



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การออกแบบวิธีการควบคุมระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ

A Control Design for Inductively Coupling Power Transfer Systems

นามผู้วิจัย นายณัฐกร กীরติไพบูลย์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริจรรย์ ศิริสุขประเสริฐ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงห์สีทอง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบวิธีการควบคุมระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ความเหนี่ยวนำ

A Control Design for Inductively Coupling Power Transfer Systems

โดย

นายณัฐกร กิรติไพบูลย์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ณัฐกร กิรติไพบูลย์ 2557: การออกแบบวิธีการควบคุมระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบ
คู่ควบเหนี่ยวนำ ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขา
วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ, Ph.D. 171 หน้า

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการควบคุมระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ
(Inductively Coupling Power Transfer System : ICPT) ด้วยการปรับความถี่สวิตช์เพื่อให้เกิดการ
ถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสู่โหลดสูงสุด งานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาผลตอบแทนต่อความถี่ของไฟฟ้า
กระแสตรงด้านขาเข้าและกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ เมื่อตัวแปรของระบบ ICPT มีการเปลี่ยนแปลง
เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบวิธีการควบคุมระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอ โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่ง
การทดลองออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนที่ 1 ทำการทดลองเพื่อทำความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของ
ตัวแปรต่างๆ ได้แก่ รูปแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ รูปร่างและขนาดของขดลวดที่ใช้
สำหรับด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ และช่วงความถี่เรโซแนนซ์ ที่มีต่อผลตอบแทนต่อความถี่ของไฟฟ้า
กระแสตรงด้านขาเข้าและกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ จากผลการทดลองในส่วนนี้พบว่า กำลังไฟฟ้าที่
โหลดได้รับจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาเข้าเมื่อมีค่าสูงสุดจะ
ทำให้กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับมีค่าสูงสุดเช่นกัน ความสัมพันธ์เช่นนี้นำไปใช้เป็นแนวทางในการ
ออกแบบวิธีการควบคุมระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้เพื่อทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่โหลด
ได้รับด้วยวิธีการปรับความถี่สวิตช์ การทดลองในส่วนที่ 2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบส่ง
กำลังไฟฟ้าและวิธีการควบคุมที่ได้ออกแบบสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ดำเนินการ
โดยทำการชาร์จประจุไฟฟ้าให้อุปกรณ์ไฟฟ้าแบบพกพา และทำการเปรียบเทียบกับทำการชาร์จประจุ
ไฟฟ้าให้อุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยการต่อตรงกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระยะห่างต่างกัน ผลจากงานวิจัยนี้
ทำให้ได้วิธีควบคุมการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าที่ไม่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพสูง

Nuttakron Keratipaiboon 2014: A Control Design for Inductively Coupling Power Transfer Systems. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering, Thesis Advisor: Assistant Professor Siriroj Sirisukprasert, Ph.D. 171 pages.

This thesis presents a maximum power transfer technique for Inductively Coupling Power Transfer (ICPT) Systems by searching the appropriated switching frequency based on the maximum direct current of the DC power supply. In this thesis, an ICPT system is studied in the frequency response between the direct current (I_{DC}) on the primary side and the output power (P_O) on a load side when the components of an ICPT system (the capacitor compensation topologies, the shape of coil, air-gap and resonant frequency) are changed. To understand and verify the designing of the proposed control method, two experiments have been conducted in this thesis. The first experiment is set up to understand the frequency response of the direct current and the output power when the components of the ICPT system are changed. By the first experiment, the results show that the output power is related to the direct current. While the input direct current reaches the maximum value, the output power also reaches the maximum value. This happens regardless of the changes of the capacitor compensation topologies, the shape of coil, the air-gap and the resonant frequency. In the second experiment, the efficiency of the proposed control method has been verified by the comparing between the proposed control method and the conventional method (direct charging from the DC power supply) in case of the portable electronic devices charging. From the research results, a high efficiency wireless power transfer control technique can be simply achieved.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร. ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ ตลอดจนให้การสนับสนุนในทุกด้าน จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านตลอดจนเพื่อนและรุ่นพี่รุ่นน้องทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือและทำงานร่วมกันในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังประยุกต์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และขอขอบคุณ ดร.นุจรินทร์ รามัญกุล นางสาวเพชรพร นิลวิสัย ดร.อารี ธนบุญสมบัติ ดร.พงศ์พิชญ์ วิชาสุร มณฑล คุณวัฒนา สมานจิตต์ คุณกฤษฎากร มานะกล้า และคุณบัณฑิต ปู่ตาแสงตลอดจนเพื่อนร่วมงานที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำหรับความช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้น

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ มารดา และครอบครัว ของข้าพเจ้าที่ได้ให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ให้แก่ข้าพเจ้าจนประสบความสำเร็จในการศึกษา บัญญัติต่าง ๆ ที่ข้าพเจ้าได้กระทำไว้แล้วจงเป็นแรงบุญส่งถึงผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งที่ได้กล่าวถึง และไม่ได้กล่าวถึง ขอให้ทุกท่านจงประสบแต่ความสุขความสำเร็จทั้งหน้าที่การงาน การเรียน และครอบครัว เจริญด้วย อายุ วรรณะ สุขะ พละ ตลอดไป

ณัฐกร กิริติไพบูลย์

กรกฎาคม 2557

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(11)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	27
อุปกรณ์	27
วิธีการ	29
ผลและวิจารณ์	125
ผล	125
วิจารณ์	146
สรุปและข้อเสนอแนะ	151
สรุป	151
ข้อเสนอแนะ	153
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	156
ภาคผนวก	160
ภาคผนวก ก การเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้	161
ภาคผนวก ข รหัสคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้	166
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	171

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 การเลือกใช้งานวงจรแปลงไฟฟ้าสำหรับระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ	12
2 ค่า Z_S ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ	15
3 ค่า Z_r ที่ ω_0 ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ	15
4 ค่า Z_t ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ	15
5 ค่าตัวเก็บประจุ C_p ที่ทำให้เกิด ZPA ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ	16
6 คุณสมบัติของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ	17
7 เปรียบเทียบขนาดของ dl และ dA ระหว่างขดลวด 2 แบบ	33
8 ค่า B_n ที่ได้จากการคำนวณ ρ_n^2 เมื่อ $2r_p = 2r_s$	40
9 ค่าคงที่ f ในกรณีที่ $\frac{d}{2r_p} \leq 1$	42
10 ค่าคงที่ f ในกรณีที่ $\frac{2r_p}{d} \leq 1$	43
11 คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ Z_S ของการชดเชยในรูปแบบต่างๆที่ความถี่ใดๆ	69
12 คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ Z_r ของการชดเชยในรูปแบบต่างๆที่ความถี่ใดๆ	70
13 คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ Z_t ของการชดเชยในรูปแบบต่างๆที่ความถี่ใดๆ	71
14 คุณสมบัติ $\frac{P_o}{P_i}$ ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ SS-Topology ที่ความถี่ใดๆ	72
15 คุณสมบัติ $\frac{P_o}{P_i}$ ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ SP-Topology ที่ความถี่ใดๆ	73
16 คุณสมบัติ $\frac{P_o}{P_i}$ ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ PS-Topology ที่ความถี่ใดๆ	74
17 คุณสมบัติ $\frac{P_o}{P_i}$ ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ PP-Topology ที่ความถี่ใดๆ	75
18 คุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ Z_S ของการชดเชยในรูปแบบต่างๆที่ความถี่เรโซแนนซ์	76
19 คุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ Z_r ของการชดเชยในรูปแบบต่างๆที่ความถี่เรโซแนนซ์	77
20 ค่าตัวเก็บประจุ C_1 ที่ทำให้ $Im\{Z_t\} = 0$ ในวงจรชดเชยในรูปแบบต่างๆ	78
21 การทำงานของอัลกอริทึมค้นหาแบบป็นเขาอย่างง่าย	81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
22 ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (L_S) ของขดลวด 3 แบบที่ทำการวัดจริง	85
23 ผลเปรียบเทียบความเหนี่ยวนำ L_S ระหว่างการคำนวณกับที่วัดได้จริง	86
24 ค่า L_S , M และ k ที่ได้จากการคำนวณสำหรับขดลวดแบบที่ 1	87
25 ค่า L_S , M และ k ที่ได้จากการคำนวณสำหรับขดลวดแบบที่ 2	87
26 ค่า L_S , M และ k ที่ได้จากการคำนวณสำหรับขดลวดแบบที่ 3	88
27 ค่าตัวแปรคงที่ในการจำลองระบบด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ	89
28 ค่าตัวแปรเฉพาะในการจำลองระบบด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ	89
29 ผลตอบสนองความถี่ของ I_{DC} และ P_O ในการจำลองรูปแบบ SS-Topology	91
30 ผลตอบสนองความถี่ของ I_{DC} และ P_O ในการจำลองรูปแบบ SP-Topology	92
31 ผลตอบสนองความถี่ของ I_{DC} และ P_O ในการจำลองรูปแบบ PS-Topology	93
32 ผลตอบสนองความถี่ของ I_{DC} และ P_O ในการจำลองรูปแบบ PP-Topology	94
33 ผลตอบสนองความถี่ของ I_{DC} และ P_O ในการจำลอง SP-Topology เมื่อ $C_1 = C_2$	95
34 ผลตอบสนองความถี่ของ I_{DC} และ P_O ในการจำลอง PS-Topology เมื่อ $C_1 = C_2$	96
35 ผลตอบสนองความถี่ของ I_{DC} และ P_O ในการจำลอง PP-Topology เมื่อ $C_1 = C_2$	97
36 ค่าตัวแปรของไอซี ACS-712-20A	102
37 คุณสมบัติของ Voltage Regulator เบอร์ LM338K	108
38 ค่าของขดลวดและตัวเก็บประจุที่ทำให้ขดลวดทั้ง 3 แบบมีค่า f_r ที่เท่ากัน	116
39 ค่าตัวเก็บประจุและค่า f_{rn} ในการทดลองที่ 1.6	118
40 ผลการทดลองที่ 1.1	127
41 ผลการทดลองที่ 1.2	130
42 ผลการทดลองที่ 1.3	132
43 ผลการทดลองที่ 1.4	135
44 ผลการทดลองที่ 1.5	137
45 ผลการทดลองที่ 1.6	140
46 ผลการทดลองที่ 2	144
47 เปรียบเทียบการชาร์จประจุไฟฟ้าระหว่างการต่อตรงกับระบบ ICPT	145

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
48 ตัวอย่างค่าความเข้มข้นของวัสดุชนิดต่างๆ	153
ตารางผนวกที่	
ก1 คุณสมบัติของมอสเฟดกำลังที่เลือกใช้	164
ข1 รหัสในการสั่งงานหลักของระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้	167
ข2 รหัสในการแสดงผลทางอุปกรณ์แอลซีดี	168
ข3 รหัสในการส่งค่าจากสถานะปัจจุบันไปสู่สถานะต่อไป	168
ข4 รหัสในการอ่านค่ากระแสตรงด้วยฟังก์ชันแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล	168
ข5 รหัสในการคำนวณค่ากระแสตรงที่วัดได้เป็นค่าเฉลี่ย	169
ข6 รหัสในการสร้างสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากฟังก์ชันเปรียบเทียบสัญญาณส่งออก	169
ข7 รหัสในการค้นหาค่าสูงสุดด้วยวิธีป้อนเข้าด้วยค่ากระแสตรงสูงสุด	170

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	วิธีการควบคุมที่ได้มีการนำเสนอมาในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Conventional Method)	3
2	วิธีการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ (Proposed Method)	3
3	ส่วนประกอบของระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ	5
4	ตัวอย่างขดลวดแบบเกลียวราบหรือ Spiral Circular Coil	7
5	ตัวอย่างขดลวดแบบโซลินอยด์หรือ Solenoid Coil	8
6	แบบจำลองขดลวดแบบ Double-Side Winding Transformer	8
7	แบบจำลองขดลวดแบบ Single-Side Winding Transformer	9
8	ตัวอย่างขดลวดแบบ Double-Side Winding Transformer	10
9	วงจรอินเวอร์เตอร์ของระบบ CET ในงานวิจัยของ Artur J. Moradewicz	11
10	วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าของระบบ ICPT ในงานวิจัยของ Swagat Chopra	12
11	แผนภาพเฟสในงานวิจัยของ Udaya K. Madawala	20
12	แผนภาพวิธีการควบคุมในงานวิจัยของ Udaya K. Madawala	21
13	แผนภาพวิธีการควบคุมในงานวิจัยของ Duleepa J. Thrimawithana	22
14	ภาพรวมของระบบ CET ในงานวิจัยของ Artur J. Moradewicz	23
15	วิธีการควบคุมระบบ CET ในงานวิจัยของ Artur J. Moradewicz	24
16	ภาพรวมของระบบ CEET ในงานวิจัยของ Yungtek Jang <i>et al.</i> ,	25
17	วงจรสมมูลของระบบ ICPT ในงานวิจัยของ Juan Luis Villa <i>et al.</i> ,	26
18	การเกิดสนามแม่เหล็กไหลวนรอบตัวนำตามกฎของแอมแปร์	30
19	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก	32
20	ขดลวดแบบโซลินอยด์	32
21	ขดลวดแบบเกลียวราบแบบกลม	33
22	พื้นฐานการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	33
23	การเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ	34
24	ลักษณะของขดลวดแบบโซลินอยด์ (Solenoid Coil)	36
25	ลักษณะของขดลวดเกลียวราบแบบกลม (Round Planar Spirals Coil)	37
26	การเหนี่ยวนำร่วมในขดลวดโซลินอยด์	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
27 การเหนี่ยวนำร่วมในขดลวดเกลิยวราบแบบกลม	41
28 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่นแบบ 1 เฟส	45
29 แผนผังเวลาการทำงานของสวิตช์ S1-S4	45
30 ลักษณะสัญญาณที่เข้าและออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์	46
31 การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในลักษณะ SS-Topology	47
32 การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในลักษณะ SP-Topology	47
33 การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในลักษณะ PS-Topology	48
34 การชดเชยความถี่ด้วยตัวเก็บประจุในลักษณะ PP Topology	48
35 วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบอนุกรม	50
36 ลำดับการแปลงอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรสมมูล	50
37 การไหลของกระแสไฟฟ้าตามขั้วที่ 1 และขั้วที่ 2	51
38 แรงดันไฟฟ้า $v_p(t)$ ที่ได้จากการสลับทำงานของขั้วที่ 1 และขั้วที่ 2	51
39 กระแสไฟฟ้า $i_{DC}(t)$ และ $i_p(t)$ จากการทำงานของขั้วที่ 1 และขั้วที่ 2	52
40 วงจรสมมูลของภาคสวิตชิง	54
41 การวิเคราะห์วงจรสมมูลของวงจรเรโซแนนซ์หรือ N_T	55
42 ผลตอบสนองความถี่ของตัวแปร Z_i	56
43 ผลตอบสนองความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอน $H(s)$	56
44 วงจรสมมูลของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบอนุกรม	57
45 วงจร ICPT ที่ใช้วิธีการประมาณค่าแบบไซน์ในการวิเคราะห์	58
46 วงจรเรโซแนนซ์ที่มีการชดเชยด้วยรูปแบบ SS-Topology	59
47 วงจรสมมูลใช้ในการหาอิมพีแดนซ์ $Z_{t_{SS}}$ สำหรับ SS-Topology	61
48 วงจรสมมูลใช้ในการหา $\eta_{2_{SS}}$ สำหรับ SS-Topology	62
49 วงจรเรโซแนนซ์ที่มีการชดเชยด้วยรูปแบบ SP-Topology	63
50 วงจรสมมูลใช้ในการหาค่า $Z_{t_{SP}}$ สำหรับ SP-Topology	64
51 วงจรสมมูลใช้ในการหา $\eta_{2_{SP}}$ สำหรับ SP-Topology	64
52 วงจรเรโซแนนซ์ที่มีการชดเชยด้วยรูปแบบ PS-Topology	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
53 วงจรสมมูลใช้ในการหาค่า Z_{t_PS} สำหรับ PS-Topology	66
54 วงจรเรโซแนนซ์ที่มีการชดเชยด้วยรูปแบบ PP-Topology	67
55 วงจรสมมูลใช้ในการหาค่า Z_{t_PP} สำหรับ PP-Topology	68
56 ลักษณะอัลกอริทึมค้นหาแบบป็นเขา	79
57 ลักษณะของระบบที่พบปัญหาเมื่อใช้อัลกอริทึมค้นหาแบบป็นเขา	80
58 ขั้นตอนการออกแบบขดลวดที่ใช้ในงานวิจัยนี้	82
59 ภาพตัดขวางของสายไฟหมายเลข AWG-18-UL1015	83
60 ขดลวดที่ 1 ขดลวดโซลินอยด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร	84
61 ขดลวดที่ 2 ขดลวดเกลียวราบแบบกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 เซนติเมตร	84
62 ขดลวดที่ 3 ขดลวดเกลียวราบแบบกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร	85
63 ผลการจำลองระบบ ICPT ด้วย SS-Topology ตามตารางที่ 28	90
64 ผลการจำลองระบบ ICPT ด้วย SP-Topology เมื่อให้ C_1 ตามตารางที่ 28	91
65 ผลการจำลองระบบ ICPT ด้วย PS-Topology เมื่อให้ C_1 ตามตารางที่ 28	92
66 ผลการจำลองระบบ ICPT ด้วย PP-Topology เมื่อให้ C_1 ตามตารางที่ 28	93
67 ผลการจำลองระบบ ICPT ด้วย SP-Topology เมื่อให้ตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2$	95
68 ผลการจำลองระบบ ICPT ด้วย PS-Topology เมื่อให้ $C_1 = C_2$	96
69 ผลการจำลองระบบ ICPT ด้วย PP-Topology เมื่อให้ $C_1 = C_2$	97
70 แผนภาพเค้าร่างวงจรของระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอในงานวิจัยนี้	99
71 แผนภาพเค้าร่างของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มคลื่น 1 เฟส	99
72 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มคลื่นจริงตามที่ออกแบบไว้	100
73 แผนภาพเค้าร่างของวงจรรับรู้กระแสไฟฟ้า	101
74 วงจรรับรู้กระแสตรงเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ตามที่ออกแบบไว้	103
75 แผนภาพเค้าร่างของวงจรชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้ง 4 รูปแบบ	104
76 วงจรชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิที่ความถี่ f_r	105
77 วงจรชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิที่ความถี่ f_r	105
78 วงจรชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิที่ความถี่ $2f_r$	106

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
79 วงจรชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิที่ความถี่ $2f_r$	106
80 วงจรรวมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้	107
81 แผนภาพเค้าร่างของวงจรชาร์จ์ประจุไฟฟ้าผ่านการเชื่อมต่อด้วย USB	107
82 วงจรชาร์จ์ประจุไฟฟ้าเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ICPT	109
83 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ f_s กับกระแส I_{DC} ของแหล่งจ่ายในระบบ ICPT	110
84 แผนภาพวิธีการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้	110
85 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 1.1. รูปแบบ SS-Topology	114
86 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 1.2. รูปแบบ SP-Topology	114
87 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 1.3. รูปแบบ PS-Topology	115
88 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 1.4. รูปแบบ PP-Topology	115
89 การทดลองที่ 1.5 ด้วยขดลวดแบบที่ 1	116
90 การทดลองที่ 1.5 ด้วยขดลวดแบบที่ 2	117
91 การทดลองที่ 1.5 ด้วยขดลวดแบบที่ 3	117
92 การทดลองที่ 1.6 ที่ความถี่ f_{r1} ระยะห่างขดลวด 3 เซนติเมตร	119
93 การทดลองที่ 1.6 ที่ความถี่ f_{r1} ระยะห่างขดลวด 15 เซนติเมตร	119
94 การทดลองที่ 1.6 ที่ความถี่ f_{r2} ระยะห่างขดลวด 3 เซนติเมตร	120
95 การทดลองที่ 1.6 ที่ความถี่ f_{r2} ระยะห่างขดลวด 15 เซนติเมตร	120
96 แผนภาพการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้	121
97 การทดลองที่ 2 การชาร์จ์ประจุไฟฟ้าด้วยการต่อตรงจากแหล่งจ่าย	122
98 การทดลองที่ 2 ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 0 เซนติเมตร	122
99 การทดลองที่ 2 ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 3 เซนติเมตร	123
100 การทดลองที่ 2 ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 6 เซนติเมตร	123
101 การทดลองที่ 2 ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 9 เซนติเมตร	124
102 การทดลองที่ 2 ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 15 เซนติเมตร	124
103 สัญญาณ I_{DC} และ V_o จากการทดลองที่ 1.1 ในกรณีที่ $f_s < f_r$	126
104 สัญญาณ I_{DC} และ V_o จากการทดลองที่ 1.1 ในกรณีที่ $f_s = f_r$	126

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
105 สัญญาณ I_{DC} และ V_O จากการทดลองที่ 1.1 ในกรณีที่ $f_s > f_r$	127
106 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 1.1	128
107 สัญญาณ I_{DC} และ V_O จากการทดลองที่ 1.2 ในกรณีที่ $f_s < f_r$	128
108 สัญญาณ I_{DC} และ V_O จากการทดลองที่ 1.2 ในกรณีที่ $f_s = f_r$	129
109 สัญญาณ I_{DC} และ V_O จากการทดลองที่ 1.2 ในกรณีที่ $f_s > f_r$	129
110 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 1.2	130
111 สัญญาณ I_{DC} และ V_O จากการทดลองที่ 1.3 ในกรณีที่ $f_s < f_r$	131
112 สัญญาณ I_{DC} และ V_O จากการทดลองที่ 1.3 ในกรณีที่ $f_s = f_r$	131
113 สัญญาณ I_{DC} และ V_O จากการทดลองที่ 1.3 ในกรณีความถี่ $f_s > f_r$	132
114 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 1.3	133
115 สัญญาณ I_{DC} และ V_O จากการทดลองที่ 1.4 ในกรณีที่ $f_s < f_r$	133
116 สัญญาณ I_{DC} และ V_O จากการทดลองที่ 1.4 ในกรณีความถี่ $f_s = f_r$	134
117 สัญญาณ I_{DC} และ V_O จากการทดลองที่ 1.4 ในกรณีความถี่ $f_s > f_r$	134
118 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 1.4	135
119 ผลการทดลองที่ 1.5 ในกรณีขดลวดแบบที่ 1	136
120 ผลการทดลองที่ 1.5 ในกรณีขดลวดแบบที่ 2	136
121 ผลการทดลองที่ 1.5 ในกรณีขดลวดแบบที่ 3	137
122 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 1.5	138
123 ผลการทดลองที่ 1.6 สำหรับความถี่ $f_r = f_{r1}$ ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร	138
124 ผลการทดลองที่ 1.6 สำหรับความถี่ $f_r = f_{r2}$ ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร	139
125 ผลการทดลองที่ 1.6 สำหรับความถี่ $f_r = f_{r1}$ ที่ระยะห่าง 15 เซนติเมตร	139
126 ผลการทดลองที่ 1.6 สำหรับ $f_r = f_{r2}$ ที่ระยะห่าง 15 เซนติเมตร	140
127 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 1.6	141
128 ผลการทดลองที่ 2 ด้วยการต่อตรง	141
129 ผลการทดลองด้วยระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ที่ระยะห่าง 0 เซนติเมตร	142
130 ผลการทดลองด้วยระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร	142

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
131 ผลการทดลองด้วยระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ที่ระยะห่าง 6 เซนติเมตร	143
132 ผลการทดลองด้วยระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ที่ระยะห่าง 9 เซนติเมตร	143
133 ผลการทดลองด้วยระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ที่ระยะห่าง 15 เซนติเมตร	144
134 กราฟเปรียบเทียบการการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของการทดลองที่ 1.1-1.4	146
135 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 2	150

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ICPT	=	การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ความเหนี่ยวนำ
SRI	=	วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม หรือ Series Resonant Inverter
f_s	=	ความถี่สวิตชิง
ω_s	=	ความถี่สวิตชิงเชิงมุม
f_r	=	ความถี่เรโซแนนซ์
ω_r	=	ความถี่เรโซแนนซ์เชิงมุม
L_s	=	ความเหนี่ยวนำตัวเอง
L_l	=	ความเหนี่ยวนำรั่วไหล
L_{11}	=	ความเหนี่ยวนำรั่วไหลด้านปฐมภูมิ
L_{22}	=	ความเหนี่ยวนำรั่วไหลด้านทุติยภูมิ
M	=	ความเหนี่ยวนำแม่เหล็กร่วมระหว่างขดลวด
B	=	ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก
ϕ_B	=	เส้นแรงแม่เหล็ก
A	=	พื้นที่หน้าตัดที่สนามแม่เหล็กตกกระทบ
$d\bar{A}$	=	เวกเตอร์พื้นที่หน้าตัดที่สนามแม่เหล็กตกกระทบ
$d\bar{l}$	=	เวกเตอร์เส้นรอบวงปิดของสนามแม่เหล็กรอบตัวนำ
l, h	=	ความสูงของขดลวดโซลินอยด์
r	=	รัศมีของขดลวดโซลินอยด์และขดลวดเกลียวราบแบบกลม
c	=	ความหนาของขดลวดเกลียวราบแบบกลม
N	=	จำนวนรอบของขดลวด
N_p	=	จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ
N_s	=	จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ
ID	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวด
OD	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวด
SS	=	การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
SP	=	การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมที่ด้านปฐมภูมิและต่อตัวเก็บประจุแบบขนานที่ด้านทุติยภูมิ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

PS	=	การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุขนานที่ด้านปฐมภูมิและต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่ด้านทุติยภูมิ
PP	=	การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุขนานทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ
Z_{s_SS}	=	ค่าอิมพีแดนซ์ที่ด้านทุติยภูมิ (Secondary Impedance) สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ SS Topology
Z_{r_SS}	=	ค่าอิมพีแดนซ์ที่สะท้อนฝั่งทุติยภูมิไปบนฝั่งปฐมภูมิ สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ SS Topology
Z_{t_SS}	=	ค่าอิมพีแดนซ์รวมที่ถูกมองจากด้านปฐมภูมิไปจนถึงด้านทุติยภูมิ สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ SS Topology
Z_{s_SP}	=	ค่าอิมพีแดนซ์ที่ด้านทุติยภูมิ (Secondary Impedance) สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ SP Topology
Z_{r_SP}	=	ค่าอิมพีแดนซ์ที่สะท้อนฝั่งทุติยภูมิไปบนฝั่งปฐมภูมิ สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ SP Topology
Z_{t_SP}	=	ค่าอิมพีแดนซ์รวมที่ถูกมองจากด้านปฐมภูมิไปจนถึงด้านทุติยภูมิ สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ SP Topology
Z_{s_PS}	=	ค่าอิมพีแดนซ์ที่ด้านทุติยภูมิ (Secondary Impedance) สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ PS Topology
Z_{r_PS}	=	ค่าอิมพีแดนซ์ที่สะท้อนฝั่งทุติยภูมิไปบนฝั่งปฐมภูมิ สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ PS Topology
Z_{t_PS}	=	ค่าอิมพีแดนซ์รวมที่ถูกมองจากด้านปฐมภูมิไปจนถึงด้านทุติยภูมิ สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ PS Topology
Z_{s_PP}	=	ค่าอิมพีแดนซ์ที่ด้านทุติยภูมิ (Secondary Impedance) สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ PP Topology
Z_{r_PP}	=	ค่าอิมพีแดนซ์ที่สะท้อนฝั่งทุติยภูมิไปบนฝั่งปฐมภูมิ สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ PP Topology
Z_{t_PP}	=	ค่าอิมพีแดนซ์รวมที่ถูกมองจากด้านปฐมภูมิไปจนถึงด้านทุติยภูมิ สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ PP Topology

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

R_L	=	ค่าความต้านทานของโหลดด้านทุติยภูมิ
X_C	=	ค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ (Capacitive Reactance)
X_L	=	ค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ (Inductive Reactance)
P_i	=	กำลังไฟฟ้าที่ด้านขาเข้าวงจรหรือด้านปฐมภูมิ
P_o	=	กำลังไฟฟ้าที่ด้านขาออกหรือที่เกิดขึ้นบนโหลดด้านทุติยภูมิ

การออกแบบวิธีการควบคุมระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ

A Control Design for Inductively Coupling Power Transfer Systems

คำนำ

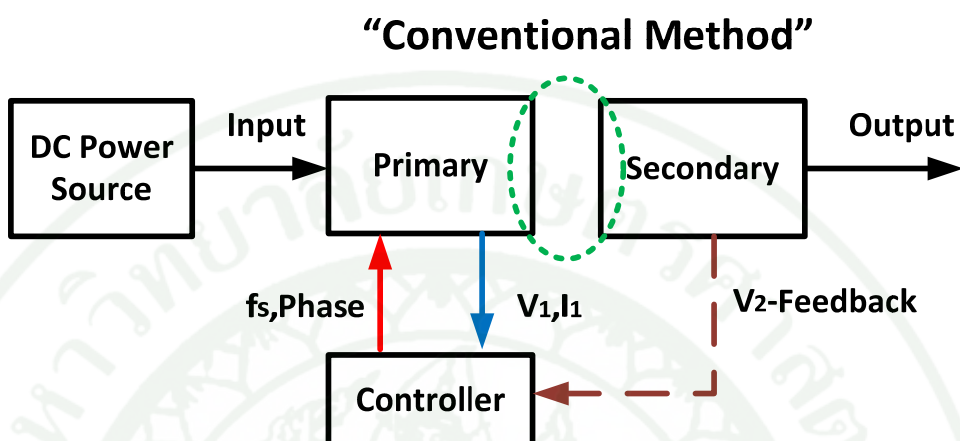
ระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ หรือ Inductively Coupling Power Transfer System (ICPT) เป็นวิธีการหนึ่งในหลายวิธีการของการถ่ายโอนส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ซึ่งวิธีการของ ICPT อาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กระหว่างขดลวด 2 ขดลวดที่อยู่ใกล้กัน โดยที่ไม่มีการสัมผัสกัน ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กผ่านช่องอากาศ (Air Gap) เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าระหว่างขดลวดทั้ง 2 ในปัจจุบัน ICPT ถูกนำไปใช้งานในลักษณะของการชาร์จประจุให้กับแบตเตอรี่ในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ตัวรับรู้ (Sensor) ที่ถูกใช้งานในสถานะแวดล้อมที่ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าในแบบต่อสายเข้าไปได้ หรือในสถานะแวดล้อมที่ไม่สามารถถอดแบตเตอรี่เปลี่ยนได้เช่น ถูกฝังอยู่ภายในร่างกายของสิ่งมีชีวิต หรือการชาร์จประจุให้กับแบตเตอรี่ในอุปกรณ์ใช้งานต่างๆ เช่น แบตเตอรี่ของโทรศัพท์มือถือ แบตเตอรี่ของแปรงสีฟันไฟฟ้า หรือแบตเตอรี่ของยานพาหนะไฟฟ้าต่างๆ เป็นต้น

เนื่องจากระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำมีการทำงานขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น รูปแบบของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ช่วงความถี่ที่ใช้งานและวิธีการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุเป็นต้น และจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ระบบ ICPT ไว้มากมาย แต่ยังไม่มียุติสรุปได้ว่าการวิเคราะห์แบบใดหรือการพิจารณาตัวแปรใดที่เหมาะสมกับระบบ ICPT ดังเช่นในการแทนค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้วิเคราะห์ระบบ ICPT ในงานวิจัย “Contactless Energy Transmission System with Rotatable Transformer-Modeling, Analyze and Design” ที่นำเสนอโดย A.J. Moradewicz และ M. P. Kazmierkowski (2008) ใช้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลหรือ Leakage Inductance (L_l) ในการวิเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนแรงดันไฟฟ้าของระบบ ICPT ซึ่งแตกต่างจากที่ถูกกำหนดในงานวิจัย “Contactless Power Transfer for Electric Vehicle Charging Application”

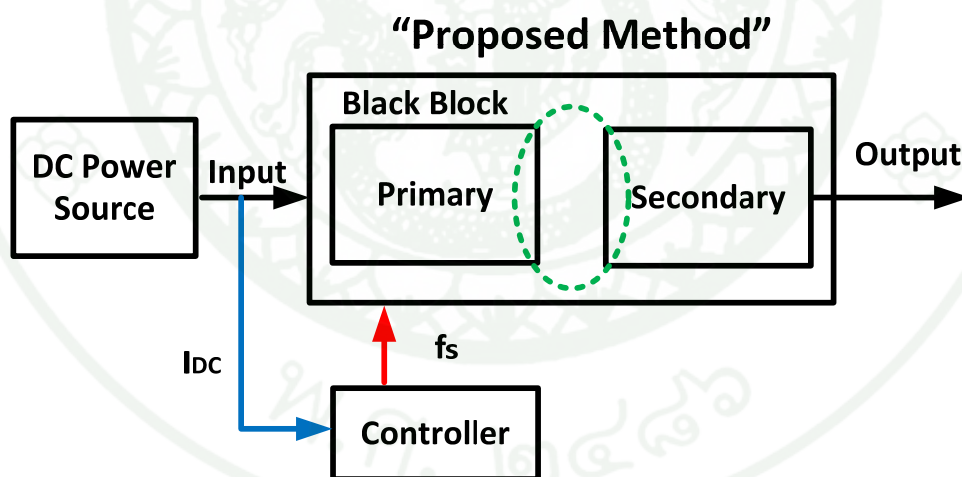
นำเสนอโดย Chopra (2011) ใช้ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (L_s) ของขดลวดที่นำมาใช้งานในการวิเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนแรงดันไฟฟ้าของระบบ ICPT ผลของความแตกต่างในการกำหนดค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบจะทำให้ได้สมการของตัวแปรต่างๆในระบบได้แก่ อิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิ (Z_s), อิมพีแดนซ์ที่สะท้อนจากด้านทุติยภูมิไปบนด้านปฐมภูมิ (Z_r), อิมพีแดนซ์รวมของระบบ (Z_T) และฟังก์ชันถ่ายโอนแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของระบบมีค่าที่ต่างกัน

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและทดลอง โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ทราบถึงผลของรูปแบบขดลวดที่นำมาใช้งาน รูปแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ และช่วงของการกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ที่เกิดขึ้นกับการทำงานของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ (ICPT) จากนั้นทำการนำเสนอวิธีการควบคุมระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ด้วยการค้นหาความถี่สวิตชิง (f_s) ที่ทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) ที่จ่ายให้วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ด้านปฐมภูมิมีค่าสูงสุด ซึ่งเป็นความถี่ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเช่นกัน จากงานวิจัยหลายๆ งานก่อนหน้านี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมไว้หลายวิธีได้แก่ การควบคุมระดับกำลังไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิด้วยการป้อนกลับจากด้านทุติยภูมิ หรือการควบคุมที่ด้านปฐมภูมิด้วยค่าที่ได้จากการวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิในการสร้างเงื่อนไขในการควบคุม ซึ่งวิธีการเหล่านี้จะมีความซับซ้อนในการนำค่าจากด้านปฐมภูมิไปประมวลผลเพื่อคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงด้านทุติยภูมิ หรือความซับซ้อนในการนำสัญญาณกลับจากด้านทุติยภูมิเพื่อนำมาควบคุมการทำงานของระบบ ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ จะมีลักษณะเป็นการค้นหาค่าสูงสุดด้วยการค้นหาความถี่สวิตชิง ของเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่นที่ทำให้ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าสูงสุดเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดภาระไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิก็ตาม ซึ่งการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายเป็นเงื่อนไขทำให้ลดตัวแปรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมลง และนอกจากนี้ในกรณีที่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของขดลวดหรือการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยง่าย โดย

แสดงความแตกต่างของวิธีการควบคุมที่มีการนำเสนอมานี้แล้วกับวิธีการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้ดังภาพที่ 1 และภาพที่ 2



ภาพที่ 1 วิธีการควบคุมที่ได้มีการนำเสนอในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Conventional Method)



ภาพที่ 2 วิธีการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ (Proposed Method)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำและความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆภายในระบบได้แก่ รูปแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปทรงและขนาดของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ช่วงความถี่ที่ใช้งาน และระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับทุติยภูมิ
2. เพื่อนำเสนอวิธีการควบคุมการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการควบคุมทางด้านปฐมภูมิเท่านั้น โดยพิจารณาการเกิดไฟฟ้ากระแสตรงด้านปฐมภูมิสูงสุดจากการปรับความถี่สวิตซ์
3. เพื่อจัดทำระบบต้นแบบของการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำด้วยวิธีการควบคุมที่นำเสนอและสามารถนำไปใช้งานได้จริง

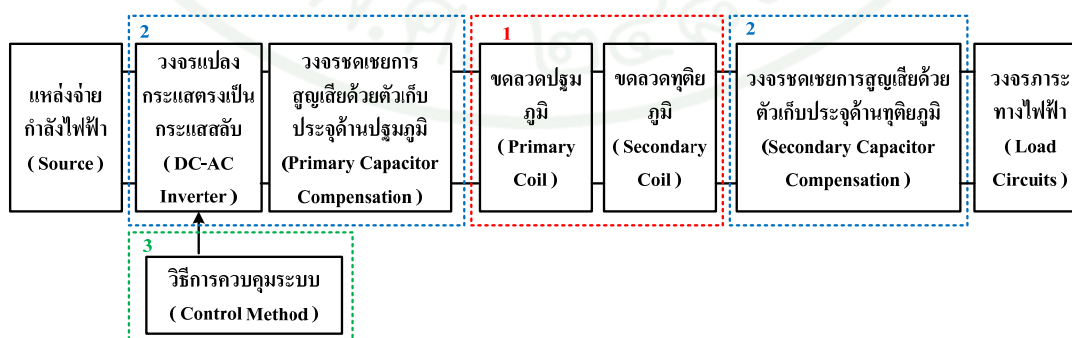
การตรวจเอกสาร

ระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำหรือ Inductively Coupling Power Transfer System (ICPT) อาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างขดลวด 2 ขดลวดที่อยู่ใกล้กัน โดยที่ไม่มีการสัมผัสกันและเกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านช่องว่างอากาศ (Air Gap) ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าระหว่างขดลวดทั้ง 2

ในปัจจุบันระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำถูกนำไปใช้งานในลักษณะของการชาร์จประจุให้กับแบตเตอรี่ในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ตัวรับรู้อัตโนมัติ (Autonomous Sensor) หรือตัวรับรู้ที่ถูกใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าในแบบต่อสายเข้าไปได้ หรือไม่สามารถถอดแบตเตอรี่เปลี่ยนได้เช่น ตัวรับรู้ที่ถูกฝังอยู่ภายในร่างกายของสิ่งมีชีวิตหรือการชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ในอุปกรณ์พกพาต่างๆ เช่น แบตเตอรี่ของโทรศัพท์มือถือ แบตเตอรี่ของแปรงสีฟันไฟฟ้า หรือแบตเตอรี่ของยานพาหนะไฟฟ้าต่างๆ เป็นต้น

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ แสดงได้ดังภาพที่ 3 โดยที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลักได้แก่

1. ขดลวดปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ
2. วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับและการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ
3. วิธีการควบคุมการทำงานของระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ



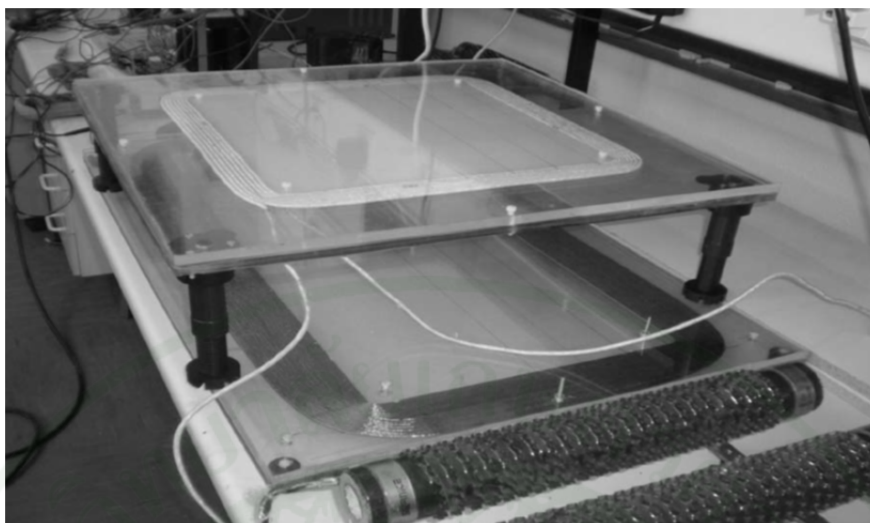
ภาพที่ 3 ส่วนประกอบของระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำได้มีการพัฒนาในส่วนประกอบทั้ง 3 ส่วนหลักอย่างต่อเนื่อง ซึ่งได้มีการนำเสนอไว้ในงานวิจัยต่างๆก่อนหน้านี้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

ขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ ซึ่งประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าผ่านช่องว่างระหว่างขดลวดส่วนมากจะขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ซึ่งลักษณะที่ถูกนำมาใช้งานมากที่สุดคือขดลวดในลักษณะเกลียวราบ (Spiral Coil หรือ Planar Coil) แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมา จะมีการนำขดลวดในรูปแบบอื่นนอกจากขดลวดแบบเกลียวราบมาใช้งานเช่นกัน ซึ่งการเลือกรูปแบบขดลวดมาใช้งาน จะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของลักษณะงานที่นำไปใช้ ทำการแสดงตัวอย่างของลักษณะขดลวดในรูปแบบต่างๆ ที่ถูกเลือกไปใช้งานในงานวิจัยที่ผ่านมาดังนี้

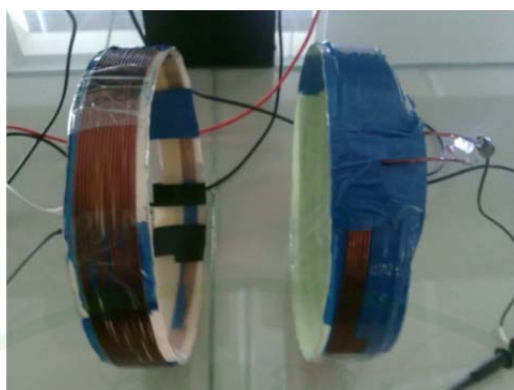
Sallán *et al.*, (2009) ได้นำเสนองานวิจัย “Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Charge” ขั้นตอนในการออกแบบระบบ ICPT ในงานวิจัยนี้ จะเริ่มจากการกำหนดลักษณะของขดลวดก่อน เพื่อที่จะสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดและความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดที่นำมาใช้ จากนั้นจึงสามารถนำไปออกแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุของระบบต่อไป ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้ขดลวดในลักษณะเกลียวราบ ซึ่งขดลวดในลักษณะเช่นนี้ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดได้ดีกว่าขดลวดในลักษณะอื่นๆ และเลือกใช้แกนอากาศ (Air Core) แทนการใช้แกนเหล็ก (Ferrite Core) ซึ่งการใช้แกนเหล็ก จะช่วยเพิ่มการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิได้ แต่การใช้แกนเหล็กจะเกิดการสูญเสียจากแม่เหล็ก หรือ Magnetic Losses และนอกจากนี้การใช้แกนเหล็กจะทำให้ระบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แกนอากาศร่วมกับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ ซึ่งจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น (95% ขึ้นไป) ในขณะที่ใช้ความถี่เรโซแนนซ์ในย่านต่ำ (ในช่วง 20 กิโลเฮิร์ตซ์) สำหรับกำลังไฟฟ้าระดับสูง (ประมาณ 200 กิโลวัตต์) โดยขดลวดที่เลือกใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้แสดงได้ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ตัวอย่างขดลวดแบบเกลียวราบหรือ Spiral Circular Coil

ที่มา : Sallán (2009)

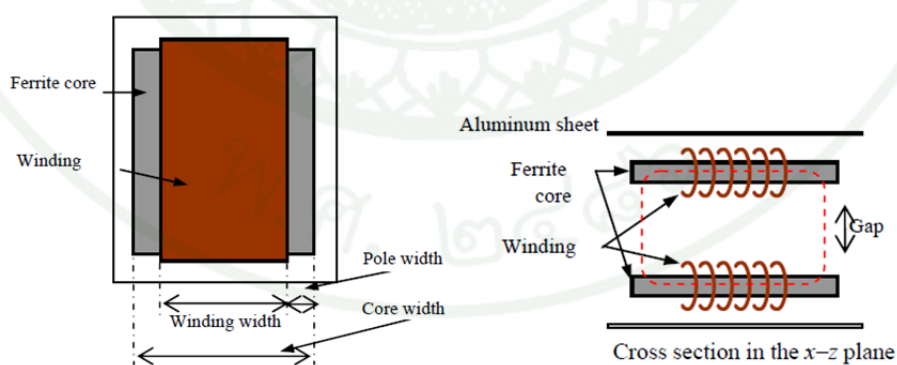
Ricaño *et al.*, (2010) ได้นำเสนองานวิจัย “Experiment About Wireless Energy Transfer” งานวิจัยนี้ทำการศึกษาและแสดงข้อแตกต่างของการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายใน 2 แบบได้แก่ การส่งกำลังไฟฟ้าในแบบ “Inductive Coupling” และการส่งกำลังไฟฟ้าในแบบ “Strong Resonant Coupling” ซึ่งการส่งกำลังไฟฟ้าแบบ Inductive Coupling จะใช้ขนาดขดลวดเล็กกว่าและความถี่เรโซแนนซ์ที่น้อยกว่าการส่งกำลังไฟฟ้าแบบ Strong Resonant Coupling ซึ่งทำให้การส่งกำลังไฟฟ้าแบบ Inductive Coupling ส่งกำลังไฟฟ้าได้ในระยะสั้นกว่าการส่งกำลังไฟฟ้าแบบ Strong Resonant Coupling นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองส่งกำลังไฟฟ้าแบบ Inductive Coupling โดยใช้ขดลวดในลักษณะโซลินอยด์หรือ Solenoid Coil แสดงขดลวดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ตัวอย่างขดลวดแบบโซลินอยด์หรือ Solenoid Coil

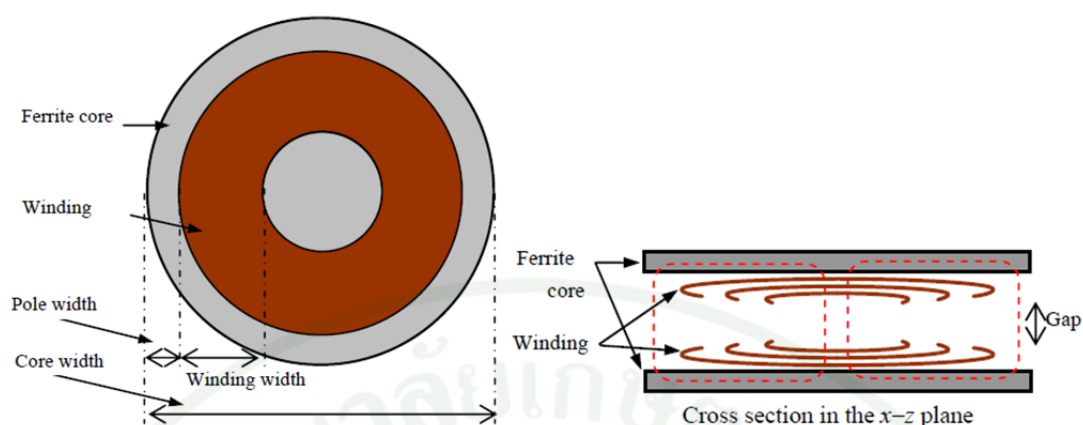
ที่มา : Ricaño (2010)

Nagatsuka *et al.*, (2010) ได้นำเสนองานวิจัย “Contactless Power Transfer System for Electric Vehicle Battery Charger” ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขดลวด 2 แบบ สามารถแสดงลักษณะขดลวดแบบ Double-Side Winding Transformer และขดลวดแบบ Single-Side Winding Transformer ดังภาพที่ 6 และภาพที่ 7 ตามลำดับ



ภาพที่ 6 แบบจำลองขดลวดแบบ Double-Side Winding Transformer

ที่มา : Nagatsuka (2010)



ภาพที่ 7 แบบจำลองขดลวดแบบ Single-Side Winding Transformer

ที่มา : Nagatsuka (2010)

จากข้อกำหนดในการออกแบบขดลวดสำหรับงานวิจัย “Contactless Power Transfer System for Electric Vehicle Battery Charger” ความกว้างของขดลวดต้องมีความมากกว่าหรือเท่ากับระยะห่างระหว่างขดลวดเพื่อให้อัตราการเหนี่ยวนำมากกว่า 0.2 ซึ่งการออกแบบขนาดของขดลวดและแกนแม่เหล็กจะอาศัยสมการที่ใช้ในการออกแบบไว้ดังสมการที่ 1 ถึง 2 ดังนี้

$$\text{ความกว้างของ Core of Single-sided} = 2(\text{winding width} + 2\text{pole width}) \quad (1)$$

$$\text{ความกว้างของ Core of Double-sided} = 1(\text{winding width} + 2\text{pole width}) \quad (2)$$

เมื่อ Winding Width คือ ความหนาของขดลวด

Pole Width คือ ขนาดของแกนแม่เหล็กที่เลื้อยออกมาจากส่วนที่เป็นขดลวด

จากสมการที่ 1 และ 2 แสดงให้เห็นว่าขดลวดแบบ Double-sided จะมีขนาดเล็กกว่าขดลวดแบบ Single-sided ซึ่งข้อดีของขดลวดแบบ Single-sided คือค่าความเหนี่ยวนำรวม จะมีค่าเป็น 0 เมื่อขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิอยู่ในตำแหน่งที่เหลื่อมกัน 50 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป แต่อย่างไรก็ตามขดลวดแบบ Double-sided จะมีข้อดีที่เกิดการสูญเสียทางแม่เหล็กไปในส่วนที่ไม่มีการเหนี่ยวนำกันหรือด้านหลังของขดลวดทั้ง 2 สามารถทำการแก้ไขได้โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมป้องกันการสูญเสียทางแม่เหล็กนี้ แต่การใช้อลูมิเนียมเป็นส่วนป้องกันนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียในลักษณะของกระแสไฟฟ้าวนหรือ Eddy Current จากงานวิจัยนี้ได้ระบุไว้ว่า การสูญเสียจากกระแสไฟฟ้าวน

มีค่าประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ สามารถแสดงขดลวดแบบ Double-Side Winding Transformer ที่ใช้ทำการทดลองในงานวิจัยนี้ได้ภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ตัวอย่างขดลวดแบบ Double-Side Winding Transformer

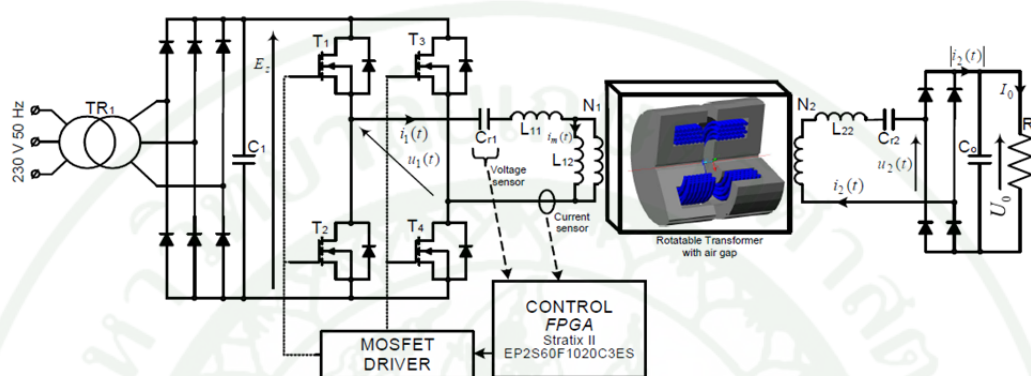
ที่มา : Nagatsuka (2010)

สุดท้ายในงานวิจัยนี้แสดงความเห็นไว้ว่า การพัฒนาระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำในอนาคตจะมีแนวโน้มในการพัฒนาส่วนของขดลวดเพื่อให้มีขนาดและน้ำหนักที่ลดลงแต่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับความถี่สูงและการชดเชยการสูญเสีย

เนื่องจากการส่งกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ จะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูง ดังนั้นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ (ICPT) จึงใช้วงจรในรูปแบบของวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับที่ความถี่สูง และจากการที่ระบบอาศัยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กร่วมระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า มีลักษณะเป็นวงจรแปลงไฟฟ้าแบบเรโซแนนซ์ โดยที่รูปแบบของวงจรแปลงไฟฟ้าแบบเรโซแนนซ์ที่ถูกใช้งานกับระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ แสดงได้จากงานวิจัยที่ได้นำเสนอมาก่อนหน้านี้ดังนี้

Moradewicz และ Kazmierkowski (2008) นำเสนอระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบหมุนได้ โดยขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิถูกแบ่งด้วยช่องว่างอากาศ ซึ่งเลือกใช้วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบเต็มคลื่นแสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 วงจรอินเวอร์เตอร์ของระบบ CET ในงานวิจัยของ Artur J. Moradewicz

ที่มา: Moradewicz (2008)

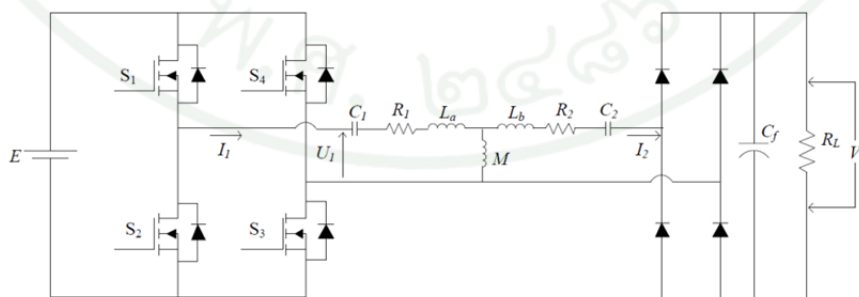
งานวิจัยของ Moradewicz และ Kazmierkowski (2008) เลือกวงจรในลักษณะเช่นนี้ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ได้จากวงจรลักษณะนี้ จะสูงกว่าวงจรแบบครึ่งคลื่นชนิดเรโซแนนซ์ และสามารถออกแบบได้ง่ายกว่าวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์รูปแบบอื่นๆ ในขณะที่ทางด้านทุติยภูมิได้ทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากวงจรเรโซแนนซ์เป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นดังแสดงในภาพที่ 9 ซึ่ง Moradewicz และ Kazmierkowski (2008) ได้ทำการสรุปแนวทางในการเลือกใช้อุปกรณ์แปลงไฟฟ้าชนิดเรโซแนนซ์ในรูปแบบต่างๆ แสดงไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเลือกใช้อุปกรณ์แปลงไฟฟ้าสำหรับระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ

DC/AC Converter	Operating Frequency	Output Voltage	Output Power	Application
	[kHz]	[V]	[W]	
Flyback MOSFET	125	3 VDC	0.1	Biomedical
Half Bridge MOSFET	100-400	5-15 VDC	30-300	Industrial Sensor, Stationary Chargers
Full Bridge MOSFET/IGBT	20-100	15-350 VDC / 230-240V AC	1-150 kW	Biomedical, Robot, Battery Chargers

จากตารางที่ 1 วงจรที่ถูกเลือกมาใช้งานในระบบ ICPT จะขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานและเงื่อนไขของผู้ออกแบบระบบ ICPT

Chopra (2011) ได้นำเสนอระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ โดยมีจุดประสงค์เพื่อออกแบบระบบการส่งกำลังไฟฟ้าให้กับยานพาหนะไฟฟ้า (Electric Vehicle : EV) ทั้งในขณะที่ยานจอดนิ่งและเคลื่อนที่ โดยให้วงจรทางด้านปฐมภูมิเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่นเฟสเดียว และวงจรทางด้านทุติยภูมิเป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าของระบบ ICPT ในงานวิจัยของ Swagat Chopra

ที่มา : Chopra (2011)

ในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่า วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่นเฟสเดียวสามารถให้กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้มากกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งคลื่น ซึ่งแสดงให้เห็นจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่โหลดได้รับของวงจรทั้ง 2 แบบ

ด้วยรูปแบบทั่วไปของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำหรือระบบ ICPT จะเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ถ่ายโอนจากแหล่งจ่ายไปสู่โหลดที่ด้านทุติยภูมิเป็นจำนวนมาก เนื่องจากความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิที่มีค่าน้อย ทำให้การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปสู่ด้านทุติยภูมิได้น้อยลง ดังนั้นหากต้องการให้เกิดกำลังไฟฟ้าที่ด้านทุติยภูมิมากขึ้น จะต้องเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ด้านปฐมภูมิมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมในการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปสู่โหลดลดลง ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ จะใช้วิธีการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ (Capacitor Compensation) ในลักษณะอนุกรมหรือขนานกับขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยทั่วไปแล้วการชดเชยที่ด้านปฐมภูมิมักมีวัตถุประสงค์เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากจังหวะที่อินเวอร์เตอร์กำลังเปลี่ยนสถานะหรือ Switching Loss ในขณะที่การชดเชยที่ด้านทุติยภูมิมักมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงแม่เหล็กระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ สำหรับรูปแบบของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุโดยพื้นฐานจะมีด้วยกัน 4 รูปแบบได้แก่

- 1) การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุโดยต่ออนุกรมกับขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ (Primary Series – Secondary Series: SS-Topology)
- 2) การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุโดยต่ออนุกรมกับขดลวดด้านปฐมภูมิแต่ต่อขนานที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ (Primary Series – Secondary Parallel: SP-Topology)
- 3) การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุโดยต่อขนานที่ขดลวดด้านปฐมภูมิแต่ต่ออนุกรมที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ (Primary Parallel – Secondary Series: PS-Topology)
- 4) การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุโดยต่อขนานกับขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ (Primary Parallel – Secondary Parallel: PP-Topology)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา รูปแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุที่ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด มีลักษณะเป็นการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแบบ SS-Topology ดังที่ได้แสดงในงานวิจัยของ Sallán (2009) นำเสนองานวิจัย “Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Charge” เลือกใช้การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในรูปแบบ SS-Topology เนื่องจากรูปแบบ SS-

Topology จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในการส่งกำลังไฟฟ้าปริมาณมาก ในขณะที่ใช้ขดลวดขนาดเล็กกว่าการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในรูปแบบอื่น

แต่อย่างไรก็ตามการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละรูปแบบทั้ง 4 รูปแบบจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันและมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานที่ต่างกัน จากงานวิจัยของ Covic *et al.*, (2005) ได้นำเสนอ “Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger” ทำการแสดงวิธีการวิเคราะห์หาคุณสมบัติต่างๆ และการออกแบบตัวแปรต่างๆ ของวงจรการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้ง 4 รูปแบบ โดยทำการออกแบบระบบให้ทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่ระบบต้องการกระแสไฟฟ้าจากด้านป้อนมุลมิกมากที่สุด เพื่อทำให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด จากการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ ICPT เมื่อใช้การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในงานวิจัยนี้พบว่า การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในลักษณะอนุกรมกับขดลวดด้านทุติยภูมิ จะทำให้ระบบ ICPT มีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ ในขณะที่การต่อตัวเก็บประจุในลักษณะขนานกับขดลวดด้านทุติย-ภูมิจะทำให้ระบบ ICPT มีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ และการต่อตัวเก็บประจุในลักษณะอนุกรมกับขดลวดป้อนมุลมิกเป็นการลดความต้องการแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่ใช้เมื่อขดลวดมีขนาดใหญ่ ในขณะที่การต่อตัวเก็บประจุขนานกับขดลวดด้านป้อนมุลมิก จะให้กระแสไฟฟ้าด้านป้อนมุลมิกมีค่ามาก ซึ่งขั้นตอนการออกแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในงานวิจัยนี้ จะออกแบบโดยอยู่บนพื้นฐานการออกแบบ 2 ข้อได้แก่

- 1) ความถี่สวิตชิงในการทำงานของระบบจะคงที่ อยู่ที่ความถี่เรโซแนนซ์โดยความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเป็น $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_s L_s}} = \frac{1}{\sqrt{C_p L_p}}$
- 2) กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายจะมีค่าคงที่

จากการออกแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในงานวิจัยนี้ จะได้อิมพีแดนซ์ที่ด้านทุติยภูมิ (Z_s), อิมพีแดนซ์ที่สะท้อนฝั่งทุติยภูมิไปบนฝั่งป้อนมุลมิก (Z_r) ที่ความถี่เรโซแนนซ์เชิงมุม (ω_0) และอิมพีแดนซ์ที่ถูกมองจากด้านป้อนมุลมิกไปจนถึงด้านทุติยภูมิ (Z_t) ของการต่อเก็บประจุในลักษณะต่างๆของระบบดังตารางที่ 2 ถึงตารางที่ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่า Z_s ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ

Secondary Compensation	Z_s
Series-Compensated	$\frac{1}{j\omega C_s} + j\omega L_s + R$
Parallel-Compensated	$\frac{1}{j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s + R}}$

ตารางที่ 3 ค่า Z_r ที่ ω_0 ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ

Secondary Compensation	Z_r (ที่ ω_0)
Series-Compensated	$\frac{\omega_0^2 M^2}{R} + 0$
Parallel-Compensated	$\frac{M^2 R}{L_s^2} - \frac{\omega_0 M^2}{L_s}$

ตารางที่ 4 ค่า Z_t ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ

Primary Compensation	Z_t
Series-Compensated	$\frac{1}{j\omega C_p} + j\omega L_p + Z_r$
Parallel-Compensated	$\frac{1}{j\omega C_p + \frac{1}{j\omega L_p + Z_r}}$

หากระบบทำงานในขณะที่แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายมีเฟสไม่ตรงกัน หรือการเลื่อนเฟสไม่เท่ากับ 0 จะทำให้กระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายมีค่าไม่คงที่ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งไปยังโหลดไม่ได้ตามต้องการ วิธีแก้ไขปัญหานี้คือการเลือกใช้ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิที่มีขนาดทำให้เกิดเงื่อนไขการเลื่อนเฟสเป็นศูนย์หรือ Zero Phase Angle (ZPA) ซึ่งตัวแปรหลักที่ทำให้เกิด ZPA คือขนาดของตัวเก็บประจุที่ด้านปฐมภูมิหรือ C_p ซึ่งงานวิจัยนี้ได้แสดงค่าของตัวเก็บประจุ C_p ที่ทำให้เกิด ZPA ไว้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าตัวเก็บประจุ C_p ที่ทำให้เกิด ZPA ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ

Topology	Primary Capacitor C_p
SS	$\frac{C_s L_s}{L_p}$
SP	$\frac{C_s L_s^2}{L_p L_s - M^2}$
PS	$\frac{(L_p L_s - M^2) C_s L_s^2}{\frac{M^4 C_s R}{L_s} + (L_p L_s - M^2)^2}$
PP	$\frac{C_s L_s}{\frac{M^4}{L_p C_s L_s R} + L_p}$

จากการออกแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในงานวิจัยนี้ อาศัยการออกแบบด้วยเงื่อนไข ZPA จะทำให้มุมของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ด้านปฐมภูมิตรงกันหรือส่วนประกอบจินตภาพของอิมพีแดนซ์รวมด้านปฐมภูมิ (Z_t) หรือ $Im\{Z_t\}$ มีค่าเป็น 0 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าตัวเก็บประจุ C_p ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละรูปแบบตามตารางที่ 5 ด้วยค่าของตัวเก็บประจุ C_p ทำให้รูปแบบ SS-Topology เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุด เนื่องจากค่าตัวเก็บประจุ C_p ของ SS-Topology จะไม่ขึ้นกับขนาดของโหลด (R) และปริมาณการเหนี่ยวนำร่วม (M) ในขณะที่ C_p ของ SP-Topology จะขึ้นอยู่กับค่า M และค่า C_p ของ PS-Topology และ PP-Topology จะขึ้นอยู่กับค่า R และ M ของระบบ

เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chopra (2011) นำเสนองานวิจัย “Contactless Power Transfer for Electric Vehicle Charging Application” ได้สรุปคุณสมบัติของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้ง 4 รูปแบบไว้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ

Characteristic of the topology	Capacitor Copensation Topologies			
	SS-Topology	SP-Topology	PS-Topology	PP-Topology
Dependence of the primary compensation capacitance on load	None	None	Dependent	Dependent
Circuit equivalent impedance at resonance	Minimum	Minimum	Maximum	Maximum
Types of ac source to applied so as to transfer maximum power	Voltage Source	Voltage Source	Voltage Source at high voltage/Current source	Voltage Source at high voltage/Current source
Power transferred	Lower	Higher	Lower	Higher
Peak Efficiency	Higher	Lower	Higher	Lower
Tolerance of efficiency to variable frequency	Lower	Higher	Lower	Higher
Tolerance of power factor to variable frequency	Higher	Lower	Higher	Lower

จากตารางที่ 6 คุณสมบัติในแต่ละข้อที่ Swagat Chopra ได้นำเสนอมีความหมายดังนี้

- 1) Dependence of the primary compensation capacitance on load แสดงถึงเงื่อนไขในการหาตัวเก็บประจุที่นำมาชดเชยที่ด้านปฐมภูมิที่ทำให้ส่วนประกอบจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์รวมของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำมีค่าเป็น 0 ที่สภาวะความถี่สวิตชิ่งเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ โดยขึ้นกับขนาดของโหลดที่ด้านทุติยภูมิหรือไม่
- 2) Circuit equivalent impedance at resonance แสดงถึงขนาดของอิมพีแดนซ์รวมของระบบเมื่อระบบทำงานที่ความถี่สวิตชิ่งเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์หรือความถี่ $f_s = f_r$
- 3) Types of ac source to applied so as to transfer maximum power แสดงถึงพฤติกรรมของระบบว่าเป็นแหล่งจ่ายชนิดใดระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage Source) หรือแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Current Source)
- 4) Power transferred at constant source แสดงถึงปริมาณการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าเมื่อระบบอยู่ในสภาวะแหล่งจ่ายคงที่ตามพฤติกรรมของแต่ละวงจร
- 5) Peak Efficiency แสดงถึงประสิทธิภาพหรือความชัดเจนของสัญญาณที่วัดได้ที่ความถี่สวิตชิ่งเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์หรือความถี่ $f_s = f_r$
- 6) Tolerance of efficiency to variable frequency แสดงถึงความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของประสิทธิภาพต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่สวิตชิ่ง
- 7) Tolerance of power factor to variable frequency แสดงถึงความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของค่าส่วนประกอบกำลังต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่สวิตชิ่ง

3. วิธีการควบคุมระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ

นอกจากวิธีการการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ตามที่ได้ศึกษาจากงานวิจัยก่อนหน้านี้มาแล้ว การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังโหลด จะมีค่าสูงสุดเมื่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำทำงานที่ความถี่สวิตชิ่ง (Switching Frequency : f_s) มีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency : f_r) ของวงจรเรโซแนนซ์ที่ด้านทุติยภูมิ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาวิธีการควบคุมให้ระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำมีความถี่สวิตชิ่งมีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ จากงานวิจัยที่มีการนำเสนอก่อนหน้านี้ โดยมุ่งเน้นไปที่วิธีการควบคุมระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบ

เหนี่ยวนำ (Inductively Couple Power Transfer System: ICPT) ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด ด้วยการพิจารณาที่ตัวแปรทางด้านปฐภูมิเท่านั้น วิธีการควบคุมจากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถแบ่งวิธีการออกได้เป็น 3 วิธีหลักๆได้ดังนี้

1. วิธีการควบคุมแบบความถี่คงที่ (Fixed-Frequency Control) คือ การกำหนดให้ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ (Switching Frequency, f_s) ทางด้านแหล่งจ่ายให้เท่ากับความถี่ค่าใดค่าหนึ่งตลอด โดยปกติแล้วจะให้ความถี่สวิตช์ที่มากกว่าหรือเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency, f_r) ของวงจรเรโซแนนซ์ทางด้านทุติยภูมิ และใช้วิธีการควบคุมแบบปรับเฟส (Phase-Shift Control) ของอินเวอร์เตอร์หรือด้วยการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Pulse-Width Modulation, PWM) โดยมีจุดประสงค์ในการควบคุมเพื่อต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้าขาออกด้านทุติยภูมิ (Output Voltage, V_o) ตามที่ต้องการ

2. วิธีการควบคุมแบบปรับค่าความถี่ (Variable-Frequency Control : VF) คือ การควบคุมความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ ทางด้านปฐภูมิให้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยมีจุดประสงค์เพื่อติดตามการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด หรือใช้วิธีการตรวจสอบที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้าและกระแสไฟฟ้าขาเข้ามีค่ามมเฟสต่างกันเป็น 0°

3. วิธีการควบคุมแบบผสม (Combination Control) คือ การรวมวิธีการควบคุมจาก 2 วิธีข้างต้น มีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถควบคุมให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ในขณะที่ได้ขนาดแรงดันส่งออกด้านทุติยภูมิตามที่กำหนดไว้เช่นกัน

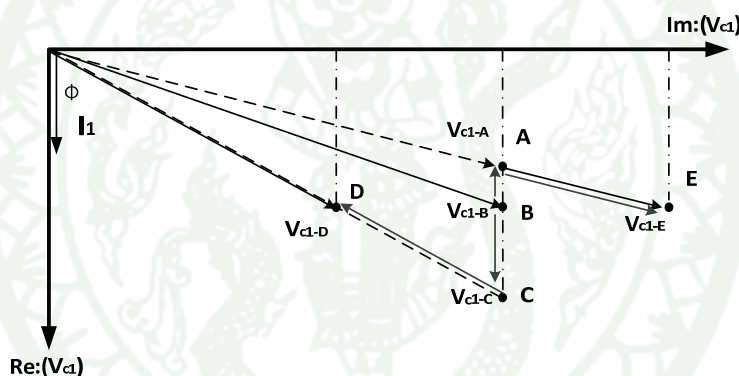
1. วิธีการควบคุมแบบความถี่คงที่ (Fixed-Frequency Control)

Madawala และ Thrimawithana (2010) จาก University of Auckland ได้นำเสนอวิธีการควบคุมระบบ ICPT ด้วยวิธีการกำหนดให้ความถี่สวิตช์ (Switching Frequency, f_s) มีค่าคงที่ซึ่งเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency, f_r) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดปฐภูมิมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ และใช้การควบคุมแบบปรับเฟสเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออก (V_o) ให้ได้ตามที่ต้องการหรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง $V_{o,est}$ โดยไม่ใช้การวัดสัญญาณกลับจากทางทุติยภูมิ แต่วัดค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุทางด้าน

ปฐมภูมิ (V_{C1}) กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ (I_{L1}) จากนั้นทำการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้า V_o เพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้า $V_{o,est}$ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง V_{C1} , I_{L1} และ V_o ดังสมการที่ 3

$$V_{C1} = V_o \frac{\pi M}{L_2 2\sqrt{2}} + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega M^2}{L_2} \right) I_{L1} \quad (3)$$

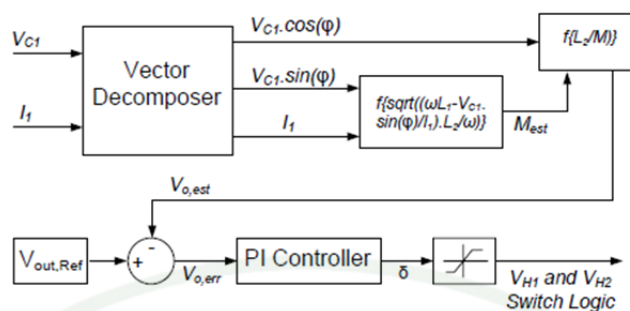
จากสมการที่ 3 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้า V_o เป็นส่วนจำนวนจริง (Real) ของแรงดันไฟฟ้า V_{C1} และมีกระแสไฟฟ้า I_{L1} เป็นส่วนจินตภาพ (Imaginary) ของแรงดันไฟฟ้า V_{C1} ซึ่งสมการข้างต้นสามารถนำมาแสดงแผนภาพที่ 11 ได้ดังนี้



ภาพที่ 11 แผนภาพเฟสในงานวิจัยของ Udaya K. Madawala

ที่มา : Madawala (2010)

จากภาพที่ 11 พบว่า จะสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้า V_o ($\text{Re}\{V_{C1}\}$) ให้มีค่าคงที่ได้จากการปรับ $\text{Im}\{V_{C1}\}$ หรือกระแสไฟฟ้า I_{L1} ได้ ตัวอย่างเช่น หากให้ระบบเริ่มต้นที่จุด B จะได้เป็นแรงดันไฟฟ้า V_{C1-B} จากนั้นหากแรงดันไฟฟ้า V_{C1} ของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจุด C ได้เป็นแรงดันไฟฟ้า V_{C1-C} จะทำให้มุมเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้า V_{C1} และกระแสไฟฟ้า I_{L1} หรือ ϕ_{vi} เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการที่จะควบคุมให้แรงดันไฟฟ้า V_o มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้า V_o ที่จุด B ได้ ต้องทำการลดกระแสไฟฟ้า I_{L1} จึงจะทำให้แรงดันไฟฟ้า V_{C1-C} เปลี่ยนมาที่จุด D ได้เป็นแรงดันไฟฟ้า V_{C1-D} ซึ่งจะได้แรงดันไฟฟ้า V_o ที่จุด D มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้า V_o ที่จุด B และ



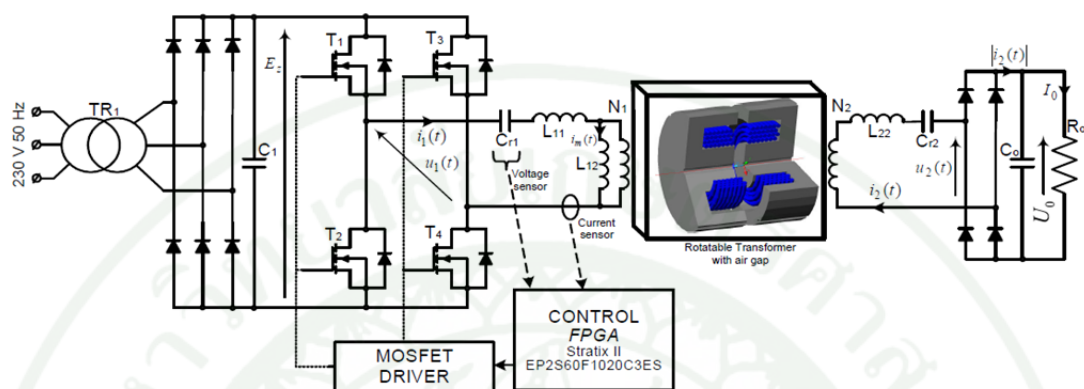
ภาพที่ 13 แผนภาพวิธีการควบคุมในงานวิจัยของ Duleepa J. Thrimawithana

ที่มา : Thrimawithana (2010)

2. วิธีการควบคุมแบบปรับความถี่ (Variable Frequency Control : VF)

Moradewicz และ Kazmierkowski (2008) นำเสนอวิธีการควบคุมระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ (ICPT) (ในบทความนี้เรียกว่า Contactless Energy Transmission system, CET) แบบการปรับความถี่ในลักษณะของการค้นหาความถี่ f_s ของอินเวอร์เตอร์ที่ด้านปฐมภูมิที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยออกแบบให้ระบบ CET ใช้การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ (Capacitor Compensation) แบบอนุกรมทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (Series Primary-Series Secondary : SS) ดังนั้นจึงมองวงจรสมมูลของ SS เป็นวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมหรือ Series-Loaded Resonant Inverter ซึ่งจะทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดและอิมพีแดนซ์ต่ำสุดเมื่อความถี่ $f_s = f_r$ ดังนั้นจึงพิจารณาว่า การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด จะเกิดเมื่อกำลังไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิในวงจรแบบ SS อยู่ในสภาวะสูงสุดเช่นกัน นอกจากนั้นการที่ความถี่ $f_s = f_r$ ยังเป็นจุดการทำงานที่ทำให้เกิดการสวิตชิงที่แรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ (Zero-Voltage Switching : ZVS) และการสวิตชิงที่กระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ (Zero-Current Switching : ZCS) ทำให้การสูญเสียในขณะสวิตชิงมีค่าน้อยที่สุด วิธีการปรับความถี่ในงานของ Moradewicz และ Kazmierkowski (2008) จะใช้การปรับความถี่ f_s ในแบบ Digital Control Oscillator (DCO) ด้วยวิธีขั้นตอนแบบ Dithering Fractional-N และใช้อุปกรณ์ในการควบคุมชนิด

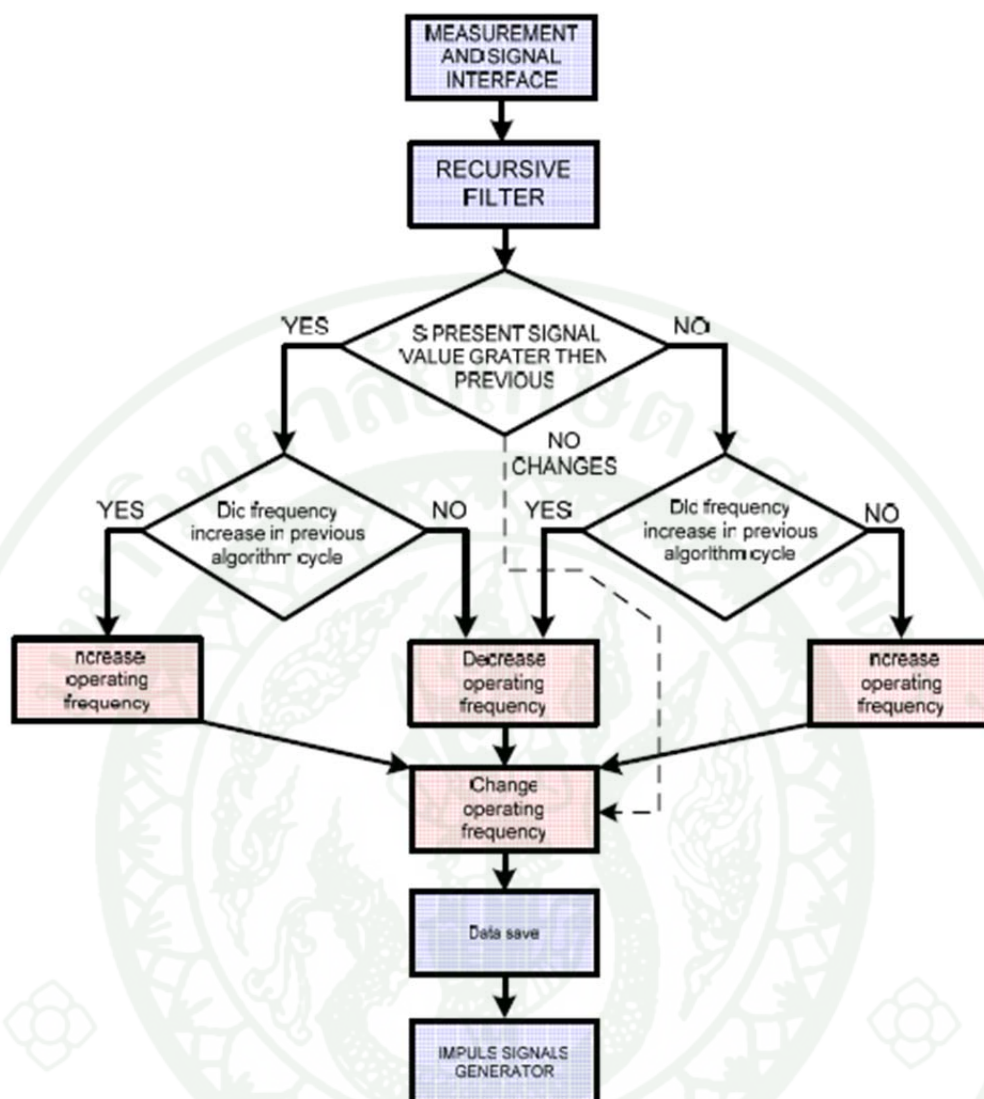
เอฟพีจีเอ (Field Programmable Gate Array: FPGA) โดยระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ภาพรวมของระบบ CET ในงานวิจัยของ Artur J. Moradewicz

ที่มา : Moradewicz (2008)

วิธีการค้นหาความถี่ตามที่ Moradewicz และ Kazmierkowski (2008) นำเสนอจะใช้การวัดแรงดันไฟฟ้า V_{C1} และกระแสไฟฟ้า I_{L1} เพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จะเกิดขึ้น โดยมีขั้นตอนวิธีแสดงได้ดังผังงาน (Flow Chart) ในภาพที่ 15

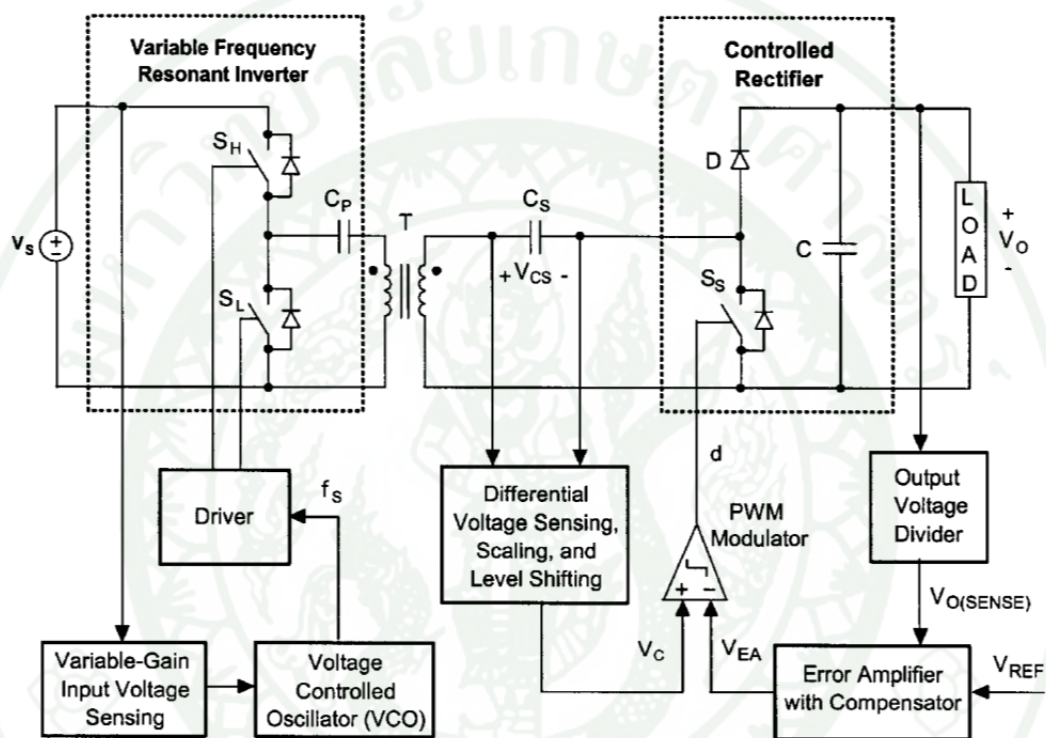


ภาพที่ 15 วิธีการควบคุมระบบ CET ในงานวิจัยของ Artur J. Moradewicz

ที่มา : Moradewicz (2008)

Jang *et al.*, (2001) ได้นำเสนอวิธีการควบคุม ICPT (ในงานวิจัยนี้จะเรียกว่าระบบ Contactless Electrical Energy Transmission: CEET) ด้วยวิธีการปรับความถี่ที่อินเวอร์เตอร์ทางด้านป้อนเพื่อรักษาระดับกำลังไฟฟ้าที่ส่งไปให้ที่ทุกขงมิให้คงที่ โดยใช้การควบคุมแบบการควบคุมล่วงหน้า (Feed Forward Control) ด้วยการประมาณค่าล่วงหน้าสำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีค่า

เท่าใดแล้วจะได้กำลังไฟฟ้าที่หุติยภูมิเท่าใด จากนั้นทำการควบคุมความถี่สวิตซึ่ง f_s ของอินเวอร์เตอร์ให้ทำงานที่ความถี่ f_s นั้น โดยที่การสร้างสัญญาณความถี่ f_s จะใช้วิธีแรงดันไฟฟ้าควบคุมความถี่ (Voltage Control Oscillator :VCO) ซึ่งเป็นวิธีการสร้างสัญญาณความถี่ f_s แบบอนาล็อก ภาพรวมของระบบ CEET ในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 16

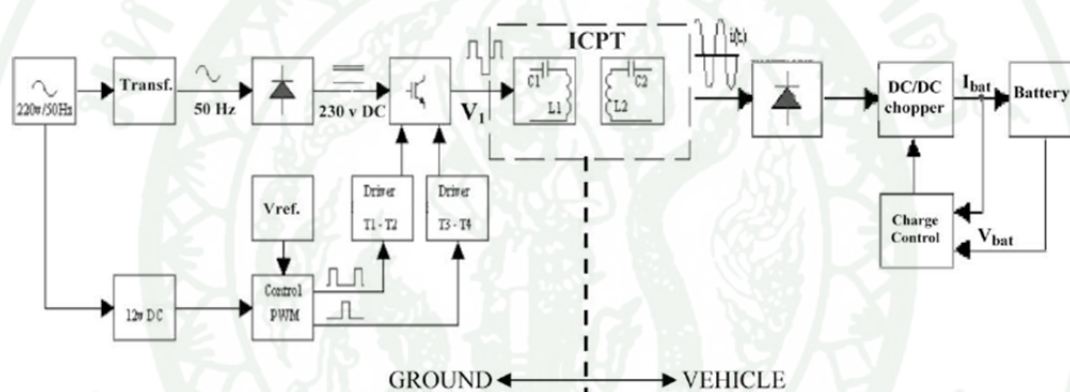


ภาพที่ 16 ภาพรวมของระบบ CEET ในงานวิจัยของ Yungtek Jang *et al.*,

ที่มา : Jang *et al.*, (2001)

3. วิธีการควบคุมแบบผสม Combination Control

Villa *et al.*, (2009) ได้นำเสนอวิธีควบคุมที่นำการมอดูเลชันความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM) และปรับความถี่สวิตช์มาใช้ด้วยกัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออก V_o ให้ได้ตามต้องการ ด้วยการควบคุมรอบทำงาน (Duty Cycle) ของอินเวอร์เตอร์ด้านปฐมภูมิ และเพื่อให้ระบบเกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด จึงใช้วิธีการปรับความถี่สวิตช์ให้เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์หรือ $f_s = f_r$ โดยระบบที่ Juan Luis Villa และคณะนำเสนอในงานวิจัยนี้มีโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 วงจรสมมูลของระบบ ICPT ในงานวิจัยของ Juan Luis Villa *et al.*,

ที่มา : Villa *et al.*, (2009)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาเพื่อการออกแบบและสร้างต้นแบบระบบในงานวิจัยนี้ แล้วทำการทดลองระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่มเครื่องมือที่ใช้ในการประกอบต้นแบบ และกลุ่มอุปกรณ์ของต้นแบบระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้ดังนี้

1. เครื่องมือ

- 1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์
- 1.2 มัลติมิเตอร์
- 1.3 ออสซิลโลสโคป
- 1.4 เครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำ Precision Impedance Analyzer: Agilent Model 4294A
- 1.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 15 แอมป์ แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์
- 1.6 โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์
- 1.7 หัวเร่งบัดกรี คีม ไขควงและเครื่องมืออื่น ๆ ที่ใช้ในการประกอบอุปกรณ์

2. อุปกรณ์ต้นแบบระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้

2.1 ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

1. สายไฟขนาด AWG-18 UL1015
2. ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร
3. ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร
4. ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร
5. แผ่นพลาสติกอะครีลิกขนาด 30x30 เซนติเมตร

2.2 วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

1. MOSFET เบอร์ IRL2203N
2. แผ่นพิมพ์ลายวงจร
3. แผ่นระบายความร้อน
4. แผ่นฉนวนรองสวิตช์
5. ตัวเก็บประจุ 0.1uF / 16V
6. สกรู M3 – 25 มิลลิเมตร

2.3 วงจรขับสวิตช์

1. TLP250 – Opto Gate Driver
2. ไดโอดเบอร์ 1N4148
3. ตัวเก็บประจุ 10uF / 16V
4. ตัวเก็บประจุ 0.1uF / 16V

2.4 วงจรขดเคเบิลการสูญเสียด้วยตัวเก็บประจุ

1. ตัวเก็บประจุ 0.1uF / 600V
2. ตัวเก็บประจุ 1uF / 600V
3. ที่ปักสาย 3 จุด DT-128V-3P

2.5 วงจรควบคุม

1. แผงวงจร dsPIC30F4011
2. อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 1 แอมป์ แรงดัน 5 โวลต์
3. ตัวรับรู้กระแสตรงเบอร์ ACS-712-20A

2.6 วงจรชาร์จประจุไฟฟ้าให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทาง USB

1. ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LM338K
2. ไดโอดเบอร์ 1N4002
3. ตัวเก็บประจุ 0.1uF ชนิดเซรามิก
4. ตัวเก็บประจุ 1000uF / 100V
5. ตัวเก็บประจุ 10uF / 16V
6. ตัวเก็บประจุ 1uF / 16V
7. ตัวต้านทาน 120 โอห์ม 1 วัตต์
8. ตัวต้านทาน 360 โอห์ม 1 วัตต์
9. ตัวต้านทาน 33 โอห์ม 5 วัตต์

วิธีการ

จากวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ในงานวิจัยนี้ จะทำการวิจัยโดยเริ่มจากศึกษาหลักการทำงานพื้นฐาน ผลของรูปแบบขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ผลของรูปแบบของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุที่แตกต่างกัน และผลของช่วงความถี่เรโซแนนซ์ที่มีต่อพฤติกรรมของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ ศึกษาวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับแบบเต็มคลื่น และศึกษาอัลกอริทึมที่ใช้ในการควบคุมระบบ เพื่อนำมาจัดสร้างเป็นต้นแบบของระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้ โดยมีขั้นตอนการทำวิจัยดังนี้

1. ขั้นตอนการศึกษาและวิเคราะห์ระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ ในขั้นตอนนี้จะแบ่งการศึกษาได้ดังนี้

- 1.1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า
- 1.2. ศึกษาการออกแบบและคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด
- 1.3. การวิเคราะห์ระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ
- 1.4. ศึกษาขั้นตอนวิธีการควบคุมแบบค้นหาแบบป้อนเข้า

2. ขั้นตอนการออกแบบระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ ในการออกแบบระบบจะแบ่งออกได้ดังนี้

- 2.1. ออกแบบขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ
- 2.2. จำลองการทำงานของระบบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- 2.3. ออกแบบวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับแบบเต็มคลื่น
- 2.4. ออกแบบวิธีการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

3. ขั้นตอนการทดลองระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองได้ดังนี้

- 3.1. การทดลองที่ 1 มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของรูปแบบขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ช่วงความถี่เรโซแนนซ์ รูปแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ และระยะห่างระหว่างขดลวดที่มี

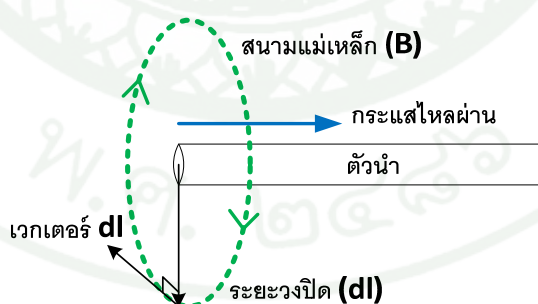
ต่อพฤติกรรมของระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำรวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากระแสตรง ความถี่สวิตชิ่งและกำลังไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ

3.2. การทดลองที่ 2 มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำที่ใช้วิธีการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ในการนำไปใช้งานจริง ด้วยการชาร์จประจุไฟฟ้าให้อุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยการเชื่อมต่อแบบ USB

1. การศึกษาระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ

1.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ

พื้นฐานของระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ (Inductive Coupling Power Transfer system :ICPT) อาศัยพื้นฐานของแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงระหว่างกำลังงานทางไฟฟ้ากับกำลังงานทางแม่เหล็ก ทำให้เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าด้วยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กระหว่างขดลวด 2 ขดลวด ซึ่งกำลังงานทางไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นกำลังงานทางแม่เหล็ก สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) กล่าวไว้ว่า “ปริมาณของสนามแม่เหล็กที่หมุนรอบตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะมีค่าขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็กและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำนั้น” แสดงความสัมพันธ์ตามกฎของแอมแปร์ได้ภาพที่ 18



ภาพที่ 18 การเกิดสนามแม่เหล็กไหลวนรอบตัวนำตามกฎของแอมแปร์

จากภาพที่ 18 ปริมาณของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นตามกฎของแอมแปร์สามารถหาได้จากสมการที่ 4

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \mu_r I \quad (4)$$

เมื่อ	$\vec{B}$	เป็นความเข้มสนามแม่เหล็ก (เป็นปริมาณเวกเตอร์)
	$d\vec{l}$	เป็นปริมาณเวกเตอร์ที่มีทิศตั้งฉากกับความยาว dl
	μ_0	เป็นความซึมซับทางแม่เหล็ก
	μ_r	เป็นความซึมซับทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ (ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวนำ)
	I	เป็นกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ

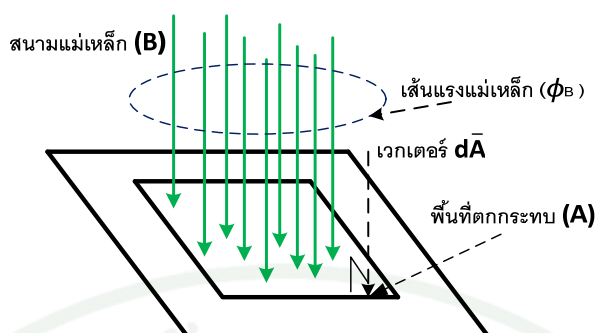
จากนิยามกฎของแอมแปร์ ปริมาณของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จะพิจารณาเป็นสนามแม่เหล็กวงรอบหรือวงปิดรอบตัวนำที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้นในการคำนวณหาปริมาณของความเข้มสนามแม่เหล็ก B จะพิจารณาเวกเตอร์ $d\vec{l}$ เป็นเส้นรอบวงที่มีรัศมี (r) ออกจากจุดศูนย์กลางของตัวนำไปยังจุดที่ต้องการพิจารณา (ดังแสดงในภาพที่ 18) ดังนั้นในกรณีของการพิจารณาขดลวดที่มีลักษณะดังภาพที่ 18 ซึ่งขนาดของเวกเตอร์ $d\vec{l}$ จะมีขนาดเป็นเส้นรอบวงที่มีรัศมีเท่ากับ r จะได้ขนาดของเวกเตอร์ $d\vec{l} = 2\pi r$

เมื่อนำขดลวดทึดยุติเข้ามาใกล้ขดลวดปฐมภูมิ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงกำลังงานทางแม่เหล็กเป็นกำลังงานทางไฟฟ้าจ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า หรือโหลดหรือวงจรที่นำมาต่อพ่วงทางด้านทุติยภูมิ ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ที่กล่าวไว้ว่า “เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux : ϕ_B) ผ่านวงรอบปิดใดๆต่อเวลา จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในทิศด้านการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ อัตราการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านวงรอบปิดนั้น” แสดงได้ดังสมการที่ 5

$$E = \frac{-d\phi_B}{dt} \quad (5)$$

เมื่อ	E	เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำ
	ϕ_B	เป็นเส้นแรงแม่เหล็ก (เครื่องหมายลบ (-) แสดงถึงทิศทางตรงกันข้าม)

เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ_B) ในสมการที่ 5 มีค่าเท่ากับปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็ก (B) ที่ตกลงบนพื้นผิวสัมผัสหรือพื้นที่ที่สนามแม่เหล็กตัดผ่านขนาดเท่ากับ A แสดงดังภาพที่ 19



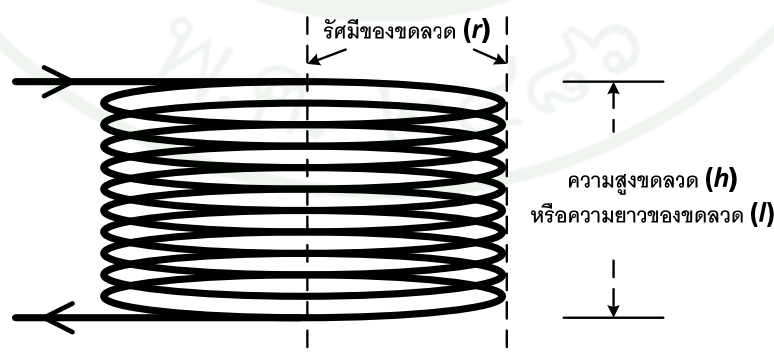
ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก

จากภาพที่ 19 ทำการคำนวณเส้นแรงแม่เหล็กได้ดังสมการที่ 6

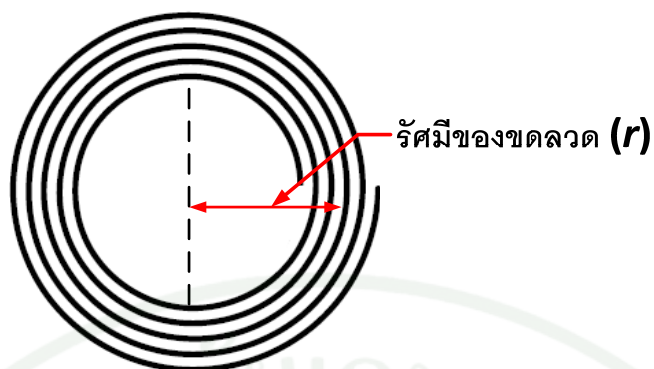
$$\int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \Phi_B \quad (6)$$

เมื่อ $d\vec{A}$ เป็นปริมาณเวกเตอร์ที่มีทิศตั้งฉากกับพื้นที่ dA

ปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็ก (B) และเส้นแรงแม่เหล็ก (Φ_B) รวมทั้งแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E) จากสมการที่ 4-6 จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวนำในกรณีของค่า μ_r ที่แตกต่างกันตามวัสดุที่ใช้งาน และรูปร่างของตัวนำที่นำมาใช้งานในกรณีขนาดของ dl และ dA ดังเช่นตัวนำที่ถูกสร้างให้มีลักษณะเป็นขดลวดแบบต่างๆ สามารถแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบขนาด dl และ dA ในขดลวดต่างลักษณะกันนี้ได้ดังตารางที่ 7, ภาพที่ 20 และภาพที่ 21



ภาพที่ 20 ขดลวดแบบโซลินอยด์

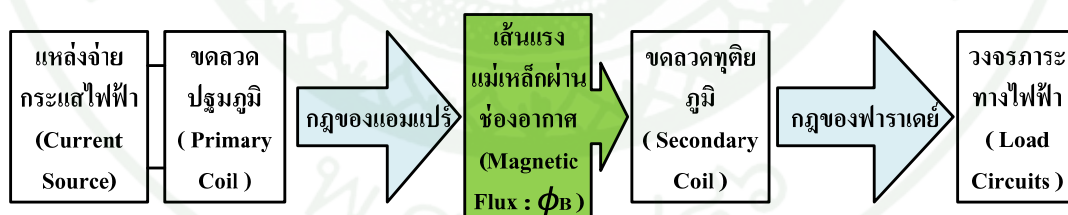


ภาพที่ 21 ขดลวดแบบเกลียวราบแบบกลม

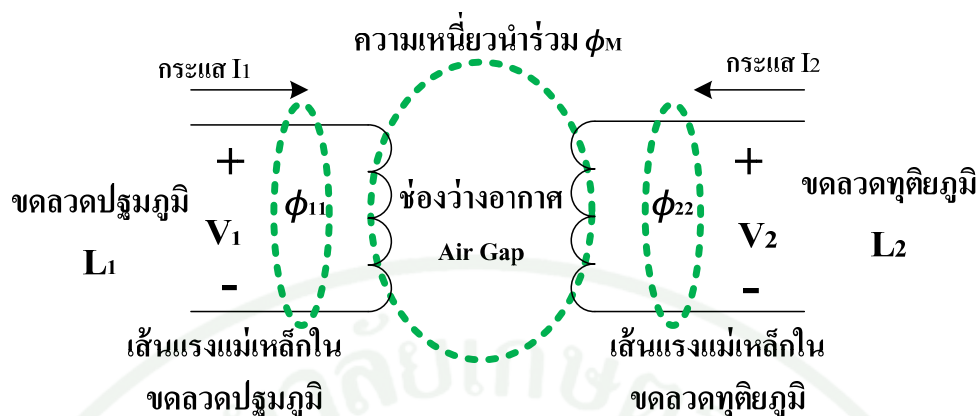
ตารางที่ 7 เปรียบเทียบขนาดของ dl และ dA ระหว่างขดลวด 2 แบบ

ลักษณะขดลวด	dl	dA
ขดลวดโซลินอยด์	l	πr^2
ขดลวดเกลียวราบแบบกลม	$2\pi r$	πr^2

ดังนั้นพื้นฐานของการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำที่อธิบายด้วยกฎของแอมแปร์และฟาราเดย์ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 22 และภาพที่ 23



ภาพที่ 22 พื้นฐานการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพที่ 23 การเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

เมื่อ	V_1	เป็นแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ
	V_2	เป็นแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ
	I_1	เป็นกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ
	I_2	เป็นกระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ
	L_1	เป็นความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดด้านปฐมภูมิ
	L_2	เป็นความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดด้านทุติยภูมิ
	ϕ_{11}	เป็นเส้นแรงแม่เหล็กจากสนามแม่เหล็กด้านปฐมภูมิ
	ϕ_{22}	เป็นเส้นแรงแม่เหล็กจากสนามแม่เหล็กด้านทุติยภูมิ
	ϕ_M	เป็นเส้นแรงแม่เหล็กรวมระหว่างด้านปฐมภูมิกับด้านทุติยภูมิ

1.2 ศึกษาการออกแบบและคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด

จากพื้นฐานของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ ประสิทธิภาพของระบบจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิเป็นสำคัญ ซึ่งค่าการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดทั้ง 2 ขดลวด จะเรียกว่า “ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance: M)” จะมีความสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self-Inductance: L_s) ของขดลวดแต่ละขดลวดดังสมการที่ 7

$$L_s = L_l - M \quad (7)$$

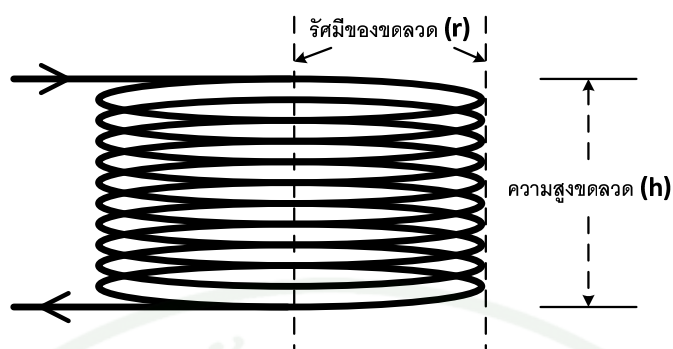
เมื่อ L_l เป็นค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวด (Leakage Inductance)

จากสมการที่ 7 พบว่า ความเหนี่ยวนำรวมจะมีค่าไม่เกินความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ดังนั้นในการออกแบบขดลวดจำเป็นต้องรู้ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวด ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของขดลวดที่แตกต่างกันไป ในการหาค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดสามารถหาได้ด้วยวิธีการนำขดลวดไปวัดค่าความเหนี่ยวนำด้วยเครื่องทดสอบจริง หรือใช้วิธีการคำนวณจากสมการต่างๆ ที่ได้มีผู้นำเสนอไว้มากมาย

สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เลือกใช้วิธีการคำนวณจากสมการของ Harold A. Wheeler (นำเสนอในงานวิจัย “Simple Inductance Formulas for Radio Coils”) ซึ่งเป็นสมการแบบการประมาณค่า (Approximation Method) ที่นิยมใช้ในการคำนวณความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวด เนื่องจากเป็นสมการที่มีความสะดวกในการคำนวณและค่าความผิดพลาดอยู่ที่ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพียงพอที่ใช้ในการคำนวณความเหนี่ยวนำตัวเองเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยที่ขดลวดที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้มีรูปร่างต่างกัน 2 แบบได้แก่ ขดลวดแบบโซลินอยด์ (Solenoid Coil) และขดลวดเกลียวราบแบบกลม (Round Planar Spirals Coil) ขดลวดทั้ง 2 แบบเป็นขดลวดที่นิยมใช้ในระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ ทำการคำนวณความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดทั้ง 2 แบบด้วยวิธีการประมาณค่าจากสมการของ Wheeler เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบจริงได้ดังนี้

1.2.1 ขดลวดแบบโซลินอยด์

ขดลวดโซลินอยด์มีลักษณะเป็นขดลวดหมუნวนทรงกระบอกโดยมีความยาวหรือความสูงของขดลวดตามจำนวนรอบของเส้นลวดตัวนำที่ใช้พันขดลวด ซึ่งขดลวดโซลินอยด์มีลักษณะดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ลักษณะของขดลวดแบบ โซลินอยด์ (Solenoid Coil)

การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (L_s) ของขดลวดโซลินอยด์ตามภาพที่ 25 ด้วยสมการของ Wheeler (Wheeler's equation) แสดงดังสมการที่ 8

$$L_s = \frac{10\mu\pi r^2 N^2}{9r+10h} \quad (8)$$

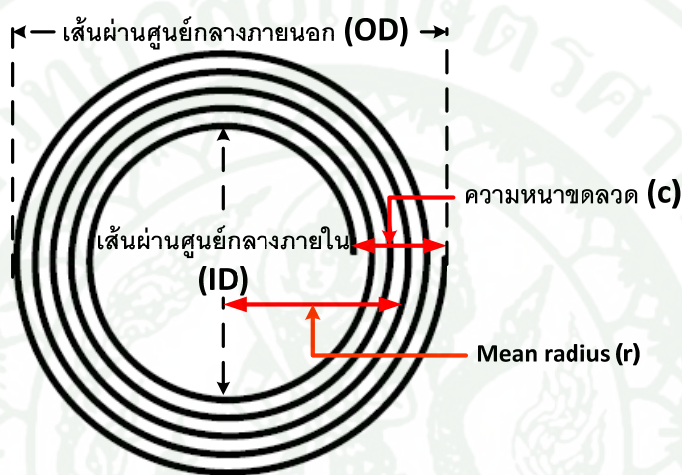
เมื่อ	r	เป็นรัศมีของขดลวดแบบ โซลินอยด์ หน่วยเป็นเมตร (meter)
	N	เป็นจำนวนรอบของขดลวดโซลินอยด์ หน่วยเป็นรอบ (turns)
	h	เป็นความยาวหรือความสูงของขดลวดโซลินอยด์ หน่วยเป็นเมตร (meter)
	L_s	เป็นค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง หน่วยเป็นเฮนรี (Henry)
	μ	เป็นค่าความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุที่เลือกใช้

เงื่อนไขการใช้สมการ Wheeler ในการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ L_s สำหรับขดลวดโซลินอยด์ โดยที่ $\frac{2r}{h} < 3$ สมการจะมีความผิดพลาดที่ 1% และในกรณีที่ $\frac{2r}{h} = 5$ จะมีความผิดพลาดที่ 4% นอกจากนี้สำหรับขดลวดที่มีค่า $h < 2r$ สมการของ Wheeler จะเป็นดังสมการที่ 9

$$L_s = \frac{10\mu\pi r^2 N^2}{\left[9 - \left(\frac{r}{5h}\right)r\right] + 10h} \quad (9)$$

1.2.2 ขดลวดเกลียวราบแบบกลม

ขดลวดเกลียวราบแบบกลมมีลักษณะขดลวดหมุนวนออกจากจุดศูนย์กลางและทำมุม 0 องศากับระนาบโดยมีความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดตามจำนวนรอบของเส้นลวดตัวนำที่ใช้พันขดลวด ซึ่งขดลวดเกลียวราบแบบกลมมีลักษณะดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ลักษณะของขดลวดเกลียวราบแบบกลม (Round Planar Spirals Coil)

การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (L_s) ของขดลวดเกลียวราบแบบกลมตามภาพที่ 25 สามารถคำนวณได้ด้วยสมการของ Wheeler (Wheeler's equation) แสดงดังสมการที่ 10

$$L_s = \frac{31.33 \mu N^2 r^2}{8r + 11c} \quad (10)$$

r เป็นความยาวจากจุดศูนย์กลางของขดลวดไปถึงกึ่งกลางของความหนาของขดลวด โดยที่ค่า r สามารถหาได้จากสมการที่ 11 และมีหน่วยเป็นเมตร (meter)

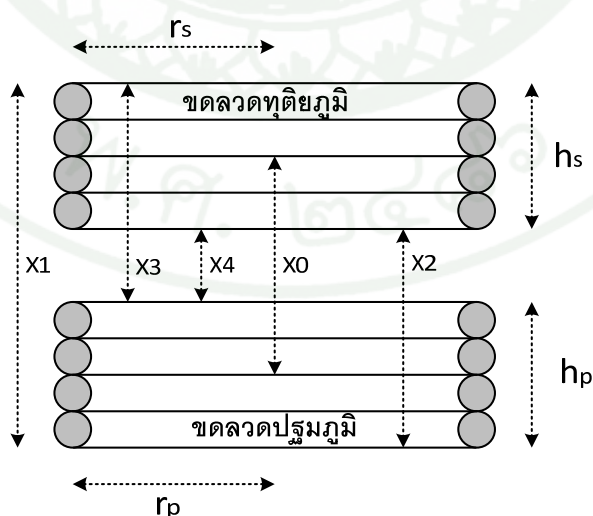
$$r = \frac{ID}{2} + \frac{c}{2} = \frac{ID}{2} + \left(\frac{OD - ID}{4} \right) \quad (11)$$

เมื่อ μ	เป็นค่าความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุที่เลือกใช้
c	เป็นความหนาของขดลวด มีหน่วยเป็นเมตร (meter)
ID	เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวด มีหน่วยเป็นเมตร (meter)
OD	เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวด มีหน่วยเป็นเมตร (meter)

เงื่อนไขการใช้สมการของ Wheeler ในการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดเกลียวแบบกลมคือ $c > 0.2r$ ซึ่งหากขนาดของขดลวดที่ออกแบบมาอยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความเหนี่ยวนำตัวเองที่คำนวณได้จากสมการของ Wheeler จะมีความผิดพลาดอยู่ที่ 1%

1.2.3 การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดแบบโซลินอยด์

การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิในขดลวดแบบโซลินอยด์ โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้ขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิมีขนาดเท่ากัน แสดงการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิได้ดังภาพที่ 26 และแสดงการคำนวณได้ดังสมการที่ 12 ซึ่งเป็นสมการของ Frederick W. Grover จากหนังสือ “Inductance Calculation Working Formulas and Tables” หน้าที่ 88-140



ภาพที่ 26 การเหนี่ยวนำร่วมในขดลวดโซลินอยด์

$$M = \frac{\mu\pi r_p^2 N_1 N_2}{2h_1 h_2 10^9} [r_1 B_1 - r_2 B_2 - r_3 B_3 + r_4 B_4] \quad (12)$$

เมื่อ	M	เป็นค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวด
	μ	เป็นค่าความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุที่เลือกใช้
	r_p	เป็นรัศมีของขดลวดโซลินอยด์ด้านปฐมภูมิ
	r_1	เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณจากตัวแปร X_1 และ r_p
	r_2	เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณจากตัวแปร X_2 และ r_p
	r_3	เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณจากตัวแปร X_3 และ r_p
	r_4	เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณจากตัวแปร X_4 และ r_p
	B_1	เป็นค่าคงที่จากการเปิดตารางที่ 8 ด้วยค่า ρ_1
	B_2	เป็นค่าคงที่จากการเปิดตารางที่ 8 ด้วยค่า ρ_2
	B_3	เป็นค่าคงที่จากการเปิดตารางที่ 8 ด้วยค่า ρ_3
	B_4	เป็นค่าคงที่จากการเปิดตารางที่ 8 ด้วยค่า ρ_4

ค่าสัมประสิทธิ์ r_n เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$ สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ 13

$$r_n = \sqrt{X_n^2 + r_p^2} \quad (13)$$

เมื่อ X_n เป็นขนาดของระยะห่างระหว่างขดลวดที่แสดงในภาพที่ 26 และ $n = 1, 2, 3, 4$

การหาค่าคงที่ B_n เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$ โดยกำหนดให้ขดลวดปฐมภูมิมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับขดลวดทุติยภูมิ ($2r_p = 2r_s$) จะได้จากการเปิดตารางที่ 8 ด้วยค่า ρ_n^2 ที่คำนวณได้จากสมการที่ 14

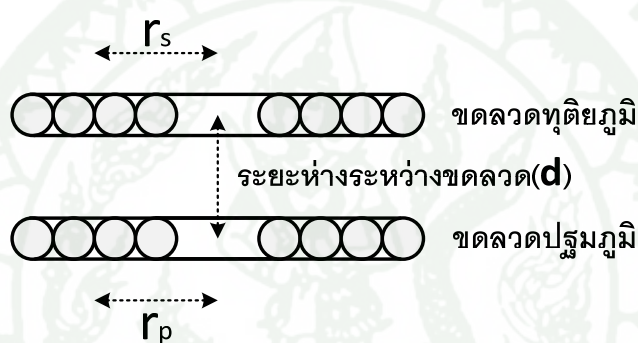
$$\rho_n^2 = \frac{r_p^2}{r_n^2} \quad (14)$$

ตารางที่ 8 ค่า B_n ที่ได้จากการคำนวณ ρ_n^2 เมื่อ $2r_p = 2r_s$

ρ_n^2	B_n	ρ_n^2	B_n	ρ_n^2	B_n	ρ_n^2	B_n
0	1						
0.01	0.999987	0.26	0.992244	0.51	0.970649	0.76	0.931397
0.02	0.99995	0.27	0.99165	0.52	0.969469	0.77	0.929294
0.03	0.999889	0.28	0.991035	0.53	0.968262	0.78	0.927135
0.04	0.999804	0.29	0.990399	0.54	0.967027	0.79	0.924918
0.05	0.999695	0.3	0.989742	0.55	0.965763	0.8	0.922639
0.06	0.999562	0.31	0.999062	0.56	0.964471	0.81	0.920297
0.07	0.999407	0.32	0.99836	0.57	0.963149	0.82	0.917886
0.08	0.999228	0.33	0.997637	0.58	0.961798	0.83	0.915403
0.09	0.999026	0.34	0.996891	0.59	0.960416	0.84	0.912843
0.1	0.998802	0.35	0.986123	0.6	0.959002	0.85	0.910202
0.11	0.998556	0.36	0.985332	0.61	0.957558	0.86	0.907472
0.12	0.998287	0.37	0.98452	0.62	0.95608	0.87	0.904648
0.13	0.997996	0.38	0.983684	0.63	0.95457	0.88	0.901721
0.14	0.997684	0.39	0.982826	0.64	0.953024	0.89	0.898683
0.15	0.997349	0.4	0.981944	0.65	0.951443	0.9	0.895522
0.16	0.996992	0.41	0.981039	0.66	0.949826	0.91	0.892225
0.17	0.996614	0.42	0.98011	0.67	0.948172	0.92	0.888774
0.18	0.996214	0.43	0.979158	0.68	0.94648	0.93	0.885151
0.19	0.995793	0.44	0.978182	0.69	0.944748	0.94	0.881327
0.2	0.995351	0.45	0.977181	0.7	0.942975	0.95	0.877266
0.21	0.994886	0.46	0.976156	0.71	0.941161	0.96	0.872917
0.22	0.994401	0.47	0.975106	0.72	0.939302	0.97	0.868201
0.23	0.993894	0.48	0.974031	0.73	0.937398	0.98	0.862983
0.24	0.993366	0.49	0.97293	0.74	0.935448	0.99	0.85698
0.25	0.992815	0.5	0.971802	0.75	0.933448	1	0.848826

1.2.4 การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดเกลียวราบแบบกลม

การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิในขดลวดเกลียวราบแบบกลม โดยที่ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิมีขนาดเท่ากัน แสดงการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิได้ดังภาพที่ 27 และแสดงการคำนวณได้ดังสมการที่ 15 ซึ่งเป็นสมการของ Frederick W. Grover จากหนังสือ “Inductance Calculation Working Formulas and Tables” หน้าที่ 77-87



ภาพที่ 27 การเหนี่ยวนำร่วมในขดลวดเกลียวราบแบบกลม

$$M = N_1 N_2 f r_p \quad (15)$$

- เมื่อ r_p เป็นรัศมีของขดลวดเกลียวราบแบบกลมด้านปฐมภูมิ
 f เป็นค่าคงที่จากการเปิดตารางที่ 9 ในกรณีที่ $\frac{d}{2r_p} \leq 1$
 หรือ f เป็นค่าคงที่จากการเปิดตารางที่ 10 ในกรณีที่ $\frac{2r_p}{d} \leq 1$

ตารางที่ 9 ค่าของ f ในกรณีที่ $\frac{d}{2r_p} \leq 1$

$d/2r_p$	f	$d/2r_p$	f	$d/2r_p$	f	$d/2r_p$	f
0.01	0.0501600	0.26	0.0107230	0.51	0.0048	0.76	0.0024659
0.02	0.0414700	0.27	0.0103400	0.52	0.004664	0.77	0.002406
0.03	0.0363900	0.28	0.0099740	0.53	0.004532	0.78	0.0023479
0.04	0.0328000	0.29	0.0096270	0.54	0.0044050	0.79	0.0022916
0.05	0.0300300	0.3	0.0093960	0.55	0.004283	0.8	0.0022369
0.06	0.0277700	0.31	0.0089800	0.56	0.004165	0.81	0.0021838
0.07	0.0258800	0.32	0.0086790	0.57	0.004051	0.82	0.0021323
0.08	0.0242400	0.33	0.0083900	0.58	0.00394	0.83	0.0020823
0.09	0.0228100	0.34	0.0081140	0.59	0.003834	0.84	0.0020337
0.1	0.0215390	0.35	0.0078500	0.6	0.00373	0.85	0.0019865
0.11	0.0203960	0.36	0.0075970	0.61	0.003631	0.86	0.0019407
0.12	0.0193610	0.37	0.0073540	0.62	0.003534	0.87	0.0018962
0.13	0.0184170	0.38	0.0071210	0.63	0.003441	0.88	0.001853
0.14	0.0175500	0.39	0.0068980	0.64	0.003351	0.89	0.0018109
0.15	0.0167500	0.4	0.0066840	0.65	0.003263	0.9	0.0017701
0.16	0.0160090	0.41	0.0064770	0.66	0.003179	0.91	0.0017304
0.17	0.0153190	0.42	0.0062790	0.67	0.003097	0.92	0.0016918
0.18	0.0146760	0.43	0.0060890	0.68	0.003018	0.93	0.0016542
0.19	0.0140730	0.44	0.0059060	0.69	0.002941	0.94	0.0016178
0.2	0.0135070	0.45	0.0057300	0.7	0.002866	0.95	0.0015822
0.21	0.0129750	0.46	0.0055600	0.71	0.002794	0.96	0.0015477
0.22	0.0124730	0.47	0.0053960	0.72	0.002725	0.97	0.0015141
0.23	0.0120000	0.48	0.0052390	0.73	0.002657	0.98	0.0014814
0.24	0.0115510	0.49	0.0050870	0.74	0.002591	0.99	0.0014496
0.25	0.0111260	0.5	0.0049410	0.75	0.002528	1	0.0014186

ตารางที่ 10 ค่าคงที่ f ในกรณีที่ $\frac{2r_p}{d} \leq 1$

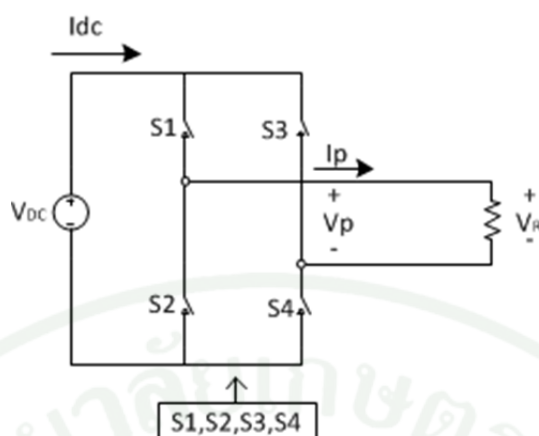
$2r_p/d$	f	$2r_p/d$	f	$2r_p/d$	f	$2r_p/d$	f
1	0.0014186	0.75	0.0007345	0.5	0.00025999	0.25	0.00003683
0.99	0.0013882	0.74	0.0007110	0.49	0.00024622	0.24	0.0000327
0.98	0.0013579	0.73	0.0006879	0.48	0.00023287	0.23	0.00002888
0.97	0.0013279	0.72	0.0006651	0.47	0.00021994	0.22	0.00002535
0.96	0.0001298	0.71	0.0006427	0.46	0.00020743	0.21	0.00002212
0.95	0.0012686	0.7	0.0006206	0.45	0.00019533	0.2	0.000019165
0.94	0.0012393	0.69	0.0005989	0.44	0.00018365	0.19	0.000016478
0.93	0.0012103	0.68	0.0005775	0.43	0.00017239	0.18	0.000014049
0.92	0.0011814	0.67	0.0005565	0.42	0.00016154	0.17	0.000011865
0.91	0.0011529	0.66	0.0005359	0.41	0.00015109	0.16	0.000009916
0.9	0.0011246	0.65	0.0005157	0.4	0.00014106	0.15	0.000008189
0.89	0.0010966	0.64	0.0004959	0.39	0.00013143	0.14	0.000006672
0.88	0.0010688	0.63	0.0004764	0.38	0.00012221	0.13	0.000005353
0.87	0.0010413	0.62	0.0004573	0.37	0.00011338	0.12	0.000004218
0.86	0.0010141	0.61	0.0004387	0.36	0.00010495	0.11	0.000003255
0.85	0.0009871	0.6	0.0004204	0.35	0.00009692	0.1	0.000002449
0.84	0.0009605	0.59	0.0004025	0.34	0.00008926	0.09	0.000001788
0.83	0.0009341	0.58	0.0003850	0.33	0.000082	0.08	0.000001257
0.82	0.0009081	0.57	0.0003680	0.32	0.0000751	0.07	0.000000843
0.81	0.0008823	0.56	0.0003513	0.31	0.00006858	0.06	0.000000532
0.8	0.0008569	0.55	0.0003350	0.3	0.00006242	0.05	0.000000308
0.79	0.0008318	0.54	0.0003192	0.29	0.00005662		
0.78	0.0008070	0.53	0.0003038	0.28	0.00005116		
0.77	0.0007825	0.52	0.0002888	0.27	0.00004605		
0.76	0.0007583	0.51	0.0002742	0.26	0.00004128		

1.3 การวิเคราะห์ระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ

นอกจากรูปร่างและขนาดของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิแล้ว ประสิทธิภาพของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ (ICPT) ยังขึ้นอยู่กับการทำงานของวงจรภาคกำลังไฟฟ้าของระบบ ICPT ซึ่งวงจรภาคกำลังไฟฟ้าของระบบ ICPT จะมีลักษณะเป็นวงจรแบบเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของระบบ ICPT คือขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยทั่วไปการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านช่องว่างอากาศระหว่างขดลวด จะเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าไปในช่องว่างอากาศ จึงทำการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุเข้ากับขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิในลักษณะอนุกรมหรือขนาน หรือทั้งอนุกรมและขนาน โดยที่จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ทำให้รูปแบบวงจรของระบบ ICPT มีลักษณะเป็นวงจรแบบเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์มีด้วยกันหลายรูปแบบ แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรแบบเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มคลื่น โดยส่วนที่เป็นวงจรเรโซแนนซ์จะอยู่ในลักษณะของวงจรชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้งแบบอนุกรมและขนาน โดยที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มคลื่นจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนได้แก่ วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มคลื่นและวงจรเรโซแนนซ์ทั้งแบบอนุกรมและแบบขนานที่อยู่ในรูปของวงจรชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ ดังนั้นในส่วนนี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มคลื่นและวงจรเรโซแนนซ์ด้วยการแปลงวงจรทางไฟฟ้าให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลและฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

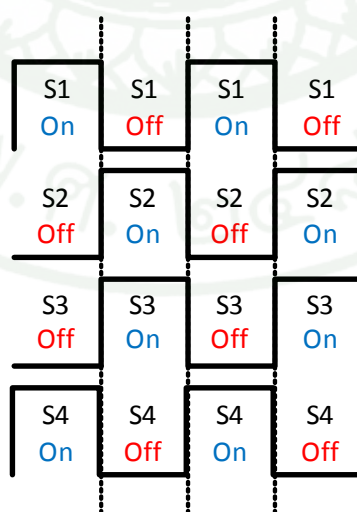
1.3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มคลื่น

การส่งกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ จะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มคลื่นเป็นวงจรกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ดังนั้นในส่วนนี้ จะทำการศึกษาการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น แสดงวงจรได้ดังภาพที่ 28



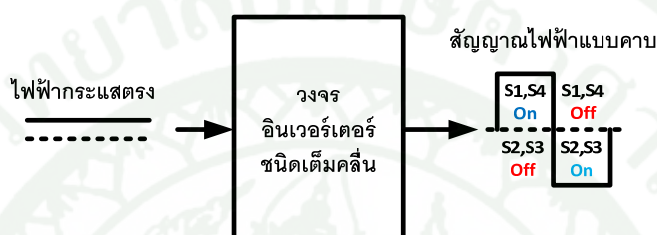
ภาพที่ 28 วงจรมอเตอร์แบบเต็มคลื่นแบบ 1 เฟส

จากภาพที่ 28 เป็นวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับแบบเต็มคลื่นแบบ 1 เฟส ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์จำนวน 4 ตัวคือ S1, S2, S3 และ S4 โดยด้านขาเข้าต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนด้านขาออกต่อกับภาระทางไฟฟ้า (แสดงด้วยตัวต้านทานหรือ Resistor : R_L) แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทำงานของสวิตช์ทั้ง 4 จะมีลักษณะเป็นสัญญาณคาบ (Periodic Signal) ตามจังหวะการทำงานของสวิตช์แต่ละคู่ ซึ่งจังหวะการทำงานของสวิตช์ S1-S4 จะสลับกันทำงานเป็นคู่ระหว่างคู่ S1, S4 และ คู่ S2, S3 แสดงจังหวะการทำงานได้ตามแผนภาพเวลาดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 แผนผังเวลาการทำงานของสวิตช์ S1-S4

จากจังหวะการทำงานของสวิตช์ S1-S4 และตำแหน่งที่สวิตช์แต่ละตัวอยู่อธิบายได้ว่าในจังหวะที่สวิตช์ S1 และ S4 ทำงาน จะเกิดแรงดันด้านบวกขึ้นที่ภาระไฟฟ้าหรือ R_L แต่ในจังหวะที่สวิตช์ S2 และ S3 ทำงาน จะเกิดแรงดันไฟฟ้าด้านลบ (ตรงข้ามกับสัญญาณในช่วงของ S1 และ S4) จะได้ลักษณะของสัญญาณที่เข้าและออกจากวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับแสดงได้ดังภาพที่ 30 (โดยแสดงให้เห็นจังหวะการทำงานของสวิตช์ S1-S4)

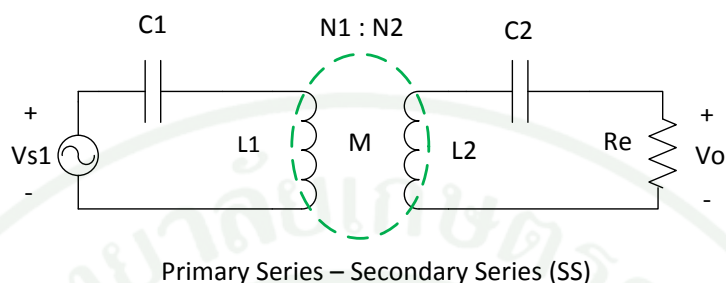


ภาพที่ 30 ลักษณะสัญญาณที่เข้าและออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์

1.3.2 การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ

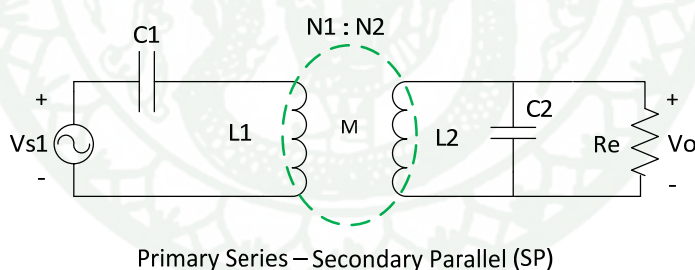
เนื่องจากสถานะที่ความถี่สวิตช์ซึ่งมีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ จะทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แสดงเป็นความต้านทานหรือ Purely Resistance ซึ่งเงื่อนไขของความถี่สวิตช์ซึ่งเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ จะขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเก็บประจุของวงจรเรโซแนนซ์ ดังนั้นหากไม่มีการต่อตัวเก็บประจุที่ทราบค่าแน่นอนเข้ากับขดลวดในวงจรเรโซแนนซ์แล้ว ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรจะเกิดจากค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดกับค่าความเก็บประจุแฝงของขดลวด ซึ่งโดยปกติจะไม่รู้ค่าความเก็บประจุแฝงของขดลวด ทำให้ไม่สามารถกำหนดให้ความถี่สวิตช์ซึ่งมีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ได้ ดังนั้นจึงต้องต่อตัวเก็บประจุที่ทราบค่ากับขดลวด จะสามารถกำหนดให้ความถี่สวิตช์ซึ่งมีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการได้ ซึ่งรูปแบบของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบหลักได้แก่

1) การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุโดยต่ออนุกรมกับขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ (Primary Series – Secondary Series: SS-Topology) แสดงวงจรสมมูลดังภาพที่ 31



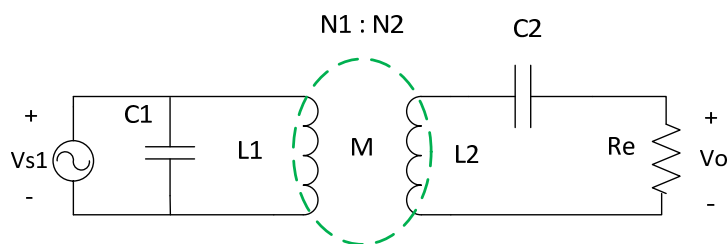
ภาพที่ 31 การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในลักษณะ SS-Topology

2) การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุโดยต่ออนุกรมกับขดลวดด้านปฐมภูมิ แต่ต่อขนานกับขดลวดด้านทุติยภูมิ (Primary-Series, Secondary-Parallel: SP Topology) แสดงวงจรสมมูลดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในลักษณะ SP-Topology

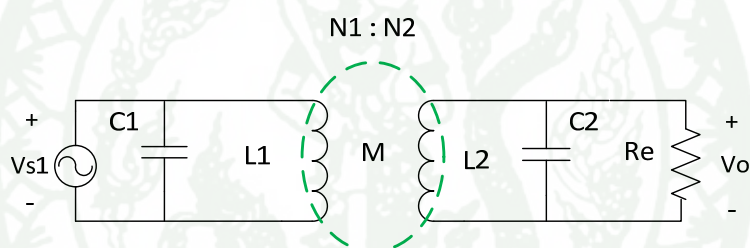
3) การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุโดยต่อขนานกับขดลวดด้านปฐมภูมิ แต่ต่ออนุกรมกับขดลวดทุติยภูมิ (Primary-Parallel, Secondary-Series: PS Topology) แสดงวงจรสมมูลดังภาพที่ 33



Primary Parallel – Secondary Series (PS)

ภาพที่ 33 การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในลักษณะ PS-Topology

4) การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุโดยต่อขนานกับขดลวดด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ (Primary-Parallel, Secondary-Parallel: PP Topology) แสดงวงจรสมมูลดังภาพที่ 34



Primary Parallel – Secondary Parallel (PP)

ภาพที่ 34 การชดเชยความถี่ด้วยตัวเก็บประจุในลักษณะ PP Topology

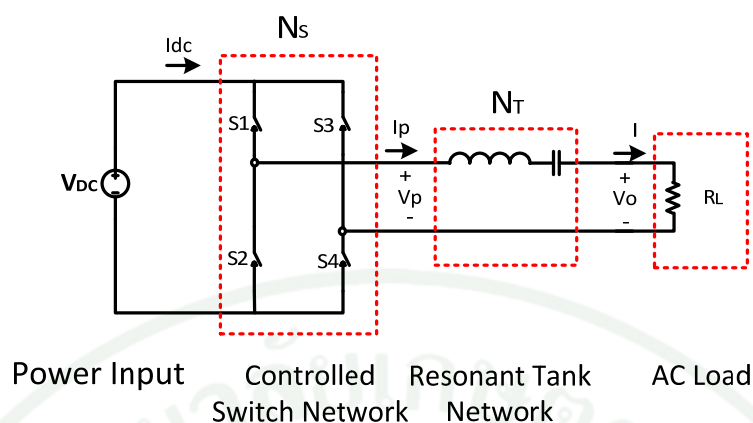
ในการวิเคราะห์รูปแบบของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้ง 4 แบบ จะแสดงได้ในขั้นตอนการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำในส่วนต่อไป

1.3.3 การวิเคราะห์การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์การทำงานและพฤติกรรมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ จะอาศัยการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากระบบถ่ายโอนกำลังแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ (ICPT) ซึ่งประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์และการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ ให้ทำงานร่วมกับ

ขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ดังนั้นภาพรวมของระบบ ICPT จะมีลักษณะเช่นเดียวกับ วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ ทั้งชนิดอนุกรม (Series Resonant Inverter : เมื่อเป็น SS หรือ SP Topology) และชนิดขนาน (Parallel Resonant Inverter : เมื่อเป็น PP หรือ PS Topology) ดังนั้นในการวิเคราะห์ระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ จะอาศัยวิธีการวิเคราะห์ห้วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีการประมาณค่าแบบไซน์ (Sinusoidal Approximation) ให้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ระบบ ICPT ร่วมกับการจัดรูปวงจรด้วยแบบจำลองการเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance Model) เพื่อวิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์รวมที่ถูกมองจากด้านปฐมภูมิไปจนถึงด้านทุติยภูมิ (Total Impedance : Z_t) อิมพีแดนซ์ที่ถูกสะท้อนจากด้านทุติยภูมิไปบนด้านปฐมภูมิ (Reflected Impedance : Z_r) และอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิ (Secondary Impedance : Z_s) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของระบบ ICPT ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามรูปแบบวงจรการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้ง 4 รูปแบบ มีรายละเอียดดังนี้

ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณค่าแบบไซน์ โดยอ้างอิงจากบทที่ 19 “Resonant Conversion” จากหนังสือ “Fundamental of Power Electronics” โดย W. Erickson ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่กำหนดให้วงจรสวิตซ์ทำงานที่ความถี่สวิตซ์เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์หรือ Resonant Tank ทำให้ไม่นำผลฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณขาออกจากวงจรสวิตซ์มาพิจารณาได้ โดยจะพิจารณาเฉพาะส่วนที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานหรือ Fundamental Component (ซึ่งสัญญาณมีลักษณะเป็นไซน์ จึงถูกเรียกว่าการประมาณค่าแบบไซน์) ของสัญญาณขาออกจากวงจรสวิตซ์ซึ่งเท่านั้น โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบอนุกรมเป็นอันดับแรก เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ต่อไป สามารถแสดงวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบอนุกรมได้ดังภาพที่ 35

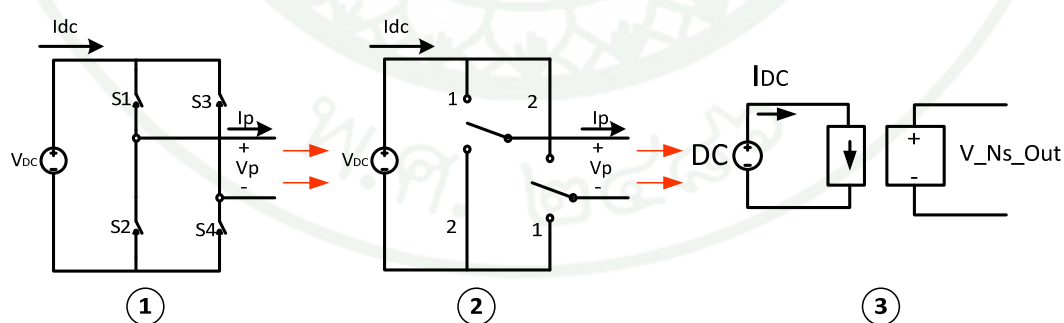


ภาพที่ 35 วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบอนุกรม

วิธีการประมาณค่าแบบไซน์สำหรับวงจรดังภาพที่ 35 จะทำการแบ่งส่วนประกอบในการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนหลักได้แก่

- 1) วงจรสวิตชิง หรือ Switching Network (N_S)
- 2) วงจรเรโซแนนซ์ หรือ Resonant Tank Network (N_T)

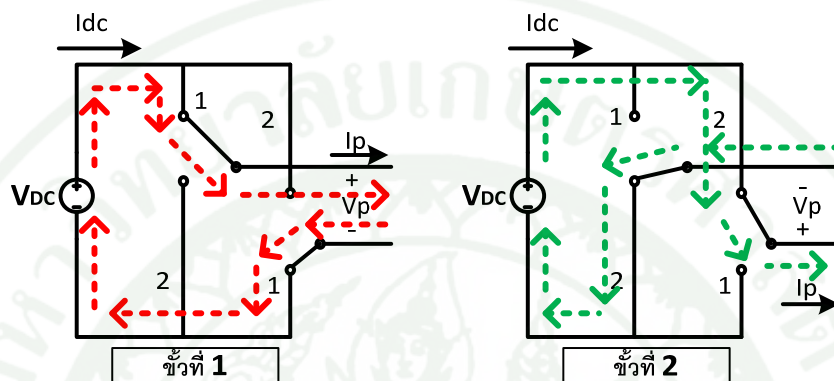
ในการวิเคราะห์วงจรสวิตชิงหรือ Switching Network (N_S) จะทำการพิจารณาตั้งแต่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปจนถึงส่วนที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยทำการวิเคราะห์ด้วยการแปลงวงจรสวิตชิงให้อยู่ในรูปวงจรสมมูล มีลำดับการแปลงดังภาพที่ 36



ภาพที่ 36 ลำดับการแปลงอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรสมมูล

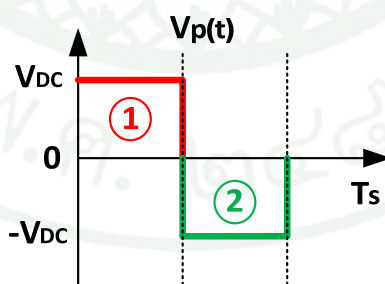
สวิตช์ S1-S4 ในวงจรสวิตชิงตามหมายเลข 1 ในภาพที่ 36 จะมีการทำงานสลับกันเป็นคู่ ซึ่งแต่ละคู่จะทำงานไม่พร้อมกัน ได้แก่ คู่ S1, S4 และคู่ S2, S3 ด้วยการสลับการทำงานของ

สวิตช์ทั้ง 2 คู่ จึงสามารถแปลงสวิตช์ S1-S4 ให้เป็นสวิตช์ในอุดมคติ (Ideal Switch) ได้ตามหมายเลข 2 ในภาพที่ 36 โดยที่คู่ S1, S4 ให้เป็นขั้วหมายเลขที่ 1 และคู่ S2, S3 ให้เป็นขั้วที่ 2 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านวงจรสวิตช์ซึ่งจากการสลับกันทำงานของสวิตช์ในอุดมคติตามหมายเลขที่ 2 ได้ดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 การไหลของกระแสไฟฟ้าตามขั้วที่ 1 และขั้วที่ 2

การทำงานตามขั้วที่ 1 และขั้วที่ 2 จะทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายหรือแรงดันไฟฟ้า V_{DC} เปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบคลื่นสี่เหลี่ยมที่เป็นคาบหรือ Square Wave ออกจากวงจรสวิตช์ซึ่งได้วงจรสมมูลที่มีลักษณะตามหมายเลข 3 ในภาพที่ 36 โดยมีคาบเวลาตามการทำงานของการสับสวิตช์ที่ขั้ว 1 และขั้ว 2 ดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 แรงดันไฟฟ้า $V_p(t)$ ที่ได้จากการสลับทำงานของขั้วที่ 1 และขั้วที่ 2

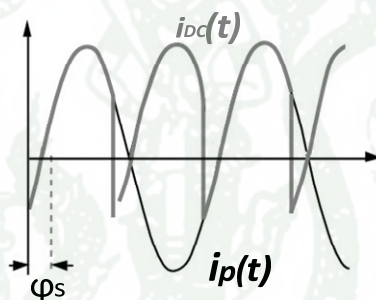
แรงดันไฟฟ้าแบบคลื่นสี่เหลี่ยมที่ได้คือแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการรวมกันของส่วนประกอบหลักมูลหรือ Fundamental Component กับส่วนประกอบฮาร์โมนิกหรือ Harmonics

สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ด้วยอนุกรมฟูริเยร์หรือ Fourier Transfer ได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากวงจรสวิตชิงดังสมการที่ 16

$$v_p(t) = \frac{4V_{DC}}{\pi} \sum \frac{\sin(2n\pi f_s t)}{n} \quad (16)$$

เมื่อ n เป็นลำดับของฮาร์โมนิก

ทำการพิจารณากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรสวิตชิง จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าทางด้านขาเข้าของวงจรสวิตชิงหรือ $i_{DC}(t)$ และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรสวิตชิงหรือ $i_p(t)$ ได้ลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้า i_{DC} และ i_p แสดงดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 กระแสไฟฟ้า $i_{DC}(t)$ และ $i_p(t)$ จากการทำงานของขั้วที่ 1 และขั้วที่ 2

ที่มา : Fundamental of Power Electronics โดย W. Erickson

จากภาพที่ 39 ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไหลเข้าวงจรสวิตชิงหรือ $i_{DC}(t)$ จะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันคาบที่เวลา $t = T_s/2$ ในขณะที่กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรสวิตชิงหรือ $i_p(t)$ จะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันคาบที่เวลา $t = T_s$ ดังนั้นจะสามารถหาค่าประกอบของไฟฟ้ากระแสตรงหรือ DC Component ที่ขาเข้าของวงจรสวิตชิงได้ด้วยค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า $i_{DC}(t)$ ได้ดังสมการที่ 17

$$\langle i_{DC}(t) \rangle = \frac{2}{T_s} \int_0^{T_s/2} i_{DC}(t) dt \quad (17)$$

เมื่อ $i_{DC}(t)$ คือไฟฟ้ากระแสตรงที่ไหลเข้าวงจรสวิตช์จากภาพที่ 39 จะมีขนาดเท่ากับกระแสไฟฟ้า $i_p(t)$ แต่เนื่องจากกระแสไฟฟ้า $i_{DC}(t)$ มีทิศทางการไหลเพียงทิศทางเดียวและไหลเข้าวงจรสวิตช์ซึ่งตามจังหวะการทำงานของสวิตช์ในอุดมคติที่ชั่วหมายเลข 1 และหมายเลข 2 ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า $i_{DC}(t)$ และกระแสไฟฟ้า $i_p(t)$ ดังสมการที่ 18 และ 19

$$i_{DC}(t) = \begin{cases} i_p(t), & \text{Ideal Switch} = 1 \\ -i_p(t), & \text{Ideal Switch} = 2 \end{cases} \quad (18)$$

$$i_p(t) = I_{pn} \sin(2\pi f_s t - \varphi_s) \quad (19)$$

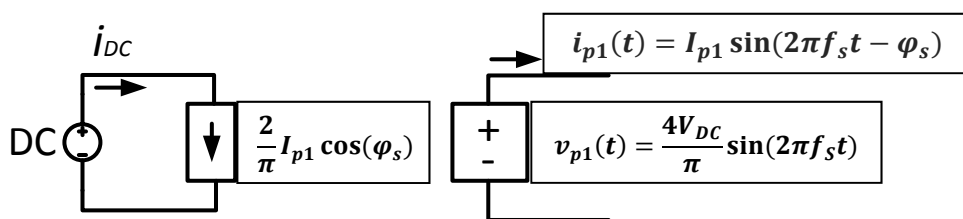
เมื่อ φ_s เป็นเฟสเลื่อนของกระแสไฟฟ้า $i_p(t)$ แต่ละลำดับ

ในการประมาณค่าแบบไซน์ จะพิจารณาให้ส่วนประกอบของวงจรเรโซแนนซ์ตอบสนองที่ความถี่เรโซแนนซ์ จะทำให้สามารถไม่นำผลขององค์ประกอบฮาร์โมนิกของสัญญาณมาพิจารณา ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะที่เป็นส่วนหลักมูลของสัญญาณ (ให้ $n = 1$) ดังนั้นจะแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากวงจรสวิตช์ซึ่งดังสมการที่ 20 และด้วยการแทนค่ากระแสไฟฟ้า $i_{DC}(t)$ และกระแสไฟฟ้า $i_p(t)$ จากสมการที่สมการที่ 18 และ 19 ลงในสมการที่ 17 ตามลำดับ จะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าวงจรสวิตช์ซึ่งดังสมการที่ 21

$$v_{p1}(t) = \frac{4V_{DC}}{\pi} \sin(2\pi f_s t) \quad (20)$$

$$\langle i_{DC}(t) \rangle = \frac{2}{\pi} I_{p1} \cos(\varphi_s) \quad (21)$$

เมื่อได้ส่วนประกอบของกระแสไฟฟ้า $\langle i_{DC}(t) \rangle$ และแรงดันไฟฟ้า $v_{p1}(t)$ ดังสมการที่ 20 และ 21 ของวงจรสวิตช์ซึ่งมาแล้ว นำมาสร้างเป็นวงจรสมมูลได้ดังภาพที่ 40



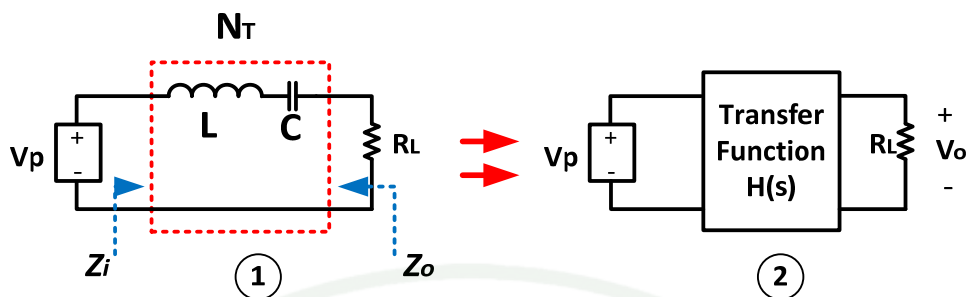
ภาพที่ 40 วงจรสมมูลของภาคสวิตชิง

จากขั้นตอนการประมาณค่าแบบไซน์จนได้วงจรสมมูลของวงจรสวิตชิงหรือ N_S สามารถสรุปลักษณะของวงจรสวิตชิงได้ว่า

- 1) ส่วนประกอบด้านขาเข้าของวงจรสวิตชิงจะแทนด้วยค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า $i_{DC}(t)$
- 2) ส่วนประกอบด้านขาออกจากวงจรสวิตชิงจะแทนด้วยส่วนประกอบหลักมูลของแรงดันไฟฟ้า $v_{p1}(t)$ และกระแสไฟฟ้า $i_{p1}(t)$
- 3) การประมาณค่าด้วยไซน์ของวงจรสวิตชิง จะมีคุณสมบัติของการอนุรักษ์พลังงานหรือกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ออกจากภาคสวิตชิงของวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าหรือ $P_{DC} = P_p$

วิเคราะห์ในส่วนของวงจรเรโซแนนซ์หรือ Tank Network (N_T) จุดประสงค์เพื่อใช้ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนหรือ Transfer Function ระหว่างด้านขาเข้าวงจรเรโซแนนซ์ไปยังโหลดที่ด้านขาออกของวงจรเรโซแนนซ์ โดยฟังก์ชันถ่ายโอน หรือ Transfer Function ($H(s)$) จะขึ้นอยู่กับรูปแบบการเชื่อมต่อของส่วนประกอบในวงจรเรโซแนนซ์ จากตัวอย่างวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบอนุกรมที่แสดงดังภาพที่ 35 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรเรโซแนนซ์ดังนี้

ทำการวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบอนุกรมโดยการแทนแหล่งจ่ายของวงจรเรโซแนนซ์ด้วยแรงดันที่ออกจากวงจรสวิตชิงด้วยแรงดันไฟฟ้า V_p และแทนด้านขาออกจากวงจรเรโซแนนซ์ด้วยตัวต้านทาน R_L จะได้รูปวงจรสมมูลของวงจรเรโซแนนซ์ดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 การวิเคราะห์วงจรสมมูลของวงจรเรโซแนนซ์หรือ N_T

วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมในหมายเลขที่ 1 ตามภาพที่ 41 จะถูกพิจารณาเป็น ฟังก์ชันถ่ายโอนหรือ Transfer Function ($H(s)$) ของการถ่ายโอนแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้าหรือ V_p ไปยัง R_L หรือแรงดันไฟฟ้า V_o ตามหมายเลขที่ 2 ในภาพที่ 41 จะฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ 22

$$H(s) = \frac{V_o}{V_p} \quad (22)$$

สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้า V_o ได้จากด้วยวิธีการแบ่งแรงดันหรือ Voltage Divider ระหว่างแรงดันไฟฟ้า V_p และแรงดันไฟฟ้า V_o ดังสมการที่ 23

$$V_o = \frac{V_p R_L}{Z_i} = \frac{V_p R_L}{X_C + X_L + R_L} \quad (23)$$

ทำการแทนค่าแรงดันไฟฟ้า V_o ลงในสมการที่ 22 จะได้ $H(s)$ ดังสมการที่ 24

$$H(s) = \frac{V_o}{V_p} = \frac{R_L}{X_C + X_L + R_L} \quad (24)$$

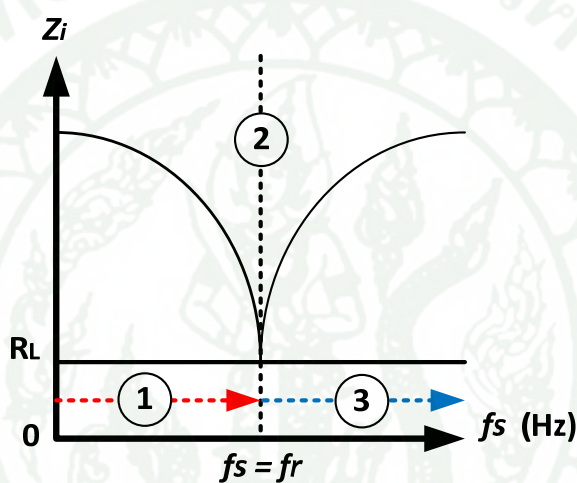
สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมได้จากผลตอบสนอง ความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนดังแสดงในสมการที่ 24 โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

จากสมการที่ 24 พบว่าฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)$ จะขึ้นอยู่กับขนาดของค่า คาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (X_C) และค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (X_L) โดยที่ตัวแปร X_C และ X_L มีค่าตาม สมการที่ 25 และ 26 ตามลำดับ

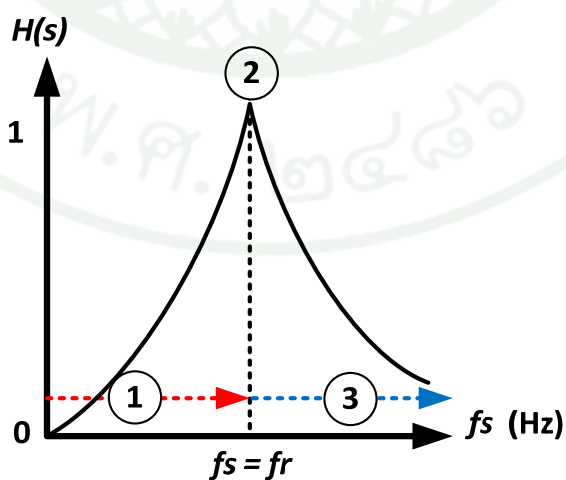
$$X_C = \frac{1}{j\omega_s C} = \frac{1}{sC} \quad (25)$$

$$X_L = j\omega_s L = sL \quad (26)$$

เมื่อ $\omega_s = 2\pi f_s$ และ f_s คือความถี่สวิตช์ของวงจรสวิตช์ซึ่งทำการพล็อตกราฟผลตอบสนองความถี่ของ $Z_i = X_C + X_L + R_L$ และผลตอบสนองความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)$ เมื่อความถี่ f_s มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง ∞ ได้ดังภาพที่ 42 และภาพที่ 43



ภาพที่ 42 ผลตอบสนองความถี่ของตัวแปร Z_i



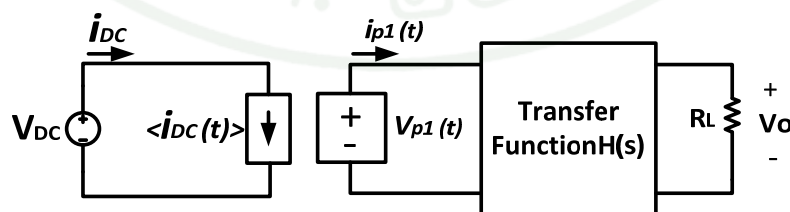
ภาพที่ 43 ผลตอบสนองความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอน $H(s)$

จากภาพที่ 42 และภาพที่ 43 พบว่าค่าของตัวแปร Z_i และฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)$ จะแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงตามความถี่สวิตชิง f_s ดังนี้

1) ช่วงที่ 1 เมื่อความถี่ $f_s < f_r$ หากกำหนดให้ความถี่ $f_s = 0$ ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า Z_i จะเป็นผลมาจากคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ X_C ในช่วงนี้จะได้ว่า $X_C = \infty$ ทำให้อิมพีแดนซ์ Z_i มีค่าเข้าใกล้ ∞ ส่งผลให้ค่าของฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)$ เข้าใกล้ 0 ดังแสดงในภาพที่ 43 และเมื่อความถี่ f_s มีค่ามากขึ้นจะทำให้ Z_i มีค่าลดลง ส่งผลให้ฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)$ มีค่ามากขึ้น เข้าสู่ช่วงที่ 2

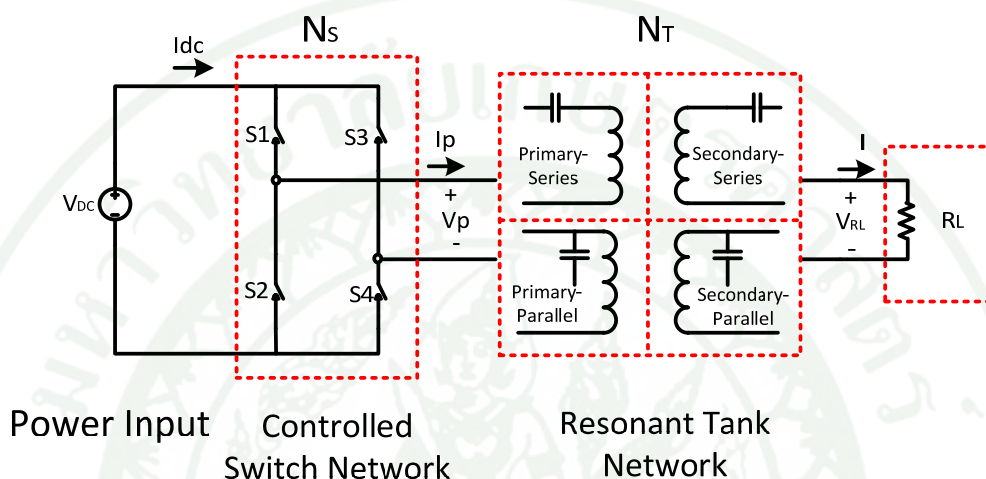
2) ช่วงที่ 2 เมื่อความถี่ $f_s = f_r$ ในช่วงนี้ปริมาณของตัวแปร X_C จะมีค่าเท่ากับตัวแปร X_L ทำให้อิมพีแดนซ์ Z_i คงเหลือแต่ผลของความต้านทาน R_L ซึ่งในขณะที่อิมพีแดนซ์ $Z_i = R_L$ จะทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)$ มีค่าเท่ากับ 1 ดังแสดงในภาพที่ 43 การที่ฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s) = 1$ แสดงว่าแรงดันไฟฟ้า $V_o = V_p$ และเมื่อความถี่ f_s มีค่ามากขึ้นจะทำให้ Z_i มีค่าเพิ่มขึ้นอีก ส่งผลให้ฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)$ มีค่าลดลงอีกครั้งเข้าสู่ช่วงที่ 3

3) ช่วงที่ 3 เมื่อความถี่ $f_s > f_r$ หากกำหนดให้ความถี่ $f_s = \infty$ ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า Z_i จะเป็นผลมาจากอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ X_L ในช่วงนี้จะได้ว่า $X_L = \infty$ ทำให้อิมพีแดนซ์ Z_i มีค่าเข้าใกล้ ∞ ส่งผลให้ฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)$ มีค่าเข้าใกล้ 0 อีกครั้ง สามารถแสดงในภาพที่ 43 นวัตกรรมของวงจรสวิตชิงและวงจรเรโซแนนซ์ (พิจารณาให้ตอบสนองที่ความถี่หลักมูลหรือความถี่เรโซแนนซ์) มาสร้างเป็นวงจรสมมูลของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบอนุกรมได้ดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 วงจรสมมูลของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบอนุกรม

จากวิธีการวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบอนุกรมดังแสดงข้างต้นมาแล้ว สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ความเหนี่ยวนำหรือ ICPT ได้โดยแบ่งส่วนของวงจร ICPT ออกเป็นแต่ละส่วนแสดงได้ดังภาพที่ 45 และแทนวงจรทางด้านทุติยภูมิด้วยความต้านทาน R_L



ภาพที่ 45 วงจร ICPT ที่ใช้วิธีการประมาณค่าแบบไซน์ในการวิเคราะห์

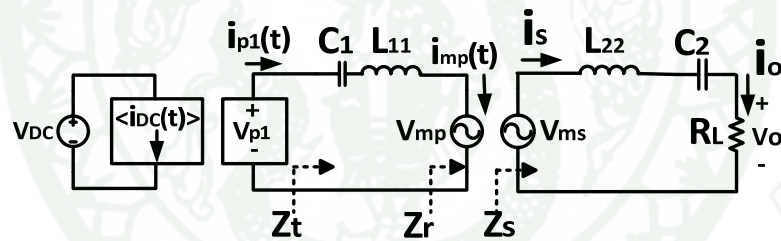
ในส่วนของภาควงจรสวิตชิง จะสามารถทำการวิเคราะห์ได้ด้วยการวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบอนุกรมที่ได้ยกตัวอย่างมาก่อนหน้านี้ แต่ในส่วนของการวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ จะอยู่ในรูปของวงจรชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุกับขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยการใช้แบบจำลองความเหนี่ยวนำร่วมหรือ Mutual Inductance Model เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนโดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) กำหนดตัวแปร r_1, r_2, C_r, L_r ลงในแบบจำลองเหนี่ยวนำร่วม
- 2) หาค่าตัวแปรอิมพีแดนซ์ด้านทุติยภูมิหรือ Secondary Impedance (Z_s)
- 3) หาค่าตัวแปรอิมพีแดนซ์ที่ถูกสะท้อนจากด้านทุติยภูมิไปบนด้านปฐมภูมิหรือ Reflective Impedance (Z_r)
- 4) หาค่าตัวแปรอิมพีแดนซ์รวมที่ถูกมองจากด้านปฐมภูมิไปจนถึงด้านทุติยภูมิหรือ Total Impedance (Z_t)

5) ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนกำลัง โดยพิจารณาเป็นการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังโหลด (P_o/P_i) จากค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมดที่หามาและด้วยวิธีการพิจารณาการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในแต่ละส่วนตั้งแต่แหล่งจ่ายไปจนถึงโหลดทางด้านทุติยภูมิหรือ R_L

ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์ของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำหรือระบบ ICPT จากขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อหาวงจรสมมูลและฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรเรโซแนนซ์ของระบบ ICPT ที่มีการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้ง 4 รูปแบบได้ดังนี้

การวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์ที่ใช้การชดเชยในรูปแบบ SS-Topology : ภาพที่ 46 แสดงวงจรสมมูลของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำที่ใช้การชดเชยการรูปแบบ SS-Topology ซึ่งแทนวงจรสวิตชิงด้วยวงจรสมมูลที่ใช้วิธีประมาณค่าแบบไซน์ และแทนวงจรเรโซแนนซ์ด้วยแบบจำลองความเหนี่ยวนำร่วม ทำให้สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ Z_{s_ss} , Z_{r_ss} , Z_{t_ss} และฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)_{Power_SS}$ ได้ดังนี้



ภาพที่ 46 วงจรเรโซแนนซ์ที่มีการชดเชยด้วยรูปแบบ SS-Topology

จากการที่ขดลวดและตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิต่อวงจรอยู่ในลักษณะอนุกรมกัน ดังนั้น จะได้อิมพีแดนซ์ Z_{s_ss} ดังสมการที่ 27

$$Z_{s_ss} = j\omega_s L_{22} + \frac{1}{j\omega_s C_2} + R_L = R_L + j\left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right) \quad (27)$$

ทำการหาอิมพีแดนซ์ Z_{r_ss} เมื่อ Z_{r_ss} เป็นอิมพีแดนซ์ที่พิจารณาด้วยการสะท้อนอิมพีแดนซ์จากด้านทุติยภูมิไปยังด้านปฐมภูมิ ซึ่งเป็นอิมพีแดนซ์ที่หาค่าได้ด้วยการใช้คุณสมบัติ

ของแบบจำลองการเหนี่ยวนำร่วม จากภาพที่ 46 แสดงคุณสมบัติของแบบจำลองการเหนี่ยวนำร่วมได้ดังนี้

$$Z_{r_SS} = \frac{V_{mp}}{I_p} \quad (28)$$

เมื่อ V_{mp} เป็นแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากความเหนี่ยวนำร่วมและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในด้านทุติยภูมิ จะมีค่าดังสมการที่ 29

$$V_{mp} = -j\omega_s M I_s \quad (29)$$

เครื่องหมาย (-) ที่หน้าตัวแปร V_{mp} เนื่องจากตัวแปร V_{mp} เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีทิศตรงข้ามกับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า จึงถูกพิจารณาเป็น (-)

โดยที่ I_s คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดทุติยภูมิ จะมีค่าตามสมการที่ 30

$$I_s = \frac{V_{ms}}{Z_s} \quad (30)$$

เมื่อ V_{ms} เป็นแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากความเหนี่ยวนำร่วมและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในด้านปฐมภูมิ จะมีค่าดังสมการที่ 31

$$V_{ms} = j\omega_s M I_{mp} \quad (31)$$

โดยที่ I_{mp} เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ ซึ่งการต่อตัวเก็บประจุในลักษณะอนุกรมกับขดลวดปฐมภูมิจะทำให้ได้กระแสไฟฟ้า $I_{mp} = I_{p1}$ (ในขณะที่ยังการต่อตัวเก็บประจุในลักษณะขนานกับขดลวดปฐมภูมิ จะทำให้กระแสไฟฟ้า $I_{mp} \neq I_{p1}$ ค่ากระแสไฟฟ้า I_{mp} สำหรับการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน จะใช้วิธีการแบ่งกระแสไฟฟ้าหรือ Current Divider)

แทนค่า I_s และ V_{ms} ลงในสมการที่ 29 จะทำให้ได้ V_{mp} ตามสมการที่ 32

$$V_{mp} = -j\omega_s M \left(\frac{j\omega_s M I_{mp}}{Z_{s_SS}} \right) = \frac{\omega_s^2 M^2 I_{mp}}{Z_{s_SS}} \quad (32)$$

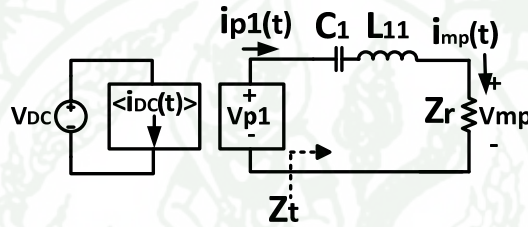
แทนค่า V_{mp} ลงในสมการที่ 28 สุดท้ายจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ Z_r ดังสมการที่ 33

$$Z_{r_SS} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} = \frac{\omega_s^2 M^2}{Z_{s_SS}} \quad (33)$$

แทน Z_{s_SS} ดังสมการที่ 27 ลงในสมการที่ 33 จัดรูปของ Z_{r_SS} ได้ดังสมการที่ 34

$$Z_{r_SS} = \frac{\omega_s^2 M^2 R_L}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right)^2} - j \frac{\omega_s^2 M^2 \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right)}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right)^2} \quad (34)$$

ทำการหาอิมพีแดนซ์ Z_{t_SS} ซึ่ง Z_{t_SS} เป็นอิมพีแดนซ์รวมที่ถูกลมองเข้าจากด้านปฐมภูมิไปถึงด้านทุติยภูมิ ซึ่งในการหาค่าอิมพีแดนซ์ Z_{t_SS} จะทำการแปลงวงจรในภาพที่ 46 ให้เป็นวงจรสมมูลสำหรับการหาอิมพีแดนซ์ Z_{t_SS} ได้ดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 วงจรสมมูลใช้ในการหาอิมพีแดนซ์ Z_{t_SS} สำหรับ SS-Topology

จากภาพที่ 47 ตัวแปร C_1 , L_{11} และ Z_{r_SS} อยู่ในลักษณะของการต่อวงจรแบบอนุกรม ดังนั้นอิมพีแดนซ์ Z_{t_SS} ของรูปแบบ SS Topology สามารถหาได้ดังสมการที่ 35

$$Z_{t_SS} = j\omega_s L_{11} + \frac{1}{j\omega_s C_1} + Z_{r_SS} \quad (35)$$

แทน Z_{r_SS} จากสมการที่ 34 จะได้ค่า Z_{t_SS} แสดงในตารางที่ 13

เมื่อได้อิมพีแดนซ์ Z_{s_SS} , Z_{r_SS} และ Z_{t_SS} แล้วทำการหาฟังก์ชันการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปจนถึงโหลดที่ด้านทุติยภูมิ (R_L) หรือ $H(s)_{Power_SS}$ สำหรับรูปแบบ SS-Topology จากงานวิจัย “Analysis and Numerical Modeling of Inductively Coupled Antenna Systems” โดย “Peter Scholz” แสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)_{Power_SS}$ รวมของระบบสามารถทำได้ด้วยการพิจารณาการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงแล้วนำมารวมกันแสดงดังสมการที่ 36

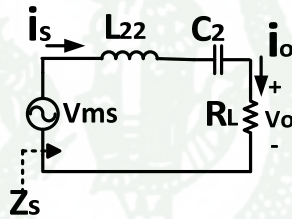
$$H(s)_{Power_SS} = P_o/P_i = \eta_{SS} = \eta_{1_SS} \times \eta_{2_SS} \quad (36)$$

เมื่อ P_o คือกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ R_L
 P_i คือกำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายให้กับระบบ ICPT
 η_{SS} คืออัตราการถ่ายโอนกำลังไฟฟารวมจากแหล่งจ่ายไปยัง R_L
 η_{1_SS} คืออัตราการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังวงจร
 η_{2_SS} คืออัตราการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากวงจร N_T ไปยัง R_L

ทำการหา η_{1_SS} ได้จากวงจรสมมูลดังภาพที่ 47 มีค่าดังสมการที่ 37

$$\eta_{1_SS} = P_r/P_i = \frac{i_{p1}^2 Z_r}{i_{p1}^2 Z_t} = \frac{Z_r}{Z_t} \quad (37)$$

ทำการหา η_{2_SS} ได้จากวงจรสมมูลดังภาพที่ 48 มีค่าดังสมการที่ 38



ภาพที่ 48 วงจรสมมูลใช้ในการหา η_{2_SS} สำหรับ SS-Topology

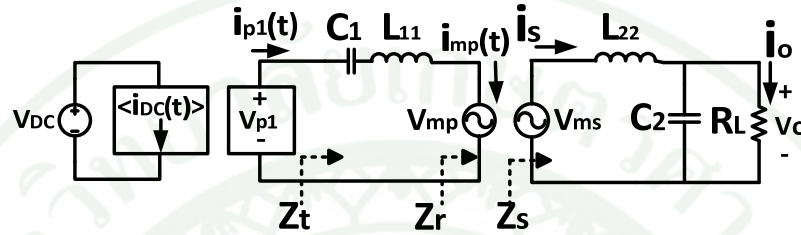
$$\eta_{2_SS} = P_o/P_r = \frac{i_s^2 R_L}{i_s^2 Z_s} = \frac{R}{Z_s} \quad (38)$$

เมื่อนำสมการของ η_{1_SS} และ η_{2_SS} ที่ได้ตามข้างต้นแทนลงในสมการที่ 36 จะทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนไฟฟ้า $H(s)_{Power_SS}$ หรือ η_{SS} ดังสมการที่ 39

$$H(s)_{Power_SS} = P_o/P_i = \eta_{SS} = \eta_{1_SS} \times \eta_{2_SS} = \frac{Z_{r_SS}}{Z_{t_SS}} \times \frac{R_L}{Z_{s_SS}} \quad (39)$$

ทำการแทนค่าตัวแปร R_L, Z_{s_SS}, Z_{r_SS} และ Z_{t_SS} ลงในสมการที่ 39 แล้วจัดรูปสมการใหม่ได้สมการของฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)_{Power_SS}$ แสดงในตารางที่ 14

การวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์ที่ใช้การชดเชยในรูปแบบ SP-Topology : ภาพที่ 49 แสดงวงจรสมมูลของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ความเหนี่ยวนำที่ใช้การชดเชยรูปแบบ SP-Topology ซึ่งแทนวงจรสวิตช์ด้วยวงจรสมมูลที่ใช้วิธีการประมาณค่าแบบไซน์ และแทนวงจรเรโซแนนซ์ด้วยแบบจำลองความเหนี่ยวนำร่วม ทำให้สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ Z_{s_SP} , Z_{r_SP} , Z_{t_SP} และฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)_{Power_SP}$ ได้ดังนี้



ภาพที่ 49 วงจรเรโซแนนซ์ที่มีการชดเชยด้วยรูปแบบ SP-Topology

จากการที่ขดลวดและตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิต่อวงจรอยู่ในลักษณะขนานกัน ดังนั้นจะได้ Z_{s_SP} ดังสมการที่ 40

$$Z_{s_SP} = j\omega_s L_{22} + \left(\frac{1}{j\omega_s C_2} // R_L \right) \quad (40)$$

ทำการจัดรูปสมการของ Z_{s_SP} ใหม่ได้ดังสมการที่ 41

$$Z_{s_SP} = \frac{R_L}{1 + (\omega_s C_2 R_L)^2} + j \frac{\omega_s L_{22} - \omega_s R_L^2 C_2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)}{1 + (\omega_s R_L C_2)^2} \quad (41)$$

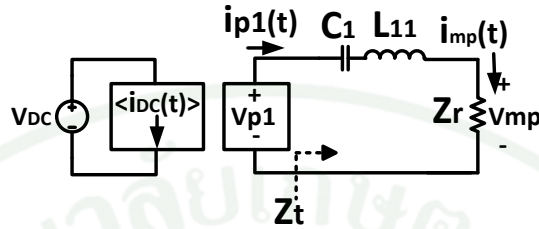
ทำการหา Z_{r_SP} เช่นเดียวกับรูปแบบของ SS-Topology แสดงดังสมการที่ 42

$$Z_{r_SP} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} = \frac{\omega_s^2 M^2}{Z_{s_SP}} \quad (42)$$

แทน Z_{s_SP} ดังสมการที่ 41 ลงในสมการที่ 42 จะได้ Z_{r_SP} ดังสมการที่ 43

$$Z_{r_SP} = \frac{\omega_s^2 M^2 (R_L (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) + \omega_s^4 M^2 R_L L_{22} C_2 + j [\omega_s^3 M^2 R_L C_2 (R_L (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) - \omega_s^3 M^2 L_{22}]}{R_L^2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)^2 + \omega_s^2 L_{22}^2} \quad (43)$$

ในการหา Z_{t_SP} จะทำการแปลงวงจรแสดงในภาพที่ 49 ให้เป็นวงจรสมมูลสำหรับ Z_{t_SP} ได้ดังภาพที่ 50



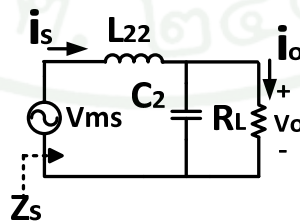
ภาพที่ 50 วงจรสมมูลใช้ในการหาค่า Z_{t_SP} สำหรับ SP-Topology

จากภาพที่ 50 ตัวแปร C_1 , L_{11} และ Z_{r_SP} อยู่ในลักษณะของการต่อวงจรแบบอนุกรม ดังนั้น Z_{t_SP} ของรูปแบบ SP Topology สามารถหาได้ดังสมการที่ 44

$$Z_{t_SP} = j\omega_s L_{11} + \frac{1}{j\omega_s C_1} + Z_{r_SP} \quad (44)$$

แทน Z_{r_SP} จากสมการที่ 43 จะได้สมการ Z_{t_SP} ดังแสดงในตารางที่ 13

เมื่อได้ Z_{s_SP} , Z_{r_SP} และ Z_{t_SP} ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)_{Power_SP}$ ของวงจรเรโซแนนซ์ ด้วยวิธีการเช่นเดียวกับรูปแบบของ SS-Topology แต่เนื่องจากการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานกับขดลวดที่ด้านทุติยภูมิ จะได้สมการของ η_{2_SP} ที่ต่างจาก SS-Topology ซึ่งจะหา η_{2_SP} ได้จากวงจรสมมูลตามภาพที่ 51 และสมการที่ 45



ภาพที่ 51 วงจรสมมูลใช้ในการหา η_{2_SP} สำหรับ SP-Topology

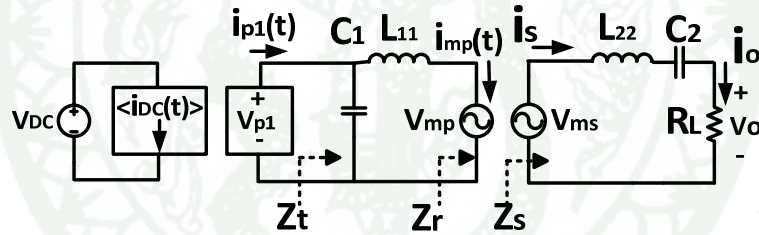
$$\eta_{2_SP} = P_o / P_r = \frac{V_s^2}{R_L} \times \frac{Z_{s_SP}}{V_s^2} = \frac{Z_{s_SP}}{R_L} \quad (45)$$

ในขณะที่ η_{1_SP} ของ SP-Topology มีรูปแบบสมการเช่นเดียวกับ SS-Topology เนื่องจากการต่อตัวเก็บประจุในลักษณะอนุกรมเช่นเดียวกัน ดังนั้นจากสมการของ η_{1_SP} และ η_{2_SP} จะทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)_{Power_SP}$ หรือ η_{SP} ดังสมการที่ 46

$$H(s)_{Power_SP} = P_o/P_i = \eta_{SP} = \eta_{1_SP} \times \eta_{2_SP} = \frac{Z_{r_SP}}{Z_{t_SP}} \times \frac{Z_{s_SP}}{R_L} \quad (46)$$

ทำการแทนตัวแปร R_L, Z_{s_SP}, Z_{r_SP} และ Z_{t_SP} ลงในสมการที่ 46 แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการของฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)_{Power_SP}$ ดังแสดงได้ในตารางที่ 15

การวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์ที่ใช้การชดเชยในรูปแบบ PS-Topology : ภาพที่ 52 แสดงวงจรสมมูลของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำที่ใช้การชดเชยรูปแบบ PS-Topology ซึ่งแทนวงจรสวิตชิ่งด้วยวงจรสมมูลที่ใช้วิธีการประมาณค่าแบบไซน์ และแทนวงจรเรโซแนนซ์ด้วยแบบจำลองความเหนี่ยวนำร่วมทำให้สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ $Z_{s_PS}, Z_{r_PS}, Z_{t_PS}$ และฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)_{Power_PS}$ ได้ดังนี้



ภาพที่ 52 วงจรเรโซแนนซ์ที่มีการชดเชยด้วยรูปแบบ PS-Topology

จากการที่ขดลวดและตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิต่อวงจรอยู่ในลักษณะอนุกรมเช่นเดียวกับวงจรด้านทุติยภูมิในรูปแบบ SS-Topology ดังนั้นจะได้ Z_{s_PS} ดังสมการที่ 47

$$Z_{s_PS} = j\omega_s L_{22} + \frac{1}{j\omega_s C_2} + R_L = R_L + j\left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right) \quad (47)$$

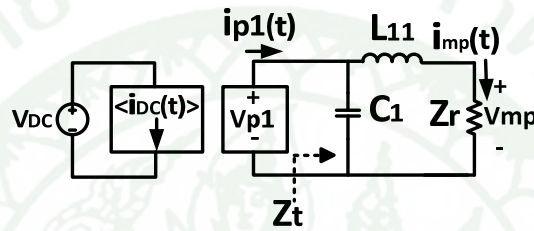
ทำการหา Z_{r_PS} เช่นเดียวกับรูปแบบของ SS-Topology แสดงดังสมการที่ 48

$$Z_{r_PS} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} = \frac{\omega_s^2 M^2}{Z_{s_PS}} \quad (48)$$

แทน Z_{s_PS} จากสมการที่ 47 ลงในสมการที่ 48 จะได้ Z_{r_PS} ดังสมการที่ 49

$$Z_{r_PS} = \frac{\omega_s^2 M^2 R_L}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right)^2} - j \frac{\omega_s^2 M^2 \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right)}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right)^2} \quad (49)$$

ในการหา Z_{t_PS} จะทำการแปลงวงจรในภาพที่ 52 ให้เป็นวงจรสมมูลสำหรับ Z_{t_PS} ได้ดังภาพที่ 53



ภาพที่ 53 วงจรสมมูลใช้ในการหาค่า Z_{t_PS} สำหรับ PS-Topology

จากภาพที่ 53 ตัวแปร C_1 , L_{11} และ Z_{r_PS} อยู่ในลักษณะของการต่อวงจรแบบขนาน ดังนั้น Z_{t_PS} ของรูปแบบ PS Topology สามารถหาได้ดังสมการที่ 50

$$Z_{t_PS} = \frac{1}{j\omega_s C_1} // (j\omega_s L_{11} + Z_{r_PS}) \quad (50)$$

แทน Z_{r_PS} จะได้สมการของ Z_{t_PS} ดังแสดงในตารางที่ 13

เมื่อได้ Z_{s_PS} , Z_{r_PS} และ Z_{t_PS} ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)_{Power_PS}$ ด้วยวิธีการแบบเดียวกับรูปแบบของ SS-Topology ซึ่งรูปแบบของ PS-Topology จะประกอบด้วยการต่ออนุกรมที่ด้านทุติยภูมิ ดังนั้นจะได้ η_{2_PS} ที่มีรูปแบบเช่นเดียวกับ SS-Topology แต่สำหรับวงจรด้านปฐมภูมิเป็นการต่อตัวเก็บประจุในลักษณะขนานกับขดลวดปฐมภูมิ ดังนั้นสามารถหา η_{1_PS} ได้ตามสมการที่ 51

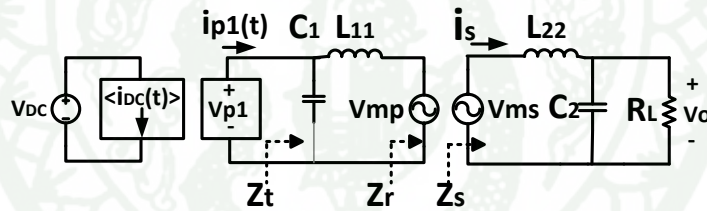
$$\eta_{1_PS} = \frac{V_{mp}^2}{Z_{r_PS}} \times \frac{Z_{t_PS}}{V_p^2} = \frac{Z_{r_PS} Z_{t_PS}}{(j\omega_s L_{11} + Z_{r_PS})^2} \quad (51)$$

จากสมการของ η_{2_PS} และ η_{1_PS} จะทำให้ได้ฟังก์ชันการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของ PS-Topology ตามสมการที่ 52

$$H(s)_{Power_PS} = P_o/P_i = \eta_{ps} = \eta_{1_PS} \times \eta_{2_PS} = \frac{Z_{r_PS}Z_{t_PS}}{(j\omega_s L_{11} + Z_{r_PS})^2} \times \frac{R_L}{Z_{s_PS}} \quad (52)$$

ทำการแทนตัวแปร R_L, Z_{s_PS}, Z_{r_PS} และ Z_{t_PS} ลงในสมการที่ 52 แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการของฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)_{Power_PS}$ ดังแสดงในตารางที่ 16

การวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์ที่ใช้การชดเชยในรูปแบบ PP-Topology : ภาพที่ 54 แสดงวงจรสมมูลของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ความเหนี่ยวนำที่ใช้การชดเชยรูปแบบ PP-Topology ซึ่งแทนวงจรสวิตช์ด้วยวงจรสมมูลที่ใช้วิธีการประมาณค่าแบบไซน์ และแทนวงจรเรโซแนนซ์ด้วยแบบจำลองความเหนี่ยวนำร่วมทำให้สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ $Z_{s_PP}, Z_{r_PP}, Z_{t_PP}$ และฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)_{Power_PP}$ ได้ดังนี้



ภาพที่ 54 วงจรเรโซแนนซ์ที่มีการชดเชยด้วยรูปแบบ PP-Topology

ในการหาค่า Z_{s_PP} ของรูปแบบ PP-Topology จะพิจารณาได้จากการที่ขดลวดและตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิต่อวงจรอยู่ในลักษณะขนานเช่นเดียวกับวงจรด้านทุติยภูมิในรูปแบบ SP-Topology ดังนั้นจะได้ Z_{s_PP} ดังสมการที่ 53

$$Z_{s_PP} = j\omega_s L_{22} + \left(\frac{1}{j\omega_s C_2} // R_L \right) \quad (53)$$

จัดรูปของ Z_{s_PP} ใหม่ได้ดังสมการที่ 54

$$Z_{s_PP} = \frac{R_L}{1 + (\omega_s C_2 R_L)^2} + j \frac{\omega_s L_{22} - \omega_s R_L^2 C_2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)}{1 + (\omega_s R_L C_2)^2} \quad (54)$$

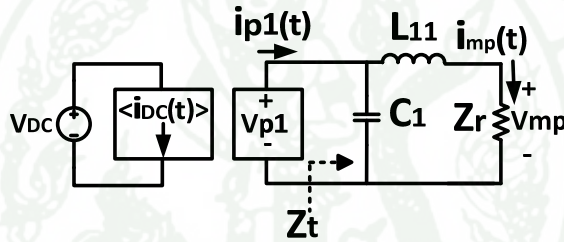
ทำการหา Z_{r_PP} เช่นเดียวกับรูปแบบของ SS-Topology แสดงดังสมการที่ 55

$$Z_{r_PP} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} = \frac{\omega_s^2 M^2}{Z_{s_PP}} \quad (55)$$

แทน Z_{s_PP} จากสมการที่ 54 ลงในสมการที่ 55 จะได้ Z_{r_PP} ดังสมการที่ 56

$$Z_{r_PP} = \frac{\omega_s^2 M^2 (R_L(1-\omega_s^2 L_{22} C_2)) + \omega_s^4 M^2 R_L L_{22} C_2 + j[\omega_s^3 M^2 R_L C_2 (R_L(1-\omega_s^2 L_{22} C_2)) - \omega_s^3 M^2 L_{22}]}{R_L^2(1-\omega_s^2 L_{22} C_2)^2 + \omega_s^2 L_{22}^2} \quad (56)$$

ในการหาค่า Z_{t_PP} จะทำการแปลงวงจรในภาพที่ 54 ให้เป็นวงจรสมมูลสำหรับ Z_{t_PP} ได้ดังภาพที่ 55



ภาพที่ 55 วงจรสมมูลใช้ในการหาค่า Z_{t_PP} สำหรับ PP-Topology

จากภาพที่ 55 ตัวแปร C_1 , L_{11} และ Z_r อยู่ในลักษณะของการต่อวงจรแบบขนาน ดังนั้น Z_{t_PP} ของรูปแบบ PP Topology สามารถหาได้ดังสมการที่ 57

$$Z_{t_PP} = \frac{1}{j\omega_s C_1} // (j\omega_s L_{11} + Z_{r_PP}) \quad (57)$$

แทน Z_{r_PP} จากสมการที่ 56 จะได้สมการของ Z_{t_PP} ดังแสดงในตารางที่ 13

เมื่อได้ Z_{s_PP} , Z_{r_PP} และ Z_{t_PP} ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)_{Power_PP}$ ด้วยวิธีการเช่นเดียวกับรูปแบบของ Topology อื่นๆ โดยที่ η_{2_pp} จะมีรูปแบบเช่นเดียวกับ SP-Topology และ η_{1_pp} จะมีรูปแบบเช่นเดียวกับ PS-Topology ซึ่งจะทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)_{Power_PP}$ ดังสมการที่ 58

$$H(s)_{Power_PP} = P_o/P_i = \eta_{PP} = \eta_{1_pp} \times \eta_{2_pp} = \frac{Z_{r_PP}Z_{t_PP}}{(j\omega_s L_{11} + Z_{r_PP})^2} \times \frac{Z_{s_PP}}{R_L} \quad (58)$$

ทำการแทนตัวแปร R_L, Z_{s_PP}, Z_{r_PP} และ Z_{t_PP} ลงในสมการที่ 58 แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการของฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)_{Power_PP}$ ดังแสดงในตารางที่ 17

จากขั้นตอนการวิเคราะห์การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้ง 4 รูปแบบ สามารถสรุปคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ Z_s, Z_r, Z_t และฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $H(s)_{Power}$ ของการชดเชยในรูปแบบต่างๆ ที่ความถี่ใดๆ ได้ดังตารางที่ 11 ถึงตารางที่ 17

ตารางที่ 11 คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ Z_s ของการชดเชยในรูปแบบต่างๆ ที่ความถี่ใดๆ

รูปแบบการชดเชย ด้วยการต่อตัวเก็บ ประจุ	คุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ด้านทุติยภูมิ (Z_s)
SS-Topology	$R_L + j\left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right)$
SP-Topology	$\frac{R_L}{1 + (\omega_s C_2 R_L)^2} + j \frac{\omega_s L_{22} - \omega_s R_L^2 C_2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)}{1 + (\omega_s R_L C_2)^2}$
PS-Topology	$R_L + j\left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right)$
PP-Topology	$\frac{R_L}{1 + (\omega_s C_2 R_L)^2} + j \frac{\omega_s L_{22} - \omega_s R_L^2 C_2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)}{1 + (\omega_s R_L C_2)^2}$

ตารางที่ 12 คุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ Z_r ของการชดเชยในรูปแบบต่างๆ ที่ความถี่ใดๆ

รูปแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ	คุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ที่สะท้อนจากด้านทุติยภูมิ (Z_r)
SS-Topology	$\frac{\omega_s^2 M^2 R_L - j\omega_s^2 M^2 (\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2})}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right)^2}$
SP-Topology	$\frac{\omega_s^2 M^2 [R_L((1 - \omega_s^2 L_{22} C_2) + \omega_s^2 L_{22} C_2) + j\omega_s (R_L C_2 (R_L (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) - L_{22})]}{R_L^2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)^2 + \omega_s^2 L_{22}^2}$
PS-Topology	$\frac{\omega_s^2 M^2 R_L - j\omega_s^2 M^2 (\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2})}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right)^2}$
PP-Topology	$\frac{\omega_s^2 M^2 [R_L((1 - \omega_s^2 L_{22} C_2) + \omega_s^2 L_{22} C_2) + j\omega_s (R_L C_2 (R_L (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) - L_{22})]}{R_L^2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)^2 + \omega_s^2 L_{22}^2}$

ตารางที่ 13 คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ Z_t ของการชดเชยในรูปแบบต่างๆ ที่ความถี่ใดๆ

รูปแบบการชดเชยด้วย การต่อตัวเก็บประจุ	คุณสมบัติของอิมพีแดนซ์รวมที่มองจากด้านปฐมภูมิ (Z_t)
SS-Topology	$\frac{\omega_s^2 M^2 R_L}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right)^2} + j \left[\left(\omega_s L_{11} - \frac{1}{\omega_s C_1}\right) - \frac{\omega_s^2 M^2 \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right)}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right)^2} \right]$
SP-Topology	$\frac{\omega_s^2 M^2 (R_L (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) + \omega_s^4 M^2 R_L L_{22} C_2}{R_L^2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)^2 + \omega_s^2 L_{22}^2} + j \left[\frac{\omega_s^3 M^2 R_L C_2 (R_L (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) - \omega_s^3 M^2 L_{22}}{R_L^2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)^2 + \omega_s^2 L_{22}^2} + \left(\omega_s L_{11} - \frac{1}{\omega_s C_1}\right) \right]$
PS-Topology	$\frac{1}{j\omega_s C_1} + \left[\frac{\left(\frac{\omega_s^2 M^2 \left(R_L - j\left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right) \right)}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right)^2} \right) j\omega_s L_{11}}{\left(\frac{\omega_s^2 M^2 \left(R_L - j\left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right) \right)}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2}\right)^2} \right) + j\omega_s L_{11}} \right]$
PP-Topology	$\frac{1}{j\omega_s C_1} + \left[\frac{\left(\frac{\omega_s^2 M^2 [R_L ((1 - \omega_s^2 L_{22} C_2) + \omega_s^2 L_{22} C_2) + j\omega_s (R_L C_2 (R_L (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) - L_{22})]}{R_L^2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)^2 + \omega_s^2 L_{22}^2} \right) j\omega_s L_{11}}{\left(\frac{\omega_s^2 M^2 [R_L ((1 - \omega_s^2 L_{22} C_2) + \omega_s^2 L_{22} C_2) + j\omega_s (R_L C_2 (R_L (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) - L_{22})]}{R_L^2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)^2 + \omega_s^2 L_{22}^2} \right) + j\omega_s L_{11}} \right]$

ตารางที่ 14 คุณสมบัติ $\frac{P_o}{P_i}$ ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ SS-Topology ที่ความถี่ใดๆ

การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ	คุณสมบัติของการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปสู่โหลด ($\frac{P_o}{P_i}$) ที่ความถี่ใดๆ
รูปแบบ SS-Topology	$\frac{\left(\frac{\omega_s^2 M^2 R_L}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right)^2} - j \frac{\omega_s^2 M^2 \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right)}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right)^2} \right) R_L}{\left\{ \frac{\omega_s^2 M^2 R_L}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right)^2} + j \left[\left(\omega_s L_{11} - \frac{1}{\omega_s C_1} \right) - \frac{\omega_s^2 M^2 \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right)}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right)^2} \right] \right\} \left(R_L + j \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right) \right)}$

ตารางที่ 15 คุณสมบัติ $\frac{P_o}{P_i}$ ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ SP-Topology ที่ความถี่ใดๆ

การชดเชยด้วย การต่อตัวเก็บ ประจุ	คุณสมบัติของการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปสู่โหลด ($\frac{P_o}{P_i}$) ที่ความถี่ใดๆ
รูปแบบ SP- Topology	$\frac{\left(\frac{\omega_s^2 M^2 [R_L((1 - \omega_s^2 L_{22} C_2) + \omega_s^2 L_{22} C_2) + j\omega_s (R_L C_2 (R_L(1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) - L_{22})]}{R_L^2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)^2 + \omega_s^2 L_{22}^2} \right) \left(j\omega_s L_{22} + \left(\frac{R_L}{1 + j\omega_s C_2 R_L} \right) \right)}{\left\{ \frac{\omega_s^2 M^2 (R_L(1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) + \omega_s^4 M^2 R_L L_{22} C_2}{R_L^2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)^2 + \omega_s^2 L_{22}^2} + j \frac{\omega_s^3 M^2 R_L C_2 (R_L(1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) - \omega_s^3 M^2 L_{22}}{R_L^2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)^2 + \omega_s^2 L_{22}^2} + \left(\omega_s L_{11} - \frac{1}{\omega_s C_1} \right) \right\} R_L}$

ตารางที่ 16 คุณสมบัติ $\frac{P_o}{P_i}$ ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ PS-Topology ที่ความถี่ใดๆ

การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ	คุณสมบัติของการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปสู่โหลด ($\frac{P_o}{P_i}$) ที่ความถี่ใดๆ
รูปแบบ PS-Topology	$\frac{\left(\frac{\omega_s^2 M^2 \left(R_L - j \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right) \right)}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right)^2} \right) \left\{ \frac{1}{j \omega_s C_1} + \frac{\left(\frac{\omega_s^2 M^2 \left(R_L - j \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right) \right)}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right)^2} \right) j \omega_s L_{11}}{\left(\frac{\omega_s^2 M^2 \left(R_L - j \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right) \right)}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right)^2} \right) + j \omega_s L_{11}} \right\} R_L}{\left[j \omega_s L_{11} + \left(\frac{\omega_s^2 M^2 \left(R_L - j \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right) \right)}{R_L^2 + \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right)^2} \right)^2 \right] \left(R_L + j \left(\omega_s L_{22} - \frac{1}{\omega_s C_2} \right) \right)}$

ตารางที่ 17 คุณสมบัติ $\frac{P_o}{P_i}$ ของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ PP-Topology ที่ความถี่ใดๆ

การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ	คุณสมบัติการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปสู่โหลด ($\frac{P_o}{P_i}$) ที่ความถี่ใดๆ
รูปแบบ PP-Topology	$\left(\frac{\omega_s^2 M^2 (R_L (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) + \omega_s^4 M^2 R_L L_{22} C_2 + j \omega_s^3 M^2 (R_L C_2 (R_L (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) - L_{22})}{R_L^2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)^2 + \omega_s^2 L_{22}^2} \right) \left(j \omega_s L_{22} + \left(\frac{R_L}{1 + j \omega_s C_2 R_L} \right) \right)$ $\left(\frac{1}{j \omega_s C_1} + \left[\frac{\left(\frac{\omega_s^2 M^2 [R_L ((1 - \omega_s^2 L_{22} C_2) + \omega_s^2 L_{22} C_2) + j \omega_s (R_L C_2 (R_L (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) - L_{22})]}{R_L^2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)^2 + \omega_s^2 L_{22}^2} \right) j \omega_s L_{11}}{\left(\frac{\omega_s^2 M^2 [R_L ((1 - \omega_s^2 L_{22} C_2) + \omega_s^2 L_{22} C_2) + j \omega_s (R_L C_2 (R_L (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) - L_{22})]}{R_L^2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)^2 + \omega_s^2 L_{22}^2} \right) + j \omega_s L_{11}} \right] \right) (R_L)^{-1}$ $\left(\left[j \omega_s L_{11} + \left(\frac{\omega_s^2 M^2 (R_L (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) + \omega_s^4 M^2 R_L L_{22} C_2 + j \omega_s^3 M^2 (R_L C_2 (R_L (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)) - L_{22})}{R_L^2 (1 - \omega_s^2 L_{22} C_2)^2 + \omega_s^2 L_{22}^2} \right) \right]^2 \right)^{-1}$

เมื่อการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเมื่อความถี่สวิตช์ของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์ทางด้านทุติยภูมิ มีค่าดังสมการที่ 73

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{22}C_2}} \quad (73)$$

ที่สภาวะความถี่ $f_s = f_r$ จะสามารถสรุปคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ Z_s และ Z_r ของการชดเชยในรูปแบบต่างๆ ได้ดังตารางที่ 18 ถึงตารางที่ 19

ตารางที่ 18 คุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ Z_s ของการชดเชยในรูปแบบต่างๆ ที่ความถี่เรโซแนนซ์

รูปแบบการชดเชยด้วยการ ต่อตัวเก็บประจุ	คุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ด้านทุติยภูมิ (Z_s)
SS-Topology	R_L
SP-Topology	$\frac{R_L + j\omega_r L_{22}}{1 + (\omega_s C_2 R_L)^2}$
PS-Topology	R_L
PP-Topology	$\frac{R_L + j\omega_r L_{22}}{1 + (\omega_s C_2 R_L)^2}$

ตารางที่ 19 คุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ Z_r ของการชดเชยในรูปแบบต่างๆที่ความถี่เรโซแนนซ์

รูปแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ	คุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ที่สะท้อนจากด้านทุติยภูมิ (Z_r)
SS-Topology	$\frac{\omega_s^2 M^2}{R_L}$
SP-Topology	$\frac{M^2 R_L}{L_{22}^2} - j \frac{\omega_s M^2}{L_{22}}$
PS-Topology	$\frac{\omega_s^2 M^2}{R_L}$
PP-Topology	$\frac{M^2 R_L}{L_{22}^2} - j \frac{\omega_s M^2}{L_{22}}$

เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้สูงสุด ดังนั้นที่สภาวะความถี่ $f_s = f_r$ ค่าอิมพีแดนซ์ Z_t ของระบบ จะต้องแสดงคุณสมบัติเฉพาะส่วนที่เป็นจำนวนจริงเท่านั้น โดยส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ Z_t จะต้องมีค่าเป็น 0 หรือ $Im\{Z_t\} = 0$ หรือมีคุณสมบัติเป็นความต้านทานอย่างเดียวหรือ Purely Resistance การที่จะทำให้อิมพีแดนซ์ Z_t มีคุณสมบัติดังกล่าว จะสามารถทำได้โดยเลือกค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการชดเชยที่ด้านปฐมภูมิหรือ Primary Capacitor (C_1) ที่จะทำให้ $Im\{Z_t\} = 0$ ซึ่งค่า C_1 ของแต่ละวงจรชดเชยในรูปแบบต่างๆ จะแตกต่างกันออกไปแสดงได้ดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ค่าตัวเก็บประจุ C_1 ที่ทำให้ $Im\{Z_t\} = 0$ ในวงจรชดเชยในรูปแบบต่างๆ

รูปแบบการชดเชยการสูญเสียด้วยตัวเก็บประจุ	ค่า C_1 ที่จะทำให้ $Im\{Z_t\} = 0$
SS-Topology	$\frac{C_2 L_{22}}{L_{11}}$
SP-Topology	$\frac{L_{22}^2 C_2}{L_{11} L_{22} - M^2}$
PS-Topology	$\frac{C_2 L_{22}}{\frac{M^4}{L_{11} L_{22} C_2 R_L} + L_{11}}$
PP-Topology	$\frac{(L_{11} L_{22} - M^2) C_2 L_{22}^2}{\frac{M^4 C_2 R_L}{L_{22}} + (L_{11} L_{22} - M^2)^2}$

จากตารางที่ 20 จะพบว่าในวงจรชดเชยในลักษณะการต่ออนุกรมที่ด้านปฐมภูมิ (SS และ SP) จะได้ค่าตัวเก็บประจุ C_1 ที่ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของโหลด แต่ในวงจรชดเชยที่ต่อขนานที่ด้านปฐมภูมิ (PS และ PP) ค่าตัวเก็บประจุ C_1 ที่เหมาะสมที่ทำให้ $Im\{Z_t\} = 0$ จะขึ้นอยู่กับขนาดของโหลดที่ต่อด้านทุติยภูมิ (R_L)

1.4 ศึกษาขั้นตอนวิธีการควบคุมแบบค้นหาด้วยอัลกอริทึมค้นหาแบบป็นเขา

วิธีการควบคุมการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำที่นำเสนอในงานวิจัยนี้อาศัยวิธีการควบคุมแบบค้นหาความถี่สวิตซ์ซึ่งทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบ ซึ่งวิธีการค้นหาค่าสูงสุด จะมีการทำงานที่คล้ายกับอัลกอริทึมค้นหาแบบป็น

เขาหรือ Hill Climbing Searching Algorithm (HCS) ดังนั้นเนื้อหาในส่วนนี้ จะกล่าวถึงรายละเอียดของอัลกอริทึมค้นหาแบบปีนเขาดังนี้

อัลกอริทึมค้นหาแบบปีนเขา (Hill Climbing Searching Algorithm :HCS) เป็นการค้นหาในแบบฮิวริสติก (Heuristic: คือการค้นหาด้วยการคาดเดาอย่างมีเหตุผลในการเปลี่ยนสถานะที่สามารถเข้าใกล้เป้าหมายมากที่สุด) ที่เปรียบเสมือนการปีนขึ้นไปสู่จุดยอดเขาดังภาพที่ 56

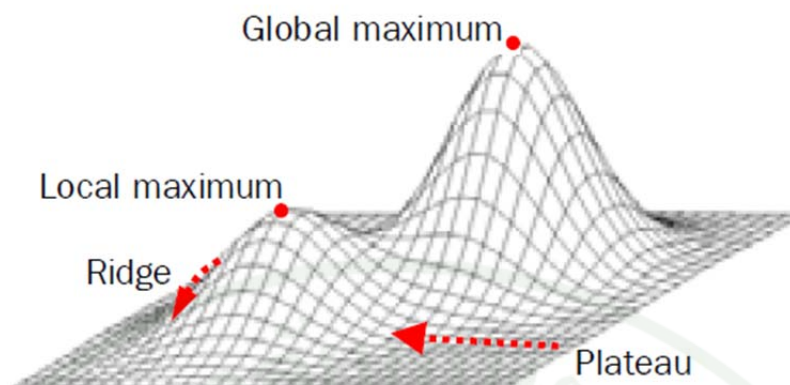


ภาพที่ 56 ลักษณะอัลกอริทึมค้นหาแบบปีนเขา

ที่มา : บุญเสริม กิจศิริกุล (2548)

อัลกอริทึมค้นหาแบบปีนเขา จะมีลักษณะการค้นหาไปทางแนวดิ่งตลอดเพื่อให้เข้าสู่จุดสูงสุดของระบบที่ทำการค้นหา โดยการค้นหาจะเลือกสถานะถัดไปที่มีค่าฮิวริสติกดีขึ้นเรื่อยๆ จนกว่าจะพบสถานะที่เป็นเป้าหมายที่ต้องการ โดยจะไม่ย้อนกลับไปเลือกสถานะที่มีค่าฮิวริสติกที่แย่ลงกว่าสถานะปัจจุบัน ดังนั้นหากระบบมีความสูงจากฐานของจุดสูงสุดยิ่งมากยิ่งทำให้การค้นหาด้วยอัลกอริทึมค้นหาแบบปีนเขายิ่งดี

ข้อจำกัดของการค้นหาด้วยอัลกอริทึมค้นหาแบบปีนเขาคือ อาจค้นหาไม่พบคำตอบหรือเป้าหมายของระบบหากกำหนดค่าฮิวริสติกที่ไม่ดี (ค่าฮิวริสติกคือ ค่าที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของการค้นหา) นอกจากนี้การใช้อัลกอริทึมค้นหาแบบปีนเขา จะไม่สามารถค้นพบคำตอบหรือเป้าหมายของระบบได้หากระบบที่ทำการค้นหามีลักษณะดังภาพที่ 57



ภาพที่ 57 ลักษณะของระบบที่พบปัญหาเมื่อใช้อัลกอริทึมค้นหาแบบป็นเขา

ที่มา : บุญเสริม กิจศิริกุล (2548)

จากภาพที่ 57 พบว่า ลักษณะของระบบที่ทำให้เกิดปัญหาในการใช้อัลกอริทึมค้นหาแบบป็นเขาในการค้นหาจะมีอยู่ 3 ลักษณะได้แก่

- 1) ลักษณะที่ 1 Local Maximum คือลักษณะของระบบที่มีจุดยอดของภูเขามากกว่า 1 จุด หากเริ่มการค้นหาที่ภูเขาที่ไม่มีค่าสูงสุดของระบบ จะทำให้การค้นหาติดอยู่ที่สถานะไม่ใช่คำตอบหรือค่าสูงสุดของระบบ
- 2) ลักษณะที่ 2 Plateau หรือ Flat คือลักษณะของระบบเป็นที่ราบ เมื่อค่าของแต่ละสถานะมีค่าเท่ากัน จะทำให้การค้นหาหยุดลง เนื่องจากไม่พบค่าที่ดีกว่าสถานะปัจจุบัน
- 3) ลักษณะที่ 3 Ridge คือลักษณะของระบบที่เป็นสันเขา หมายความว่า ระบบมีลักษณะสูงขึ้นไปเรื่อยๆ หรือเกิดการค้นหาในแนวรอบๆ ของภูเขายาวไปเรื่อยๆ ทำให้เกิดการค้นหาโดยเลือกสถานะดีกว่าไปเรื่อยๆ แต่ไม่พบคำตอบหรือค่าสูงสุดของระบบ

การทำงานของอัลกอริทึมค้นหาแบบป็นเขาอย่างง่ายสามารถได้ดังตารางที่ 21

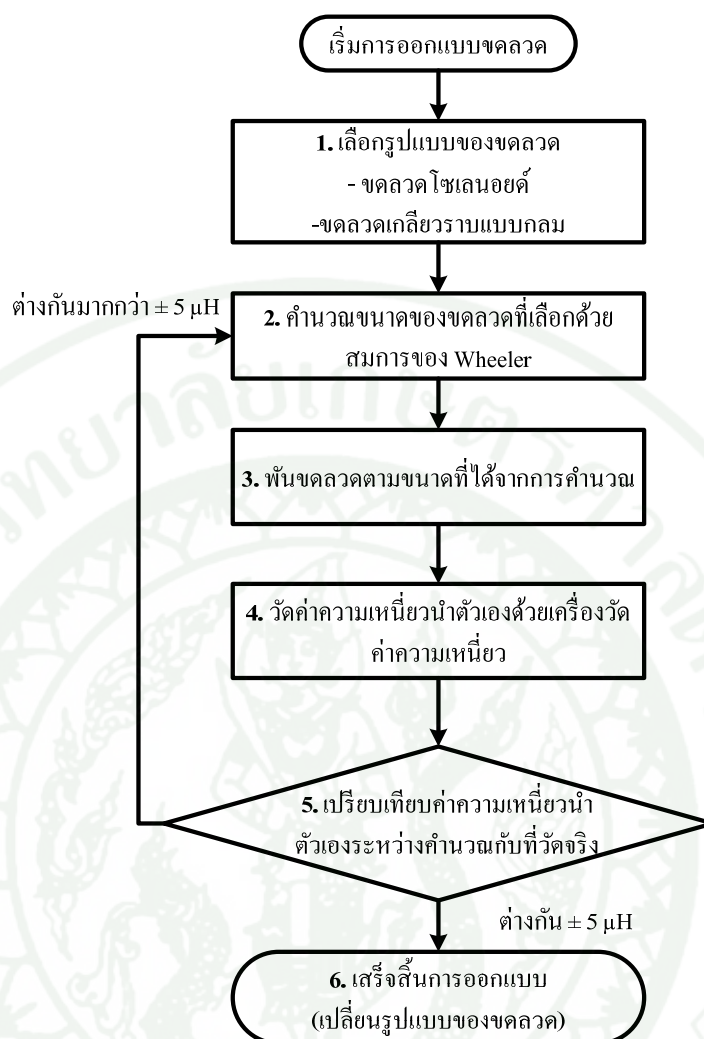
ตารางที่ 21 การทำงานของอัลกอริทึมค้นหาแบบป็นเขอย่างง่าย

ลำดับที่	การทำงานของอัลกอริทึมค้นหาแบบป็นเขอย่างง่าย
1	1. Evaluate the initial state.
2	2. IF the initial state = goal state THEN
3	return the initial state and quit
4	ELSE current state := initial state.
5	3. UNTIL a goal state is found or there are no new
6	operators left to be applied in the current state DO
7	3.1 Select an operator that has not yet been applied to
8	the current state and apply it to produce a new state.
9	3.2 Evaluate the new state.
10	IF new state = goal state THEN
11	return the initial state and quit
12	ELSE IF the new state is better than the current state THEN
13	current state := new state
14	ELSE IF the new state is not better than the current state THEN
15	continue in this loop.

2. การออกแบบระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ

2.1 การออกแบบขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

ในงานวิจัยนี้เลือกลักษณะของขดลวดทั้งหมด 3 แบบ เพื่อทดลองให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ (Inductively Coupling Power Transfer Systems: ICPT) สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงลักษณะของขดลวด โดยขั้นตอนในการออกแบบขดลวดทั้ง 3 แบบแสดงได้ดังภาพที่ 58



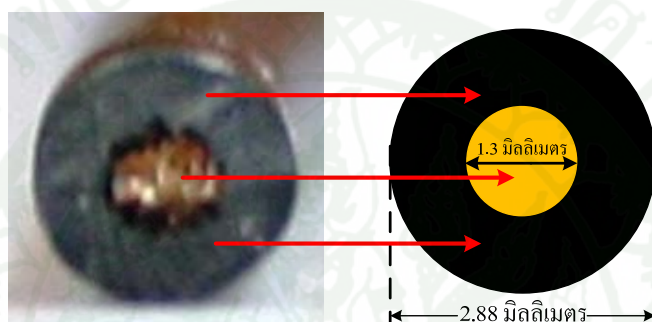
ภาพที่ 58 ขั้นตอนการออกแบบขดลวดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

แบ่งขั้นตอนการออกแบบขดลวดได้เป็น 6 ขั้นตอน ในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 ขั้นตอนการเลือกรูปแบบของขดลวด : จากจุดประสงค์ที่ต้องการเปรียบเทียบรูปแบบของขดลวดที่มีผลต่อการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำได้เลือกขดลวดใน 3 รูปแบบได้แก่

- 1) แบบที่ 1 ขดลวดโซลินอยด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร
- 2) แบบที่ 2 ขดลวดเกลียวราบแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 เซนติเมตร
- 3) แบบที่ 3 ขดลวดเกลียวราบแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร

2.1.2 ขั้นตอนคำนวณขนาดของขดลวด : ทำการคำนวณขนาดของขดลวดด้วยสมการของ Wheeler เพื่อให้ได้ขนาดของขดลวดที่มีค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (L_s) ตามสมการของ Wheeler ที่ได้แสดงมาแล้วก่อนหน้านี้ โดยกำหนดให้ใช้สายไฟหมายเลข AWG-18-UL1015 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของสายไฟเท่ากับ 2.8 มิลลิเมตร (เส้นลวดตัวนำเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3 มิลลิเมตร รวมกับความหนาของเปลือกสายไฟ) แสดงลักษณะของสายไฟที่ใช้ดังภาพที่ 59 (แสดงแนวทางในการเลือกใช้สายไฟเบอร์ AWG-18-UL1015 มาใช้พันเป็นขดลวดได้จากภาคผนวก ก)



ภาพที่ 59 ภาพตัดขวางของสายไฟหมายเลข AWG-18-UL1015

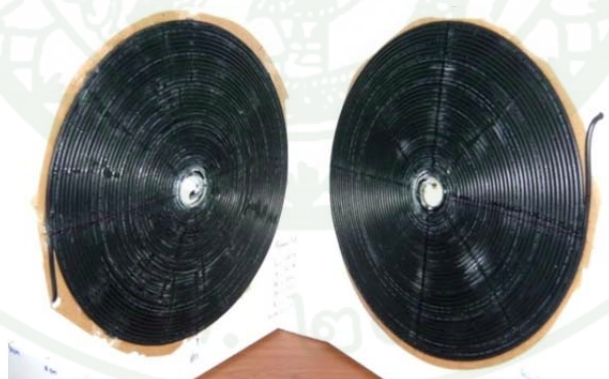
2.1.3 ขั้นตอนการพันขดลวด : ในขั้นตอนนี้จะนำสายไฟมาพันเป็นขดลวดทั้ง 3 แบบให้ได้ขนาดตามที่คำนวณด้วยสมการของ Wheeler สามารถแสดงรูปร่างของขดลวดทั้ง 3 แบบได้ดังภาพที่ 60 ถึงภาพที่ 62

ขดลวดแบบที่ 1 มีลักษณะเป็นขดลวดโซลินอยด์เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ทำการพันขดลวดได้โดยนำสายไฟมาพันรอบท่อพีวีซีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.92 เซนติเมตร (เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อพีวีซีขนาด 10 เซนติเมตร) ให้ได้จำนวนรอบเป็น 38 รอบ (ตามที่ได้จากการคำนวณ) ด้วยจำนวน 38 รอบทำให้ต้องใช้สายไฟยาว 13.04 เมตรต่อขดลวด 1 ขดลวด ทำเช่นนี้เป็นจำนวน 2 ขดลวดสำหรับขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิตามลำดับแสดงลักษณะขดลวดแบบที่ 1 ได้ดังภาพที่ 60



ภาพที่ 60 ขดลวดที่ 1 ขดลวดโซลินอยด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร

ขดลวดแบบที่ 2 มีลักษณะเป็นขดลวดเกลียวราบแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 เซนติเมตร ทำการพันขดลวดได้โดยนำสายไฟม้วนรอบลงบนแผ่นพลาสติกอะคริลิก โดยมีท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.2 เซนติเมตร (เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อพีวีซีขนาด 2 เซนติเมตร) เป็นจุดศูนย์กลางของการพันขดลวด ทำการพันสายไฟทั้งหมด 35 รอบทำให้ต้องใช้สายไฟยาว 13.85 เมตร ต่อขดลวด 1 ขดลวด ทำเช่นนี้เป็นจำนวน 2 ขดลวดสำหรับขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ตามลำดับ แสดงลักษณะขดลวดแบบที่ 2 ได้ดังภาพที่ 61



ภาพที่ 61 ขดลวดที่ 2 ขดลวดเกลียวราบแบบกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 เซนติเมตร

ขดลวดแบบที่ 3 มีลักษณะเป็นขดเกลียวราบแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร ทำการพันขดลวดได้โดยพันสายไฟม้วนรอบลงบนแผ่นพลาสติกอะคริลิก โดยมีท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร (เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อพีวีซีขนาด 2 เซนติเมตร) เป็นจุด

ศูนย์กลางของการพันขดลวด ทำการพันสายไฟทั้งหมด 17 รอบทำให้ต้องใช้สายไฟยาว 3.86 เมตร ต่อขดลวด 1 ขดลวด ทำเช่นนี้เป็นจำนวน 2 ขดลวดสำหรับขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ตามลำดับ แสดงลักษณะขดลวดแบบที่ 2 ได้ดังภาพที่ 62



ภาพที่ 62 ขดลวดที่ 3 ขดลวดเกลียวราบแบบกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร

2.1.4 ขั้นตอนการวัดค่าความเหนี่ยวนำ L_s ของขดลวดด้วยเครื่องวัดความเหนี่ยวนำ : ในขั้นตอนนี้ จะนำขดลวดที่ทำการสร้างไว้ โดยให้มีรูปแบบและขนาดตามที่คำนวณไว้ตามสมการของ Wheeler มาทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำ L_s ด้วยเครื่อง “Precision Impedance Analyzer: Agilent รุ่น 4294A” เพื่อยืนยันความถูกต้องของการนำสมการ Wheeler มาใช้ในการออกแบบขดลวดทั้ง 3 แบบ โดยกำหนดช่วงความถี่ที่ทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำไว้ที่ 10 ถึง 25 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่เลือกใช้ในการทดลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ จะได้ค่าความเหนี่ยวนำ L_s ของขดลวดแต่ละแบบแสดงดังตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (L_s) ของขดลวด 3 แบบที่ทำการวัดจริง

ชนิดขดลวด	ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (L_s) หน่วยไมโครเฮนรี่ (μH)	
	ขดลวดด้านปฐมภูมิ	ขดลวดด้านทุติยภูมิ
ขดลวดที่ 1	117.6	117.8
ขดลวดที่ 2	118.3	116.6
ขดลวดที่ 3	19.28	19.73

2.1.5 ขั้นตอนการเปรียบเทียบความถูกต้องของการออกแบบขดลวด : ทำการเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (L_s) ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการของ Wheeler กับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัด หากค่าที่ได้จากการคำนวณ มีค่าต่างจากค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวัดไม่เกิน ± 5 ไมโครเฮนรี (μH) ให้พิจารณาว่าการออกแบบขดลวดที่กำลังออกแบบในขณะนั้นเสร็จสิ้น สามารถแสดงการเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำ L_s ระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้จากเครื่องมือวัดดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 ผลเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำ L_s ระหว่างการคำนวณกับที่วัดได้จริง

ชนิดขดลวด	ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (L_s) หน่วย ไมโครเฮนรี (μH)		ความแตกต่างของ L_s หน่วย ไมโครเฮนรี (μH)
	การคำนวณ	เครื่องมือวัด L_s	
ขดลวดที่ 1 ด้านปฐมภูมิ	117.62	117.60	- 0.02
ขดลวดที่ 1 ด้านทุติยภูมิ	117.62	117.80	+ 0.18
ขดลวดที่ 2 ด้านปฐมภูมิ	113.84	118.30	+ 4.46
ขดลวดที่ 2 ด้านทุติยภูมิ	113.84	116.60	+ 2.76
ขดลวดที่ 3 ด้านปฐมภูมิ	17.44	19.28	+ 1.84
ขดลวดที่ 3 ด้านทุติยภูมิ	17.44	19.73	+ 2.29

2.1.6 เมื่อค่าที่ได้จากการคำนวณไม่เกิน $\pm 5 \mu H$ ให้ออกแบบขดลวดในรูปแบบอื่นจนครบทั้งหมด 3 รูปแบบตามที่กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1

หลังจากคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ L_s ของขดลวดแต่ละแบบเรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำขนาดของขดลวดแต่ละชนิดมาทำการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิหรือ Mutual Inductance (M) ในแต่ละระยะห่างระหว่างขดลวด โดยคำนวณจากสมการที่ 12 เมื่อเป็นขดลวดแบบโซลินอยด์ และสมการที่ 15 เมื่อเป็นขดลวดแบบเกลียวราบแบน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำ M กับ L_s แสดงได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำหรือ Coupling Coefficient (k) แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 74

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_{s1}L_{s2}}} \quad (74)$$

เมื่อ L_{s1} เป็นค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดปฐมภูมิ
 L_{s2} เป็นค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดทุติยภูมิ

จะสามารถแสดงค่าความเหนี่ยวนำ L_s , M และค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำ k ของขดลวดแบบที่ 1-3 ที่ได้ออกแบบไว้ได้ดังตารางที่ 24 ถึงตารางที่ 26

ตารางที่ 24 ค่า L_s , M และ k ที่ได้จากการคำนวณสำหรับขดลวดแบบที่ 1

ระยะห่างระหว่าง ขดลวด (เซนติเมตร)	ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (L_s) ไมโครเฮนรี (μH)	ความเหนี่ยวนำรวม (M) ไมโครเฮนรี (μH)	สัมประสิทธิ์การ เหนี่ยวนำ (k)
3 เซนติเมตร	117.62	11.79	0.10
6 เซนติเมตร	117.62	5.99	0.05
9 เซนติเมตร	117.62	3.90	0.03
15 เซนติเมตร	117.62	1.71	0.01

ตารางที่ 25 ค่า L_s , M และ k ที่ได้จากการคำนวณสำหรับขดลวดแบบที่ 2

ระยะห่างระหว่าง ขดลวด (เซนติเมตร)	ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (L_s) ไมโครเฮนรี (μH)	ความเหนี่ยวนำรวม (M) ไมโครเฮนรี (μH)	สัมประสิทธิ์การ เหนี่ยวนำ (k)
3 เซนติเมตร	113.84	90.75	0.79
6 เซนติเมตร	113.84	40.80	0.36
9 เซนติเมตร	113.84	21.09	0.18
15 เซนติเมตร	113.84	7.24	0.06

ตารางที่ 26 ค่า L_s , M และ k ที่ได้จากการคำนวณสำหรับขดลวดแบบที่ 3

ระยะห่างระหว่าง ขดลวด (เซนติเมตร)	ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (L_s) ไมโครเฮนรี (μH)	ความเหนี่ยวนำรวม (M) ไมโครเฮนรี (μH)	สัมประสิทธิ์การ เหนี่ยวนำ (k)
3 เซนติเมตร	17.44	6.39	0.36
6 เซนติเมตร	17.44	2.06	0.12
9 เซนติเมตร	17.44	0.85	0.05
15 เซนติเมตร	17.44	0.23	0.01

จากขั้นตอนการออกแบบขดลวดทั้ง 3 แบบและการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและความเหนี่ยวนำรวมแสดงให้เห็นว่า ขดลวดเกลียวราบแบบกลมตามรูปแบบที่ 2 และ 3 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำที่ดีกว่าขดลวดแบบโซลินอยด์ ในขณะที่ขดลวดเกลียวราบแบบกลมใช้สายไฟในการพันขดลวดที่น้อยกว่าขดลวดแบบโซลินอยด์ และค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำที่ได้นี้จะถูกนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำต่อไป

2.2 จำลองผลตอบสนองความถี่ของระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในส่วนนี้ทำการจำลองผลตอบสนองความถี่ในช่วงต่างๆ ของไฟฟ้ากระแสตรงและการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลดของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ที่ใช้การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้ง 4 แบบ โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการสร้างแบบจำลองของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีขั้นตอนการจำลองผลดังนี้

1) กำหนดค่าตัวแปรคงที่ในการจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในแต่ละรูปแบบ โดยเริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าความเหนี่ยวนำตัวเองด้านปฐมภูมิ (L_1), ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองด้านทุติยภูมิ (L_2) และค่าความเหนี่ยวนำรวม (M) จากขั้นตอนการออกแบบขดลวด ซึ่งเลือกจากขดลวดแบบที่ 2 ที่ระยะห่างระหว่างขดลวดเป็น 3 เซนติเมตร จากนั้นเลือกค่าตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิ (C_2) ที่ทำให้ระบบมีการทำงานอยู่ในช่วง

ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ที่กำหนดไว้ แสดงค่าได้ดังตารางที่ 27 (แสดงแนวทางในการเลือกค่าความเก็บประจุและความถี่เรโซแนนซ์ได้จากภาคผนวก ก)

ตารางที่ 27 ค่าตัวแปรคงที่ในการจำลองระบบด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ

ตัวแปรคงที่	ปริมาณ	หน่วย
ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (L_1, L_2)	118.36	ไมโครเฮนรี (μH)
ความเหนี่ยวนำรวม (M)	90.75	ไมโครเฮนรี (μH)
ค่าตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิ (C_2)	1.2	ไมโครฟารัด (μF)
ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r)	13.35	กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)
โหลด (R_L)	10	โอห์ม (Ω)

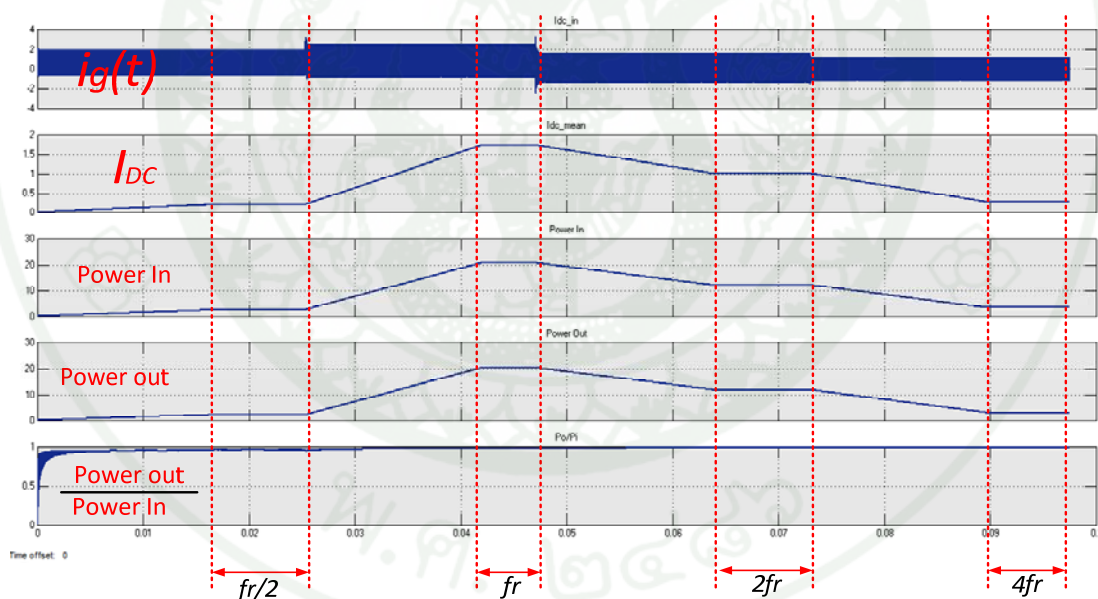
2) กำหนดค่าตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ (C_1) สำหรับรูปแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละรูปแบบที่ทำให้ค่า $Im\{Z_t\} = 0$ ที่ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าคงที่ 13.35 กิโล-เฮิร์ตซ์ โดยใช้สมการจากตารางที่ 20 แสดงค่าตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิได้ดังตารางที่ 28

ตารางที่ 28 ค่าตัวแปรเฉพาะในการจำลองระบบด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ

การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ	ค่าตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ (C_1) ไมโครฟารัด (μF)
SS-Topology	1.20
SP-Topology	2.91
PS-Topology	0.27
PP-Topology	2.41

3) สร้างแบบจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้หรือระบบ ICPT สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในแต่ละรูปแบบ จากการกำหนดค่าตัวแปรตามตารางที่ 27 และตารางที่ 28 โดยกำหนดให้อุปกรณ์ที่ใช้งานในระบบทำงานในสภาวะอุดมคติ (ไม่คิดผลของความต้านทานและตัวเก็บประจุแฝงในอุปกรณ์) และทำการจำลองระบบในแต่ละรูปแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุที่ความถี่ 4 ช่วงความถี่ ได้แก่ ช่วงความถี่ $f_s = \frac{f_r}{2}$, ช่วงความถี่ $f_s = f_r$, ช่วงความถี่ $f_s = 2f_r$ และช่วงความถี่ $f_s = 4f_r$ โดยที่ความถี่ f_r ของแต่ละรูปแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{22}C_2}}$ ดังสมการที่ 73 จะได้ผลการจำลองระบบทั้ง 4 รูปแบบดังนี้

- ผลการจำลองของไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (I_p) กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (P_i) และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ SS-Topology แสดงได้ดังภาพที่ 63



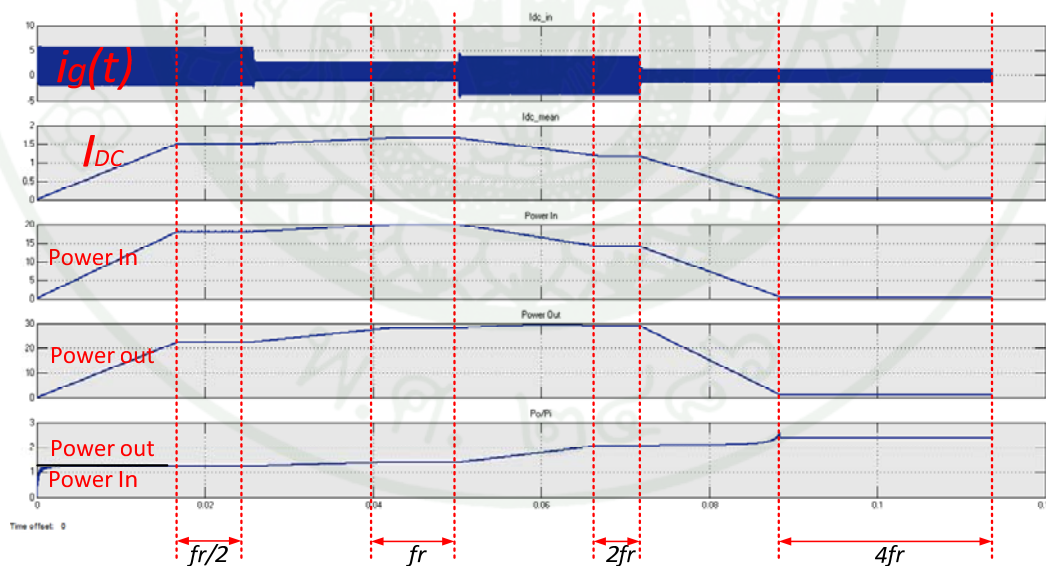
ภาพที่ 63 ผลการจำลองระบบ ICPT ด้วย SS-Topology ตามตารางที่ 28

จากผลการจำลองดังภาพที่ 63 แสดงผลตอบสนองความถี่ของกระแสไฟฟ้า I_{DC} และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) ในแต่ละช่วงความถี่สำหรับ SS-Topology ได้ดังตารางที่ 29

ตารางที่ 29 ผลตอบสนองความถี่ของ I_{DC} และ P_o ในการจำลองรูปแบบ SS-Topology

ช่วงความถี่	ความถี่ กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)	กระแสไฟฟ้า I_{DC} (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) (วัตต์)
$\frac{f_r}{2}$	6.67	0.19	2.33
f_r	13.35	1.74	20.93
$2f_r$	26.69	1.02	12.33
$4f_r$	53.39	0.26	3.15

● ผลการจำลองของไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (I_p) กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (P_i) และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ SP-Topology แสดงได้ดังภาพที่ 64



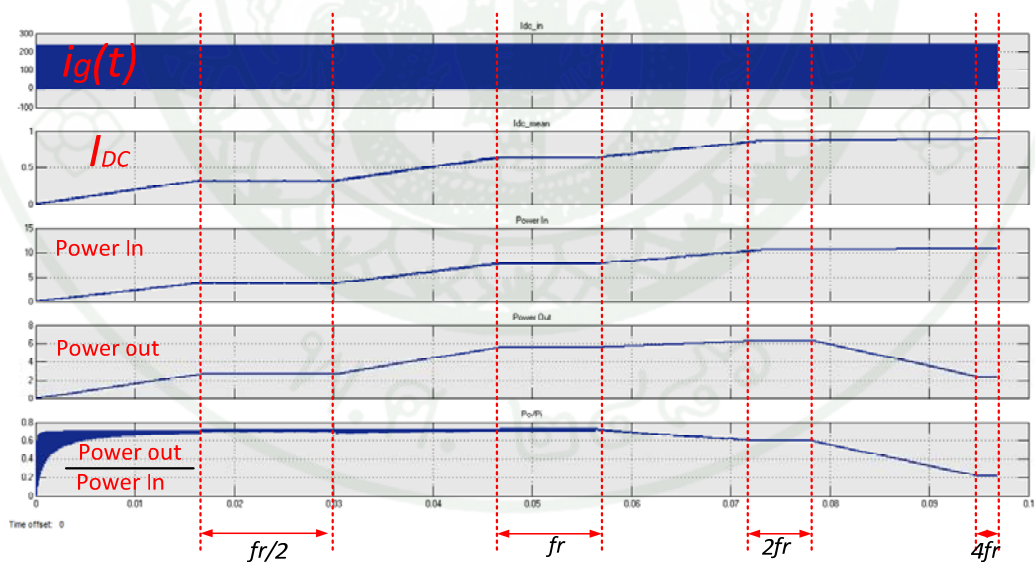
ภาพที่ 64 ผลการจำลองระบบ ICPT ด้วย SP-Topology เมื่อให้ C_1 ตามตารางที่ 28

จากผลการจำลองดังภาพที่ 64 แสดงผลตอบสนองความถี่ของกระแสไฟฟ้า I_{DC} และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) ในแต่ละช่วงความถี่สำหรับ SP-Topology ได้ดังตารางที่ 30

ตารางที่ 30 ผลตอบสนองความถี่ของ I_{DC} และ P_o ในการจำลองรูปแบบ SP-Topology

ช่วงความถี่	ความถี่ กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)	กระแสไฟฟ้า I_{DC} (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) (วัตต์)
$\frac{f_r}{2}$	6.67	1.46	23.36
f_r	13.35	1.66	28.73
$2f_r$	26.69	1.15	29.17
$4f_r$	53.39	0.02	0.96

• ผลการจำลองของไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (I_p) กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (P_i) และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ PS-Topology แสดงได้ดังภาพที่ 65



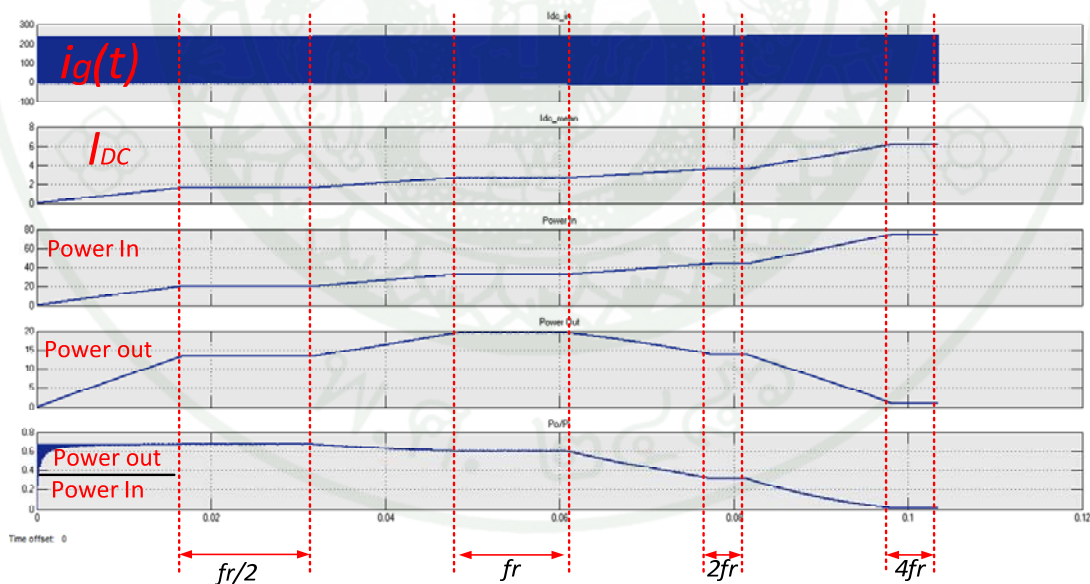
ภาพที่ 65 ผลการจำลองระบบ ICPT ด้วย PS-Topology เมื่อให้ C_1 ตามตารางที่ 28

จากผลการจำลองดังภาพที่ 65 แสดงผลตอบสนองความถี่ของกระแสไฟฟ้า I_{DC} และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) ในแต่ละช่วงความถี่สำหรับ PS-Topology ได้ดังตารางที่ 31

ตารางที่ 31 ผลตอบสนองความถี่ของ I_{DC} และ P_o ในการจำลองรูปแบบ PS-Topology

ช่วงความถี่	ความถี่ กิโลเฮิรตซ์ (kHz)	กระแสไฟฟ้า I_{DC} (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) (วัตต์)
$\frac{f_r}{2}$	6.67	0.22	2.70
f_r	13.35	0.67	5.74
$2f_r$	26.69	0.83	6.18
$4f_r$	53.39	0.92	2.19

• ผลการจำลองของไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (I_p) กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (P_i) และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุรูปแบบ PP-Topology แสดงได้ดังภาพที่ 66



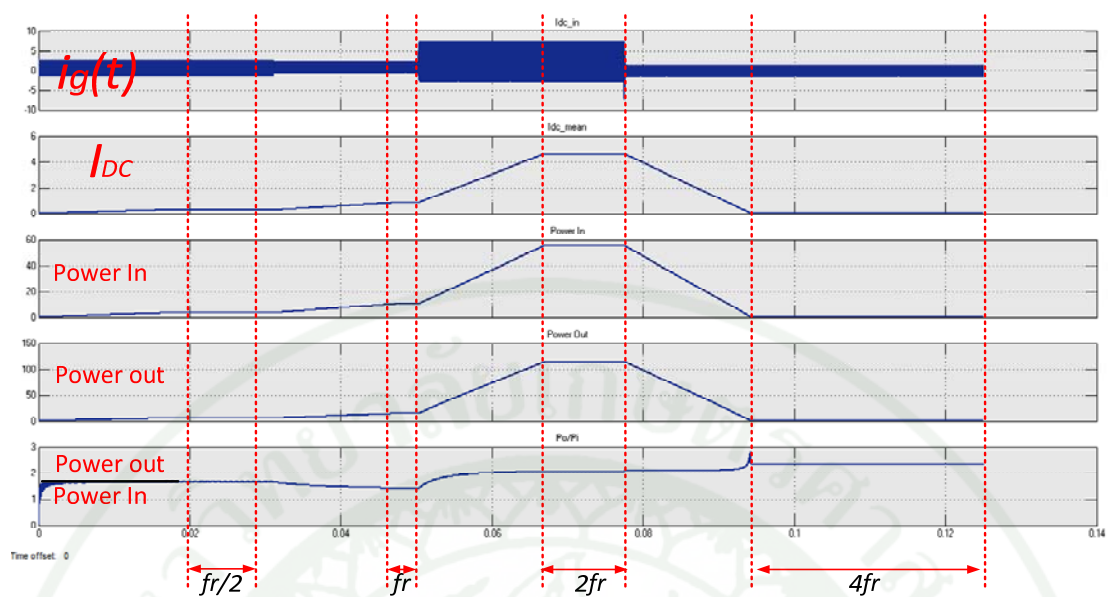
ภาพที่ 66 ผลการจำลองระบบ ICPT ด้วย PP-Topology เมื่อให้ C_1 ตามตารางที่ 28

จากผลการจำลองดังภาพที่ 66 แสดงผลตอบสนองความถี่ของกระแสไฟฟ้า I_{DC} และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) ในแต่ละช่วงความถี่สำหรับ PP-Topology ได้ดังตารางที่ 32

ตารางที่ 32 ผลตอบสนองความถี่ของ I_{DC} และ P_o ในการจำลองรูปแบบ PP-Topology

ช่วงความถี่	ความถี่ กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)	กระแสไฟฟ้า I_{DC} (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) (วัตต์)
$\frac{f_r}{2}$	6.67	1.83	13.35
f_r	13.35	2.26	19.41
$2f_r$	26.69	3.94	14.15
$4f_r$	53.39	6.08	0.84

จากการจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ตามข้างต้น จะเป็นการจำลองระบบด้วยการกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิหรือ C_1 มีค่าตามที่คำนวณได้จากตารางที่ 28 ซึ่งค่าของตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิในการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละรูปแบบ จะมีค่าที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ค่าตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิสำหรับการชดเชยในรูปแบบ SP ,PS และ PP-Topology จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าของความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวด (ซึ่งเปลี่ยนแปลงจากระยะห่างระหว่างขดลวด) และขนาดของโหลด ทำให้ในการออกแบบวงจรที่ใช้ในการทดลองจริงนั้น ออกแบบได้ยากและหาตัวเก็บประจุที่มีค่าได้ตรงจากที่คำนวณไว้ได้ยาก เมื่อค่าความเหนี่ยวนำร่วมและขนาดของโหลดเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจะทำการจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในรูปแบบ SP ,PS และ PP-Topology โดยกำหนดให้ขนาดของตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิมียุ่กับตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิเช่นเดียวกับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในรูปแบบ SS-Topology โดยมีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการพิจารณาเลือกตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิของการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุในรูปแบบ SP ,PS และ PP-Topology ระหว่างกำหนดให้ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิมียุ่กับตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิเช่นเดียวกับรูปแบบ SS-Topology หรือมีค่าเท่ากับตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิเช่นเดียวกับรูปแบบ SS-Topology แสดงผลการจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ในรูปแบบ SP ,PS และ PP-Topology เมื่อตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิมียุ่กับตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $C_1 = C_2 = 1.2 \mu F$ ได้ดังภาพที่ 67 ถึงภาพที่ 69 และพิจารณาผลตอบสนองความถี่ของกระแส I_{DC} และกำลังไฟฟ้า P_o จากการจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ทั้ง 3 รูปแบบในกรณีของตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2 = 1.2 \mu F$ ได้ดังตารางที่ 33 ถึงตารางที่ 35

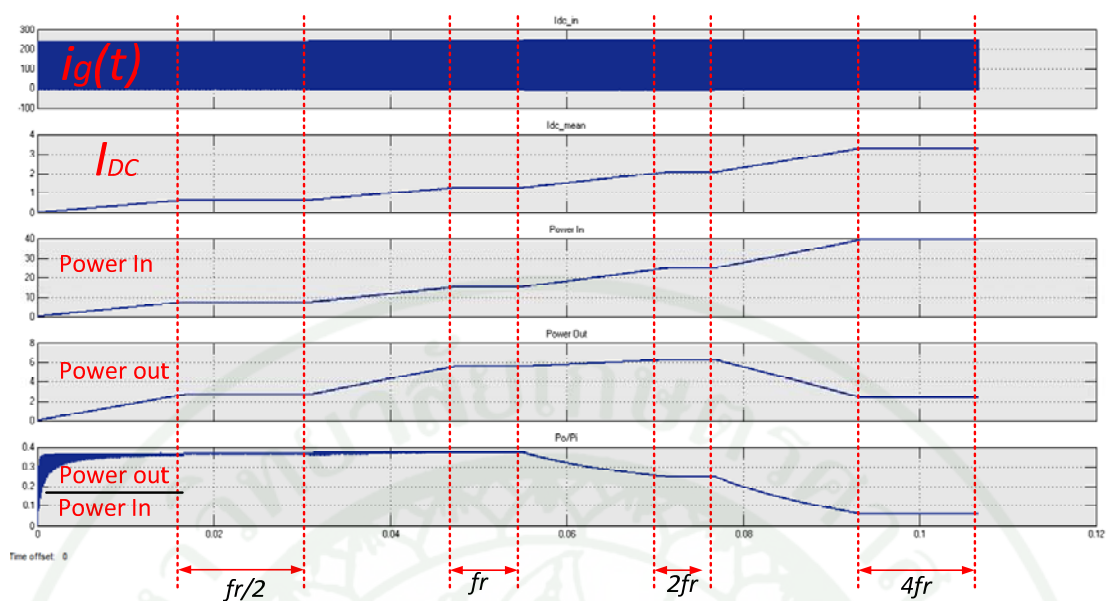


ภาพที่ 67 ผลการจำลองระบบ ICPT ด้วย SP-Topology เมื่อให้ตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2$

จากผลการจำลองดังภาพที่ 67 แสดงผลตอบสนองความถี่ของกระแสไฟฟ้า I_{DC} และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) ในแต่ละช่วงความถี่สำหรับ SP-Topology ได้ดังตารางที่ 33

ตารางที่ 33 ผลตอบสนองความถี่ของ I_{DC} และ P_o ในการจำลอง SP-Topology เมื่อ $C_1 = C_2$

ช่วงความถี่	ความถี่ กิโลเฮิรตซ์ (kHz)	กระแสไฟฟ้า I_{DC} (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) (วัตต์)
$\frac{f_r}{2}$	6.67	0.26	5.56
f_r	13.35	0.85	15.06
$2f_r$	26.69	4.99	125.10
$4f_r$	53.39	0.03	1.21

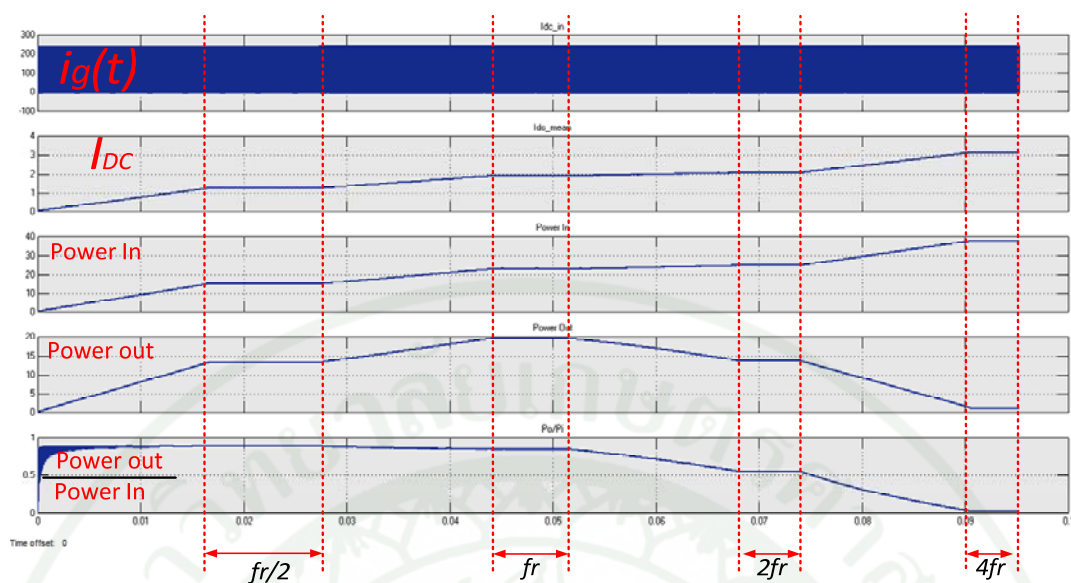


ภาพที่ 68 ผลการจำลองระบบ ICPT ด้วย PS-Topology เมื่อให้ $C_1 = C_2$

จากผลการจำลองดังภาพที่ 68 แสดงผลตอบสนองความถี่ของกระแสไฟฟ้า I_{DC} และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) ในแต่ละช่วงความถี่สำหรับ PS-Topology ได้ดังตารางที่ 34

ตารางที่ 34 ผลตอบสนองความถี่ของ I_{DC} และ P_o ในการจำลอง PS-Topology เมื่อ $C_1 = C_2$

ช่วงความถี่	ความถี่ กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)	กระแสไฟฟ้า I_{DC} (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) (วัตต์)
$\frac{f_r}{2}$	6.67	0.72	2.72
f_r	13.35	1.28	4.82
$2f_r$	26.69	2.12	6.34
$4f_r$	53.39	3.29	2.18



ภาพที่ 69 ผลการจำลองระบบ ICPT ด้วย PP-Topology เมื่อให้ $C_1 = C_2$

จากผลการจำลองดังภาพที่ 69 แสดงผลตอบสนองความถี่ของกระแสไฟฟ้า I_{DC} และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) ในแต่ละช่วงความถี่สำหรับ SP-Topology ได้ดังตารางที่ 35

ตารางที่ 35 ผลตอบสนองความถี่ของ I_{DC} และ P_o ในการจำลอง PP-Topology เมื่อ $C_1 = C_2$

ช่วงความถี่	ความถี่ กิโลเฮิรตซ์ (kHz)	กระแสไฟฟ้า I_{DC} (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) (วัตต์)
$\frac{f_r}{2}$	6.67	1.14	13.36
f_r	13.35	2.08	19.42
$2f_r$	26.69	2.23	14.15
$4f_r$	53.39	3.09	0.84

จากการจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำและเพื่อเปรียบเทียบผลของการเลือกใช้ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิระหว่างเลือกใช้ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิที่มีค่าตามที่คำนวณได้จากสมการใน

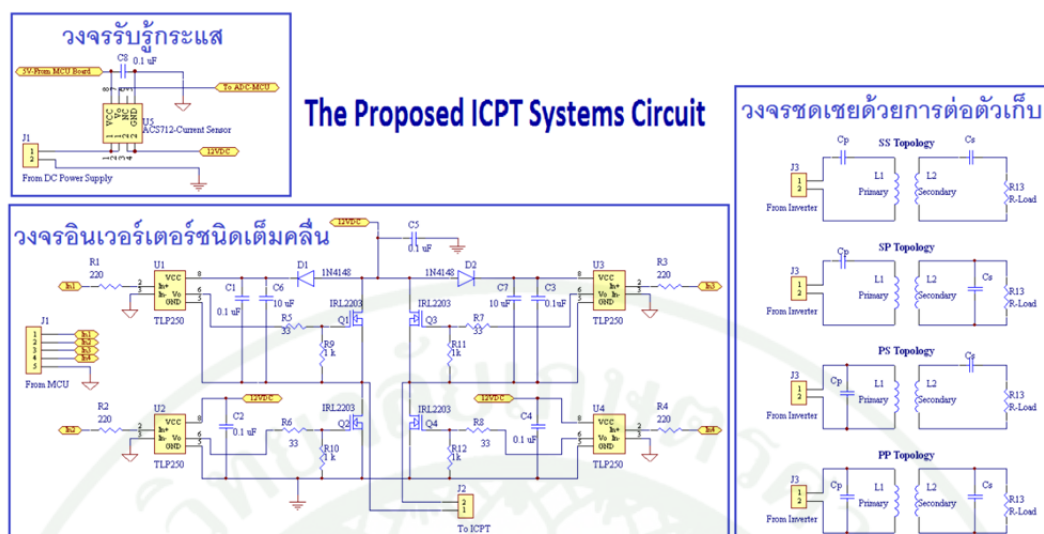
ตารางที่ 20 หรือมีค่าเท่ากับตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิ เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ต่อไป ซึ่งได้ข้อสรุปจากการจำลองระบบดังนี้

การเลือกใช้ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิที่มีค่าเท่ากับตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิหรือ $C_1 = C_2$ เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ และจะถูกใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ เนื่องจากเป็นเงื่อนไขที่ทำให้การชดเชยด้วยตัวเก็บประจุในรูปแบบ SS และ SP-Topology มีผลตอบสนองความถี่ของกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ มีการเปลี่ยนแปลงตามผลตอบสนองความถี่ของไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่าย ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่จะนำมาใช้เพื่อออกแบบวิธีการควบคุมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ และจากผลการจำลองพบว่า ในรูปแบบ PS และ PP-Topology กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับไม่เป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงของไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นการเลือกใช้ไฟฟ้ากระแสตรงอาจไม่เหมาะสมกับรูปแบบ PS และ PP-Topology ซึ่งจะทำให้การยืนยันผลการจำลองด้วยการทดลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ในส่วนตัวต่อไป

และจากผลการจำลองจะพบว่า กระแสไฟฟ้าที่มาจากแหล่งจ่ายหรือ $i_g(t)$ จะมีลักษณะเป็นสัญญาณคลื่นที่มีทั้งด้านบวกและด้านลบ ซึ่งสัญญาณด้านลบเกิดขึ้นจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากวงจรเรโซแนนซ์ผ่านไดโอดที่ต่อขนานอยู่กับสวิตช์กลับคืนไปสู่แหล่งจ่ายในช่วงของสวิตช์หยุดทำงาน ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าด้านลบชั่วขณะขึ้น (เกิดการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับตัวต้านทานแฝงในวงจร) และสัญญาณกระแส I_{DC} จะเป็นค่าเฉลี่ยของ $i_g(t)$ ซึ่งมีขนาดเป็นบวก เนื่องจากสัญญาณ $i_g(t)$ มีพื้นที่ใต้กราฟด้านบวกของสัญญาณมากกว่าพื้นที่ใต้กราฟด้านลบ

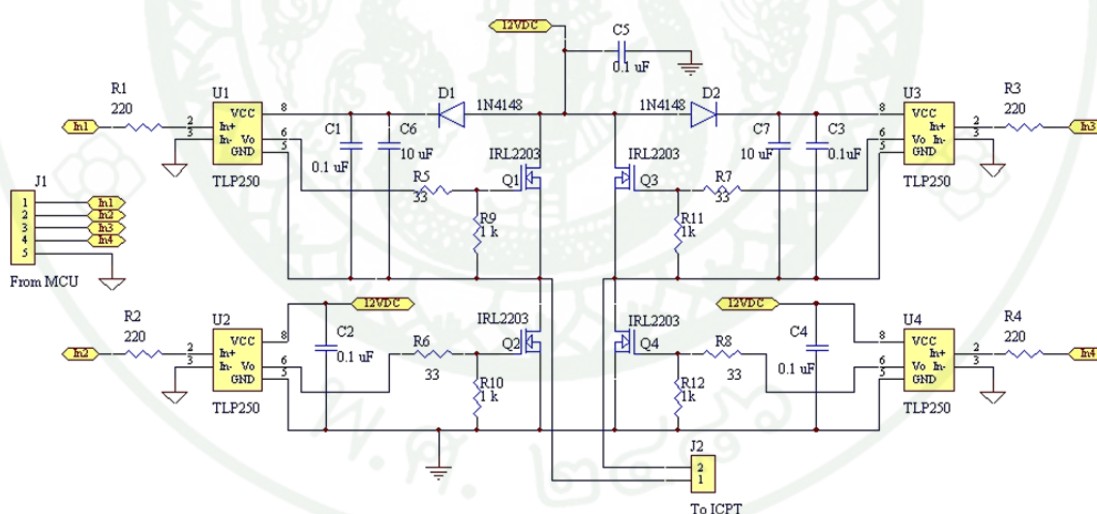
2.3 ออกแบบวงจรสำหรับระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ

ระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรรับรู้ไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรในส่วนของการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุทั้ง 4 รูปแบบ สามารถแสดงแผนภาพเค้าร่างรวมได้ดังภาพที่ 70 โดยวงจรแต่ละส่วนสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 71 ถึงภาพที่ 80 และมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 70 แผนภาพเค้าร่างวงจรของระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มคลื่น 1 เฟส มีแผนภาพเค้าร่างของวงจรดังภาพที่ 71

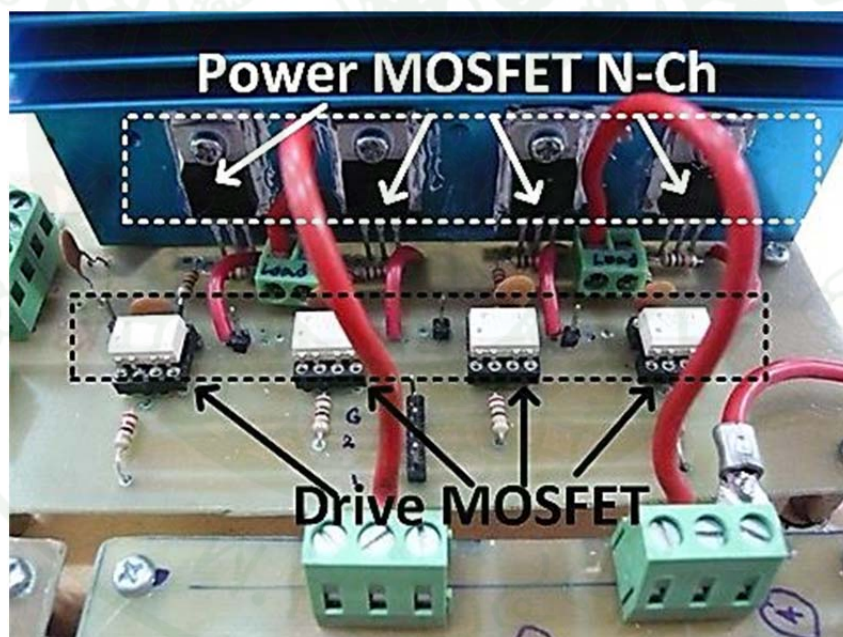


ภาพที่ 71 แผนภาพเค้าร่างของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มคลื่น 1 เฟส

วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มคลื่น 1 เฟส ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เลือกใช้มอสเฟตกำลัง (Power Mosfet) เบอร์ IRL2203N เป็นมอสเฟตกำลังชนิด N-Channel กำหนดให้ทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ การทำงานของมอสเฟตกำลังที่แต่ละคู่ให้มีช่วง Dead Time

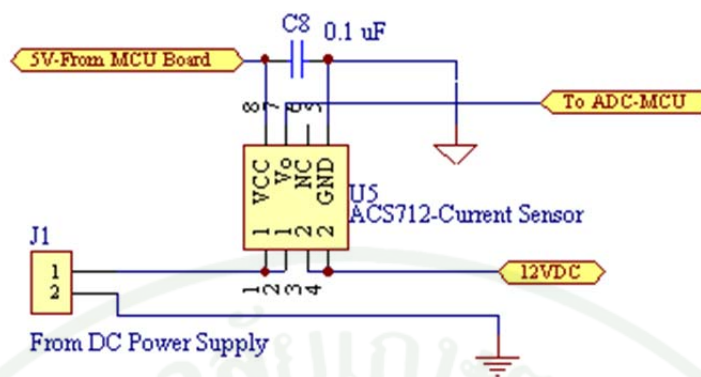
เป็น 2 เพลอร์เซนต์ โดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250 เป็นอุปกรณ์ในการส่งสัญญาณเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนของมอเตอร์กำลังในงานวิจัยนี้ (แสดงแนวทางในการเลือกใช้อุปกรณ์ IRL2203 และ TLP250 ได้จากภาคผนวก ก) โดยการขับเคลื่อนของมอเตอร์กำลังที่ต่ออยู่ด้านบนหรือมอเตอร์ในตำแหน่งของ Q1 และ Q3 ในภาพที่ 71 ทำการขับเคลื่อนของมอเตอร์กำลังด้วยวงจร Bootstrap ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุและไดโอด (เลือกใช้ไดโอดที่สามารถทำงานได้ในช่วงความถี่สูง ตามความถี่ที่ใช้งานของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้) ทำให้สามารถใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า สำหรับการขับเคลื่อนของมอเตอร์กำลังเป็นชุดเดียวกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าของภาคกำลังของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ได้

จากแผนภาพเค้าร่างของวงจรดังภาพที่ 71 จะได้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มคลื่นจริงตามที่ออกแบบไว้แสดงดังภาพที่ 72



ภาพที่ 72 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มคลื่นจริงตามที่ออกแบบไว้

วงจรรับรู้ไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไอซีเบอร์ ACS-712-20A เป็นตัวรับรู้ไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่าย โดยต่อขั้วบวกของสัญญาณขาออกของแหล่งจ่ายผ่านขาที่ 1,2 และ 3,4 ของไอซี ACS-712-20A และต่อขา V_o ของ ACS-712-20A เข้ากับขาของสัญญาณนาฬิกาของไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงแผนภาพเค้าร่างของวงจรได้ดังภาพที่ 73



ภาพที่ 73 แผนภาพเค้าร่างของวงจรรับรู้กระแสไฟฟ้า

ไอซี ACS-712-20A ที่ใช้เป็นตัวรับรู้ไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า 12 โวลต์ เป็นอุปกรณ์ที่รับรู้ได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าจากหมายเลข 1 และ 2 ไปยังหมายเลข 3 และ 4 จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้า (ด้วยทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า) ด้านขาออกของไอซี ACS-712-20A โดยที่ปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้นี้แสดงถึงปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไอซี ACS-712-20A สามารถแสดงปริมาณของกระแสไฟฟ้าด้วยการคำนวณจากแรงดันไฟฟ้าขาออกนี้ได้ดังสมการที่ 75

$$I = \frac{V_{712} - V_{offset}}{Sensitivity} \quad (75)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไอซี ACS-712-20A
 V_{712} คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกจาก ACS-712-20A
 V_{offset} คือ แรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มของ ACS-712-20A
 Sensitivity คือ ค่าความไวของการรับรู้กระแส

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้อุปกรณ์ตรวจจับกระแสรุ่น ACS-712-20A สามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 20 แอมป์ โดยจะมีค่าของตัวแปรที่แสดงในสมการที่ 75 ดังตารางที่ 36 (แสดงแนวทางในการเลือกใช้ ACS-712-20A ได้จากภาคผนวก ก)

ตารางที่ 36 ค่าตัวแปรของไอซี ACS-712-20A

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
V_{offset}	2.5 โวลต์
Sensitivity	0.1 โวลต์ต่อกระแสไฟ 1 แอมป์

การใช้งานไอซี ACS-712-20A จะนำสัญญาณแรงดันขาออกของ ACS-712-20A ไปเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด dsPIC30F4011 ด้วยการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยฟังก์ชัน Analog to Digital Converter (ADC) สามารถแปลงได้ตามขั้นตอนดังนี้

- กำหนดคุณสมบัติของตัวแปรที่ใช้งานสำหรับ ACS-712-20A และ dsPIC30F4011
 - แรงดันไฟเลี้ยง (V_{cc}) ของ ACS-712-20A เท่ากับ 5 โวลต์ ทำให้มีค่าความไวเป็น 0.1 โวลต์เมื่อกระแสเปลี่ยนแปลง 1 แอมแปร์ หรือ Sensitivity เท่ากับ 0.100 V/A
 - แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (V_{ref}) สำหรับฟังก์ชัน ADC ของ dsPIC30F4011 เป็น 5 โวลต์
- ทำการแปลงค่าสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลได้ดังสมการที่ 76

$$ADC_Count = \left(\frac{1024}{V_{cc}}\right)(V_{in}) \quad (76)$$

เมื่อ ADC_Count คือ จำนวนบิตของฟังก์ชัน ADC

V_{cc} คือ แรงดันไฟเลี้ยงของ ADC-712-20A

V_{in} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการเทียบกระแสไฟฟ้าจาก ACS-

712-20A

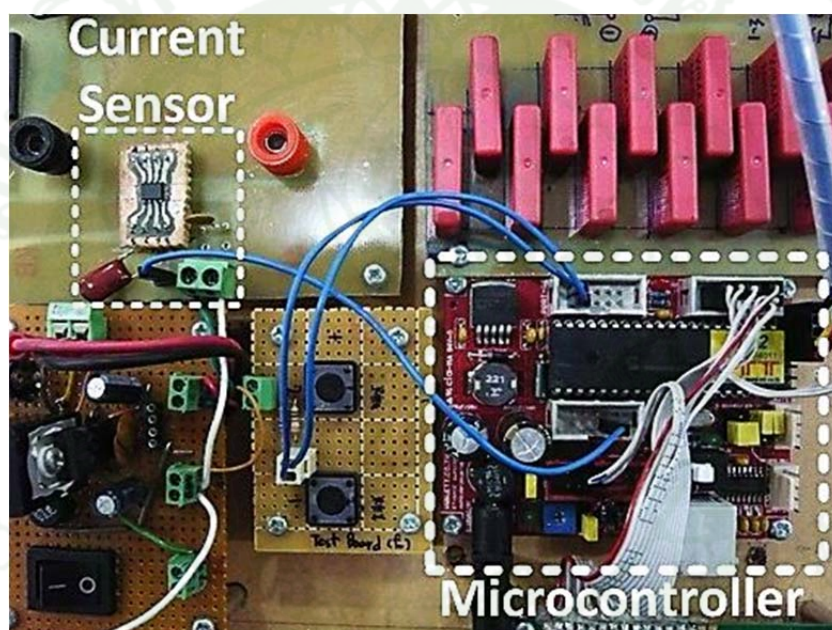
สามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้า V_{in} ได้ดังสมการที่ 77

$$V_{in} = \left(\frac{V_{cc}}{2}\right) + [(0.1)(I)] \quad (77)$$

แทนค่าแรงดันไฟฟ้า V_{cc} และแรงดันไฟฟ้า V_{in} ลงในสมการที่ 76 จะได้ค่า ADC_Count ดังสมการที่ 78

$$ADC_{Count} = (512) + [(20.48)(I)] \quad (78)$$

จากแผนผังวงจรดังภาพที่ 70 จะได้ว่าวงจรรับรู้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ไอซีเบอร์ ACS-712-20A ส่งสัญญาณให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011 ดังภาพที่ 74

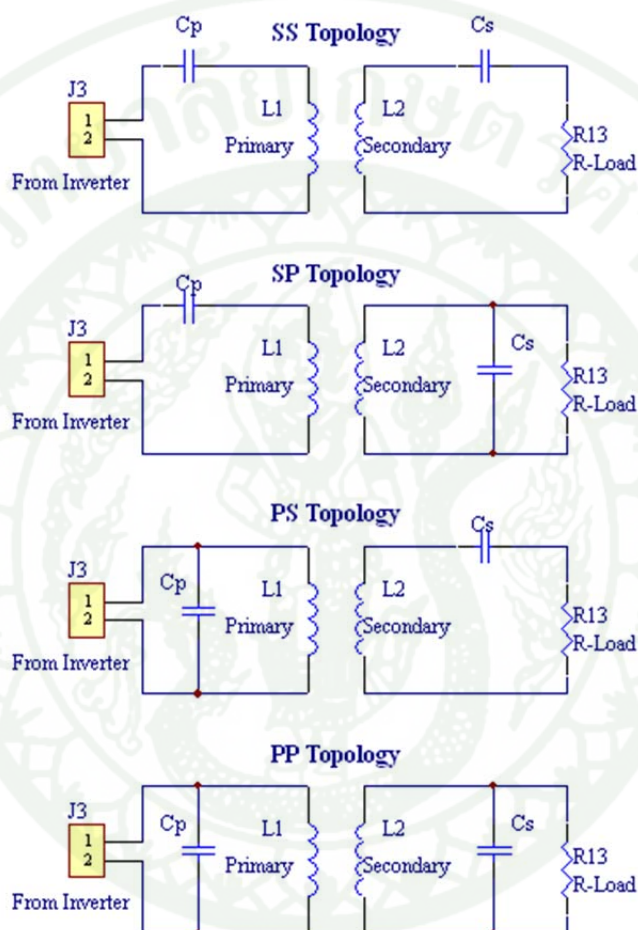


ภาพที่ 74 วงจรรับรู้กระแสตรงเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ตามที่ออกแบบไว้

งานวิจัยนี้จะทำการทดลองเปรียบเทียบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า สำหรับการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้งหมด 4 รูปแบบ ได้แก่

- 1) การชดเชยด้วยตัวเก็บประจุในรูปแบบ SS-Topology
- 2) การชดเชยด้วยตัวเก็บประจุในรูปแบบ SP-Topology
- 3) การชดเชยด้วยตัวเก็บประจุในรูปแบบ PS-Topology
- 4) การชดเชยด้วยตัวเก็บประจุในรูปแบบ PP-Topology

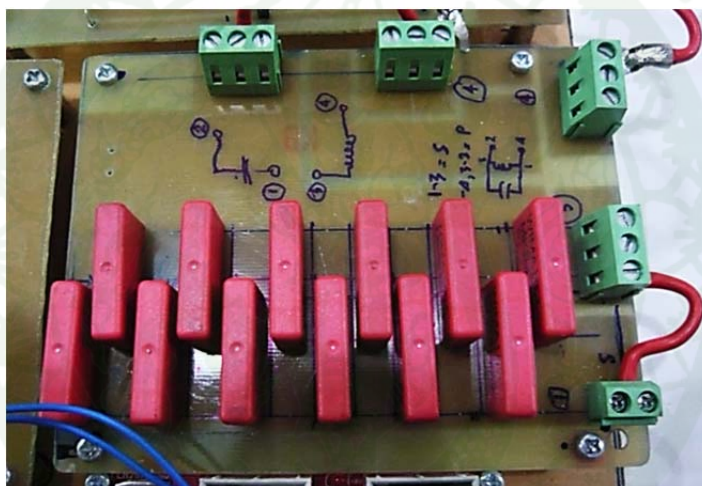
เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทดลองส่วนของการจำลองในก่อนหน้านี้ สามารถแสดงแผนภาพเค้าร่างของวงจรของวงจรชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้ง 4 รูปแบบได้ดังภาพที่ 75



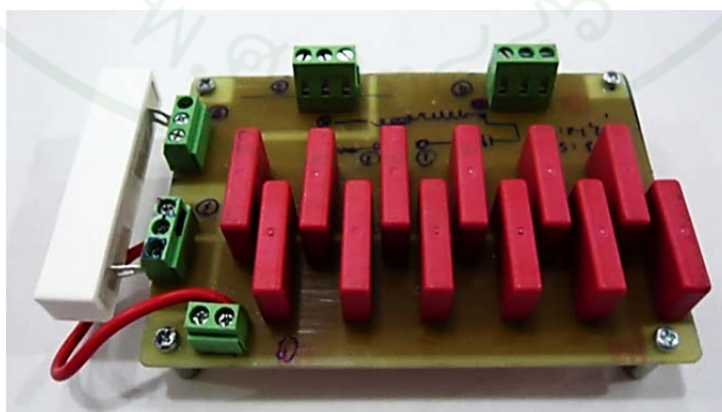
ภาพที่ 75 แผนภาพเค้าร่างของวงจรชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้ง 4 รูปแบบ

โดยกำหนดให้ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่าความเหนี่ยวนำตัวเองหรือ Self-Inductance เท่ากัน ($L_1 = L_2$) และให้ค่าตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่าเท่ากัน ($C_1 = C_2$) เนื่องจากตัวเก็บประจุ C_1 ที่คำนวณได้จากการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุจากรูปแบบ SP, PS และ PP Topology จะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรค่าความเหนี่ยวนำรวม (M) และความต้านทานของโหลด (R_L) โดยเฉพาะค่าความเหนี่ยวนำรวมที่มีผลต่อค่าตัวเก็บประจุ C_1 ทั้ง

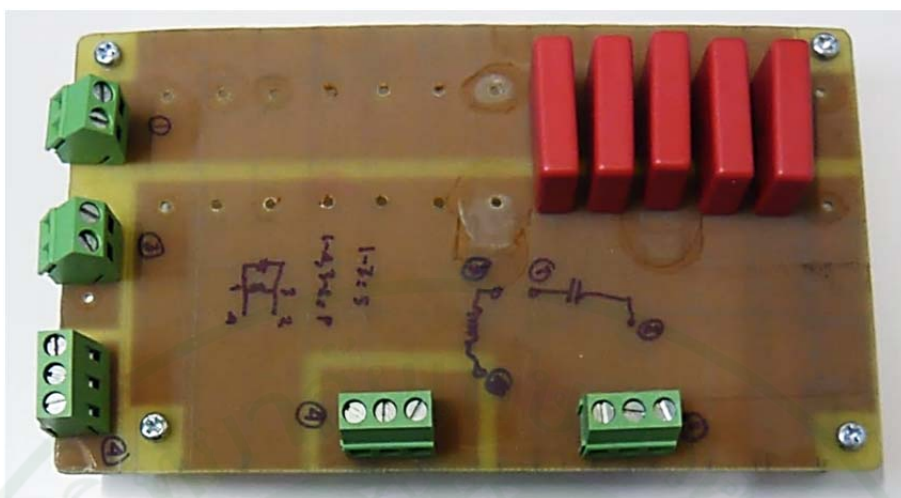
รูปแบบ SP ,PS และ PP ในขณะที่รูปแบบ PS และ PP จะขึ้นอยู่กับค่าค่าความเหนี่ยวนำรวมและขนาดของโหลด แต่จากการจำลองระบบที่แสดงในก่อนหน้านี พบว่าการที่กำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2$ จะมีผลตอบสนองความถี่ของระบบที่แตกต่างกันเล็กน้อย แต่ระดับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการกำหนดให้ตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2$ และ $C_1 \neq C_2$ ไม่ต่างกัน ดังนั้นในขั้นตอนการสร้างระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ จะกำหนดให้ใช้ค่าตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2$ และได้ออกแบบการทดลองเปรียบเทียบการทำงานของระบบระหว่างความถี่เรโซแนนซ์ 2 ช่วงความถี่ โดยทั้ง 2 ช่วงความถี่จะใช้ตัวเก็บประจุในวงจรที่ต่างกัน โดยที่สามารถแสดงวงจรจริงที่ออกแบบไว้ได้ ดังภาพที่ 76 ถึงภาพที่ 79 (แสดงแนวทางในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุได้จากภาคผนวก ก)



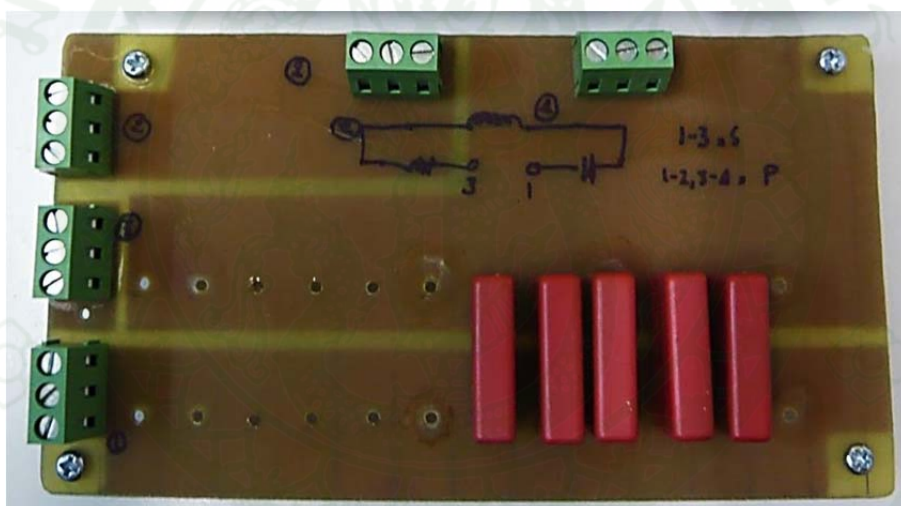
ภาพที่ 76 วงจรซดเซชด้วยการต่อตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิที่ความถี่ f_r



ภาพที่ 77 วงจรซดเซชด้วยการต่อตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิที่ความถี่ f_r



ภาพที่ 78 วงจรชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิที่ความถี่ $2f_r$

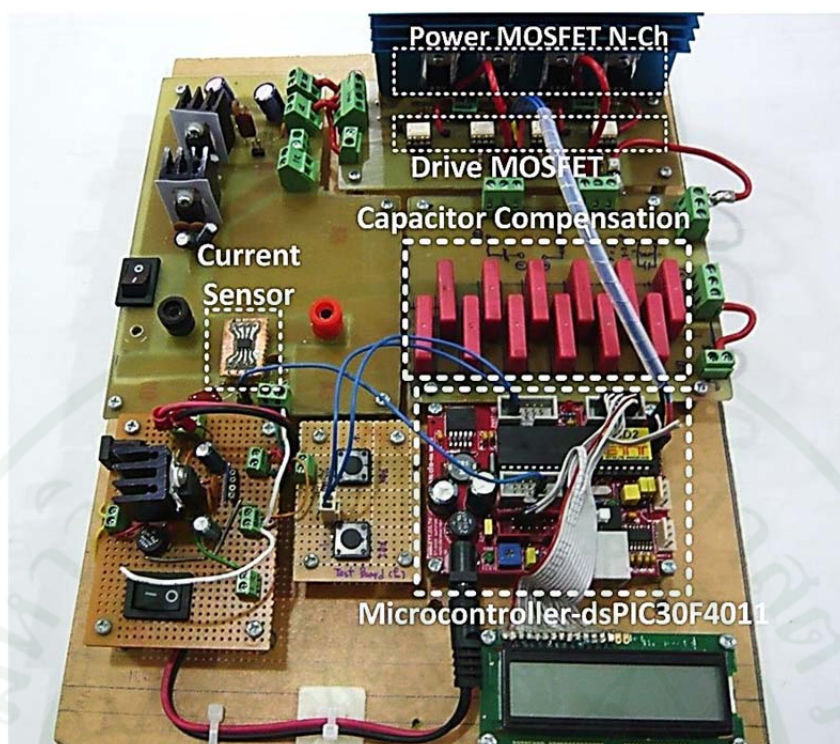


ภาพที่ 79 วงจรชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิที่ความถี่ $2f_r$

วงจรชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้งด้านปฐมภูมิและด้านหตุยภูมิดังภาพที่ 76 ถึง

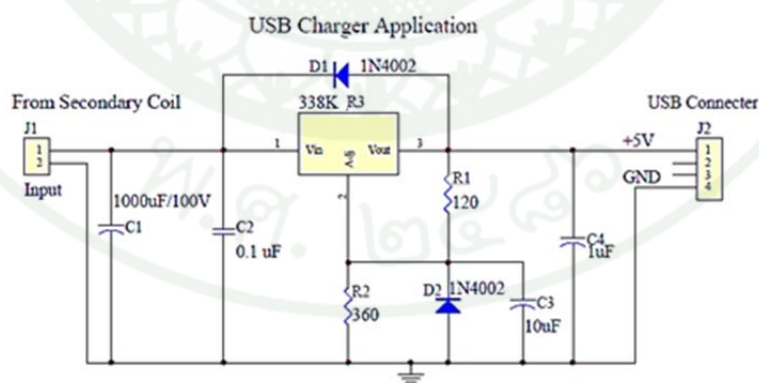
ภาพที่ 79 ทำการออกแบบให้สามารถใช้ได้ทั้งการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมและแบบขนาน โดยใช้การเปลี่ยนขั้วเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุกับชุดวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ขดลวดปฐมภูมิและหตุยภูมิ และภาระไฟฟ้าด้านหตุยภูมิหรือโหลด

เมื่อได้วงจรจริงตามที่ออกแบบไว้ทั้งหมดแล้ว นำมารวมกันเป็นวงจรของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ตามที่ออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้แสดงได้ดังภาพที่ 80



ภาพที่ 80 วงจรรวมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้

ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ อาศัยวงจรชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าทาง USB สามารถแสดงแผนภาพเค้าร่างของวงจรได้ดังภาพที่ 81



ภาพที่ 81 แผนภาพเค้าร่างของวงจรชาร์จประจุไฟฟ้าผ่านการเชื่อมต่อด้วย USB

วงจรดังภาพที่ 81 เป็นวงจรที่ออกแบบมาเพื่อชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่รับแรงดันไฟฟ้าขนาด 5 โวลต์ โดยทำการออกแบบให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 5 แอมป์

ด้วยการใช้ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือ Voltage Regulator เบอร์ LM338K โดยที่ LM338K มีคุณสมบัติดังตารางที่ 37

ตารางที่ 37 คุณสมบัติของ Voltage Regulator เบอร์ LM338K

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
แรงดันไฟฟ้าขาออก (ปรับค่าได้)	1.2 ถึง 32 โวลต์
กระแสไฟฟ้าขาออก	5 แอมป์
กระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุด	7 แอมป์

อุปกรณ์เบอร์ LM338K เป็นตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกให้อยู่ที่ระดับ 1.2 โวลต์ถึง 32 โวลต์ได้ ซึ่งระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกของ LM338K สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 79 ดังนี้

$$V_o = 1.25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_A R_2 \quad (79)$$

เมื่อ V_o คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกของ LM338K หน่วยเป็น โวลต์
 I_A คือ กระแสไฟฟ้าอ้างอิงของ LM338K มีค่า 0.8 ไมโครแอมป์
 R_1 คือ ค่าความต้านทานขาออก
 R_2 คือ ค่าความต้านทานสำหรับปรับค่าแรงดันขาออก

เมื่อค่ากระแสไฟฟ้า I_A ของ LM338K มีค่าน้อยมากทำให้สามารถละพจน์ของ $I_A R_2$ ได้ จึงทำให้สามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้า V_o ของ LM338K ใหม่ได้ตามสมการที่ 80 ดังนี้

$$V_o = 1.25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (80)$$

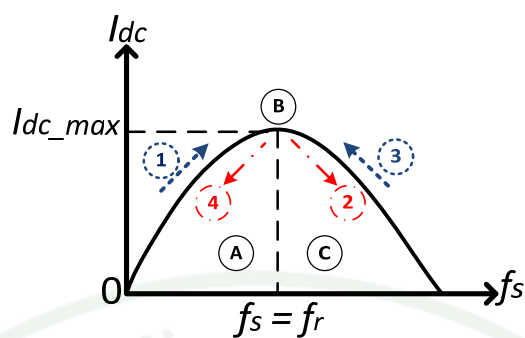
จากสมการที่ 80 ทำให้สามารถออกแบบวงจรจ่ายแรงดันเพื่อชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่รับแรงดันไฟฟ้าขนาด 5 โวลต์ และจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 5 แอมป์ ด้วยการใช้ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LM338K ได้รูปวงจรจริงดังภาพที่ 82



ภาพที่ 82 วงจรชาร์จประจุไฟฟ้าเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ICPT

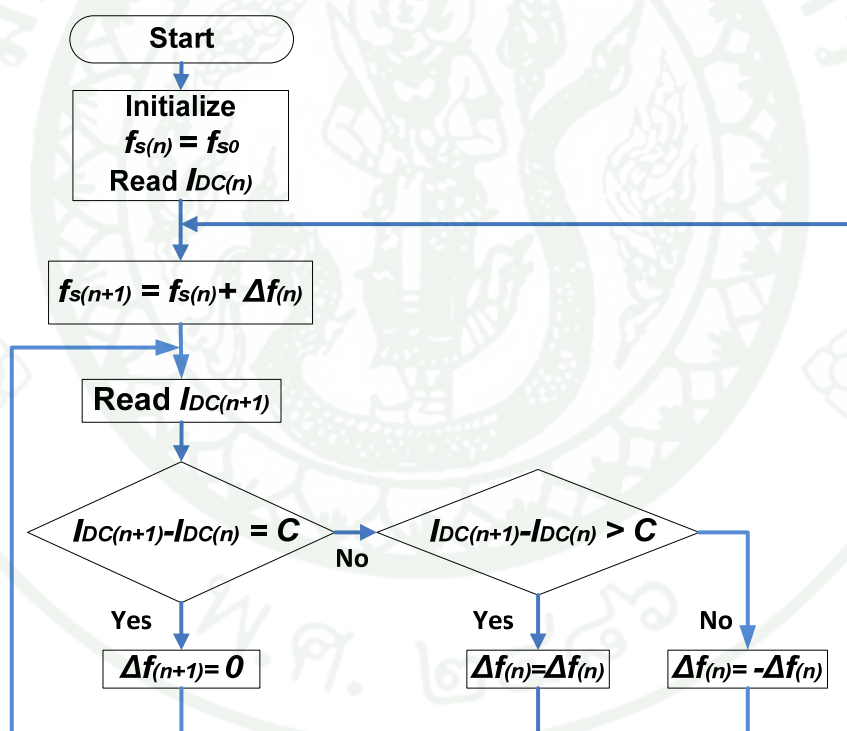
2.4 ออกแบบวิธีการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

วิธีการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้อาศัยวิธีการปรับความถี่สวิตชิงของอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงร่วมกับวิธีการค้นหาค่าสูงสุดด้วยวิธีค้นหาแบบปีนเขา (Hill Climbing Searching :HCS) โดยใช้ค่าไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดเป็นเงื่อนไขในการค้นหาเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิได้สูงสุด โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สวิตชิง (f_s) กับค่าไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) ของแหล่งจ่ายแสดงดังภาพที่ 83



ภาพที่ 83 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ f_s กับกระแส I_{DC} ของแหล่งจ่ายในระบบ ICPT

ขั้นตอนการควบคุมที่นำเสนอสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 84



ภาพที่ 84 แผนภาพวิธีการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

จากภาพที่ 84 กำหนดให้ความถี่สวิตชิงขณะเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ f_{s0} แล้วทำการอ่านค่าไฟฟ้ากระแสตรง I_{DC} จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบ แล้วกำหนดให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่

สถานะปัจจุบัน หรือตัวแปร $I_{DC(n)}$ จากนั้นทำการเพิ่มความถี่สวิตช์ที่ $f_{s(n)}$ ด้วยค่า $\Delta f_{(n)}$ จะได้ความถี่สวิตช์ที่สถานะถัดไปเป็น $f_{s(n+1)}$ มีค่าเท่ากับสมการที่ 81

$$f_{s(n+1)} = f_{s(n)} + \Delta f_{(n)} \quad (81)$$

จากนั้นทำการอ่านค่าไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายอีกครั้งกำหนดให้เป็นตัวแปร $I_{DC(n+1)}$ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าระหว่างกระแสไฟฟ้า $I_{DC(n+1)}$ กับกระแสไฟฟ้า $I_{DC(n)}$ ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบจะนำมาใช้เป็นเงื่อนไขในการเปลี่ยนแปลงความถี่สวิตช์ f_s ในสถานะต่อไป หรือ $f_{s(n+1)}$ ด้วยค่า $\Delta f_{(n)}$

กระแสไฟฟ้า I_{DC} ของแหล่งจ่าย จะมีค่าสูงสุดเมื่อความถี่สวิตช์ (f_s) มีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ดังจุด B ในขณะที่ช่วงความถี่ f_s ที่น้อยกว่าและมากกว่าความถี่ f_r ดังจุด A และ C ตามลำดับ จะได้ค่ากระแสไฟฟ้า I_{DC} มีค่าลดลง และด้วยพฤติกรรมของระบบถ่ายโอนกำลังแบบคู่ควบเหนี่ยวนำหรือ ICPT เช่นนี้ เมื่อนำผลที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าระหว่างกระแสไฟฟ้า $I_{DC(n+1)}$ กับกระแสไฟฟ้า $I_{DC(n)}$ จะนำไปกำหนดเงื่อนไขการควบคุมระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ โดยแบ่งออกเป็น 3 เงื่อนไขได้ดังนี้

เงื่อนไขที่ 1 เมื่อค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้า $I_{DC(n+1)}$ กับกระแสไฟฟ้า $I_{DC(n)}$ มีค่าเท่ากับค่าคงที่ C แสดงว่าระบบกำลังทำงานอยู่ในช่วงที่เกิดกระแสไฟฟ้า I_{DC} ในขณะนั้นมีค่าสูงสุด ให้ทำการคงที่ความถี่ f_s ไว้ด้วยการให้ตัวแปร $\Delta f_{(n+1)} = 0$ เปรียบเทียบได้ดังจุด B ในภาพที่ 83

เงื่อนไขที่ 2 เมื่อค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้า $I_{DC(n+1)}$ กับกระแสไฟฟ้า $I_{DC(n)}$ มีค่ามากกว่าค่าคงที่ C หรือ $I_{DC(n+1)} - I_{DC(n)} > C$ แสดงว่า ระบบกำลังทำงานอยู่ในช่วงที่กำลังเข้าสู่การเกิดกระแสไฟฟ้า I_{DC} ที่มีค่าสูงสุด ในกรณีนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ f_s ในทิศทางเดิมด้วยขนาดเท่าเดิมหรือ $\Delta f_{(n+1)} = \Delta f_{(n)}$ จะแสดงได้ดังเส้นปะที่ 1 และ 3 ในภาพที่ 83

- เส้นปะที่ 1 ในภาพที่ 83 ระบบกำลังทำงานอยู่ในช่วงที่เพิ่มความถี่ f_s ให้ทำการเพิ่มความถี่ f_s ต่อไป
- เส้นปะที่ 3 ในภาพที่ 83 ระบบกำลังทำงานอยู่ในช่วงที่ลดความถี่ f_s ให้ทำการลดความถี่ f_s ต่อไป

เงื่อนไขที่ 3 เมื่อค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้า $I_{DC(n+1)}$ กับกระแสไฟฟ้า $I_{DC(n)}$ มีค่าน้อยกว่าค่าคงที่ C หรือ $I_{DC(n+1)} - I_{DC(n)} < C$ แสดงว่า ระบบกำลังทำงานเลยช่วงที่ระบบเข้าสู่การเกิดกระแสไฟฟ้า I_{DC} ที่มีค่าสูงสุด ในกรณีนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ f_s ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางเดิม ด้วยขนาดเท่าเดิมหรือ $\Delta f_{(n+1)} = -\Delta f_{(n)}$ จะแสดงได้ดังเส้นปะที่ 2 และ 4 ในภาพที่ 83

- เส้นปะที่ 2 ในภาพที่ 83 ระบบกำลังทำงานอยู่ในช่วงของการเพิ่มความถี่ f_s จะกำหนดให้ทำการลดความถี่ f_s แทน
- เส้นปะที่ 4 ในภาพที่ 83 ระบบกำลังทำงานอยู่ในช่วงของการลดความถี่ f_s จะกำหนดให้ทำการเพิ่มความถี่ f_s แทน

จากเงื่อนไขทั้ง 3 เงื่อนไข จะนำมาสร้างเป็นรหัสควบคุมที่ใช้ในการสั่งงานไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ควบคุมการทำงานของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์หมายเลข dsPIC30F4011 ของบริษัท Microchip (แสดงรหัสที่ใช้ในการควบคุมได้ดังตารางผนวกที่ ข1 ถึง ข7 ในภาคผนวก ข)

3. การทดลองระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำที่นำเสนอ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ (ICPT) และนำเสนอวิธีการควบคุมระบบ ICPT หรือระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด โดยการควบคุมความถี่สวิตช์ที่ทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายสูงสุด ดังนั้นเพื่อให้สามารถออกแบบวิธีการควบคุมที่นำเสนอ จึงทำการทดลองหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในระบบ ICPT ได้แก่ รูปร่างและขนาดของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ช่วงความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ที่ใช้งานและรูปแบบของการชดเชย

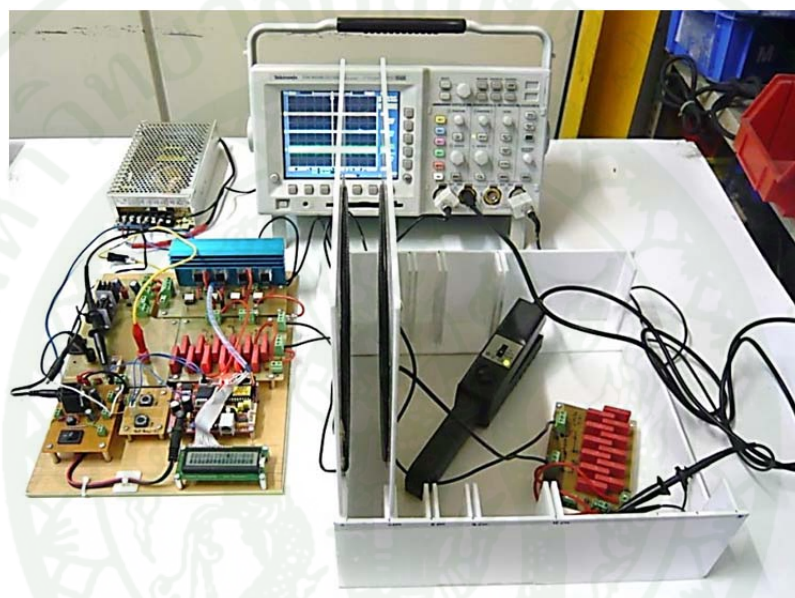
ด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้ง 4 แบบ และความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) ความถี่สวิตช์ (f_s) และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบวิธีการควบคุมระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ให้สามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด จากนั้นเพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้และวิธีการควบคุมด้วยการค้นหาความถี่ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการติดตามค่าไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง จึงทำการทดลองด้วยการเปรียบเทียบการชาร์จประจุให้อุปกรณ์ไฟฟ้าระหว่างระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้กับวิธีการชาร์จประจุแบบใช้สาย ดังนั้นขั้นตอนในการทดลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองหลักได้ดังนี้

3.1 การทดลองที่ 1 มีจุดประสงค์เพื่อทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากระแสตรง ความถี่สวิตช์และกำลังไฟฟ้าที่ด้านทุติยภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละการชดเชยการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ และความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำหรือ ICPT ดังนั้นการทดลองที่ 1 จะแบ่งการทดลองตามการพิจารณาความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรได้เป็นการทดลองที่ 1.1 ถึง 1.6 ดังนี้

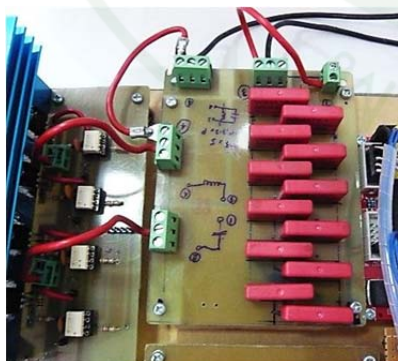
สำหรับการทดลองที่ 1.1 ถึง 1.4 เป็นการทดลองเพื่อทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากระแสตรง ความถี่สวิตช์และกำลังไฟฟ้าที่ด้านทุติยภูมิของระบบ ICPT เมื่อใช้การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในแต่ละรูปแบบ โดยการทดลองเลือกใช้ขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิเป็นขดลวดรูปแบบที่ 2 หรือขดลวดเกลียวราบแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 เซนติเมตร เนื่องจากขดลวดรูปแบบที่ 2 จะให้ค่าเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่ยวนำรวมที่มากที่สุดจากขดลวดทั้ง 3 รูปแบบ และกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างขดลวดเป็น 3 เซนติเมตร และภาระไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 10 โอห์ม โดยเปรียบเทียบผลของไฟฟ้ากระแสตรงและกำลังไฟฟ้าที่ด้านทุติยภูมิในช่วงความถี่สวิตช์ 3 ช่วงได้แก่

- กำหนดให้ความถี่สวิตช์ของระบบมีค่าน้อยกว่าความถี่เรโซแนนซ์ $f_s < f_r$
- กำหนดให้ความถี่สวิตช์ของระบบมีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ $f_s = f_r$
- กำหนดให้ความถี่สวิตช์ของระบบมีค่ามากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ $f_s > f_r$

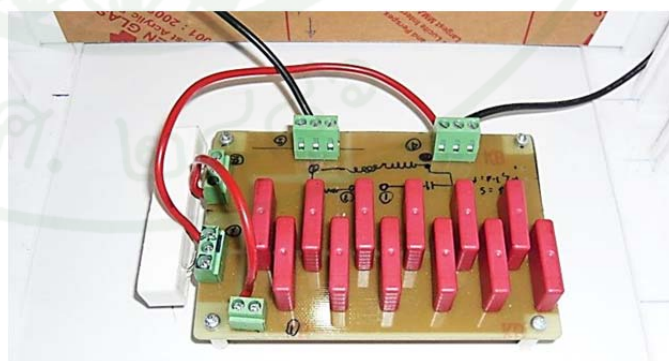
ซึ่งการทดลองที่ 1.1 ถึง 1.4 สามารถแสดงวงจรที่ใช้ในการทดลองได้ดังภาพที่ 85 ถึง ภาพที่ 88 โดยวงจรในภาพที่ 85 เป็นระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ที่ใช้รูปแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแบบ SS-Topology สำหรับการทดลองที่ 1.2 ถึง 1.4 ทำการทดลองโดยใช้วงจร เช่นเดียวกับภาพที่ 85 แต่เปลี่ยนการต่อตัวเก็บประจุให้เป็นไปตามแต่ละรูปแบบ แสดงการต่อตัวเก็บประจุบนแผงวงจรได้ดังภาพที่ 86 ถึงภาพที่ 88



ภาพที่ 85 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 1.1. รูปแบบ SS-Topology

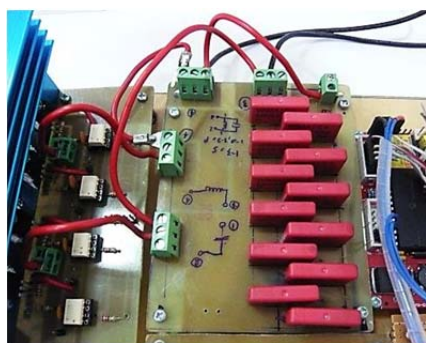


ภาพที่ 86-1) ต่ออนุกรมด้านปฐมภูมิ

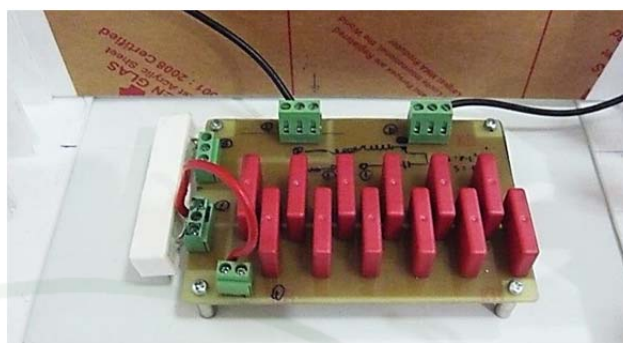


ภาพที่ 86-2) ต่อขนานด้านทุติยภูมิ

ภาพที่ 86 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 1.2. รูปแบบ SP-Topology

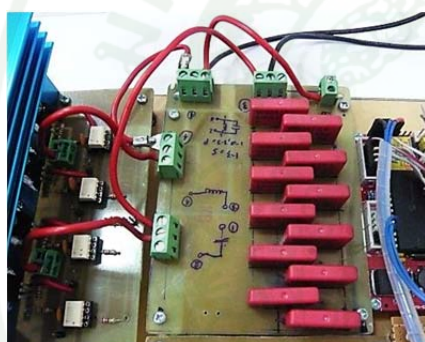


ภาพที่ 87-1) ต่อขานด้านปฐมภูมิ

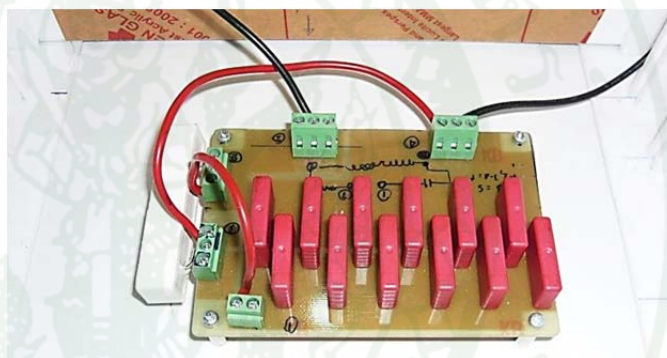


ภาพที่ 87-2) ต่อขานด้านทุติยภูมิ

ภาพที่ 87 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 1.3. รูปแบบ PS-Topology



ภาพที่ 88-1) ต่อขานด้านปฐมภูมิ



ภาพที่ 88-2) ต่อขานด้านทุติยภูมิ

ภาพที่ 88 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 1.4. รูปแบบ PP-Topology

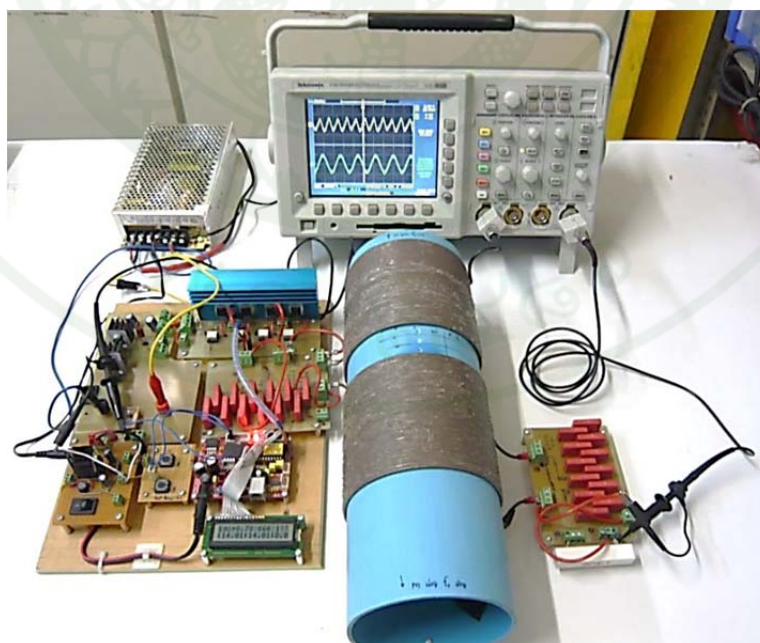
การทดลองที่ 1.5 ทดลองความสัมพันธ์ของรูปร่างและขนาดของขดลวดกับพฤติกรรมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ด้วยการเปรียบเทียบขดลวด 3 แบบได้แก่

- แบบที่ 1 ขดลวดโซลินอยด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร
- แบบที่ 2 ขดลวดเกลียวราบแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 เซนติเมตร
- แบบที่ 3 ขดลวดเกลียวราบแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร

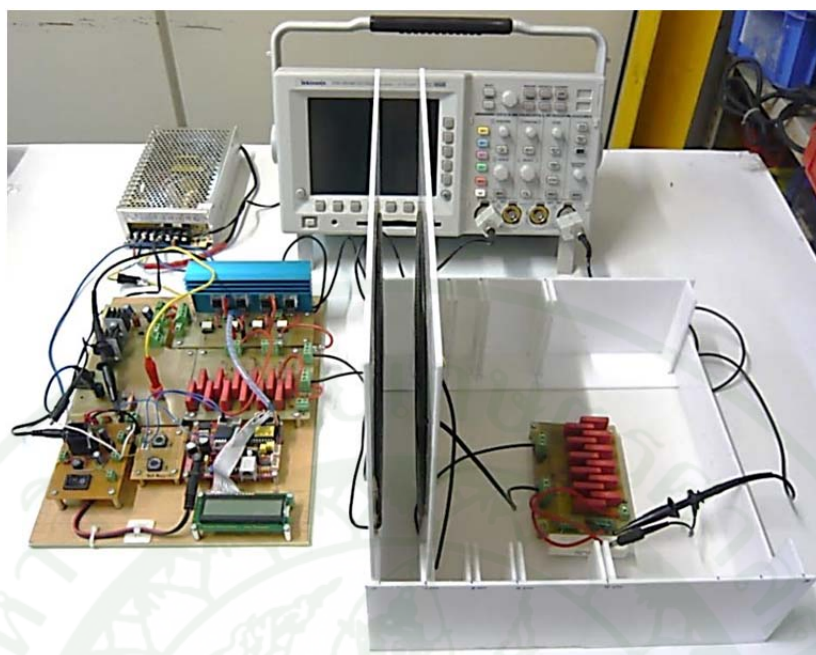
โดยทำการทดลองด้วยการกำหนดให้ใช้การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุด้วยรูปแบบ SS-Topology เนื่องจากการเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่ด้านปฐมภูมิมีค่าไม่ขึ้นกับรูปร่าง ขนาด และระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ และกำหนดให้ระยะห่างระหว่างขดลวดเป็น 3 เซนติเมตร และภาระไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 10 โอห์ม โดยทดลองในสภาวะที่ $f_s = f_r$ ซึ่งได้ออกแบบขดลวดและวงจรชดเชยการสูญเสียเพื่อให้ขดลวดแต่ละแบบมี f_r ที่เท่ากัน จากนั้นทำการทดลองในลักษณะเช่นเดียวกันกับขดลวดทั้ง 3 แบบ แสดงค่า L_s ของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้ขดลวดทั้ง 3 แบบมีค่า f_r ที่ใกล้เคียงกันได้ดังตารางที่ 38 และแสดงการทดลองที่ 1.5 ได้ดังภาพที่ 89 ถึงภาพที่ 91

ตารางที่ 38 ค่าของขดลวดและตัวเก็บประจุที่ทำให้ขดลวดทั้ง 3 แบบมีค่า f_r ที่เท่ากัน

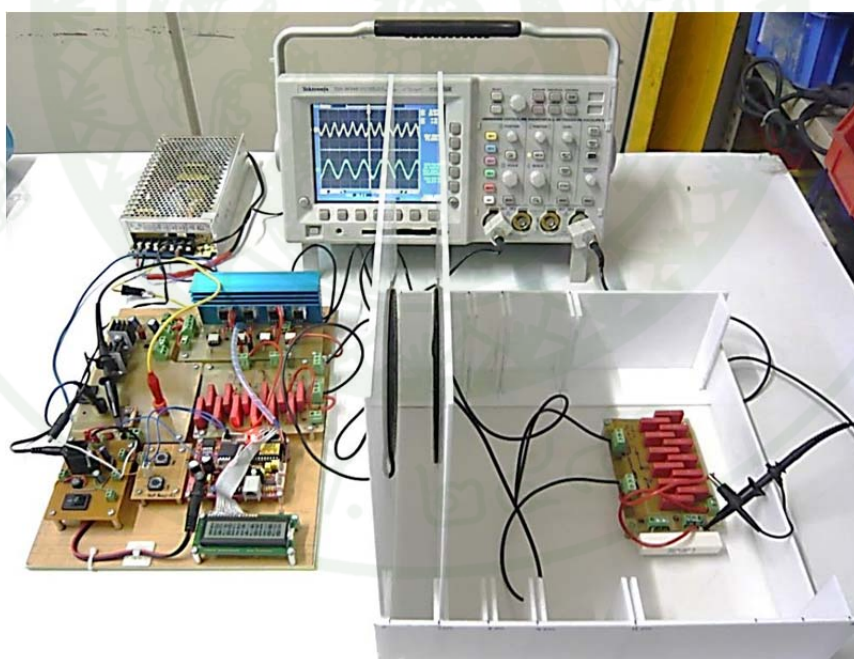
รูปแบบขดลวด	ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (L_s) ไมโครเฮนรี (μH)	ค่าตัวเก็บประจุ ไมโครฟารัด (μF)	ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) กิโลเฮิรตซ์ (kHz)
ขดลวดแบบที่ 1	117.60	1.2	13.39
ขดลวดแบบที่ 2	118.30	1.2	13.36
ขดลวดแบบที่ 3	19.28	7	13.70



ภาพที่ 89 การทดลองที่ 1.5 ด้วยขดลวดแบบที่ 1



ภาพที่ 90 การทดลองที่ 1.5 ด้วยขดลวดแบบที่ 2



ภาพที่ 91 การทดลองที่ 1.5 ด้วยขดลวดแบบที่ 3

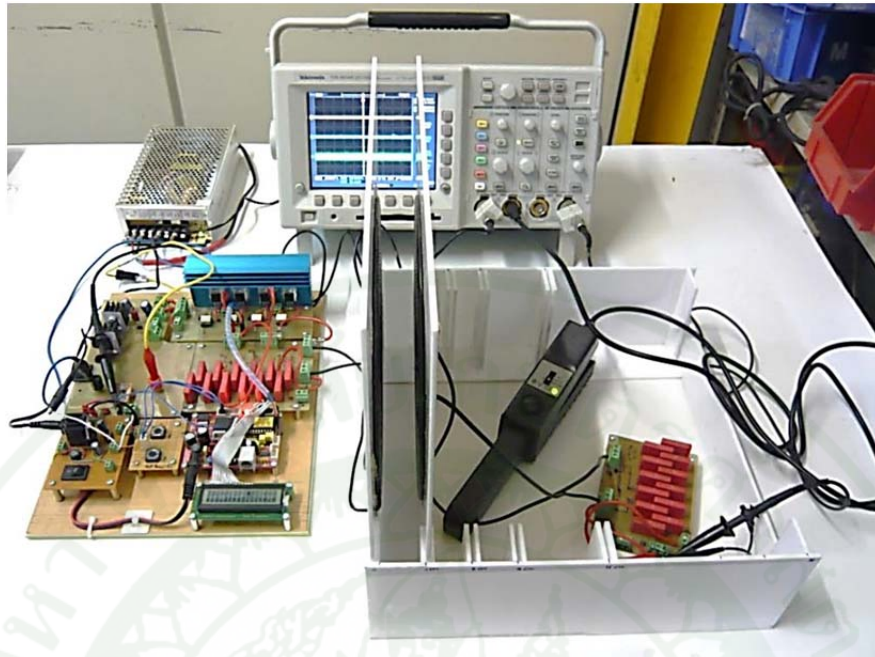
การทดลองที่ 1.6 ทดลองความสัมพันธ์ของช่วงความถี่เรโซแนนซ์และระยะห่างของขดลวดกับพฤติกรรมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ด้วยการเปรียบเทียบความถี่เรโซแนนซ์ 2 ช่วงได้แก่

- กำหนดให้ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบมีค่าเป็น f_{r1}
- กำหนดให้ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบมีค่าเป็น f_{r2}

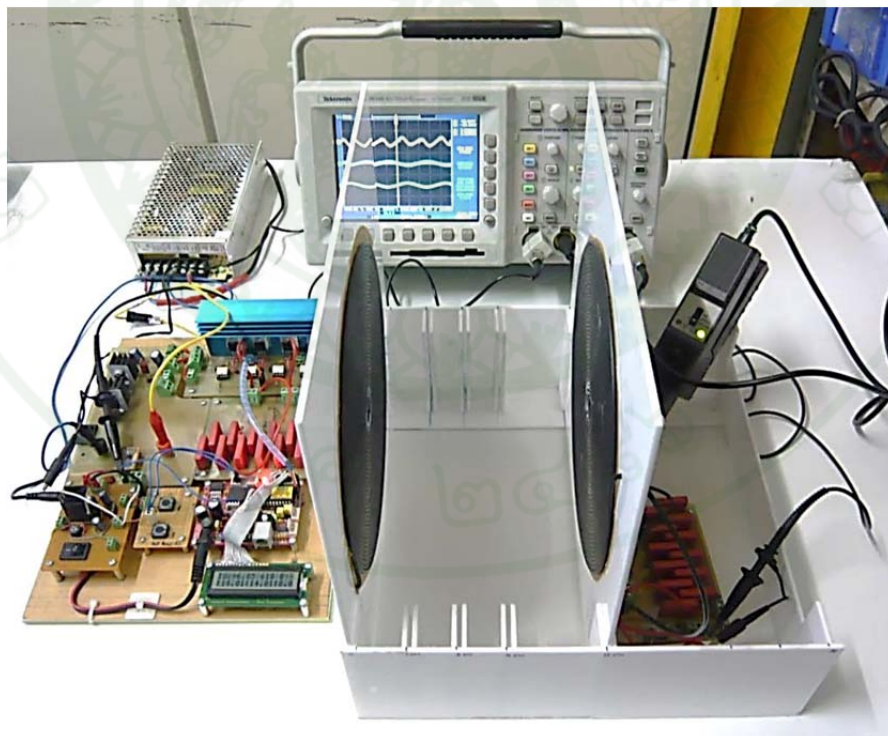
ทำการทดลองด้วยการกำหนดให้ขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิเป็นขดลวดรูปแบบที่ 2 หรือขดลวดเกลียวราบแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 เซนติเมตร โดยทดลองที่แต่ละความถี่เรโซแนนซ์ด้วยระยะห่างระหว่างขดลวด 2 ระยะได้แก่เป็น 3 เซนติเมตร และ 15 เซนติเมตร เมื่อให้ภาระไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 10 โอห์ม และใช้การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแบบ SS Topology เนื่องจากการเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่ด้านปฐมภูมิมิค่าไม่ขึ้นกับรูปร่าง ขนาดและระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ แสดงค่าตัวเก็บประจุและค่าความถี่ f_{rn} ได้ดังตารางที่ 39 และแสดงการทดลองที่ 1.5 ได้ดังภาพที่ 92 ถึงภาพที่ 95

ตารางที่ 39 ค่าตัวเก็บประจุและค่า f_{rn} ในการทดลองที่ 1.6

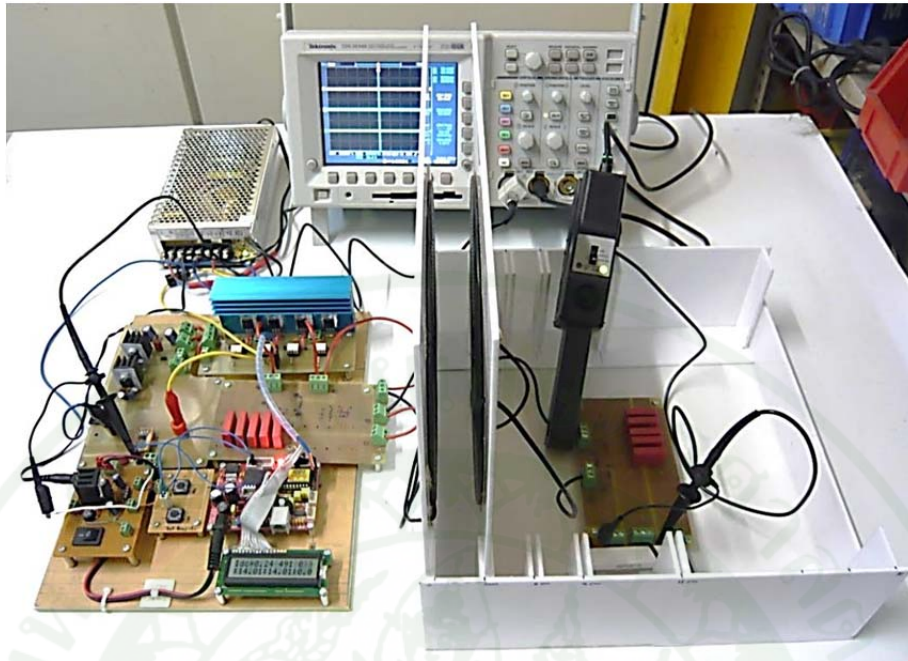
ช่วงความถี่	ค่าตัวเก็บประจุ ไมโครฟารัด (μF)	ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)
f_{r1}	1.2	13.36
f_{r2}	0.5	20.75



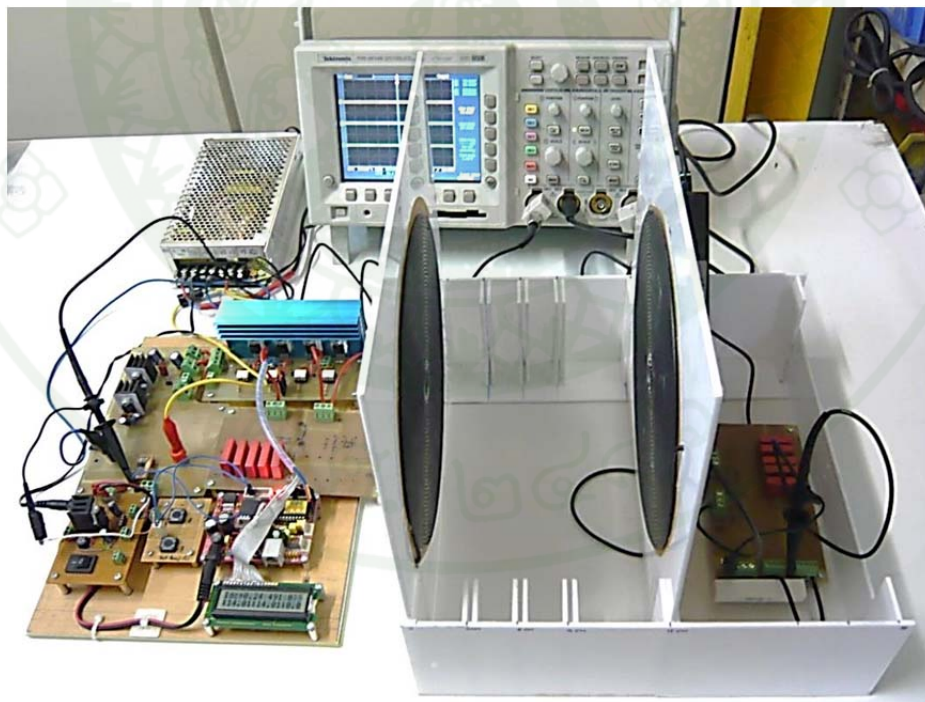
ภาพที่ 92 การทดลองที่ 1.6 ที่ความถี่ f_{r1} ระยะห่างขดลวด 3 เซนติเมตร



ภาพที่ 93 การทดลองที่ 1.6 ที่ความถี่ f_{r1} ระยะห่างขดลวด 15 เซนติเมตร

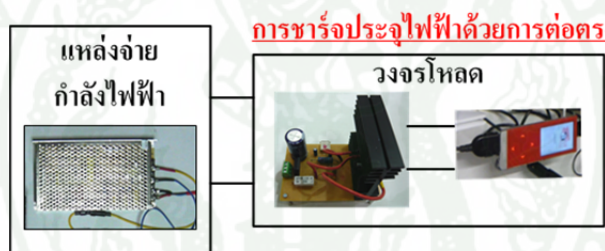


ภาพที่ 94 การทดลองที่ 1.6 ที่ความถี่ f_{r2} ระยะห่างขดลวด 3 เซนติเมตร

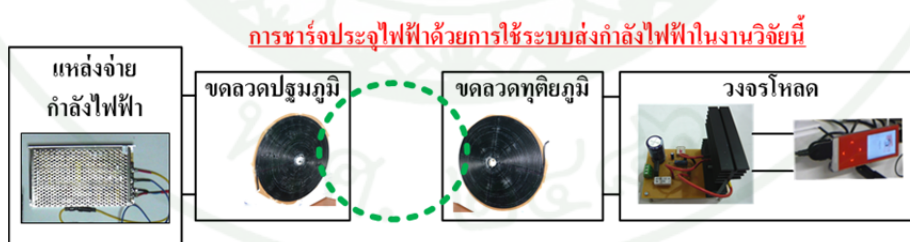


ภาพที่ 95 การทดลองที่ 1.6 ที่ความถี่ f_{r2} ระยะห่างขดลวด 15 เซนติเมตร

3.2 การทดลองที่ 2 มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควมเหนี่ยวนำที่ใช้วิธีการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ในการใช้งานจริง ด้วยการนำระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ มาใช้ชาร์จประจุไฟฟ้าให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทางการเชื่อมต่อแบบ USB โดยเปรียบเทียบกับวิธีการชาร์จประจุไฟฟ้าให้อุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านทาง การเชื่อมต่อแบบ USB ในลักษณะต่อตรง ในการทดลองได้เลือกกระบบรูปแบบ SS-Topology และขดลวดในแบบที่ 2 เป็นวงจรในการทดลอง โดยทำการทดลองวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) ,กระแสไฟฟ้าที่โหลดได้รับ (I_O) และแรงดันไฟฟ้าที่โหลดได้รับ (V_O) จากการชาร์จแบบต่อตรงและจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ที่ระยะห่างระหว่างขดลวดที่ 0 เซนติเมตร ,3 เซนติเมตร ,6 เซนติเมตร ,9 เซนติเมตร และ 15 เซนติเมตร โดยเลือกทดลองที่ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเป็น $f_r = f_{r2}$ หรือมีค่าประมาณ 20.27 กิโลเฮิรตซ์ สามารถแสดงแผนภาพการทดลองที่ 2 ได้ดังภาพที่ 96 (ก) และ (ข) นอกจากนี้สามารถแสดงการทดลองจริงได้ดังภาพที่ 97 ถึงภาพที่ 102



(96-1) การชาร์จประจุไฟฟ้าด้วยการต่อตรงจากแหล่งจ่าย

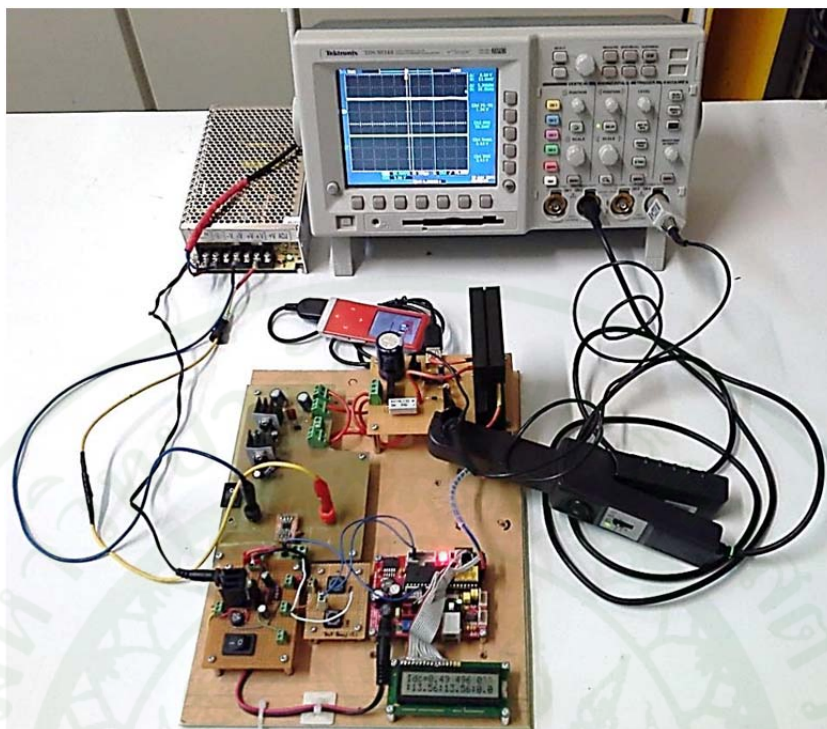


(96-2) การชาร์จประจุไฟฟ้าด้วยการใช้ระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้

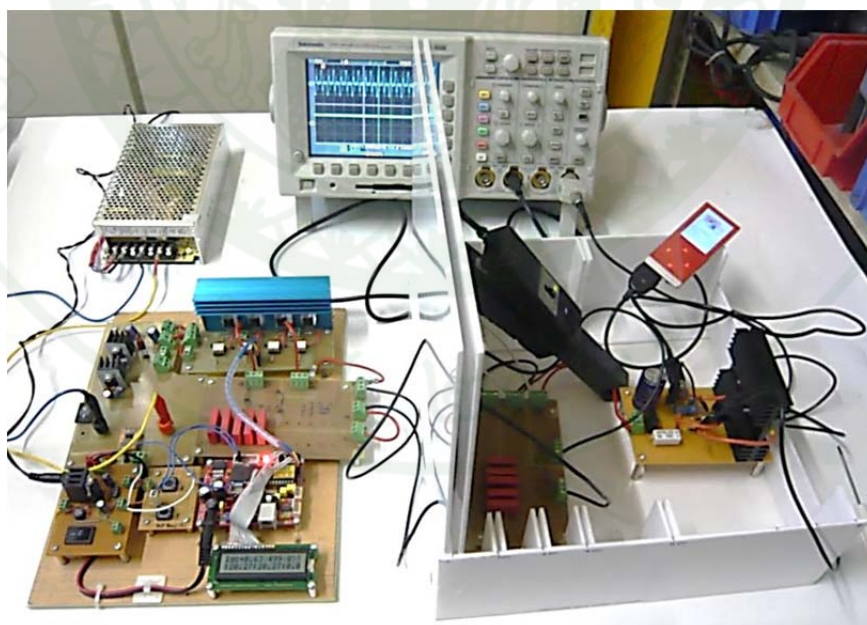
ภาพที่ 96 แผนภาพการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้

(96-1) การชาร์จประจุไฟฟ้าด้วยการต่อตรงจากแหล่งจ่าย

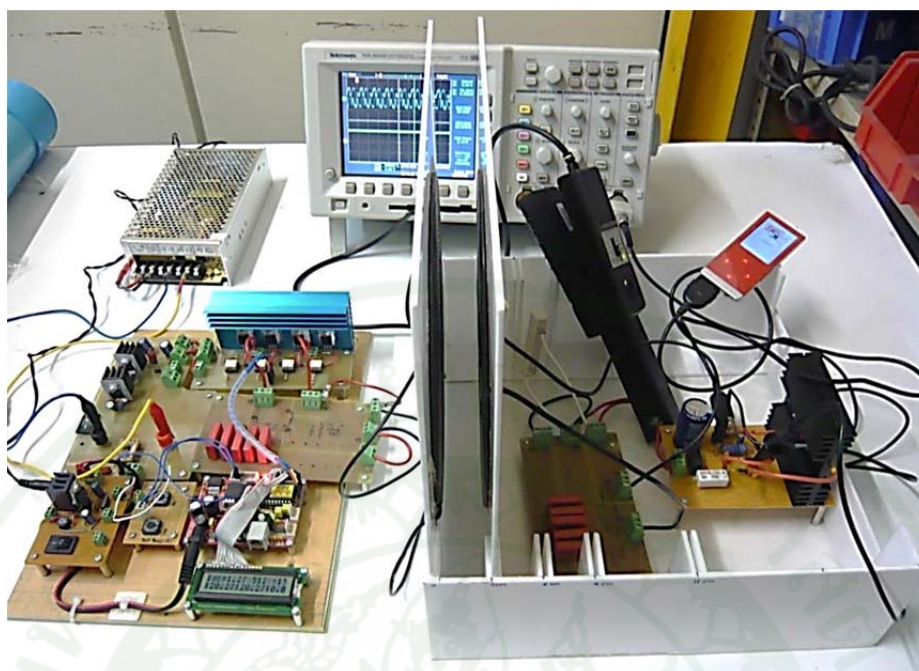
(96-2) การชาร์จประจุไฟฟ้าด้วยการใช้ระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้



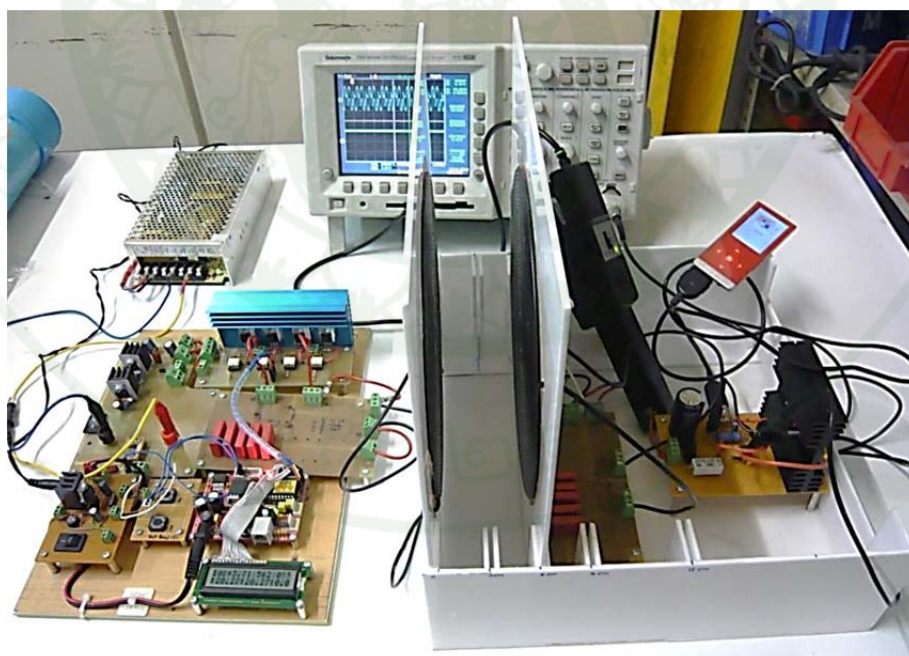
ภาพที่ 97 การทดลองที่ 2 การชาร์จประจุไฟฟ้าด้วยการต่อตรงจากแหล่งจ่าย



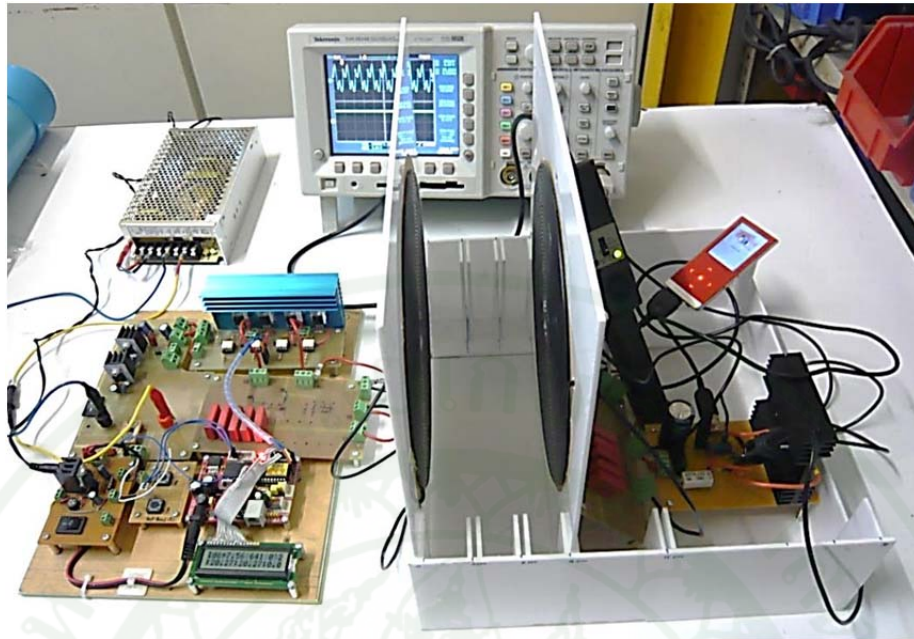
ภาพที่ 98 การทดลองที่ 2 ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 0 เซนติเมตร



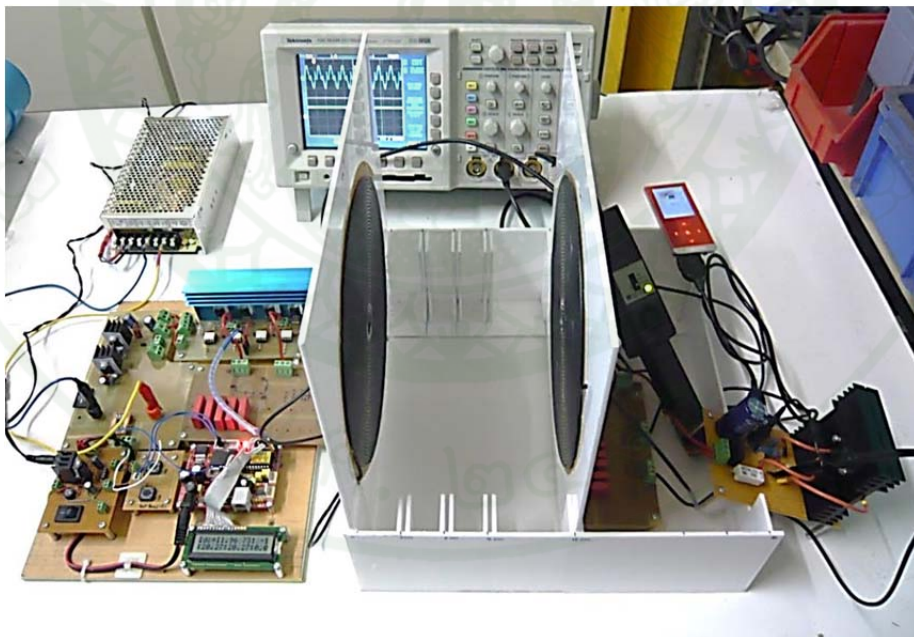
ภาพที่ 99 การทดลองที่ 2 ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 3 เซนติเมตร



ภาพที่ 100 การทดลองที่ 2 ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 6 เซนติเมตร



ภาพที่ 101 การทดลองที่ 2 ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 9 เซนติเมตร



ภาพที่ 102 การทดลองที่ 2 ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 15 เซนติเมตร

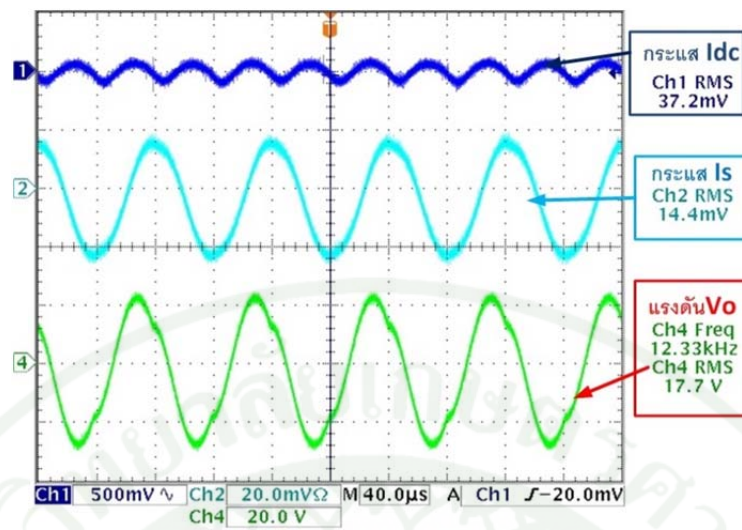
ผลและวิจารณ์

ผล

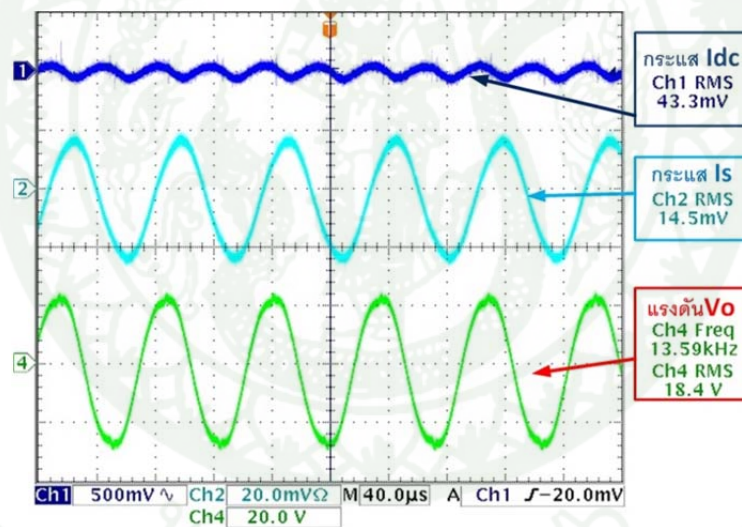
หลังจากทำการสร้างวงจรและอุปกรณ์ต่างๆสำหรับระบบ ICPT หรือระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ตามที่ได้ออกแบบไว้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว เพื่อเป็นการยืนยันการทำงานของระบบที่ได้ออกแบบไว้ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ในส่วนนี้จึงกล่าวถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองตามขั้นตอนการทดลองที่กำหนดไว้ ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักได้แก่ ส่วนที่ 1 ผลของการทดลองเพื่อให้เข้าใจความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกับพฤติกรรมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ และส่วนที่ 2 ผลการทดลองประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ สามารถแสดงผลการทดลองทั้ง 2 ส่วนได้ดังนี้

1. ผลการทดลองที่ 1 เพื่อให้เข้าใจความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกับพฤติกรรมของระบบ ICPT จะแบ่งการทดลองออกเป็น 1.1 ถึง 1.6 ตามตัวแปรที่ต้องการศึกษา ได้แก่ รูปแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) ของวงจรด้านปฐมภูมิรูปร่างและขนาดของขดลวด, และช่วงความถี่เรโซแนนซ์ที่เลือกใช้ (f_{r1}, f_{r2}) ซึ่งในการทดลองจะทำการวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) และแรงดันไฟฟ้าที่โหลด (V_o) ของแต่ละการทดลองย่อย จะได้ผลการทดลองที่ 1.1 ถึง 1.6 ได้ดังนี้

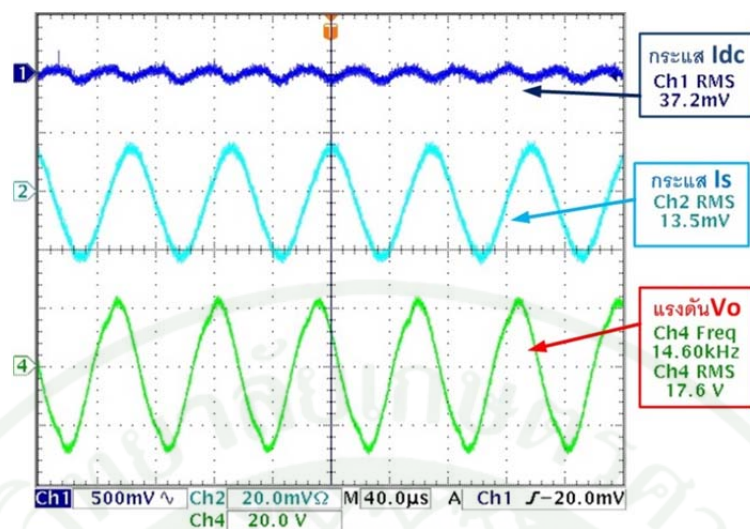
ผลการทดลองที่ 1.1 ทดลองความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) แรงดันไฟฟ้าขาออก (V_o) และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) ที่ความถี่ f_s แต่ละช่วง เมื่อใช้การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในรูปแบบ SS-Topology โดยทำการวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายและแรงดันไฟฟ้าที่โหลดในช่วงความถี่สวิตซิ่งที่เลือกใช้งานได้ผลดังภาพที่ 103 ถึงภาพที่ 105



ภาพที่ 103 สัญญาณ I_{DC} และ V_o จากการทดลองที่ 1.1 ในกรณีที่ $f_s < f_r$



ภาพที่ 104 สัญญาณ I_{DC} และ V_o จากการทดลองที่ 1.1 ในกรณีที่ $f_s = f_r$

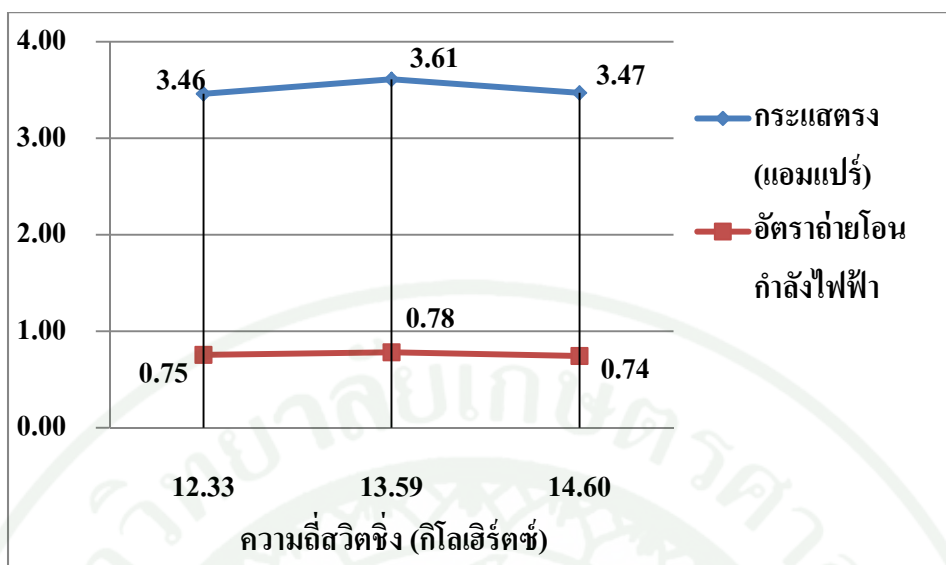


ภาพที่ 105 สัญญาณ I_{DC} และ V_o จากการทดลองที่ 1.1 ในกรณีที่ $f_s > f_r$

นำผลดังภาพที่ 103 ถึงภาพที่ 105 ทำการเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างที่ความถี่ f_s แต่ละช่วงแสดงได้ดังตารางที่ 40 และภาพที่ 106

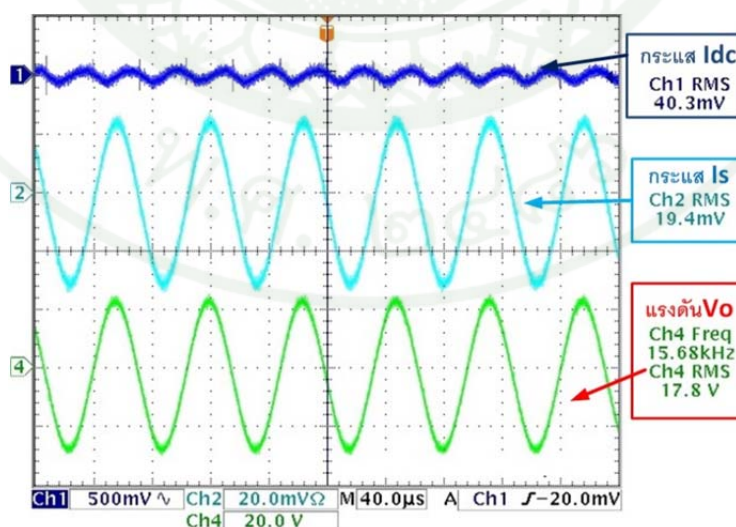
ตารางที่ 40 ผลการทดลองที่ 1.1

ช่วง ความถี่	ความถี่สวิตชิง (f_s) กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)	กระแสไฟฟ้า I_{DC} (แอมแปร์)	แรงดันไฟฟ้าที่ โหลด (V_o) (โวลต์)	อัตราการถ่ายโอน กำลังไฟฟ้า ($\frac{P_o}{P_i}$)
$f_s < f_r$	12.33	3.46	17.70	0.75
$f_s = f_r$	13.59	3.61	18.40	0.78
$f_s > f_r$	14.60	3.47	17.60	0.74

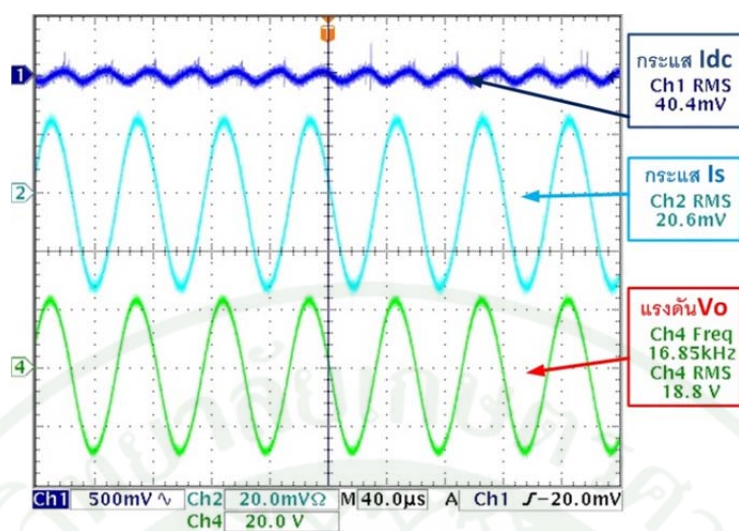


ภาพที่ 106 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 1.1

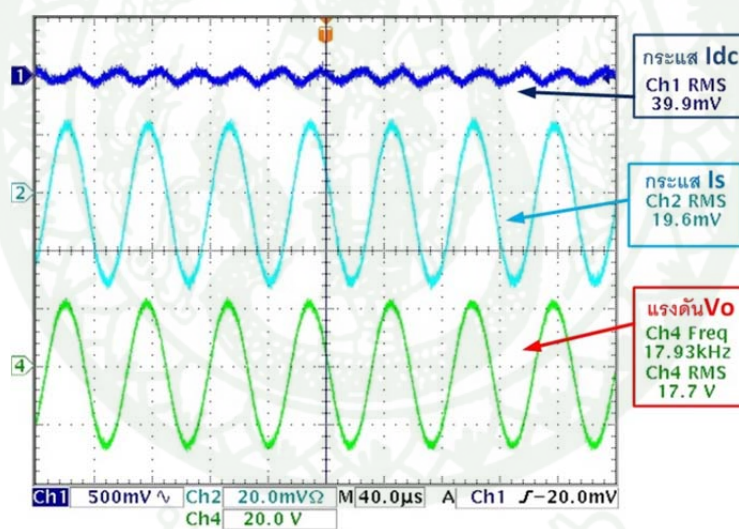
ผลการทดลองที่ 1.2 ทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสตรง (I_{DC}) แรงดันไฟฟ้าขาออก (V_o) และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) ที่ความถี่ f_s แต่ละช่วง เมื่อใช้การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในรูปแบบ SP-Topology โดยทำการวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายและแรงดันไฟฟ้าที่โหลดในช่วงความถี่สวิตช์ที่เลือกใช้งานได้ผลดังภาพที่ 107 ถึงภาพที่ 109



ภาพที่ 107 สัญญาณ I_{DC} และ V_o จากการทดลองที่ 1.2 ในกรณีที่ $f_s < f_r$



ภาพที่ 108 สัญญาณ I_{DC} และ V_o จากการทดลองที่ 1.2 ในกรณีที่ $f_s = f_r$

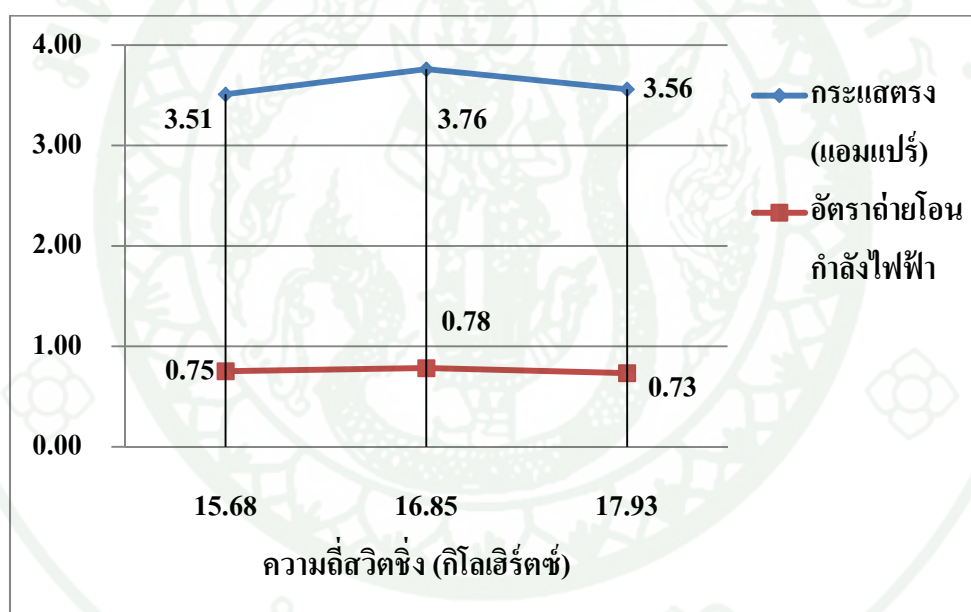


ภาพที่ 109 สัญญาณ I_{DC} และ V_o จากการทดลองที่ 1.2 ในกรณีที่ $f_s > f_r$

นำผลจากภาพที่ 107 ถึงภาพที่ 109 ทำการเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างที่ความถี่ f_s แต่
 ช่วงแสดงได้ดังตารางที่ 41 และภาพที่ 110

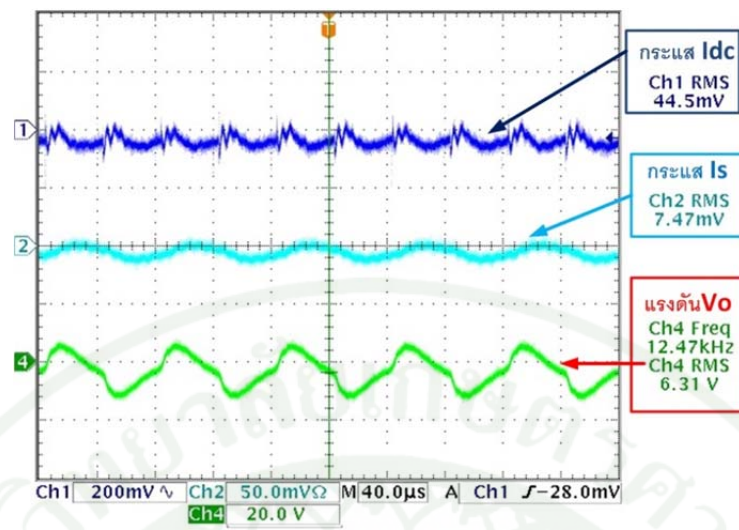
ตารางที่ 41 ผลการทดลองที่ 1.2

ช่วงความถี่	ความถี่สวิตชิง (f_s) กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)	กระแสไฟฟ้า I_{DC} (แอมแปร์)	แรงดันไฟฟ้าที่ โหลด (V_o) (โวลต์)	อัตราการถ่ายโอน กำลังไฟฟ้า ($\frac{P_o}{P_i}$)
$f_s < f_r$	15.68	3.51	17.80	0.75
$f_s = f_r$	16.85	3.76	18.80	0.78
$f_s > f_r$	17.93	3.56	17.70	0.73

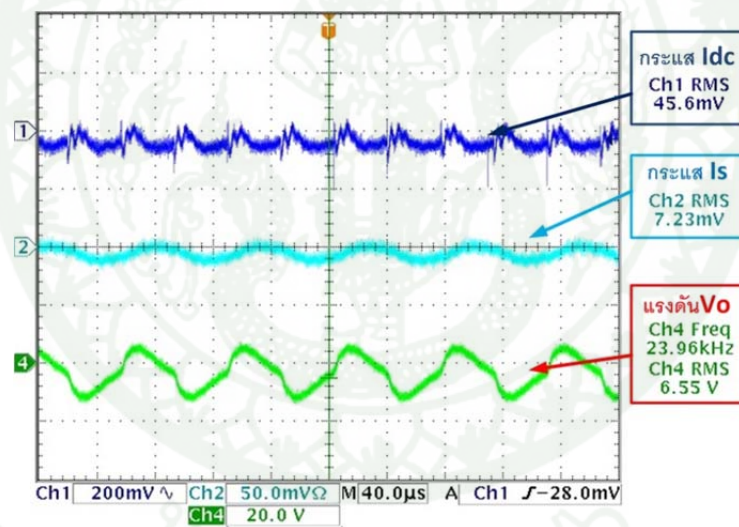


ภาพที่ 110 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 1.2

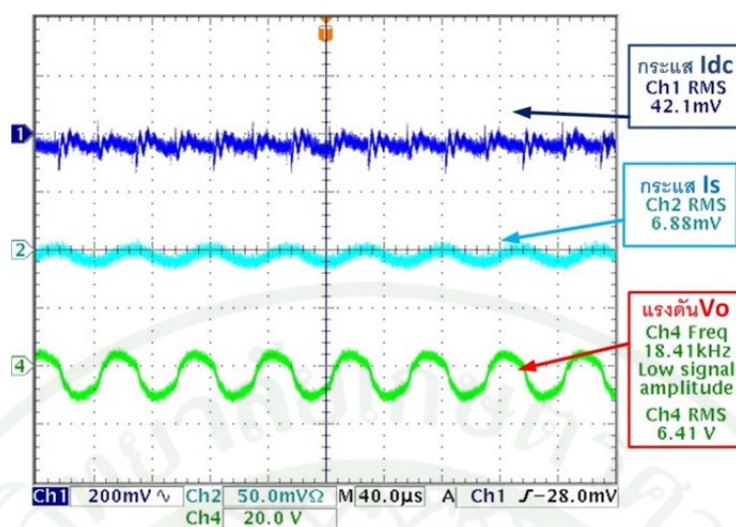
ผลการทดลองที่ 1.3 ทดลองความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) แรงดันไฟฟ้าขาออก (V_o) และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) ที่ความถี่ f_s แต่ละช่วง เมื่อใช้การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในรูปแบบ PS-Topology โดยทำการวัดสัญญาณกระแสตรงจากแหล่งจ่ายและแรงดันไฟฟ้าที่โหลดในช่วงความถี่สวิตชิงที่เลือกใช้งานได้ผลดังภาพที่ 111 ถึงภาพที่ 113



ภาพที่ 111 สัญญาณ I_{DC} และ V_o จากการทดลองที่ 1.3 ในกรณีที่ $f_s < f_r$



ภาพที่ 112 สัญญาณ I_{DC} และ V_o จากการทดลองที่ 1.3 ในกรณีที่ $f_s = f_r$

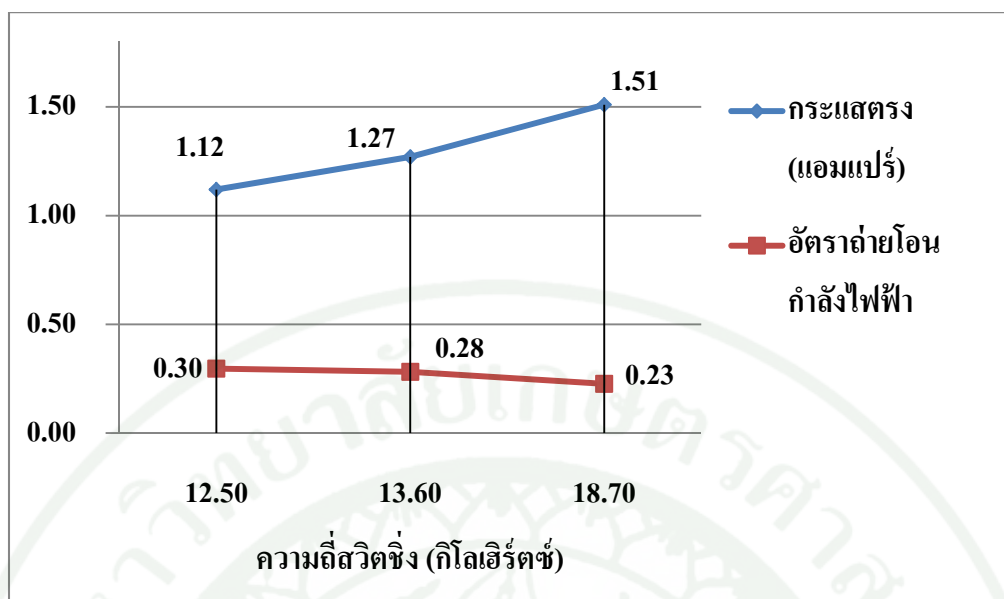


ภาพที่ 113 สัญญาณ I_{DC} และ V_o จากการทดลองที่ 1.3 ในกรณีความถี่ $f_s > f_r$

นำผลดังภาพที่ 111 ถึงภาพที่ 113 ทำการเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างที่ความถี่ f_s ในแต่ละช่วงแสดงได้ดังตารางที่ 42 และภาพที่ 114

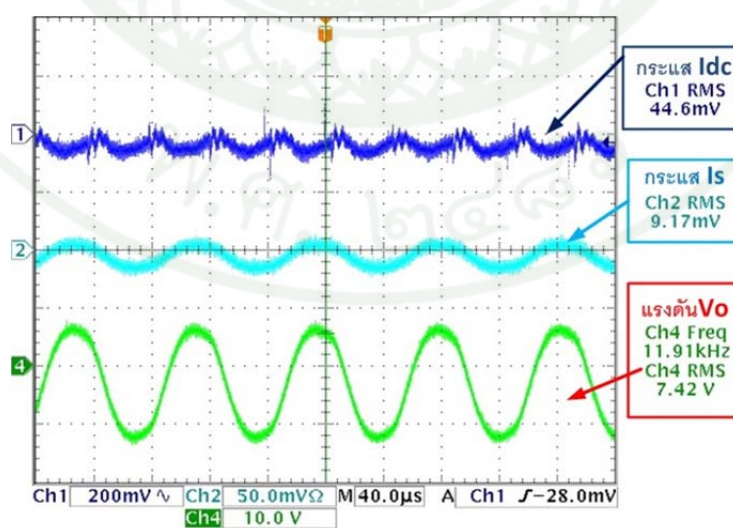
ตารางที่ 42 ผลการทดลองที่ 1.3

ช่วง ความถี่	ความถี่สวิตชิง (f_s) กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)	กระแสไฟฟ้า I_{DC} (แอมแปร์)	แรงดันไฟฟ้าที่ โหลด (V_o) (โวลต์)	อัตราถ่ายโอน กำลังไฟฟ้า ($\frac{P_o}{P_i}$)
$f_s < f_r$	12.5	1.12	6.31	0.30
$f_s = f_r$	13.6	1.27	6.55	0.28
$f_s > f_r$	18.7	1.51	6.41	0.23

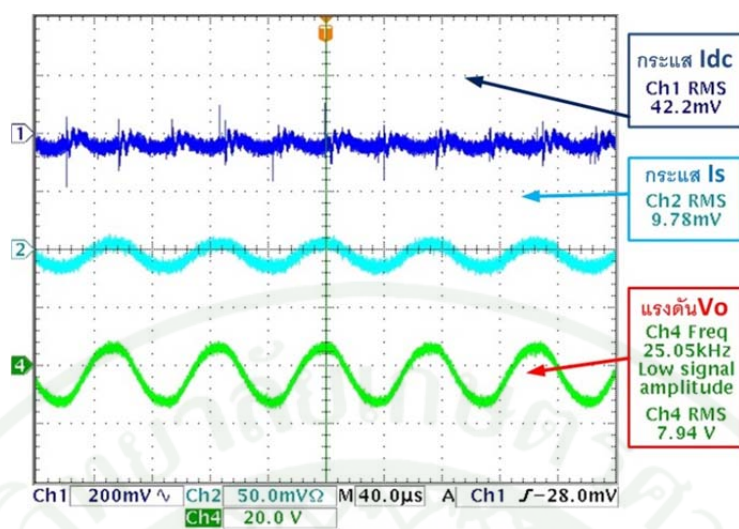


ภาพที่ 114 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 1.3

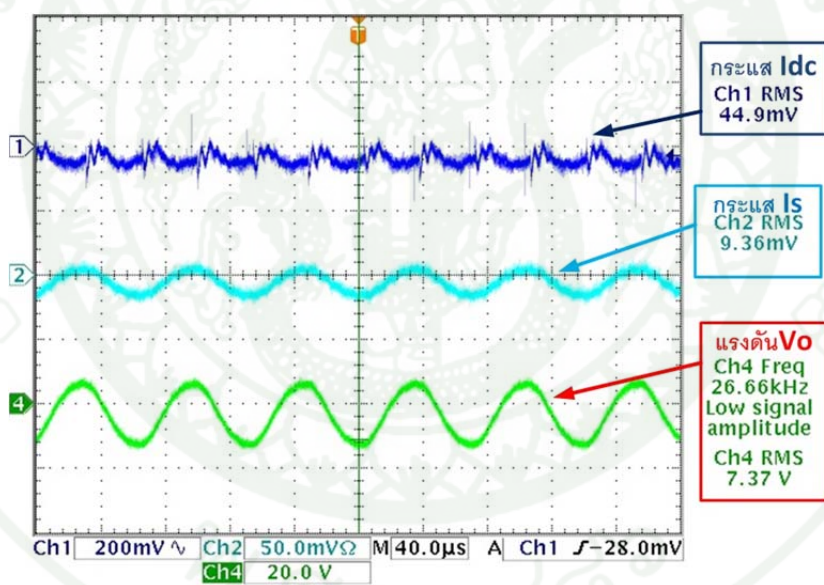
ผลการทดลองที่ 1.4 ทดลองความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) แรงดันไฟฟ้าขาออก (V_o) และกำลังไฟฟ้าที่โหลด (P_o) ที่ความถี่ f_s แต่ละช่วง เมื่อใช้การชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุในรูปแบบ PP-Topology โดยทำการวัดสัญญาณกระแสตรงจากแหล่งจ่ายและแรงดันไฟฟ้าที่โหลดในช่วงความถี่สวิตชิงที่เลือกใช้งานได้ผลดังภาพที่ 115 ถึงภาพที่ 117



ภาพที่ 115 สัญญาณ I_{DC} และ V_o จากการทดลองที่ 1.4 ในกรณีที่ $f_s < f_r$



ภาพที่ 116 สัญญาณ I_{DC} และ V_o จากการทดลองที่ 1.4 ในกรณีความถี่ $f_s = f_r$

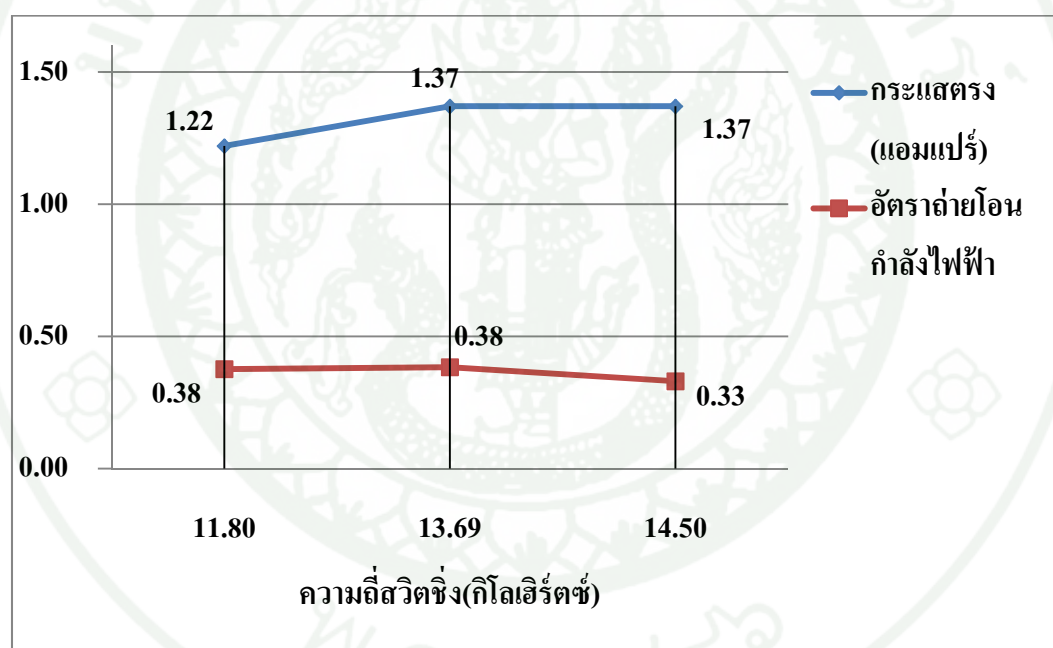


ภาพที่ 117 สัญญาณ I_{DC} และ V_o จากการทดลองที่ 1.4 ในกรณีความถี่ $f_s > f_r$

นำผลดังภาพที่ 115 ถึงภาพที่ 117 ทำการเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างที่ความถี่ f_s ในแต่ละช่วงแสดงได้ดังตารางที่ 43 และภาพที่ 118

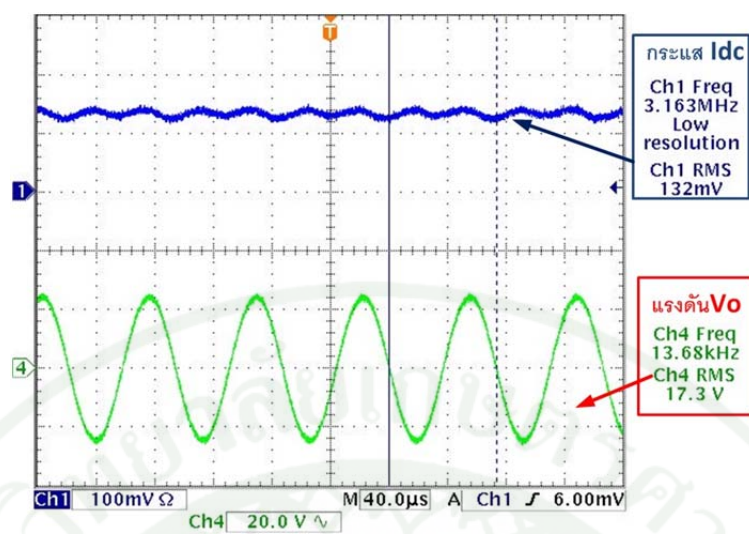
ตารางที่ 43 ผลการทดลองที่ 1.4

ช่วงความถี่	ความถี่สวิตช์ (f_s) กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)	กระแสไฟฟ้า I_{DC} (แอมแปร์)	แรงดันไฟฟ้าที่ โหลด (V_o) (โวลต์)	อัตราการถ่ายโอน กำลังไฟฟ้า ($\frac{P_o}{P_i}$)
$f_s < f_r$	11.8	1.22	7.42	0.38
$f_s = f_r$	13.69	1.37	7.94	0.38
$f_s > f_r$	14.5	1.37	7.37	0.33

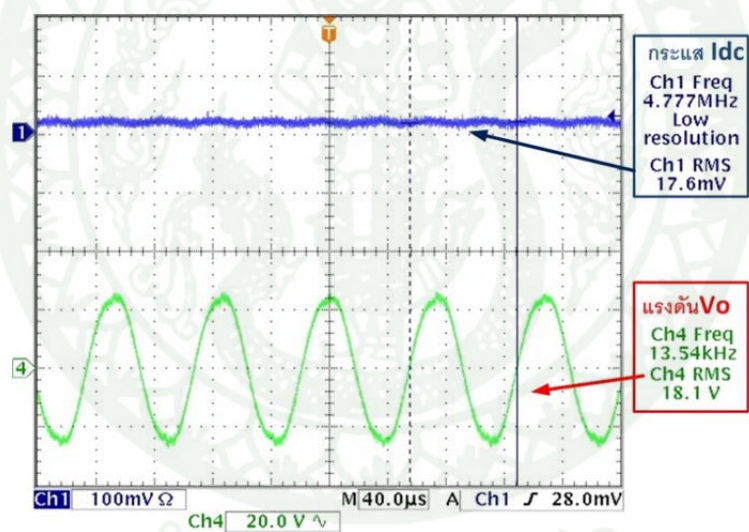


ภาพที่ 118 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 1.4

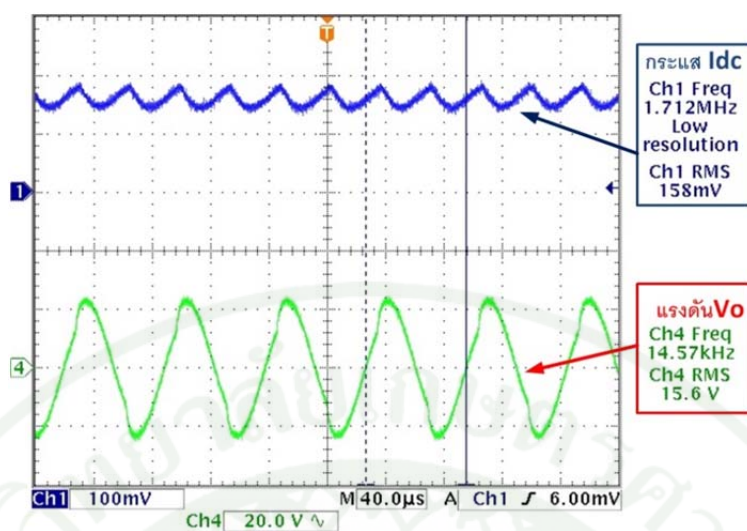
ผลการทดลองที่ 1.5 ทดลองความสัมพันธ์ของรูปร่างและขนาดของขดลวดกับพฤติกรรมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ โดยทำการวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายและแรงดันไฟฟ้าที่โหลดในขณะที่ความถี่ $f_s = f_r$ และทำการเปลี่ยนขดลวดที่ใช้งานทั้ง 3 แบบได้ผลดังภาพที่ 119 ถึงภาพที่ 121



ภาพที่ 119 ผลการทดลองที่ 1.5 ในกรณีขดลวดแบบที่ 1



ภาพที่ 120 ผลการทดลองที่ 1.5 ในกรณีขดลวดแบบที่ 2

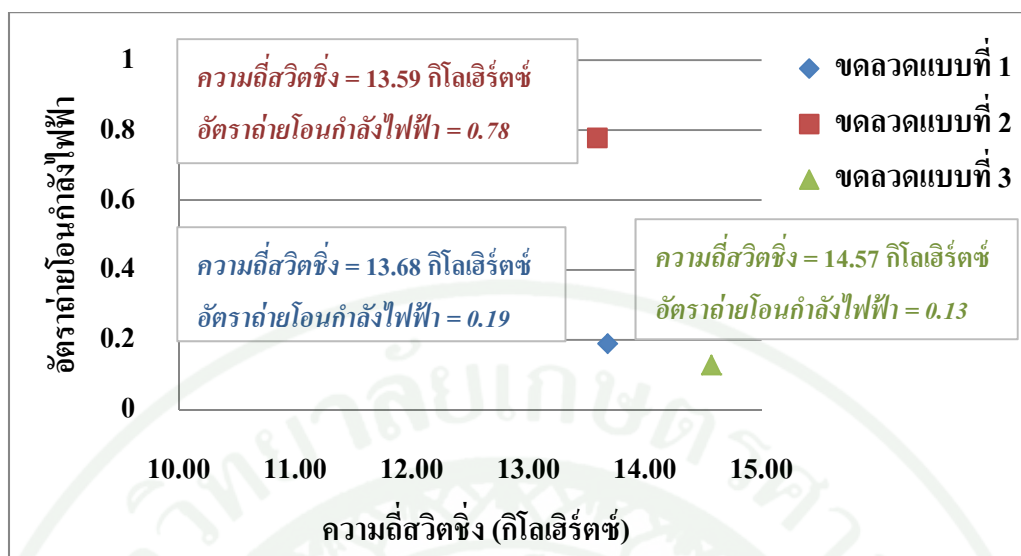


ภาพที่ 121 ผลการทดลองที่ 1.5 ในกรณีขดลวดแบบที่ 3

นำผลดังภาพที่ 119 ถึงภาพที่ 121 ทำการเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างของขดลวดในแต่ละแบบแสดงได้ดังตารางที่ 44 และภาพที่ 122

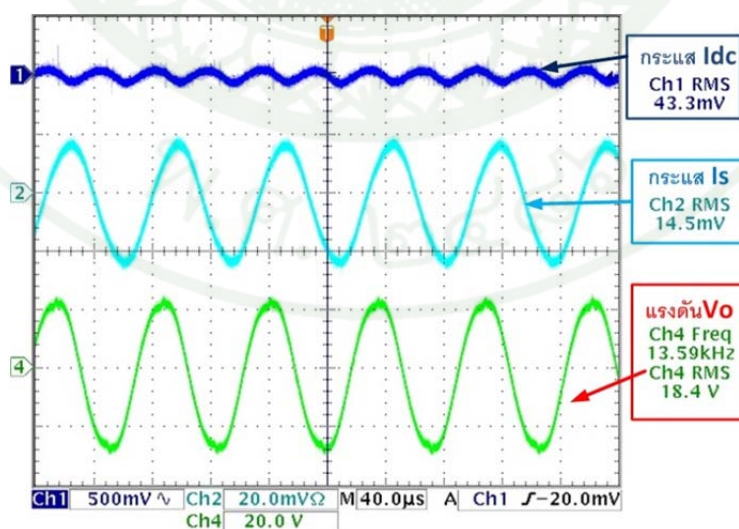
ตารางที่ 44 ผลการทดลองที่ 1.5

ช่วงความถี่	ความถี่สวิตชิง (f_s) กิโลเฮิรต์ซ์ (kHz)	กระแสไฟฟ้า I_{DC} (แอมแปร์)	แรงดันไฟฟ้าที่ โหลด (V_o) (โวลต์)	อัตราการถ่ายโอน กำลังไฟฟ้า ($\frac{P_o}{P_i}$)
แบบที่ 1	13.68	13.20	17.30	0.19
แบบที่ 2	13.59	3.61	18.40	0.78
แบบที่ 3	14.57	15.8	15.6	0.13

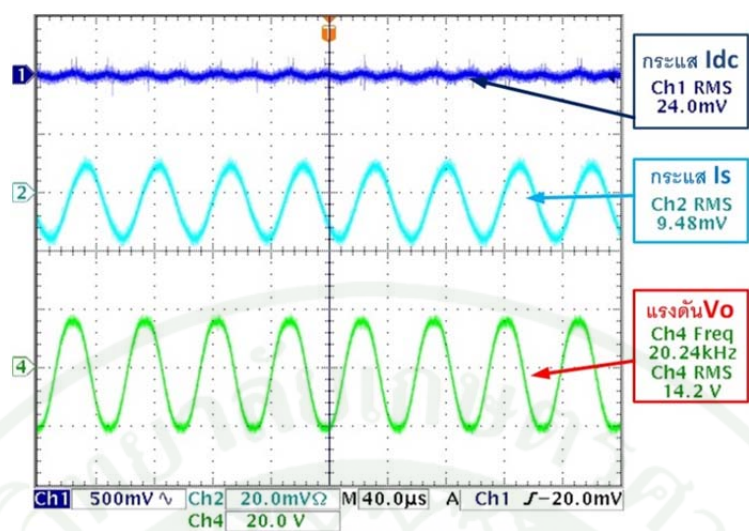


ภาพที่ 122 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 1.5

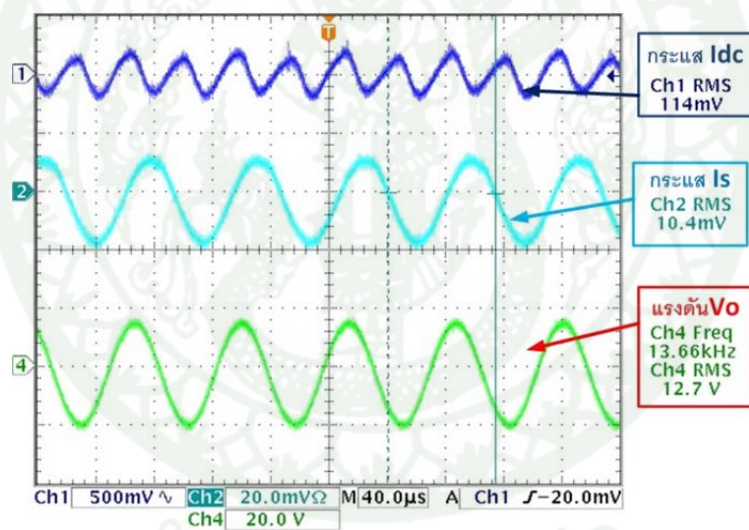
ผลการทดลองที่ 1.6 ทดลองความสัมพันธ์ของช่วงความถี่ f_r กับพฤติกรรมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ โดยทำการวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายและแรงดันไฟฟ้าที่โหลด เมื่อทำการเปลี่ยนความถี่ f_r เป็น 2 ช่วงได้แก่ ช่วงความถี่เรโซแนนซ์ที่ 1 หรือ $f_r = f_{r1}$ และช่วงความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2 หรือ $f_r = f_{r2}$ ได้ผลดังภาพที่ 123 ถึงภาพที่ 126



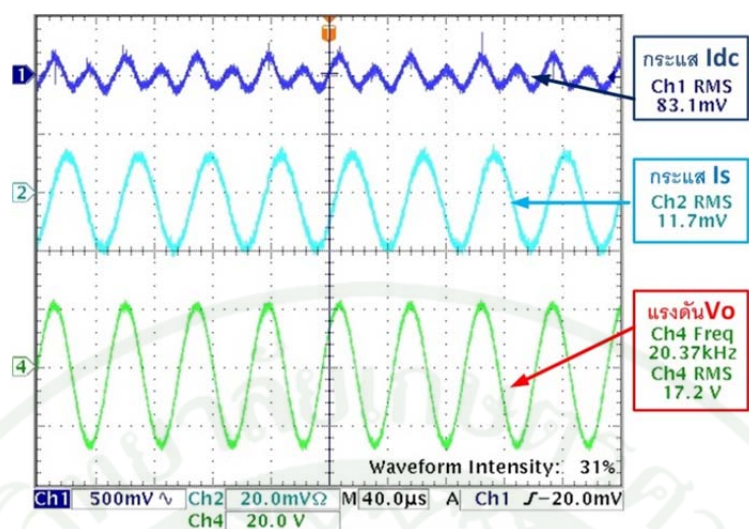
ภาพที่ 123 ผลการทดลองที่ 1.6 สำหรับความถี่ $f_r = f_{r1}$ ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร



ภาพที่ 124 ผลการทดลองที่ 1.6 สำหรับความถี่ $f_r = f_{r2}$ ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร



ภาพที่ 125 ผลการทดลองที่ 1.6 สำหรับความถี่ $f_r = f_{r1}$ ที่ระยะห่าง 15 เซนติเมตร

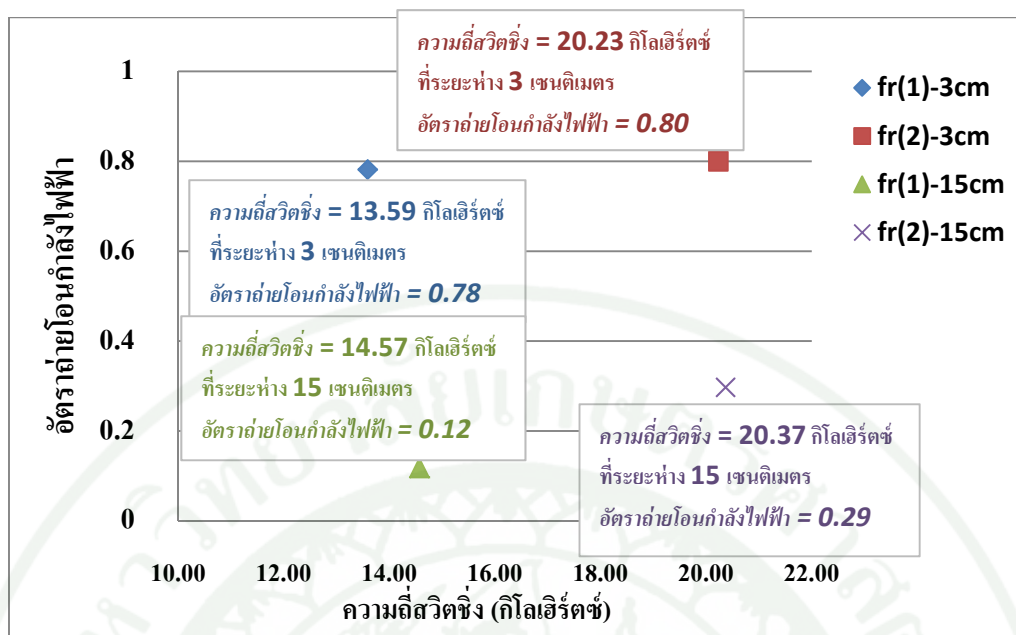


ภาพที่ 126 ผลการทดลองที่ 1.6. สำหรับ $f_r = f_{r2}$ ที่ระยะห่าง 15 เซนติเมตร

นำผลดังภาพที่ 123 ถึงภาพที่ 126 ทำการเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างที่ความถี่ f_r ที่ต่างกัน แสดงได้ดังตารางที่ 45 และภาพที่ 127

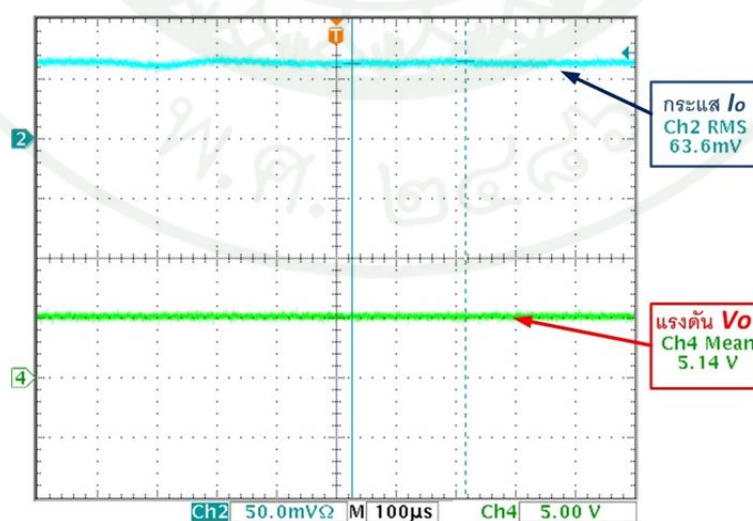
ตารางที่ 45 ผลการทดลองที่ 1.6

ระยะห่าง (เซนติเมตร)	ช่วงความถี่	กระแสไฟฟ้า I_{DC} (แอมแปร์)	แรงดันไฟฟ้าที่ โหลด (V_o) (โวลต์)	อัตราการถ่ายโอน กำลังไฟฟ้า ($\frac{P_o}{P_i}$)
3	f_{r1}	3.61	18.40	0.78
	f_{r2}	2.10	14.20	0.80
15	f_{r1}	11.40	12.70	0.12
	f_{r2}	8.30	17.20	0.29

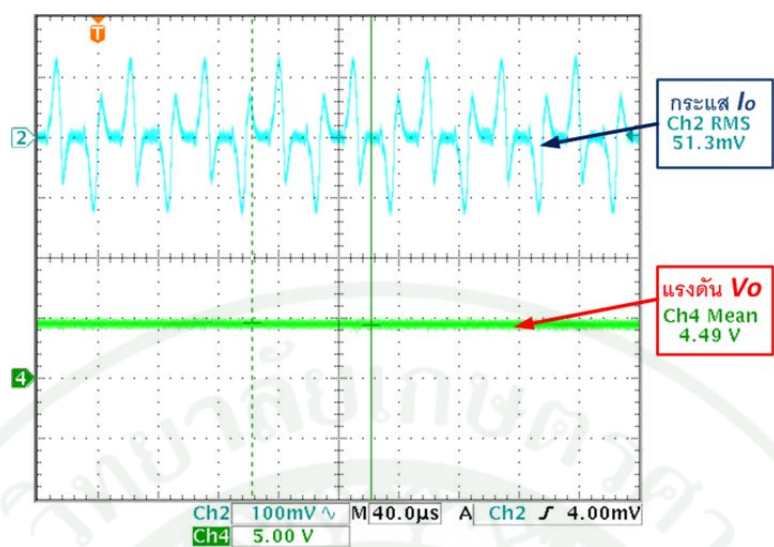


ภาพที่ 127 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 1.6

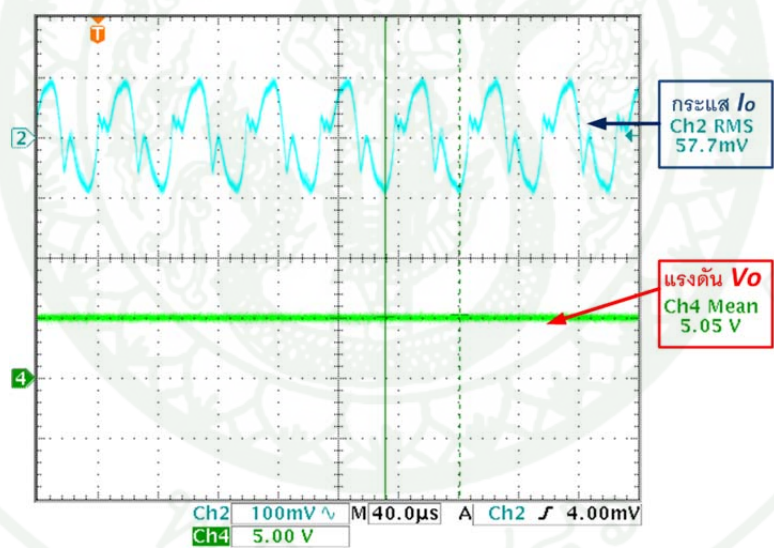
2. ผลการทดลองที่ 2 ทำการทดลองโดยวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}) กระแสไฟฟ้าที่โหลด (I_o) และแรงดันไฟฟ้าที่โหลดได้รับ (V_o) จากการชาร์จประจุด้วยการต่อตรงและจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ที่ระยะห่างระหว่างขดลวดเป็น 0, 3, 6, 9 และ 15 เซนติเมตร สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังภาพที่ 128 ถึงภาพที่ 133 และตารางที่ 46



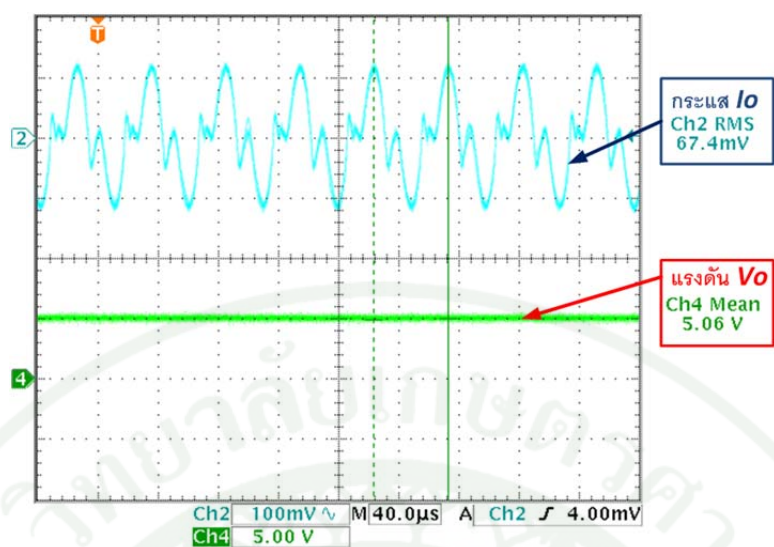
ภาพที่ 128 ผลการทดลองที่ 2 ด้วยการต่อตรง



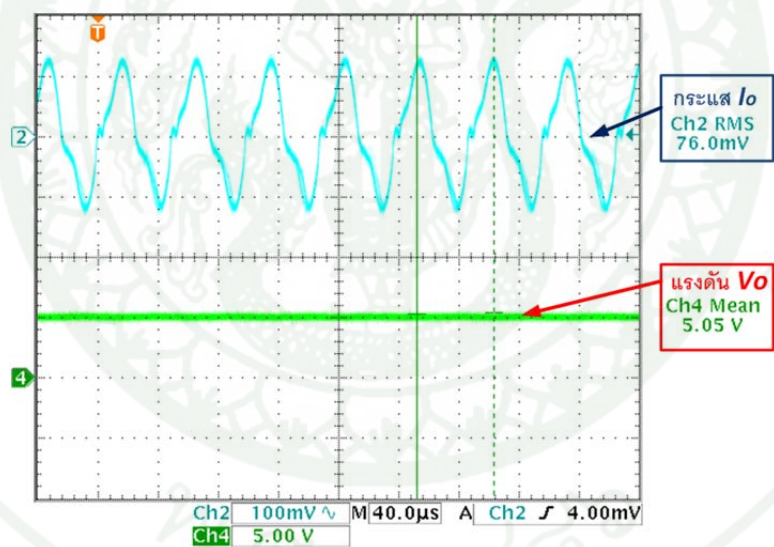
ภาพที่ 129 ผลการทดลองด้วยระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ที่ระยะห่าง 0 เซนติเมตร



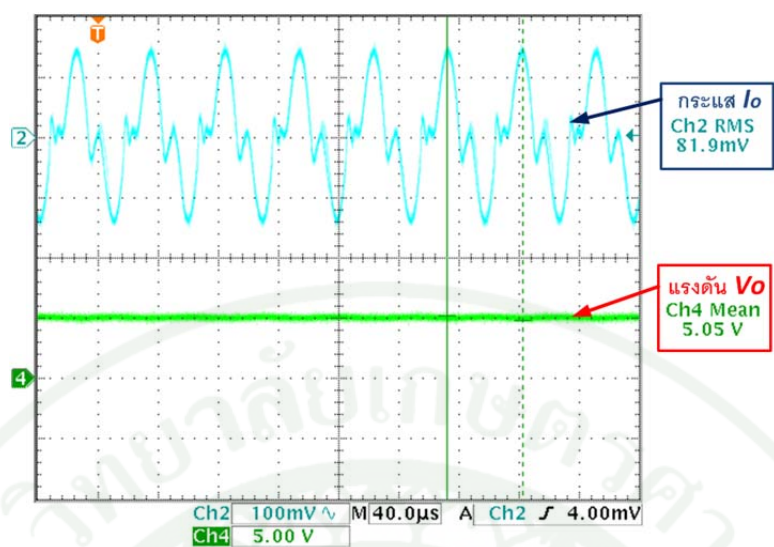
ภาพที่ 130 ผลการทดลองด้วยระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร



ภาพที่ 131 ผลการทดลองด้วยระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ที่ระยะห่าง 6 เซนติเมตร



ภาพที่ 132 ผลการทดลองด้วยระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ที่ระยะห่าง 9 เซนติเมตร



ภาพที่ 133 ผลการทดลองด้วยระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ที่ระยะห่าง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 46 ผลการทดลองที่ 2

วิธีการชาร์จ ประจุไฟฟ้า	ไฟฟ้ากระแสตรง ด้านขาเข้า (I_{DC}) (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า ด้านขาเข้า (P_i) (วัตต์)	ไฟฟ้ากระแสตรง ด้านขาออก (I_o) (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้าด้านขา ออก (P_o) (วัตต์)
ต่อตรง	0.64	7.68	0.64	3.29
ICPT ที่ 0 ซม.	0.68	8.16	0.51	2.30
ICPT ที่ 3 ซม.	1.71	20.52	0.58	2.91
ICPT ที่ 6 ซม.	3.81	45.72	0.67	3.41
ICPT ที่ 9 ซม.	7.66	91.92	0.76	3.84
ICPT ที่ 15 ซม.	14.44	173.28	0.82	4.13

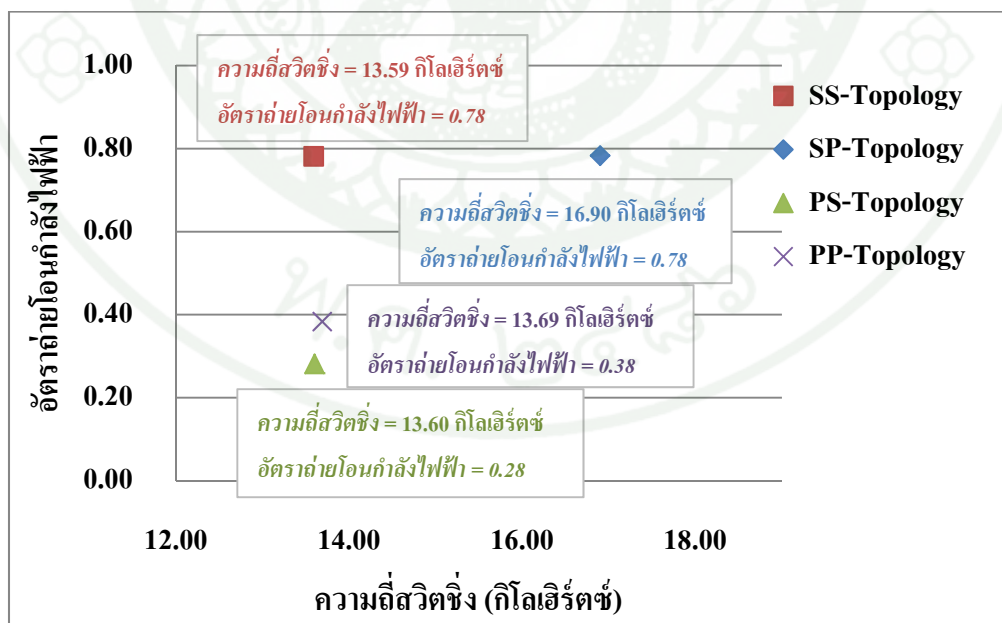
จากผลการทดลองที่ 2 ดังภาพที่ 128 ถึงภาพที่ 133 และตารางที่ 46 สามารถแสดงประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ในการชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ โดยเปรียบเทียบกับวิธีการชาร์จประจุแบบต่อตรงได้ดังตารางที่ 47 เมื่อกำหนดให้อัตราการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปที่โหลดจากการชาร์จประจุไฟฟ้าแบบต่อตรงเป็น 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 47 เปรียบเทียบการชาร์จประจุไฟฟ้าระหว่างการต่อตรงกับระบบ ICPT

วิธีการชาร์จประจุไฟฟ้า	อัตราถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า $\left(\frac{P_o}{P_i}\right)$	เปรียบเทียบประสิทธิภาพ ในการชาร์จประจุไฟฟ้า (เปอร์เซ็นต์)
แบบต่อตรง	0.43	100
ใช้ระบบ ICPT ที่ระยะ 0 เซนติเมตร	0.28	67.75
ใช้ระบบ ICPT ที่ระยะ 3 เซนติเมตร	0.14	34.08
ใช้ระบบ ICPT ที่ระยะ 6 เซนติเมตร	0.07	17.90
ใช้ระบบ ICPT ที่ระยะ 9 เซนติเมตร	0.04	10.02
ใช้ระบบ ICPT ที่ระยะ 15 เซนติเมตร	0.02	5.72

วิจารณ์

จากผลการทดลองที่ 1.1-1.4 เป็นการทดลองเพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากระแสตรง (I_{DC}), แรงดันไฟฟ้าที่โหลด (V_o) และการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปสู่โหลด ($\frac{P_o}{P_i}$) ที่ความถี่สวิตชิ่ง f_s ในช่วงต่างๆ ได้แก่ ช่วงความถี่ $f_s < f_r$, ช่วงความถี่ $f_s = f_r$ และช่วงความถี่ $f_s > f_r$ ที่เกิดขึ้นในการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ (SS, SP, PS และ PP) ซึ่งผลการทดลองที่ 1.1-1.4 แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำหนดให้ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิแล้ว ผลตอบสนองความถี่ f_s ของกระแสไฟฟ้า I_{DC} , แรงดันไฟฟ้า V_o และ $\frac{P_o}{P_i}$ ของวงจรชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุทั้ง 4 รูปแบบในระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ มีลักษณะเช่นเดียวกับผลการจำลองในก่อนหน้านี้นี้ และผลการทดลองที่ 1.1-1.4 แสดงให้เห็นถึงอัตราถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปสู่อุปกรณ์โหลดของการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละแบบ โดยที่การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของ SS, SP, PS และ PP มีค่าเป็น 0.78, 0.78, 0.30 และ 0.38 ตามลำดับ แสดงการเปรียบเทียบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของแต่ละรูปแบบได้ดังภาพที่ 134



ภาพที่ 134 กราฟเปรียบเทียบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของการทดลองที่ 1.1-1.4

โดยที่การชดเชยด้วยตัวเก็บประจุรูปแบบ SS-Topology และ SP-Topology เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลดได้สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบ PS-Topology และ PP-Topology แต่ความแตกต่างระหว่าง SS กับ SP จากผลการทดลองคือช่วงความถี่ f_s ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ขนาดของความเหนี่ยวนำตัวเองทางด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับความเหนี่ยวนำตัวเองด้านทุติยภูมิคือ $L_1 = L_2$ และให้ค่าตัวเก็บประจุทางด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิคือ $C_1 = C_2$ ซึ่งตามทฤษฎีที่ศึกษามาข้างต้น เงื่อนไขของการเกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ จะเกิดขึ้นเมื่อกำหนดให้ความถี่สวิตชิ่งมีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์คือ $f_s = f_r$ และต้องกำหนดให้ตัวเก็บประจุ C_1 มีขนาดที่เหมาะสมที่ทำให้ส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์รวมถูกหักล้างจนหมด หรือ $Im\{Z_t\} = 0$ แต่จากการจำลองระบบด้วยการชดเชยทั้ง 4 รูปแบบพบว่า การกำหนดให้ตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2$ นอกจากจะเหมาะสมกับรูปแบบ SS-Topology แล้ว สำหรับรูปแบบการชดเชยแบบ SP-Topology การกำหนดให้ตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2$ ยังสามารถทำให้ผลตอบสนองความถี่ของกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ มีการเปลี่ยนแปลงตามผลตอบสนองความถี่ของไฟฟ้ากระแสตรงที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายให้ระบบได้ ซึ่งจะเห็นได้จากผลการทดลองที่ 1.1-1.2 นอกจากนี้ในการทดลองที่ 1.3 และ 1.4 แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้แรงดันไฟฟ้าที่โหลดได้รับหรือกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับในช่วงความถี่ f_r ของรูปแบบ PS-Topology และ PP-Topology จะมีค่าสูงกว่าช่วงที่ไม่ใช่ความถี่ f_r ก็ตาม แต่อัตราถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ f_r มีค่าน้อยกว่าอัตราถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในช่วงความถี่น้อยกว่า f_r เนื่องจากกำลังไฟฟ้าด้านปฐมภูมิในช่วงความถี่น้อยกว่าความถี่ f_r ถูกใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า ทำให้เมื่อพิจารณาในเทอมของการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในช่วงความถี่น้อยกว่าความถี่ f_r จึงมากกว่าการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในช่วงความถี่ f_r

ดังนั้นจากการจำลองระบบและการทดลองระบบจริงด้วยการกำหนดให้ตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2$ ในงานวิจัยนี้ จะได้เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมกับรูปแบบการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุในรูปแบบ SS-Topology เนื่องจากเป็นรูปแบบที่สามารถออกแบบได้ง่ายกว่ารูปแบบอื่น และให้กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับอยู่ในระดับสูงเมื่อเปรียบเทียบกับารชดเชยด้วยตัวเก็บประจุในรูปแบบอื่น และนอกจากนี้ด้วยรูปแบบ SS-Topology และ SP-Topology อิมพีแดนซ์รวมของทั้งวงจรถูก

มองว่าเป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ซึ่งด้วยคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม จะได้กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ แต่รูปแบบ PS-Topology และ PP-Topology อิมพีแดนซ์รวมของทั้งวงจรถูกมองว่าเป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ซึ่งด้วยคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน จะได้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นการใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุดเพื่อติดตามการเกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด จึงเหมาะสมกับการชดเชยด้วยรูปแบบ SS-Topology และ SP-Topology มากกว่ารูปแบบ PS-Topology และ PP-Topology

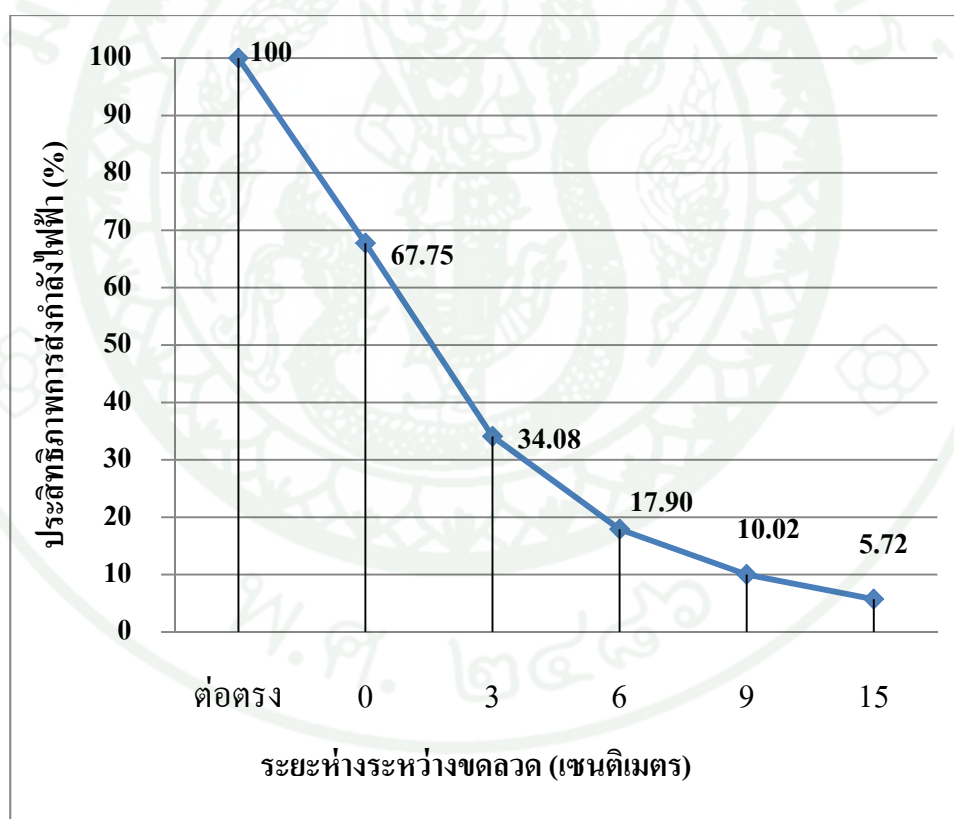
ในการทดลองที่ 1.5 ที่ทำการเปรียบเทียบรูปร่างและขนาดของขดลวดที่มีผลการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ โดยเปรียบเทียบขดลวด 3 รูปแบบ สำหรับรูปร่างและขนาดของขดลวดที่นำมาใช้งาน จะมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดหรือ Mutual Inductance (M) โดยที่หากความเหนี่ยวนำร่วมมีค่ามาก จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างขดลวดด้านปฐมภูมิกับด้านทุติยภูมิได้มาก ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้มากเช่นกัน และในทางกลับกันหากความเหนี่ยวนำร่วมมีค่าน้อย จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างขดลวดด้านปฐมภูมิกับด้านทุติยภูมิได้น้อย ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้น้อยเช่นกัน และจากผลการทดลองที่ 1.5 นี้แสดงให้เห็นว่า ขดลวดรูปแบบเกลียวราบแบบกลม จะมีค่าความเหนี่ยวนำร่วม ที่มากกว่าขดลวดแบบโซลินอยด์ (ผลการเปรียบเทียบขดลวดแบบที่ 1 กับขดลวดแบบที่ 2) และขดลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าจะมีค่าความเหนี่ยวนำ ที่มากกว่าขดลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า (ผลการเปรียบเทียบขดลวดแบบที่ 2 กับขดลวดแบบที่ 3) และจากการเปรียบเทียบขดลวดแบบที่ 1 กับขดลวดแบบที่ 3 จะเป็นการแสดงให้เห็นว่า ขดลวดเกลียวราบแบบกลมที่มีขนาดเล็กกว่าและมีค่าความเหนี่ยวนำตัวเองหรือ Self Inductance (L_s) ที่น้อยกว่าขดลวดแบบโซลินอยด์ มีค่าประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกับขดลวดแบบโซลินอยด์ เนื่องจากด้วยขนาดของขดลวด, ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและปริมาณสายไฟที่ใช้ทำขดลวดของขดลวดแบบที่ 1 จะมากกว่าขดลวดแบบที่ 3 แต่ผลการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของขดลวดแบบที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกับการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากขดลวดแบบที่ 1 ดังนั้นขดลวดเกลียวราบแบบกลม จะมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่าขดลวดแบบโซลินอยด์ เนื่องจากขดลวดเกลียวราบแบบกลมมีลักษณะคล้ายงานทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดได้มาก ในขณะที่ขดลวดใน

แบบโซลินอยด์ จะมีเส้นแรงแม่เหล็กออกมาในแนวทงกระบอกตามรูปร่างของขดลวด จึงทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำได้น้อยกว่าขดลวดเกลียวราบแบบกลม และนอกจากนี้ปริมาณของความเหนี่ยวนำรวม จะมีค่าไม่เกินค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดนั้น

สำหรับการทดลองที่ 1.6 เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบช่วงความถี่เรโซแนนซ์ที่มีผลต่อการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในระบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ระหว่างความถี่ f_{r1} กับความถี่ f_{r2} และเพื่อแสดงให้เห็นความแตกต่างของผลการเล็กใช้ช่วงความถี่ทั้ง 2 ช่วง จึงทำการเปรียบเทียบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าที่ระยะห่างของขดลวด 2 ระยะระหว่าง 3 เซนติเมตรกับ 15 เซนติเมตร ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ด้วยความถี่ f_{r2} สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าการใช้ความถี่ f_{r1} ทั้งที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 3 เซนติเมตร ($f_{r1}=0.78$, $f_{r2}=0.8$) และที่ 15 เซนติเมตร ($f_{r1}=0.12$, $f_{r2}=0.29$) ซึ่งเป็นไปตามสมการของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ที่ได้ศึกษาในเบื้องต้น เมื่อการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า จะมีค่าสูงสุดที่ความถี่ $f_s = f_r$ และการที่ความถี่ f_r มีค่าสูงขึ้นการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของระบบ จะสูงขึ้นตามเช่นกัน นอกจากนี้ผลการทดลองที่ 1.6 ยังแสดงให้เห็นผลของระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับทุติยภูมิที่มีต่อการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้พบว่า เมื่อขดลวดทั้ง 2 ขดลวดมีระยะห่างมากขึ้น จะทำให้การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลดได้ลดลง ซึ่งจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าระยะห่างระหว่างขดลวด จะส่งผลโดยตรงกับค่าความเหนี่ยวนำรวมระหว่างขดลวด โดยที่ระยะห่างระหว่างขดลวดน้อยลง จะส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำรวมมีค่ามากขึ้นทำให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น ในขณะที่ระยะห่างระหว่างขดลวดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความเหนี่ยวนำรวมมีค่าน้อยลงส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้น้อยลงเช่นกัน

ผลการทดลองที่ 2 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ จากการชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าทาง USB ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ยังมียประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าน้อย เนื่องจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของการกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในช่องว่างระหว่าง

ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยช่องว่างระหว่างขดลวดยิ่งมาก การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า จะลดลงมากเท่านั้น ซึ่งพฤติกรรมเช่นนี้เป็นไปตามความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ตามการทดลองที่ 1.1 ถึง 1.6 นอกจากนี้จากการทดลองที่ 2 นี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิมากขึ้น ในขณะที่กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการเท่าเดิม ระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้จะดึงกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดได้เท่าเดิม ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ลดลงตามระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้กับการต่อตรงจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ดังภาพที่ 135



ภาพที่ 135 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 2

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้แสดงผลการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรกับพฤติกรรมของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำหรือ Inductively Coupling Power Transfer system (ICPT) และได้ นำผลที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆที่มีต่อพฤติกรรมต่อระบบ มาออกแบบ ส่วนประกอบและวิธีการควบคุมระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ซึ่งจากการศึกษาทฤษฎีเบื้องต้น ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ และการทดลองที่ออกแบบมาเพื่อทำการเปรียบเทียบผลจาก ตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อพฤติกรรมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ได้มุ่งเน้นศึกษาไปที่ตัวแปร ดังนี้ รูปร่างและขนาดของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ รูปแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุ ช่วงความถี่ที่ใช้งานและระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับทุติยภูมิ ทำให้เข้าใจการทำงานของ ระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้และสามารถนำไปออกแบบระบบได้

จากการศึกษาพฤติกรรมของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ พบว่าการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด จะเกิดขึ้นเมื่อระบบทำงานอยู่ภายใต้เงื่อนไขของความถี่สวิตช์มีค่าเท่ากับ ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรด้านทุติยภูมิ และส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์รวมถูกหักล้างจนหมด หรือ $Im\{Z_t\} = 0$ แต่การเกิดเงื่อนไข $Im\{Z_t\} = 0$ สำหรับวงจรชดเชยด้วยตัวเก็บประจุในแต่ละ รูปแบบ จะไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับค่าตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิหรือ C_1 ที่เลือกใช้ในแต่ละรูปแบบ จากการจำลองระบบและทดลองที่ 1 ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ด้วยการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุทั้ง 4 รูปแบบ พบว่าความถี่ที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าที่โหลดมีค่าสูงสุด จะมีค่าไม่เท่ากับ ความถี่เรโซแนนซ์ด้านทุติยภูมิเสมอไป ขึ้นอยู่กับรูปแบบการชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุแต่ละ รูปแบบ และการเลือกใช้ขนาดของตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ โดยที่การใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเป็น เงื่อนไข จะเหมาะสมกับการชดเชยในรูปแบบ SS และ SP Topology เท่านั้น และจากผลการจำลอง กับผลการทดลองที่มีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าใน งานวิจัยนี้ จึงเลือกให้ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิมิค่าเท่ากับตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิคือ $C_1 = C_2$ ซึ่ง

เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มากที่สุด นอกจากนี้การจำลองและการทดลองที่ 1 ได้แสดงให้เห็นว่า การชดเชยด้วยตัวเก็บประจุแบบ SS-Topology เป็นรูปแบบที่สามารถออกแบบได้ง่ายที่สุดและเป็นรูปแบบที่เหมาะสมกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำมากที่สุด ถึงแม้ว่าการชดเชยด้วยรูปแบบ SP-Topology จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับสูงที่สุดจากการชดเชยทั้ง 4 รูปแบบก็ตาม แต่จากการเลือกใช้ตัวเก็บประจุ C_1 ที่เหมาะสมของรูปแบบ SP-Topology จะขึ้นอยู่กับขนาดของความเหนี่ยวนำร่วม (M) ทำให้ในการออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับรูปแบบ SP-Topology ยังมีความซับซ้อนมากกว่ารูปแบบ SS-Topology

จากผลการจำลองและผลการทดลองที่ 1 สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบวิธีการควบคุมระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ด้วยการค้นหาความถี่สวิตช์ที่ทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุด ซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด แม้ว่าตัวแปรที่สำคัญของระบบส่งกำลังไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม และได้แนวทางการออกแบบและวิธีการควบคุมระบบที่ได้จากการทดลองนี้ ไปสร้างเป็นต้นแบบระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำสำหรับงานวิจัยนี้สามารถเห็นได้จากการทดลองและผลการทดลองที่ 2

จากการทดลองที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ระบบต้นแบบของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยแสดงให้เห็นจากการนำไปชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น เครื่องเล่น MP3 ซึ่งประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ จะมีค่าสูงสุดเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็น 0 เซนติเมตรและจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิมากขึ้น โดยที่การชาร์จประจุไฟฟ้าด้วยระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ที่ระยะห่างระหว่างขดลวดเป็น 0 , 3 , 6 , 9 และ 15 เซนติเมตรตามลำดับ จะมีประสิทธิภาพเป็น 58.14 , 23.26 , 9.30 , 7.01 และ 4.67 เปอร์เซนต์ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการชาร์จประจุไฟฟ้าแบบต่อตรงจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบ

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้มุ่งศึกษาวิธีการที่ใช้ในการควบคุมตัวแปรที่ด้านปฐมภูมิของระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำ เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้สูงสุด ด้วยการใช้เงื่อนไขในการค้นหาความถี่สวิตช์ที่ทำให้เกิดการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ด้วยการพิจารณาเฉพาะไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายสามารถนำไปใช้ควบคุมให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้สูงสุด ดังนั้นด้วยเงื่อนไขการพิจารณาที่ไฟฟ้ากระแสตรงนี้สามารถนำไปทดลองใช้งานกับอัลกอริทึมอื่นที่มีลักษณะเช่นเดียวกับการค้นหาในลักษณะแบบนี้ได้เช่นกัน

จากการที่งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วัสดุที่มีราคาไม่สูงและสามารถหาได้ง่ายในพื้นที่มาใช้ในการทำเป็นขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบมีค่าสูงสุดไม่เกิน 80% (จากผลการทดลองที่ 1) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สายไฟที่สร้างมาจากเส้นลวดทองแดง ซึ่งมีความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability: μ) ใกล้เคียงกับค่าซึมซาบแม่เหล็กของสุญญากาศหรืออากาศ ซึ่งหากเลือกใช้วัสดุชนิดอื่นที่มีความซึมซาบแม่เหล็กมากขึ้น จะทำให้ได้ความเหนี่ยวนำตัวเองและความเหนี่ยวนำรวมมากขึ้น แสดงตัวอย่างค่าความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุชนิดต่างๆ ได้ดังตารางที่ 48

ตารางที่ 48 ตัวอย่างค่าความซึมซาบและค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุชนิดต่างๆ

ชนิดวัสดุ	ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก ($\mu : \frac{H}{m}$)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\sigma : \frac{S}{m}$)
อากาศ หรือ สุญญากาศ	$1.256637 \times 10^{-6} (\mu_0)$	$3 \times 10^{-15} - 8 \times 10^{-15}$
ทองแดง	1.256629×10^{-6}	5.96×10^7
อะลูมิเนียม	1.256665×10^{-6}	3.50×10^7
นิกเกิล	$1.26 \times 10^{-4} - 7.54 \times 10^{-4}$	1.43×10^7
เหล็ก (99.95%)	0.25	1.00×10^7
แพพตินัม	1.256970×10^{-6}	9.43×10^6
ไม้	1.256637×10^{-6}	$10^{-4} - 7.54 \times 10^{-3}$

จากสมการของ Harold A. Wheeler และ Fedderick W. Grover ที่แสดงในขั้นตอนการออกแบบขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิดังสมการที่ 8 ถึงสมการที่ 15 จะกำหนดให้ค่าความซึมซาบมีค่าเท่ากับค่าความซึมซาบของสูญญากาศ ซึ่งการเปลี่ยนชนิดของวัสดุที่เลือกใช้จะต้องแทนค่าความซึมซาบแม่เหล็กตามชนิดของวัสดุนั้น ดังนั้นหากเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำขดลวดให้มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กมากขึ้น จะสามารถเพิ่มความเหนี่ยวนำตัวเองและความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดได้ แต่การเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้แทนทองแดงทำขดลวดนั้น นอกจากจะพิจารณาค่าความซึมซาบแล้ว จะต้องพิจารณาที่ค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุนั้นด้วย เนื่องจากการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำนั้น ซึ่งวัสดุบางชนิดจะมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่สูงกว่าทองแดง แต่มีค่าความนำไฟฟ้าน้อยกว่าดังเช่น วัสดุที่เป็นเหล็ก เป็นต้น ซึ่งเห็นได้จากตารางที่ 48 แสดงให้เห็นว่าเหล็กมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กมากกว่าทองแดง แต่เหล็กมีค่าความนำไฟฟ้าที่น้อยกว่าทองแดง ดังนั้นหากค่าความนำไฟฟ้าน้อย แสดงว่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุชนิดนั้นสูง ส่งผลให้การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพน้อยลง เนื่องจากการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่จะไปสูญเสียในความร้อนของวัสดุที่นำมาใช้นั้น และนอกจากนี้การเลือกใช้ลักษณะของขดลวด จะมีผลต่อการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำเช่นกัน ซึ่งจากข้อมูลที่ได้จากการศึกษางานวิจัยในก่อนหน้านี้ ได้มีการนำรูปแบบของลักษณะขดลวดที่ให้คุณสมบัติในการเหนี่ยวนำที่ดีกว่า (ถูกเรียกว่า “Litz Wire”) มาสร้างเป็นขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองใช้ Litz Wire ในงานวิจัยก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการส่งกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นอยู่ในระดับที่มากกว่า 90% ขึ้นไปได้

นอกจากนี้ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้อุปกรณ์ที่ทำงานในช่วงความถี่ไม่เกิน 25 กิโลเฮิร์ตซ์ ทำให้ช่วงความถี่ในการทดลองในงานวิจัยนี้มีค่าไม่เกิน 25 กิโลเฮิร์ตซ์ แต่จากการทดลองพบว่าเมื่อให้ความถี่เรโซแนนซ์สูงขึ้น ระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น ดังนั้นการเพิ่มความถี่เรโซแนนซ์ให้สูงกว่าในงานวิจัยนี้ ต้องออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงและสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้มากขึ้น โดยเฉพาะตัวเก็บประจุในวงจรชดเชยด้วยตัวเก็บประจุที่ด้านปฐมภูมิ ซึ่งจากการทดลองพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ด้านปฐมภูมิจะมีค่าสูงมาก เมื่อระบบทำงานที่ความถี่สวิตช์

มีค่าเข้าใกล้หรือเท่ากับค่าความถี่เรโซแนนซ์ หากเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ไม่สูงพอหรือตัวเก็บประจุที่มีค่าความต้านทานแฝงสูง (ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าสูงเช่นกัน) อาจทำให้ตัวเก็บประจุที่เลือกมาใช้งานนั้นเสียหายได้ และนอกจากข้อจำกัดของการเลือกใช้ตัวเก็บประจุดังที่กล่าวมาแล้ว การเลือกช่วงความถี่เรโซแนนซ์ในการทดลอง จะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของการเกิดการสูญเสียในขณะที่มอสเฟตทำงานหรือ Switching Loss ในช่วงความถี่สูง เมื่อความถี่สวิดซิ่งสูงขึ้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขณะที่มอสเฟตทำงานจะสูงขึ้นเช่นกัน ถึงแม้ว่าการใช้วงจรเรโซแนนซ์ จะช่วยให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยลงเมื่อความถี่สวิดซิ่งมีค่าเท่ากับค่าความถี่เรโซแนนซ์ตามทฤษฎีก็ตาม แต่ในทางปฏิบัติการกำหนดให้ความถี่สวิดซิ่งมีค่าเท่ากับค่าความถี่เรโซแนนซ์ตลอดนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากการเปลี่ยนหรือการเสื่อมสภาพของตัวอุปกรณ์ทั้งมอสเฟตและตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรเรโซแนนซ์ ทำให้ช่วงของความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากขึ้น และด้วยค่าความต้านทานแฝงและความเก็บประจุแฝงของอุปกรณ์ต่างๆ มีผลทำให้ระบบเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเช่นกัน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- บุญเสริม กิจศิริกุล. 2548. **ปัญญาประดิษฐ์ Artificial Intelligence**, เอกสารคำสอนวิชา 2110654 ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ประจัน พลังสันติกุล. 2551. **การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F ด้วยคอมไพเลอร์ MPLAB C**, บริษัท แอปซอฟต์แวร์ จำกัด, กรุงเทพฯ.
- สาโรช รุจิวรรณ. 2556. **บทที่ 4 สนามแม่เหล็ก กฎของบิโอต์-ซาวาร์ต และกฎของแอมแปร์ และบทที่ 5 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าและวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ**, เอกสารคำสอนวิชา 105102 ฟิสิกส์ 2 สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา
- Chopra, S. 2011. **Contactless Power Transfer for Electric Vehicle Charging Application**, M.S. Thesis, Delft University of Technology.
- Erickson, R.B. and D. Maksimović. 2004. **Chapter 19: Resonant Conversion**, Fundamentals of Power Electronics, 2nd Edition, 2004.
- Grover, F.W. 2004. **Inductance Calculation Working Formulas and Tables**, pp.88-140.
- Jang, Y. and M.M. Jovanovic. 2001. **Contactless Electrical Energy Transmission System**. US006301128B1.
- Kim, S.M., I.K. Cho, J.I. Moon, J.H. Yoon, W.J. Byun and J.I. Choi. 2012. **1.9MHz Wireless Power Transmission System using Magnetic Resonance**, pp.519-522. In MIKON 2012, 19th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications.

Liao, S.B., P. Dourmashkin and J. Belcher. 2011. **Chapter 11: Inductance and Magnetic Energy**, Introduction to Electricity and Magnetism: MIT 8.02 Course Notes, 2011.

Madawala, U.K. and D.J. Thrimawithana. 2012. **New technique for inductive power transfer using a single controller**, pp. 248–256. *In* IET Power Electron, 2012, Vol. 5, Iss. 2

Moradewicz, A.J. 2008. **Contactless Energy Transmission System with Rotatable Transformer - Modeling, Analyze and Design**, Ph.D. Thesis, Warsaw University of Technology.

Moradewicz, A.J. and M.P. Kazmierkowski. 2008. **FPGA Based Control of Series Resonant Converter for Contactless Power Supply**, pp.245-250. *In* IEEE, 2008

Nagatsuka, Y., S. Noguchi, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda, K. Ida, A. Suzuki and R.Yamanouchi. 2010. **Contactless Power Transfer System for Electric Vehicle Battery Charger**, World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, 25th, 5-9 November 2010, China.

Prasanth, V. 2011. **Wireless Power Transfer for E-mobility**, M.S. Thesis, Delft University of Technology.

Ricaño, H.J.A., H. R. Torres, H. Vázquez, Leal and G. del Angel. 2010. **Experiment About Wireless Energy Transfer**, International Congress on Instrumentation and Applied Sciences, 1st, 26-29 October 2010, Mexico.

Sallán, J., J.L. Villa, A. Llombart and J.F. Sanz. 2009. **Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Charge**, pp.2140-2149. IEEE Transactions on Industrial, Vol.56, No.6, June 2009.

Scholz, P. 2010. **Analysis and Numerical Modeling of Inductively Coupled Antenna Systems**, Theorie Elektromagnetischer Felder (TEMF), 2010.

Schuylenbergh, V., Koenraad, and P. Robert. 2009. **Inductive Powering: Basic Theory and Application to Biomedical Systems**, Springer, 2009.

Tengnér, T. 2009. **Automatic elective charging of electric vehicles – modeling and simulation**, Master of Science Thesis, Department of electrical machines, KTH Royal Institute of Technology, 2009.

Thrimawithana, D.J. and U.K. Madawala. 2011. **A Primary Side Controller for Inductive Power Transfer Systems**, pp.661-666. *In* IEEE, 2010.

Tilbury, M. 2008. **THE ULTIMATE Tesla Coil Design AND CONSTRUCTION GUIDE**, McGraw-Hill Companies, Inc. 2008.

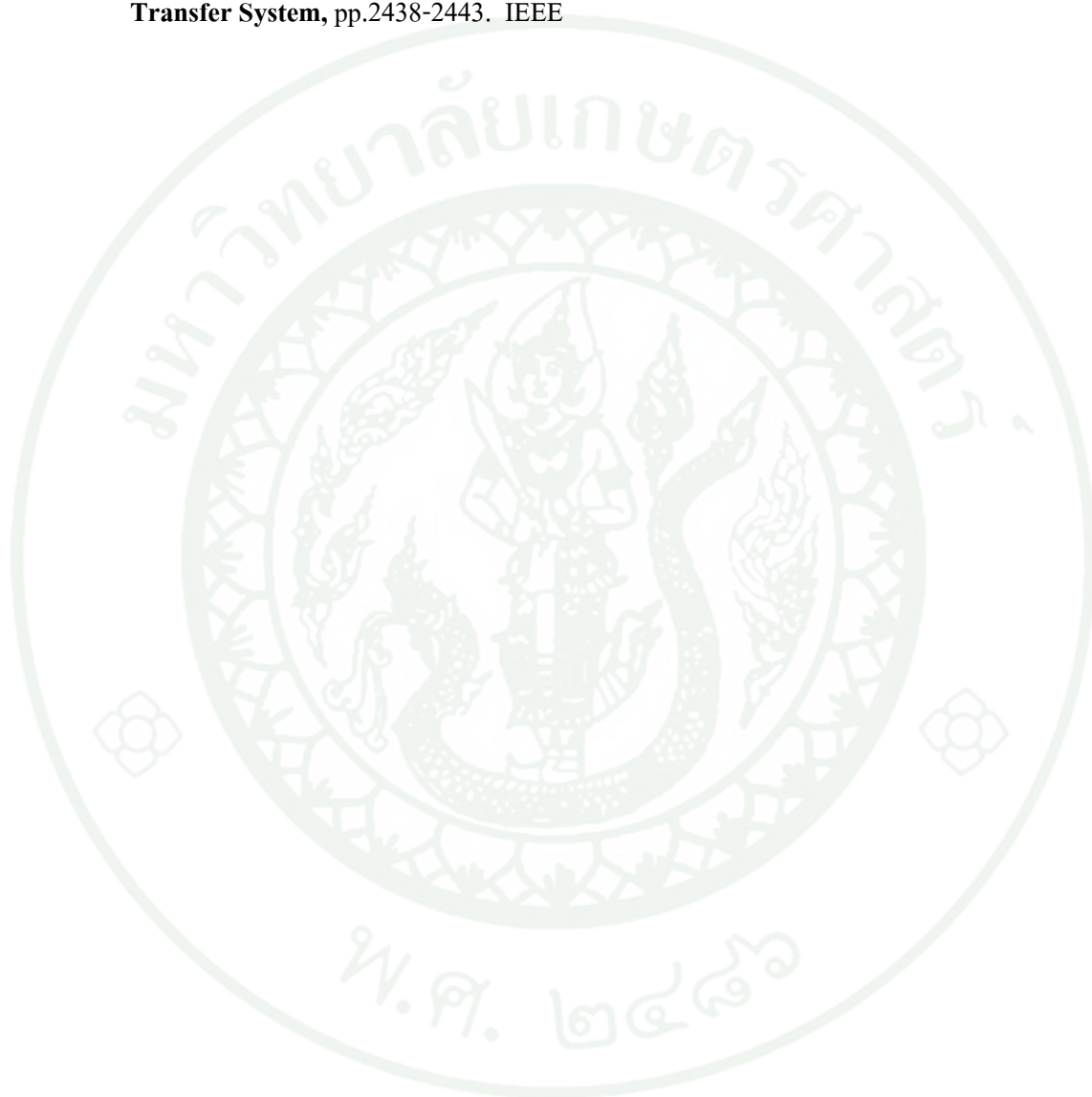
Thompson. 1999. **Inductance Calculation Techniques—Part 2: Approximations and Handbook Methods Power Control and Intelligent Motion**, Available Source: <http://www.pcim.com> , December 1999.

Villa, J.L., J. Sallán, A. Llombart and J.F. Sanz. 2009. **Design of a high frequency Inductively Coupled Power Transfer system for electric vehicle battery charge**, pp.355–363. *In* Applied Energy 86th, 2009.

Wang, C.S., Oskar H.S. and G.A. Covic. 2005. **Design Consideration for a Contactless Electric Vehicle Battery Charger**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.52, No.5, October 2005.

Wheeler, H.A. 1928. **Simple inductance formulas for radio coils**, pp. 1398-1400. *In* Proceedings of the I.R.E., October 1928, Vol.16, No.10.

Zhou, W., and M. Hao. 2006. **Steady-State Analysis of the Inductively Coupled Power Transfer System**, pp.2438-2443. IEEE







ภาคผนวก ก

การเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

การเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

สำหรับภาคผนวก ก นี้ จะนำเสนอแนวทางในการเลือกอุปกรณ์ที่สำคัญเพื่อประกอบเป็นระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบคู่ควบเหนี่ยวนำที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักได้แก่ ส่วนที่ 1 ส่วนประกอบของขดลวดเหนี่ยวนำและการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุ ส่วนที่ 2 ส่วนประกอบของวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับและส่วนรับรู้กระแสตรงด้านปฐมภูมิ ซึ่งทั้ง 2 ส่วนมีแนวทางในการเลือกใช้ค่าและอุปกรณ์ดังนี้

ส่วนที่ 1 ส่วนประกอบของขดลวดเหนี่ยวนำและการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุ จะเสนอแนวทางในการเลือกช่วงความถี่เรโซแนนซ์ ขนาดของสายไฟที่นำมาทำเป็นขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ และการเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับทั้งการกำหนดชดเชยด้วยตัวเก็บประจุและใช้กำหนดค่าความถี่เรโซแนนซ์ของระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยเริ่มจากการกำหนดช่วงของความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการใช้งาน ในเบื้องต้นจะยังไม่กำหนดค่าความถี่ที่แน่นอน แต่กำหนดเป็นช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานโดยเลือกให้ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบมีค่าไม่เกิน 25 กิโลเฮิร์ตซ์ เนื่องจากเป็นช่วงความถี่ที่ไม่สูงหรือต่ำเกินไป ซึ่งสามารถเลือกใช้อุปกรณ์ที่นำมาประกอบในระบบได้ง่ายและมีราคาที่ไม่สูงมาก และนอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ จะทำการเปรียบเทียบผลตอบแทนของระบบถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอ โดยเลือกใช้ความถี่เรโซแนนซ์ที่แตกต่างกัน 2 ช่วงความถี่ ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์ช่วงแรกที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะอยู่ในช่วง 10-15 กิโลเฮิร์ตซ์ และความถี่ช่วงที่ 2 จะอยู่ในช่วง 20-23 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ถูกกำหนดได้จากค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่ด้านทุติยภูมิและค่าความเก็บประจุของตัวเก็บประจุที่ด้านทุติยภูมิ ดังนั้นเมื่อได้ช่วงความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการทดลองใช้งานแล้ว จะทำการออกแบบโดยกำหนดให้ใช้ค่าของความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดทุติยภูมิเป็นหลัก (ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมีคุณสมบัติแบบเดียวกัน) โดยใช้สมการของ Harold A. Wheeler และ Frederick W. Grover ในการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและความเหนี่ยวนำร่วมตามลำดับ จากสมการของ Harold A. Wheeler และ Frederick W. Grover พบว่าค่าความเหนี่ยวนำ

ตัวเองและค่าความเหนียวร่วมของขดลวด จะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาหรือความสูงของขดลวด ซึ่งค่าเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของสายไฟหรือเส้นลวดที่เลือกมา และจำนวนรอบของขดลวด ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สายไฟเบอร์ AWG-18-UL1015 ซึ่งเป็นสายไฟที่มีลวดเส้นเล็กๆ รวมเป็นสายไฟที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำประมาณ 1.3 มิลลิเมตร และมีจำนวนหุ้มรอบเส้นลวดตัวนำอีกที ทำให้สายไฟเบอร์นี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรวมประมาณ 2.8 มิลลิเมตร โดยสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 600 โวลต์และทนอุณหภูมิได้ 105 องศาเซลเซียส ซึ่งเหตุผลที่เลือกสายไฟเบอร์นี้ เนื่องจากเมื่อนำขนาดของสายไฟเบอร์นี้มาคำนวณหาค่าความเหนียวของตัวเองด้วยสมการของ Harold A. Wheeler ที่ค่าความเหนียวของตัวเองอยู่ในช่วง 113-117 ไมโครเฮนรี ซึ่งทำให้ต้องใช้สายไฟยาวประมาณ 14 เมตร ซึ่งสายไฟเบอร์นี้ขายเป็นม้วน โดยสายไฟ 1 ม้วนจะมีความยาว 30 เมตร ทำให้สายไฟ 1 ม้วนสามารถพันขดลวดได้ทั้งขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ การที่สามารถพันขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิจากสายไฟม้วนเดียวกันได้ ทำให้พิจารณาได้ว่าขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน ลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากคุณสมบัติของสายไฟที่ต่างกันเช่น ความต้านทานแฝง เป็นต้น โดยที่สายไฟเบอร์นี้มีราคา 253 บาท ซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ หากเลือกสายไฟที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่านี้ โดยกำหนดให้ได้ค่าความเหนียวของตัวเองเท่าเดิม ซึ่งจากการคำนวณด้วยสมการของ Harold A. Wheeler จะใช้สายไฟที่ยาวขึ้นในการพันเป็นขดลวด 1 ขดลวด ซึ่งจะทำให้ขดลวด 2 ขดลวดไม่สามารถใช้สายไฟเพียง 1 ม้วนได้ อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้มีปัญหาจากคุณสมบัติที่ต่างกันของสายไฟคนละม้วน และการที่สายไฟมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น จะมีราคาที่สูงขึ้น แต่หากเลือกใช้สายไฟที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง จะทำให้ขดลวดที่ใช้สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้น้อยลง

ในการเลือกตัวเก็บประจุในงานวิจัยนี้ได้เลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาด 0.1 ไมโครฟารัด และทนแรงดันได้ 630 โวลต์ เป็นชนิด WIMA ตัวถัง MKS4 เหตุที่เลือกตัวเก็บประจุในลักษณะนี้ เพราะในช่วงที่ระบบทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดและตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิมีค่าสูงมาก ซึ่งจากงานวิจัยนี้วัดแรงดันนี้ได้ประมาณ 400 โวลต์ ทำให้ต้องเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่ทนแรงดันได้มากกว่า 400 โวลต์ จึงได้เลือกตัวเก็บประจุขนาดนี้มาใช้งานวิจัยนี้

ส่วนที่ 2 ส่วนประกอบของวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับและส่วนรับรู้กระแสตรงด้านปฐมภูมิ ในส่วนนี้จะนำเสนอแนวทางในการเลือกใช้ออสเฟตกำลัง ตัวขับมอสเฟตกำลัง และตัวรับรู้ไฟฟ้ากระแสตรงด้านปฐมภูมิ โดยที่การเลือกใช้ออสเฟตกำลัง จะอาศัยเกณฑ์ในการพิจารณาดังนี้

1. ให้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับขาเกต-ซอร์ส (V_{GS}) และขาเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) เป็นแหล่งจ่ายชุดเดียวกัน
 2. ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ 15 แอมป์ เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักของระบบที่นำเสนอ
 3. ค่าความต้านทานที่ขาเดรน-ซอร์ส ($R_{DS_{on}}$) และช่วงเวลาหนึ่งขณะมอสเฟตเริ่มทำงาน (t_{on_delay}) และเริ่มหยุดทำงาน (t_{off_delay}) ควรมีค่าน้อยเพื่อลดกำลังสูญเสียหรือ Power Loss ในช่วงเปลี่ยนสถานะและช่วงที่มอสเฟตทำงาน
 4. ราคาไม่สูง สามารถหาซื้อในประเทศได้ง่าย
- จากข้อกำหนดทั้ง 4 ข้อ จะเปรียบเทียบคุณสมบัติของมอสเฟตกำลังได้ดังตารางผนวกที่ ก1

ตารางผนวกที่ ก1 คุณสมบัติของมอสเฟตกำลังที่เลือกใช้

คุณสมบัติ	มอสเฟตกำลัง			
	IRL2203N	IRF3205	IRF3205zPbF	IRFZ 44 NPBF
I_{D_max} (A)	116	110	75	49
V_{DS_max} (V)	30	55	55	55
V_{GS_max} (V)	16	20	20	20
$R_{DS_{on}}$ (ohm)	0.007	0.008	0.0065	0.0175
t_{on_delay} (ns)	23	50	18	44
t_{off_delay} (ns)	11	14	45	12
ราคา (บาท)	18.03	28	ไม่มีขาย	10.78

จากตารางผนวกที่ ก1 จึงเลือกมอสเฟตกำลังเบอร์ IRL2203N สำหรับวงจรแปลงไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสสลับในงานวิจัยนี้

การเลือกใช้ TLP250 ในการขับขาเกทของมอสเฟตกำลัง เนื่องจาก TLP250 เป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเป็นอุปกรณ์ขับขาเกทของมอสเฟตกำลังอยู่แล้ว และมีการทำงานอยู่ในช่วงความถี่ 25 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ และมีการออกแบบวงจรที่ไม่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ขับมอสเฟตกำลังเบอร์ IR2110 ซึ่งมีการออกแบบวงจรเพื่อใช้งาน IR2110 ที่ซับซ้อน และใช้พื้นที่ในแผ่นวงจรมากกว่า TLP250 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ TLP250 เป็นอุปกรณ์ขับขาเกทของมอสเฟตกำลังในวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยที่ TLP250 มีราคาตัวละ 32.77 บาท ซึ่งจะต้องใช้ TLP250 จำนวน 4 ตัวเพื่อขับมอสเฟตกำลังทั้งหมด 4 ตัว ดังนั้นราคารวมของ TLP250 จำนวน 4 ตัวเท่ากับ 131.08 บาท ในขณะที่ IR2110 ที่มีราคา 56 บาท ต่อ 1 ตัว โดย IR2110 จำนวน 1 ตัวสามารถขับมอสเฟตกำลังได้ 2 ตัว ดังนั้นจะต้องใช้จำนวน 2 ตัวเพื่อขับมอสเฟตกำลัง 4 ตัว จะได้ราคารวมของ IR2110 จำนวน 2 ตัวเท่ากับ 112 บาท ทั้งนี้คิดเฉพาะราคาตัวอุปกรณ์ขับขาเกทเท่านั้น ไม่รวมอุปกรณ์ประกอบอื่นในวงจรขับขาเกทของมอสเฟตกำลัง ซึ่งหากคิดราคารวมของทั้งวงจร หากใช้วงจรของ IR2110 จะใช้งบประมาณและการออกแบบวงจรที่ซับซ้อนมากกว่าการใช้อุปกรณ์ TLP250

การเลือกใช้ ACS-712-20A ในการรับรู้ไฟฟ้ากระแสตรงด้านปฐมภูมิ โดย ACS-712-20A เป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับได้สูงสุด 20 แอมป์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์ของฮอลล์หรือ Hall Effect ในการวัดกระแสไฟฟ้า โดย ACS-712-20A สามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อให้อุปกรณ์เริ่มทำงาน ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานในงานวิจัยนี้ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าเพียงชุดเดียวเท่านั้น ไม่เหมือนกับตัวรับรู้กระแสไฟฟ้าเบอร์ LA25-NP ที่ต้องการแหล่งจ่าย ± 15 โวลต์ เพื่อให้ LA25-NP ทำงานได้ ทำให้ต้องเพิ่มแหล่งจ่ายไฟฟ้าอีก 1-2 ชุด ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ ACS-712-20A เป็นตัวรับรู้ไฟฟ้ากระแสตรงด้านปฐมภูมิ



ภาคผนวก ข

รหัสคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมการทำงานระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

รหัสคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

ตารางผนวกที่ ข1 รหัสในการสั่งงานหลักของระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

ลำดับที่	คำสั่งการสั่งงาน
1	while(1) // Continue Loop
2	T1 = T+dm; // Start loop by modifies timer
3	if (SW_1 == 0) // SW_1 pushed
4	{ __delay32(1500000); // 0.05 s delay using delay32
5	T1 = T1-5; } // Increase Frequency by decrease period(T)
6	if (SW_2 == 0) // SW_2 pushed
7	{ __delay32(1500000); // 0.05 s delay using delay32
8	T1 = T1+5;} // Decrease Frequency by increase period(T)
9	/****** Limit of T1 *****/
10	if (T1 < 200){T1 = 200;} // Lower limit of T (250 = 120kHz)
11	if (T1 > 30000){T1 = 30000;} // Upper limit of T (30000 = 1kHz)
12	else {T1=T1;} // No action on SW1 and SW2
13	/****** PWM Out on OC1-OC2 *****/
14	Square_out(T1); // Generate square wave by T1
15	/****** Waiting for Stable State *****/
16	__delay32(30000000); // 1s Delay for wait stable state
17	/****** keep ADC to Cal diff ADC *****/
18	ADC_n1 = mean_ADC(); // read ADC to ADC_n1 variable
19	ADC_diff = ADC_n1 - ADC_n0; // Diff ADC_n1 and ADC_n0
20	Idc = 0.0488*(ADC_n1-486); // Convert ADC to Idc
21	/****** Calculate switching frequency (fs) *****/
22	fs = 29.4912/T1; // Convert to fs
23	fs = fs*1000; // convert unit to kHz
24	fs_m1 = fs;
25	fs_diff = fs_m1 - fs_m0;

ตารางผนวกที่ ข2 รหัสในการแสดงผลทางอุปกรณ์แอลซีดี

ลำดับที่	คำสั่งการสั่งงาน
1	/***** LCD Display *****/
2	SetDDRamAddr(0x00); // Start Cursor Line-1
3	sprintf(text,"Idc=%4.2f %d %d\n",Idc, ADC_n1,ADC_diff);
4	PutsLCD(text);
5	SetDDRamAddr(0x40); // Start Cursor Line-2
6	sprintf(text,"%4.2f:%4.2f:%4.2f\n",fs_m0,fs_m1,fs_diff);
7	PutsLCD(text);

ตารางผนวกที่ ข3 รหัสในการส่งค่าจากสถานะปัจจุบันไปสู่สถานะต่อไป

ลำดับที่	คำสั่งการสั่งงาน
1	/***** Prepare for next state *****/
2	ADC_n0 = ADC_n1; // ADC_n1--> ADC_n0 for next state
3	fs_m0 = fs_m1; // fs_m1 --> fs_m0 for next state
4	T = T1; // T1--> T for next state

ตารางผนวกที่ ข4 รหัสในการอ่านค่ากระแสตรงด้วยฟังก์ชันแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

ลำดับที่	คำสั่งการสั่งงาน
1	unsigned int read_ADC(int channel)
2	{ ADCHS = channel; // Select the requested channel
3	ADCON1bits.SAMP = 1; // Start sampling
4	ADCON1bits.SAMP = 0; // Start Converting
5	while (!ADCON1bits.DONE); // Should take 12 * Tad = 3.2us
6	return ADCBUF0; } // returned is between 0 and 1023 inclusive.

ตารางผนวกที่ ข5 รหัสในการคำนวณค่ากระแสตรงที่วัดได้เป็นค่าเฉลี่ย

ลำดับที่	คำสั่งการสั่งงาน
1	unsigned int mean_ADC() // Calculation for Avg of ADC
2	Count
3	{ int n; // n variable for correct ADC
4	int m; // m variable for sum ADC
5	unsigned int ADC_value[60]; // Build ADC array 20 samples
6	unsigned int D; D=0; // D variable for Avg. ADC
7	for(n=0; n<60; n++){ // correct ADC value 20 data
8	ADC_value[n] = read_ADC(6);} // from read_ADC channel AN6
9	for(m=0; m<60; m++){ // Sum ADC value 20 data
10	D = D+ADC_value[m];} //
11	D = D/60; // Avg 20 data
12	return D; } // send Avg ADC by D variable

ตารางผนวกที่ ข6 รหัสในการสร้างสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากฟังก์ชันเปรียบเทียบสัญญาณส่งออก

ลำดับที่	คำสั่งการสั่งงาน
1	////////// Square Wave from Output Compare1-Output Compare2 //////////
2	void Square_out(unsigned long T1)
3	{ // Fcy = 117.9648 MHz/4 = 29.4912 MHz --> Fcy/PR = F_out
4	PR2 = T1; // Set Frequency = Fcy/T
5	TMR2 = 0; // TMR2 and TMR3 start at count "0"
6	OC1R = 0; // OC1 start at TMR2 = 0
7	OC1RS = (0.5*PR2)-(0.05*PR2); // OC1 Stop at TMR2 = 0.5*PR2-Dead Time
8	OC2R = 0.5*PR2; // OC2 Start at TMR2 = 0.5*PR2
9	OC2RS = PR2-(0.05*PR2); } // OC2 Stop at TMR2 = PR2-Dead Time */

ตารางผนวกที่ ข7 รหัสในการค้นหาค่าสูงสุดด้วยวิธีป็นเขาด้วยค่ากระแสตรงสูงสุด

ลำดับที่	คำสั่งการสั่งงาน
1	/***** Searching Method *****/
2	if (ADC_diff > 0) // Check ADC increase
3	{ if (fs_diff < 0){dm = 8;} // in case of fs decreased --> decrease fs
4	else {dm = -8;} // in case of fs increased and NC --> increase fs
5	if (ADC_diff < 0) // Check ADC decrease
6	{ if (fs_diff > 0){dm = 8;} // in case of fs increased--> decrease fs
7	else {dm = -8;} // in case of fs decreased and NC --> increase fs
8	if (ADC_diff == 0)
9	{ dm = 0;} // in case ADC no change set dm to 0

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายณัฐกร กิริติไพบูลย์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	10 กรกฎาคม 2525
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-