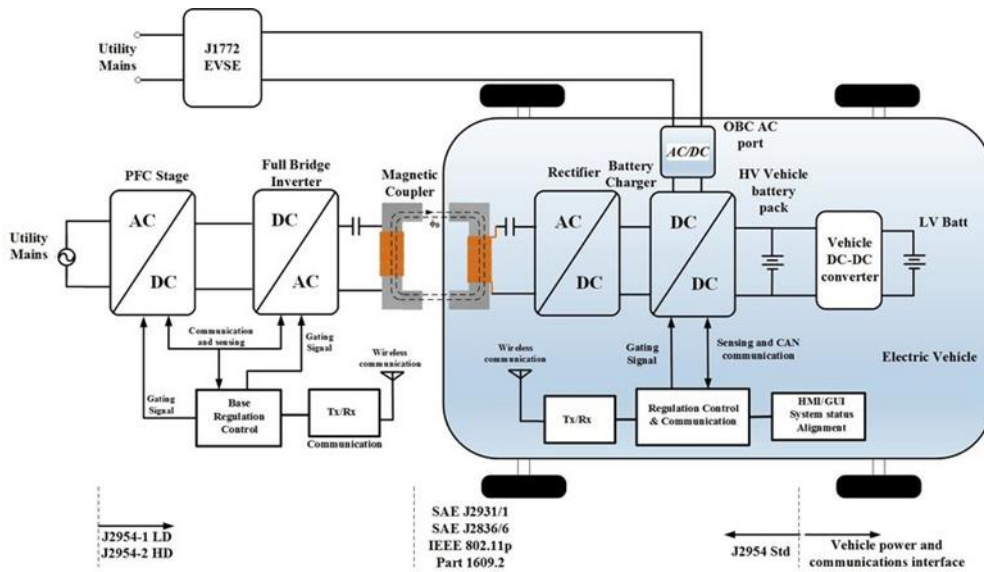
เทคโนโลยีการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย ระบบการชาร์จไร้สายทำงานได้ด้วยการเหนี่ยวนำสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) ต้องมีภาคส่งที่ต้องส่งสัญญาณ ออกใน ช่วง ความถี่ (Frequency) ที่กำหนด โดยมีการกำหนดกำลังการส่งที่เหมาะสมและต่อเนื่องรวมทั้งต้องมีวงจรควบคุมการส่งสัญญาณดังกล่าว ส่วนภาครับประกอบ โหลดที่เราต้องการหรือสามารถนำไปประจุให้กับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าได้ ดังแสดงในรูปที่ 3 [3]

การส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสามารถทำได้ในหลายรูปแบบในที่นี้จะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบไม่แผ่พลังงาน (Non-radiating) และแบบแผ่พลังงาน (Radiating)

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 11

11th Conference of Electrical Engineering Network 2019 (EENET 2019)



รูปที่ 3 ระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

2.1 การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบไม่แผ่พลังงาน

1) การคับปลิงแบบเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic Inductive Coupling) จะใช้การส่งผ่านพลังงานจากการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก โดยจะมีลักษณะการทำงานคล้ายหม้อแปลงซึ่งจากกฎของฟาราเดย์จะพบว่าแรงดันเหนี่ยวนำ (V_i) ที่ด้านรับจะมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า (B) ผ่านพื้นที่ผิว (S) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$V_i = -\frac{\partial}{\partial t} \int B \cdot dS \quad (1)$$

2) การคับปลิงแบบเรโซแนนซ์แม่เหล็ก (Resonant Magnetic) โดยทั่วไปประกอบด้วยภาคส่งและรับซึ่งมีความถี่เรโซแนนซ์เดียวกัน โดยวงจรสมมูลทางไฟฟ้า อาจจะอยู่ในรูปของอนุกรมหรือขนานก็ได้ ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน ทั้งสองแบบจะใช้กลไกการทำงานจะใช้การเชื่อมต่อแบบสนามแม่เหล็กจากขดลวดตัวส่งไปยังตัวรับ และมีพารามิเตอร์ที่สำคัญอยู่สองตัวคือ ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor, Q) และ ค่าเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance, M) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ (k) โดย Q สามารถหาได้ดังแสดงในสมการที่ 2

$$Q_i = \frac{\omega_0 L_{Li}}{R_{loss,i}} = \frac{\omega_0 W_{Li}}{R_i} \quad (2)$$

เมื่อ W_{Li} และ $P_{loss,i}$ คือพลังงานสะสมและการสูญเสียในขดลวด และ $i = 1, 2$ คือที่ตัวส่งหรือรับ ในขณะที่ค่าเหนี่ยวนำร่วม M และ k สามารถหาได้จากสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$M = k \sqrt{L_t \times L_r} \quad (3)$$

$$k = \frac{1}{\left[1 + 1.58 \left(\frac{d}{\sqrt{R_t R_r}}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (4)$$

เมื่อ d คือระยะห่างขดลวด และ R_t และ R_r คือ รัศมีของขดลวดตัวส่งและรับตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบไม่แผ่พลังงานทั้งสองวิธี การคับปลิงแบบเรโซแนนซ์แม่เหล็กสามารถส่งผ่านพลังงานได้ไกลกว่าแต่อย่างไรก็ตามการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบไม่แผ่พลังงาน ทั้งสองวิธีก็มีข้อดีคือมีความไวต่อการวางที่ไม่อยู่ในแนวที่เหมาะสม และที่สำคัญคือเมื่อนำไปใช้กับอุปกรณ์มากกว่าหนึ่งตัวจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงไป

3) การคับปลิงแบบความจุ (Capacitive Coupling) ใช้สำหรับงานที่ต้องการกำลังงานต่ำเพราะเมื่อใช้ที่แรงดันสูงมาก ๆ จะเกิดอันตรายได้ง่าย อย่างไรก็ตามข้อดีคือ สนามแม่เหล็กจะอยู่ขอบเขตที่จำกัดมากกว่าการคับปลิงแบบเหนี่ยวนำแม่เหล็ก ดังนั้นสนามรั่วไหลจึงน้อยกว่ารวมทั้งสามารถใช้ในบริเวณที่มีโลหะขวางกันได้ดี

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 11

11th Conference of Electrical Engineering Network 2019 (EENET 2019)

2.2 การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบแผ่นพลังงาน

การส่งพลังงานแบบนี้จะใช้คลื่นไมโครเวฟหรือใช้เลเซอร์ ตัวส่งจะส่งผ่านท่อนำคลื่นผ่านไปยังสายอากาศผ่านอากาศและไปถึงตัวรับผ่านสายอากาศไปยังวงจรเรียงกระแส ซึ่งเรียกว่า สายอากาศปรับกระแส (Rectenna: Rectifier + Antenna) จะได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง องค์กร JAXA ของญี่ปุ่นใช้ส่งพลังแสงจากนอกโลกลงมาสู่พื้นโลกโดยใช้ แบบแผ่นพลังงาน ซึ่งไม่ได้ใช้เลเซอร์เพราะว่าจะมีปัญหาเกี่ยวกับแสงอาทิตย์ที่นอกโลกก่อนแล้วส่งพลังงานทางคลื่นไมโครเวฟมายังโลกซึ่งจะมีประสิทธิภาพมากกว่า [4]

2.3 การเพิ่มระยะห่างและประสิทธิภาพ

การเพิ่มประสิทธิภาพอาจทำให้ระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดพลังงานกับโหลดเพิ่มมากขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกรณีของการคัปปลิงแบบเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และการคัปปลิงแบบเรโซแนนซ์แม่เหล็ก คือ ความถี่การทำงานของวงจร การออกแบบขดลวด การออกแบบวงจรประกอบอื่นๆ และผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมและวัสดุ เนื่องจากมีข้อจำกัดของจำนวนหน้าในการเขียนในสไลด์จะเน้นไปในส่วนของความถี่และการออกแบบขดลวดเป็นหลัก

1) ประสิทธิภาพสูงสุดสามารถหาได้จากสมการที่ (5) และ (6) ซึ่งประสิทธิภาพจะส่งผลโดยตรงต่อการเลือกความถี่การทำงานที่เหมาะสม

$$\eta_{\max} = \frac{(kQ)^2}{1 + \sqrt{1 + (kQ)^2}} \quad (5)$$

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{2}{kQ} \quad (6)$$

โดยผลคูณของ kQ เรียกว่า Figure-of-Merit : FOM= kQ เมื่อ FOM มีค่าสูงจากสมการที่ (6) จะพบว่า FOM เป็นกุญแจที่สำคัญในการเพิ่มข้อจำกัดขอประสิทธิภาพ

2) การออกแบบขดลวดถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมากที่สุดของการคัปปลิงแบบเหนี่ยวนำแม่เหล็กและการคัปปลิงแบบเรโซแนนซ์แม่เหล็ก ซึ่งเป็นเหมือนส่วนของประตูทางเข้าออกของพลังงานเฉพาะ ฉะนั้นถ้าออกแบบในส่วนนี้ไม่ดีหรือไม่มีประสิทธิภาพจะส่งผลต่อส่วนอื่นเป็นอย่างมาก องค์ประกอบของขดลวดที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ รูปร่าง ขนาดหรือพื้นที่ จำนวนขดลวด และวัสดุที่พัน

จากการศึกษารูปร่างของขดลวดแบบต่างๆ ทั้งวงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยม พบว่ารูปร่างส่งผลต่อการคัปปลิงแม่เหล็ก (k) ไม่ต่างกัน โดยวงกลมจะคัปปลิงได้ดีที่สุด ขณะที่รูปร่างอื่นมีขนาดลดลง เพราะเกิดจากการสูญเสียที่มุมของขดลวด ในขณะที่จำนวนรอบ (N)

ขนาดของเส้นลวดและช่องว่างระหว่างขดลวดก็มีผลต่อ k ไม่มากแต่จะส่งผลต่อ Q มากกว่า ถ้ารัศมีของขดลวดตัวรับมีค่าคงที่ค่าคัปปลิงจะมีค่ามากขึ้น ถ้ารัศมีของขดลวดตัวส่งมีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งเป็นคำตอบที่ว่าทำไมรัศมีของขดลวดตัวส่งยังมีขนาดใหญ่กว่าตัวรับ ซึ่งมีการคัปปลิงได้ดีกว่ากรณีที่ขดลวดเท่ากัน ในขณะที่ผลต่อ Q ถ้าขนาดของเส้นลวดมีขนาดใหญ่ขึ้นและระยะระหว่างขดลวดลดลง จะทำให้ Q เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้สิ่งที่ต้องพิจารณาคือ การมีช่องว่างระหว่างขดลวดน้อยจะทำให้ค่าตัวเก็บประจุพาราซิติก มีค่ามากขึ้นซึ่งจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ตัวเอง (Self-resonance) ของขดลวดมีค่าต่ำลงซึ่งจะทำให้ช่วงใช้งานขดลวดมีความถี่ลดลง [5]

3. การออกแบบ

การออกแบบต้นแบบระบบการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สายสามารถแบ่งองค์ประกอบประกอบออกได้ 6 ชุด คือ แผงวงจรถูกคุม STM32F407G-DISC1 หม้อแปลงไฟฟ้าลดระดับแรงดัน (Step-down transformer) วงจรชุดส่ง (Transmission driving circuit) ขดลวดชุดส่ง (Transmission coil) ขดลวดชุดรับ (Receiving driving circuit) และวงจรชุดรับ (Receiving coil) รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างหลักของระบบการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สายสำหรับประยุกต์ใช้ไฟฟ้า



รูปที่ 4 ต้นแบบระบบการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สาย

ต้นแบบระบบการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สายสามารถอธิบายเพิ่มเติมในส่วนที่สำคัญดังต่อไปนี้

3.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อระบบการโอนย้ายพลังงานแบบไร้สาย โดยจะเริ่มทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากหม้อแปลงไฟฟ้าเข้ามาผ่านวงจรเรียง

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 11

11th Conference of Electrical Engineering Network 2019 (EENET 2019)

กระแสไฟฟ้าและตัวเก็บประจุขนาด 1000 μ F, 50V ซึ่งจะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

3.2 คอนเวอร์เตอร์ (Converter) เป็นวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง การควบคุมความถี่และแรงดันในวงจรให้สามารถปรับเปลี่ยนไปตามต้องการได้ โดยวงจรที่เลือกมาใช้จะเป็นคอนเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุ 1000 μ F 2 ตัวต่ออนุกรมกันทำให้แรงดันที่มาจากแหล่งจ่ายลดลงเหลือเพียงครึ่งเดียว และมอสเฟตเบอร์ r6076enz1 มีพิกัดทนแรงดัน 600V และกระแส 76A ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จำนวน 2 ตัว สำหรับเป็นตัวสวิตช์ [6-8]

3.3 การออกแบบขดลวดตัวส่งแกนอากาศ การส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายจำเป็นต้องใช้ขดลวดในการสร้าง ฟลักแม่เหล็กโดยขดลวดตัวส่ง (Transmitter) เป็นขดลวดที่ใช้กำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อส่งพลังงานไปขดลวดตัวรับ (Receiver) ในที่นี้ จะใช้แกนอากาศ (Air) เป็นสื่อกลางในการส่งผ่านพลังงาน [9] ในส่วนรูปร่างของขดลวดแบบวงกลมจะได้ประสิทธิภาพสูงสุดขณะที่รูปร่างอื่นจะเกิดการสูญเสียที่มุมของขดลวด



รูปที่ 5 การพันขดลวดตัวส่งและขดลวดตัวรับ

จากรูปที่ 5 แสดงการพันขดลวดตัวส่ง โดยออกแบบให้ตัวเหนี่ยวนำจะใช้ลวดอบน้ำยาเบอร์ 26 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 มิลลิเมตร พื้นที่หน้าตัด 0.1624 ตารางมิลลิเมตรทนกระแสได้ 0.547A นำมาตีเกลียวจำนวน 7 เส้น เพื่อให้สามารถใช้งานในค่ากระแสที่สูงขึ้นได้ ขดลวดตัวส่ง (Transmitter) ออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.7 นิ้ว จำนวนรอบ 34 รอบ และมีความยาวของขดลวดเท่ากับ 4.1 นิ้ว เท่ากันทั้ง 2 ขด โดยค่าความเหนี่ยวนำที่ได้มีค่าเท่ากับ 140 μ H โดยค่าความเหนี่ยวนำแกนอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$L = \frac{(d^2 \times n^2)}{(18d + 40l)} \quad (7)$$

$$L = 140 \mu H$$

จากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำขนาด 140 μ H และใช้ตัวเก็บประจุขนาด 0.47 μ F ต่ออนุกรมกันภายในวงจรทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์อนุกรม ค่าตัวเก็บประจุและค่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรนั้น จะเกิดการหักล้างกันจนเหลือศูนย์ เพื่อจ่ายให้กับขดลวดตัวส่ง (Transmitter) โดยความถี่เรโซแนนซ์ที่ทำให้ค่าคือ 19.62 kHz สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (8)

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

$$f_o = 19.62 \text{ kHz}$$

4. ผลการทดลอง

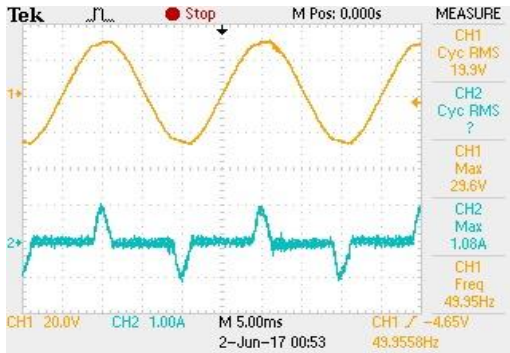
จากการบันทึกผลจะเห็นว่าค่าพลังงานไฟฟ้าจะลดลงตามระยะของขดลวดที่ห่างออกไป และในขณะที่กำลังไฟฟ้าลดลงจะเห็นว่าค่าประสิทธิภาพก็จะลดลงตามไปด้วย ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้มีตัวแปรที่สำคัญอยู่หลายส่วนคือ ความถี่เรโซแนนซ์ ขนาดตัวเก็บประจุ ขนาดตัวเหนี่ยวนำ และระยะห่างของขดลวดระหว่างขดส่งและขดรับ จากการทดลองกับโหลดหลอดไฟฟ้าขนาด 20W พบว่าที่ระยะห่างต่างกัน มีผลต่อกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายอย่างมาก ซึ่งการทดสอบในแนวแกน X ที่ระยะห่าง 1 ถึง 4 เซนติเมตร พบว่าที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร ระดับแรงดันอินพุต 30V ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกเท่ากับ 12.54V กระแสไฟฟ้าด้านออกเท่ากับ 1.66A ประสิทธิภาพ 88.96% เป็นผลที่น่าพอใจที่สุดสำหรับการทดสอบนี้เพราะได้ประสิทธิภาพสูงกว่าระยะอื่น และในแนวแกน Y ที่ระยะห่าง 0 ถึง 3 เซนติเมตร พบว่าที่ระยะห่าง 0 เซนติเมตร ระดับแรงดันอินพุต 30V ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกเท่ากับ 13.85V กระแสไฟฟ้าด้านออกเท่ากับ 1.8A ประสิทธิภาพ 83.1% เป็นผลที่น่าพอใจที่สุดสำหรับการทดสอบนี้เพราะได้ประสิทธิภาพสูงกว่าระยะอื่น จากผลการทดลองที่ได้นำมาทดลองประจูปริมาณตัวแปร จากผลที่ได้ นำมาทดลองประจูปริมาณตัวแปรที่ระยะห่าง 1 ถึง 3 เซนติเมตร ในแนวแกน Y โดยปรับระดับแรงดันอินพุตคงที่ 20V พบว่าการส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่ระยะห่างใกล้ที่สุดจะได้ค่ากระแสและแรงดันสูงสุด จึงเป็นผลให้ในระยะห่าง 1 เซนติเมตร สามารถประจูปริมาณตัวแปรได้รวดเร็วที่สุดเมื่อเทียบกับระยะห่างอื่น ๆ

สัญญาณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านเข้าที่ได้จากแหล่งจ่ายจะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ 50 Hz แสดงดังรูปที่ 6

บทความวิจัย

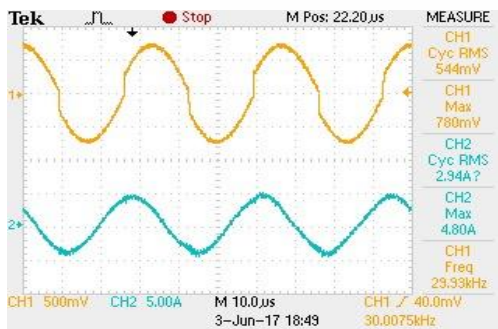
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 11

11th Conference of Electrical Engineering Network 2019 (EENET 2019)



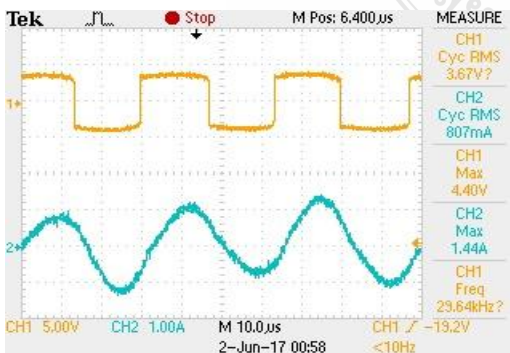
รูปที่ 6 แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านเข้า

ผลการวัดสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดชุดส่ง โดยคอนเวอร์เตอร์จะแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูงขึ้น จากแหล่งจ่าย 50 Hz ไปเป็น 30 kHz แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แรงดันและกระแสด้านออกที่ขดลวดชุดส่ง

การทดลองชุดรับกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายสัญญาณสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านออกที่ได้จากขดลวดความถี่ 30 kHz แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 4.5 แรงดันและกระแสอินพุตจากขดลวดชุดรับ

5. สรุป

การออกแบบระบบการโอนถ่ายพลังงานแบบไร้สายสำหรับการประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า ช่วยให้แบบนี้มีการแนวทางที่ชัดเจน การประจุแบตเตอรี่ผ่านระบบการโอนถ่ายพลังงานแบบไร้สายเน้นเทคนิคการเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์แม่เหล็กที่มีการส่งผ่านพลังงานได้การจัดทำงานวิจัยนี้เพื่อออกแบบสำหรับสถานีประจุยานยนต์ไฟฟ้าเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจที่จะนำแนวคิดของงานวิจัยชิ้นนี้ไปทำการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ในด้านการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] ยศพงษ์ ลออนวลและคณะ. 2558. “การศึกษาการพัฒนาของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าและผลกระทบที่เกิดขึ้นสำหรับประเทศไทย” สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- [2] จิตกุล ไสภวานิชย์. 2557. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- [3] John M. Miller, Matthew B. Scudiere, John W. McKeever and Cliff White. Wireless Power Transfer. Oak Ridge National Laboratory (ORNL) Conference Center. Oak Ridge. Tennessee.
- [4] ศราวุธ ชัยมูล. 2558. ข้อพิจารณาในการออกแบบระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายสมัยใหม่. ECTI-CARD, จังหวัดศรีง.
- [5] นันทรัตน์ สุขปัญญา. 2556. การศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้ลิเทียมไอออนฟลูออโรฟอสเฟตเป็นขั้วแคโทด. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [6] Y. Kongjeen and K. Bhumkittipich. 2016. “Electric Vehicle Loads for Power Flow Analysis,” IET- International Electrical Engineering Transactions, VOL.2, No. 1 (2) Jan-Jun, 2016, pp. 18-22.
- [7] C.H. Dharamakeerthi, N. Mithulananthan N. and T.K. Saha., 2013. “Impact of electric vehicle fast charging on power system voltage stability,” Electrical Power and Energy Systems, 2013.
- [8] H. Saadat, “Power System analysis book” third edition, MagrallHill, USA.
- [9] ยุทธนา คงจีน และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์. 2559. “การควบคุมการแกว่งความถี่ต่ำระบบไฟฟ้าโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของ PSS ด้วยเทคนิค PSO กรณีโหลดสถานีประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า,” EECON39, หัวหิน, 2-4 พฤศจิกายน 2559

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล นายชาญณรงค์ เรืองขจร
วัน เดือน ปีเกิด 13 กุมภาพันธ์ 2535
ที่อยู่ 20 หมู่ 10 ตำบลขุนโขลน อำเภอพระพุทธบาท จังหวัดสระบุรี 18120
การศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปี พ.ศ. 2559
E-Mail Channarong_r@mail.rmutt.ac.th

ประสบการณ์ทำงาน

มีนาคม 2560 - เมษายน 2561 ครูฝึกในสถานประกอบการ
บริษัท สมาร์ท (2015) เซอร์วิสเอส จำกัด
จังหวัด กรุงเทพมหานคร
พฤษภาคม 2561 - ปัจจุบัน ครูพิเศษสอน
วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี
จังหวัดสระบุรี

