

หม้อแปลงเทสลาแบบโซลิดสเตทเรโซแนนท์คู่

DUAL RESONANT SOLID STATE TESLA TRANSFORMER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-020-206

หม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่

DUAL RESONANT SOLID STATE TESLA TRANSFORMER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-020-206

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DUAL RESONANT SOLID STATE TESLA TRANSFORMER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

KMITL-2015-EN-M-020-206

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ หม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่
Thesis Title Dual Resonant Solid State Tesla Transformer
นักศึกษา นายวัชร พงศ์สถิต
รหัสประจำตัว 56601081
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พีรวัฒน์ ยุทธโกวิท
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M- 020 - 206

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	
ดร.สมภพ	ผลไม้	
ผศ.ดร.ศุภกิตต์	โชติโก	
ผศ.ดร.นรเศรษฐ์	พัฒนเดช	
ผศ.ดร.พีรวัฒน์	ยุทธโกวิท	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2558 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRAKANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	หม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตทเรโซแนนท์คู่
นักศึกษา	นายวีชรา พงศ์สถิต
รหัสนักศึกษา	56601081
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พีรฤทธิ ยูทธโกวิท

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตทเรโซแนนท์คู่ (Dual resonant solid state Tesla coil) พิกัด 120 kV 200 kHz เนื่องจากหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิมจะมีพลังงานสูญเสียที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากการสปาร์กของสปาร์กแก๊ป ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการระบายความร้อน นอกจากนี้แล้วหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิมจะมีโครงสร้างที่ค่อนข้างใหญ่เนื่องจากจะต้องมีสปาร์กแก๊ป หม้อแปลงปรับแรงดัน และหม้อแปลงแรงดันสูง จึงทำให้ไม่สะดวกมากนักสำหรับการทดสอบทางไฟฟ้าในห้องทดสอบที่มีขนาดเล็กภายในโรงงานจริง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการพัฒนาหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตทเรโซแนนท์คู่ขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดสอบความผิดพลาดของลูกถ้วยฉนวน เพื่อยืนยันประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตทเรโซแนนท์คู่ซึ่งมีความสูงประมาณ 0.6 m จึงได้ทำการทดสอบหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตทเรโซแนนท์คู่ที่พัฒนาขึ้นนี้ โดยการทดสอบการวางไฟตามผิวกับลูกถ้วยแขวน (Suspension Insulator) ชนิด ANSI 52-1 ลูกถ้วยแขวน ชนิด ANSI 52-4 และลูกถ้วยแบบแท่ง (Line Post Insulator) ชนิด ANSI 57-2 จากการทดลองพบว่าหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตทเรโซแนนท์คู่ที่ได้ประกอบสร้างขึ้นสร้างแรงดันสูงที่ความถี่ประมาณ 200 kHz (180 kHz ถึง 201 kHz) และสามารถทดสอบการวางไฟตามผิวของลูกถ้วยแบบแขวน และลูกถ้วยแบบแท่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้หม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตทเรโซแนนท์คู่ที่ได้ประกอบสร้างขึ้นยังเป็นหม้อแปลงเตสลาที่มีขนาดกะทัดรัดที่สุดที่สามารถใช้ในการทดสอบลูกถ้วยแขวนในระบบจำหน่ายได้จริงในทางปฏิบัติ จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตทเรโซแนนท์คู่ที่ได้ทำการออกแบบและพัฒนาขึ้นจึงเป็นที่น่าสนใจมากสำหรับเพื่อใช้ในการทดสอบความผิดพลาดของลูกถ้วยฉนวนในการทดสอบจริง

Thesis Title	Dual Resonant Solid State Tesla Transformer
Student	Mr. Watchara Pongsathit
Student ID.	56601081
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Peerawut Yutthagowith

ABSTRACT

This thesis presents design and construction of a compact dual resonant solid state Tesla transformer (CDRSSTT) with rating of 120 kV 200 kHz. Because the conventional circuit of the CTT has high loss from the quenching gap, a cooling system is required. Additionally, its structure is large due to the sizes of the quenching gap, the voltage regulator, and the high-voltage transformer, so it is not convenient to use for the electrical soundness test in a small testing room in the actual factory. Therefore, the CDRSSTT is necessary to develop. The aim of developing the CDRSSTT is to use to perform the electrical soundness of insulators. The experiments have been carried out to confirm the performance of the developed CDRSSTT. In the experiments, the developed CDRSSTT with the height of 0.6 m was employed in the electrical soundness test of insulators. The insulators under test are suspension type ANSI 52-1, suspension type ANSI 52-4, and post type ANSI 57-2. It is found that the CDRSSTT can generate high voltage with frequency about 200 kHz (180 to 201 kHz) and make flashovers on the insulators under test. In addition, the developed CDRSSTT is also the most compact one that it can be used for insulator test in the real practice. From the reasons above, the developed CDRSSTT is very attractive to use for the electrical soundness test of insulators in the real practice.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความกรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาจาก ผศ.ดร.พีรฤติ ยุทธโกวิท ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณปณณวีร์ นายศิริ คุณบัญญัติ ลีลาจริยกุล คุณปิยะพล ถือทอง คุณบุษยพล เพาพาน คุณนวนคุณ ไตรรัตน์ภักดิ์ คุณชาติอริยะ ประเสริฐสังข์ และคุณเสาวลักษณ์ แสงศรีจันทร์ ตลอดจนพี่ๆ น้องๆ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาและคอยให้กำลังใจผู้จัดทำเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และอาจารย์ผจงจิต มุสิกะวัน ผู้ให้การศึกษาอบรมสั่งสอน ให้กำลังใจในการดำเนินชีวิตและการทำงาน รวมถึงครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

วีชรา พงศ์สถิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ขอบเขตการทำวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.6 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 ทฤษฎีทั่วไป.....	5
2.3 การเกิดเรโซแนนซ์ในวงจร LC.....	6
2.3.1 วงจรเรโซแนนซ์อนุกรม.....	6
2.4 การเกิดออสซิลเลทในวงจรหม้อแปลงเตสลา.....	8
2.5 ลูกถ้วยฉนวน (Insulators).....	10
2.5.1 คุณสมบัติของลูกถ้วย (Properties of Insulators).....	10
2.5.2 การฉนวนภายนอกและการฉนวนภายใน (External Insulation and Internal Insulation).....	11
2.5.3 ชนิดของลูกถ้วยฉนวน (Type of Insulators).....	11
2.5.4 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลน.....	14
2.5.5 การทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลน (Porcelain Insulator Test).....	14
2.5.5.1 การทดสอบเฉพาะแบบ (Type Test).....	14
2.5.5.2 การทดสอบรับรอง (Acceptance Test).....	15
2.5.5.3 การทดสอบประจำ (Routine Test).....	15
2.6 หลักการทำงานของหม้อแปลงเตสลา.....	15
2.6.1 หลักการทำงานของหม้อแปลงเตสลาโดยทั่วไป.....	15
2.6.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท.....	19
- สภาวะเริ่มการทำงานของวงจร.....	23
- สภาวะการทำงานอย่างต่อเนื่อง.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม.....	24
2.7.1 หลักการทำงานเบื้องต้น.....	24
2.7.2 การสูญเสียจากการสวิตชิง.....	25
2.7.3 การควบคุมขนาดแรงดัน.....	26
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง.....	27
3.1 เงื่อนไขการออกแบบ.....	27
3.2 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ (C_2).....	27
3.2.1 ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบวงแหวน (Toroid; C_T).....	27
3.2.2 ค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดด้านทุติยภูมิ (Self-Capacitance; C_S).....	29
- กรณีค่าความจุไฟฟ้าแฝงของหม้อแปลงเทสลา แบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแห้ง).....	29
- กรณีค่าความจุไฟฟ้าแฝงของหม้อแปลงเทสลา แบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแฉวน).....	29
3.3 การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านทุติยภูมิ (L_2).....	30
3.3.1 กรณีการออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเทสลา แบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแห้ง).....	30
3.3.2 กรณีการออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเทสลา แบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแฉวน).....	32
3.4 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (C_1).....	33
3.5 การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านปฐมภูมิ (L_1).....	34
3.6 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรกำลัง.....	36
3.7 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรควบคุม.....	36
3.8 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรควบคุม.....	37
3.9 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์.....	39
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	40
4.1 กล่าวนำ.....	40
4.2 การทดสอบหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่.....	40
4.2.1 การตรวจสอบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแห้ง).....	40
4.2.2 การตรวจสอบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแฉวน).....	41
4.2.3 การตรวจสอบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิ.....	41
4.2.4 การตรวจสอบค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ.....	42
4.2.5 การจำลองระบบการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ OrCAD.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อVอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.6 การทดสอบวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน โดยหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	53
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
เอกสารอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก.....	55
ภาคผนวก ก. การออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม.....	56
ก1. การออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม.....	57
ก2. การทดลองและสรุปผลการทดลองหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม.....	70
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	77
ประวัติผู้เขียน.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดVIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท และหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทโรซแนนท์คู่.....	21
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทและหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม.....	22
ตารางที่ 2.3 พลังงานที่สูญเสียจากการนำกระแสของอุปกรณ์สวิตชิง.....	22
ตารางที่ 3.1 ค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมต่อพันขดลวดด้านทุติยภูมิตามเงื่อนไขการออกแบบ ที่กำหนด.....	30
ตารางที่ 3.2 ค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมต่อพันขดลวดด้านทุติยภูมิตามเงื่อนไขการออกแบบ ที่กำหนด.....	32
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิที่ได้จากการวัด.....	41
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบเพื่อหาความถี่จากการทดสอบวาปไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน.....	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตี VI างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

			หน้า
รูปที่ 2.1	วงจรมุมูลของหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม.....		5
รูปที่ 2.2	วงจร LC แบบขนานและแบบอนุกรม.....		6
รูปที่ 2.3	วงจรเรโซแนนท์อนุกรม.....		6
รูปที่ 2.4	กราฟแสดงลักษณะอิมพีแดนซ์ในวงจร RLC แบบอนุกรม.....		8
รูปที่ 2.5	การเกิดออสซิลเลชันในวงจรหม้อแปลงเตสลา (ขณะอัดประจุ).....		8
รูปที่ 2.6	การเกิดออสซิลเลชันในวงจรหม้อแปลงเตสลา (ขณะคายประจุ).....		9
รูปที่ 2.7	การเกิดออสซิลเลชันในวงจรหม้อแปลงเตสลา (ขณะอัดประจุใหม่).....		9
รูปที่ 2.8	การเกิดออสซิลเลชันในวงจรหม้อแปลงเตสลา (ขณะคายประจุใหม่).....		9
รูปที่ 2.9	รูปคลื่นที่เกิดจากการแกว่ง (Oscillation) ในหม้อแปลงเตสลา.....		10
รูปที่ 2.10	ลูกถ้วยก้านตรง (Pin Insulator).....		11
รูปที่ 2.11	ลูกถ้วยก้านตรงแบบฟ็อก (Fog Type Pin Insulator).....		12
รูปที่ 2.12	ลูกถ้วยแท่ง (Line Post Insulator).....		12
รูปที่ 2.13	ลูกถ้วยแท่งก้านตรง (Pin Post Insulator).....		12
รูปที่ 2.14	ลูกถ้วยหลัก (Post Insulator).....		13
รูปที่ 2.15	ลูกถ้วยแขวน (Suspension Insulator).....		13
รูปที่ 2.16	ลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน (Solid Core Suspension Insulator).....		13
รูปที่ 2.17	ลูกถ้วยคอตันยาว (Long Rod Insulator).....		14
รูปที่ 2.18	วงจรมุมูลของหม้อแปลงเตสลาที่ออกแบบ.....		15
รูปที่ 2.19	การเหนี่ยวนำของหม้อแปลงเตสลาโดยมีค่า M เป็นค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำ.....		17
รูปที่ 2.20	วงจรมุมูลของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตท.....		20
รูปที่ 2.21	วงจรมุมูลของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตทเรโซแนนท์คู่.....		21
รูปที่ 2.22	แผนผังการทำงานของวงจรหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตทเรโซแนนท์คู่.....		22
รูปที่ 2.23	สภาวะเริ่มการทำงานของวงจรหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตท.....		23
รูปที่ 2.24	สภาวะการทำงานของวงจรหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตทอย่างต่อเนื่อง.....		23
รูปที่ 2.25	วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบอนุกรม.....		24
รูปที่ 2.26	วงจรมุมูล R-L-C.....		24
รูปที่ 3.1	พารามิเตอร์อิลเล็กโตรดแบบวงแหวน (Toroid).....		28
รูปที่ 3.2	อิลเล็กโตรดแบบวงแหวนของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตท.....		28
รูปที่ 3.3	พารามิเตอร์ของความจุไฟฟ้าแฝง (Self-Capacitance).....		29
รูปที่ 3.4	พารามิเตอร์จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ.....		31
รูปที่ 3.5	พารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ.....		31
รูปที่ 3.6	ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตท (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแท่ง).....		32
รูปที่ 3.7	ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิดสเตท (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแขวน).....		33
รูปที่ 3.8	แสดงการต่อตัวเก็บประจุขนานกัน 3 ชุด และอนุกรมชุดละ 10 ตัว.....		34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VIII ำงอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

			หน้า
รูปที่ 3.9	ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่	.....	34
รูปที่ 3.10	พารามิเตอร์ในการพันขดลวดด้านปฐมภูมิแบบ Helical Coil	.....	35
รูปที่ 3.11	ขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่	.....	35
รูปที่ 3.12	แผนผังการทำงานของวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรกำลัง	.....	36
รูปที่ 3.13	วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรกำลัง (Bridge Rectifier)	.....	36
รูปที่ 3.14	แผนผังการทำงานของวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรควบคุม	.....	37
รูปที่ 3.15	วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรควบคุม	.....	37
รูปที่ 3.16	แผนผังการทำงานของวงจรควบคุม	.....	38
รูปที่ 3.17	วงจรควบคุม	.....	38
รูปที่ 3.18	แผนผังการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์	.....	39
รูปที่ 3.19	วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์	.....	39
รูปที่ 4.1	ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแห้ง)	.....	40
รูปที่ 4.2	ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแฉวน)	.....	41
รูปที่ 4.3	ตัวอย่างการวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิรอบที่ 10	.....	42
รูปที่ 4.4	การวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ	.....	42
รูปที่ 4.5	วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบการทำงานของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท	.....	43
รูปที่ 4.6	ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิง	.....	43
รูปที่ 4.7	แรงดันที่ขดลวดของวงจรด้านปฐมภูมิ	.....	44
รูปที่ 4.8	กระแสที่ขดลวดของวงจรด้านปฐมภูมิ	.....	44
รูปที่ 4.9	แรงดันที่ขดลวดของวงจรด้านทุติยภูมิ	.....	44
รูปที่ 4.10	วงจรที่ใช้ทดสอบหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่	.....	45
รูปที่ 4.11	วงจรที่ใช้ทดสอบหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่	.....	46
รูปที่ 4.12	ลักษณะสัญญาณทริกเกอร์เริ่มการทำงานของวงจรควบคุม	.....	47
รูปที่ 4.13	ลักษณะสัญญาณป้อนกลับจากวงจรป้อนกลับ	.....	47
รูปที่ 4.14	ลักษณะสัญญาณขั้วนำเกตไอจีบีที	.....	48
รูปที่ 4.15	สัญญาณขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์	.....	48
รูปที่ 4.16	การทดสอบวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยแฉวนชนิด 52-1	.....	49
รูปที่ 4.17	รูปคลื่นความถี่ที่วัดได้จากการทดสอบวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยแฉวนชนิด 52-1	.....	49
รูปที่ 4.18	การทดสอบวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยแฉวนชนิด 52-4	.....	50
รูปที่ 4.19	รูปคลื่นความถี่ที่วัดได้จากการทดสอบวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยแฉวนชนิด 52-4	.....	50
รูปที่ 4.20	การทดสอบวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยแห้งชนิด 57-2	.....	51
รูปที่ 4.21	รูปคลื่นความถี่ที่วัดได้จากการทดสอบวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยแห้งชนิด 57-2	.....	51
รูปที่ 4.22	ตัวอย่างทดสอบวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยบกพร่อง	.....	52
รูปที่ 4.23	โครงสร้างรองรับอุปกรณ์หลังจากติดตั้งส่วนประกอบต่างๆ แล้ว	.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงข้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบันห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีหม้อแปลงทดสอบสำหรับการทดสอบการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน พิกัด 400 kV 200 kHz อย่างไรก็ตามหม้อแปลงทดสอบแบบดั้งเดิมที่ใช้ทดสอบความผิดปกติของลูกถ้วยฉนวนนั้นมีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่ น้ำหนักมากและมีราคาแพง อันเนื่องมาจากจะต้องมีสปาร์กแกป หม้อแปลงปรับระดับแรงดันและหม้อแปลงแรงดันสูง อีกทั้งยังมีพลังงานสูญเสียที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากการสปาร์กของสปาร์กแกป จึงจำเป็นที่จะต้องมีการระบายความร้อนที่ดี ซึ่งส่งผลให้เคลื่อนย้ายได้ลำบากและไม่สะดวกมากนัก สำหรับการทดสอบทางไฟฟ้าในห้องทดสอบที่มีขนาดเล็กภายในโรงงานจริง

ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาของหม้อแปลงทดสอบแบบดั้งเดิม ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษา ค้นคว้า และออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ขึ้น โดยการประยุกต์ใช้ความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดสอบความผิดปกติของลูกถ้วยฉนวน ซึ่งหม้อแปลงทดสอบแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ที่ได้รับการพัฒนานี้จะสามารถทดสอบความผิดปกติของลูกถ้วยฉนวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความกะทัดรัด น้ำหนักเบา มีค่าใช้จ่ายในการประกอบสร้างที่ต่ำและอุปกรณ์สามารถหาได้ภายในประเทศ จึงเป็นที่น่าสนใจมากสำหรับเพื่อใช้ในการทดสอบความผิดปกติของลูกถ้วยฉนวนในการทดสอบจริง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความมุ่งหมายในการส่งเสริมงานวิจัย และพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทดสอบ ตลอดจนการพัฒนาหม้อแปลงทดสอบแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ พิกัดแรงดัน 120 kV ความถี่ 200 kHz ให้สามารถทดสอบความผิดปกติของลูกถ้วยฉนวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความกะทัดรัด น้ำหนักเบา ค่าใช้จ่ายในการประกอบสร้างที่ต่ำและอุปกรณ์สามารถหาได้ภายในประเทศ

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

หม้อแปลงทดสอบสำหรับการทดสอบการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนแต่เดิมที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่ น้ำหนักมากและมีราคาแพง อันเนื่องมาจากจะต้องมีสปาร์กแกป หม้อแปลงปรับระดับแรงดันและหม้อแปลงแรงดันสูง อีกทั้งยังมีพลังงานสูญเสียที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากการสปาร์กของสปาร์กแกป จึงจำเป็นที่จะต้องมีการระบายความร้อนที่ดี ซึ่งส่งผลให้เคลื่อนย้ายได้ลำบากและไม่สะดวกมากนัก สำหรับการทดสอบทางไฟฟ้าในห้องทดสอบที่มีขนาดเล็กภายในโรงงานจริง จึงมีการพัฒนาหม้อแปลงทดสอบแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ พิกัดแรงดัน 120 kV ความถี่ 200 kHz ให้สามารถทดสอบความผิดปกติของลูกถ้วยฉนวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความกะทัดรัด น้ำหนักเบา มีค่าใช้จ่ายในการประกอบสร้างที่ต่ำและอุปกรณ์สามารถหาได้ภายในประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ พิกัดแรงดัน 120 kV ความถี่ 200 kHz ให้สามารถทดสอบความผิดพลาดของลูกถ้วยฉนวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความกะทัดรัด น้ำหนักเบา ค่าใช้จ่ายในการประกอบสร้างที่ต่ำ และอุปกรณ์สามารถหาได้ภายในประเทศ

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถแบ่งเป็นหัวข้อตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาหลักการทำงานของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท
- 3) ศึกษาหลักการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- 4) โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองแบบทางไฟฟ้าวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรม OrCAD
- 5) ออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่
- 6) พัฒนาวิธีการปรับจูนหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่เพื่อให้ได้รูปคลื่นตามที่มาตรฐานกำหนด
- 7) ทำการทดสอบลูกถ้วยฉนวน
- 8) นำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่กำหนดไว้
- 9) สรุปผล ข้อเสนอแนะ
- 10) จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมุติฐานแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการศึกษา และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิมและผลการทดสอบลูกถ้วยฉนวนจากหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

1.6 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2536 มีการพัฒนาออกแบบสร้างหม้อแปลงเตสลาสำหรับทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน โดย สářรวย สังข์สะอาด จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [1] โดยมีการออกแบบสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบใหม่ ที่ให้ขดลวดด้านทุติยภูมิติดตั้งในท่อฉนวนบรรจุก๊าซ N_2 อัตราความดันที่ 2.5 บาร์ เป็นฉนวนขดลวดด้านทุติยภูมิ และเป็นฉนวนระหว่างขดลวดด้านทุติยภูมิกับขดลวดด้านปฐมภูมิ โดยออกแบบสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบใหม่ที่มีพิกัด 400 kV 200 kHz สำหรับทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน จากการทดสอบพบว่าสามารถทดสอบการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนได้ และให้ความถี่ขาออก 227 kHz และทดสอบกับลูกถ้วยแท่งก้านตรงให้ความถี่ขาออก 278 kHz ซึ่งตรงกับที่มาตรฐานกำหนด แต่เนื่องจากมีลักษณะโครงสร้างที่ค่อนข้างใหญ่ จึงทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้งานในพื้นที่ที่จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี พ.ศ. 2545 มีการออกแบบและสร้างหม้อแปลงเตสลาพิกัดแรงดัน 400 kV 200 kHz ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง [2] โดย นายพุทธิรักษ์ มธุรส นายขวัญชัย เชิญขวัญ และนายสมศักดิ์ บุญธรรม สำหรับใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน จากการทดสอบพบว่าสามารถทดสอบการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย ก้านตรงชนิด 56-2, 56-3 และลูกถ้วยแท่งชนิด 57-2 ได้ และให้ความถี่ด้านขาออก 250 kHz ซึ่งความถี่ที่วัดได้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด แต่โครงสร้างของหม้อแปลงเตสลาที่มีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่ ทำให้ไม่สะดวกมากนักหากทำการทดสอบในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด

ในปี พ.ศ. 2546 มีการออกแบบหม้อแปลงเตสลาโดยใช้แหล่งจ่ายแบบสวิตช์สำหรับใช้ทดสอบฉนวน ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ [3] โดย นายฐิติพงศ์ สมัครพงศ์ เพื่อใช้ในการทดสอบฉนวนและใช้แหล่งจ่ายแบบสวิตช์กระแสตรง (DC Switching power supply) ที่มีพิกัด 5 kVA แรงดัน 7.5 kV ความถี่ในการสวิตช์ 10 kHz เป็นแหล่งจ่ายให้กับหม้อแปลงเตสลาแทนการใช้หม้อแปลงกำลังกระแสสลับ (AC Power Transformer) ซึ่งหม้อแปลงเตสลาโดยใช้แหล่งจ่ายแบบสวิตช์สามารถใช้ทดสอบกับลูกถ้วยฉนวนชนิดต่างๆ ที่ใช้กับระบบจำหน่ายแรงดัน 22 kV หรือ 33 kV ได้ และมีความถี่ด้านขาออก 100 kHz ซึ่งปัจจุบันตามมาตรฐาน ANSI C29.1(R2012) [4] กำหนด การทดสอบประจำสำหรับลูกถ้วยฉนวนควรมีความถี่ประมาณ 200 kHz จึงทำให้ความถี่ขาออกของหม้อแปลงเตสลาโดยใช้แหล่งจ่ายแบบสวิตช์นี้ไม่เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด และยังพบว่าโครงสร้างของหม้อแปลงเตสลาโดยใช้แหล่งจ่ายแบบสวิตช์ยังคงมีโครงสร้างที่ใหญ่เกินไป ทำให้ไม่สะดวกในการเคลื่อนย้ายและทดสอบในพื้นที่จำกัด

ในปี พ.ศ. 2551 มีการสร้างหม้อแปลงเตสลา ตามหลักสูตรเทคโนโลยีบัณฑิต มหาวิทยาลัยบูรพา โดย ประพัฒน์ รั้วโรสง นนท์ หุ่นทอง และวัลลภ อินพรม เพื่อเป็นอุปกรณ์ทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน [5] ผลที่ได้ปรากฏว่าหม้อแปลงเตสลาสามารถสร้างแรงดันได้ 100 kV 100-250 kHz ซึ่งสามารถเลือกความถี่ได้โดยปรับขดลวดด้านปฐมภูมิ และยังสามารถปรับตั้งเกาเบิพัดของสปาร์กเกาเบิดับอาร์ก ที่เป็นตัวกำหนดแรงดันที่จะบ่อนให้ขดลวดด้านปฐมภูมิให้จ่ายพลังงานได้ตามที่ต้องการ จากการทดสอบการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนแท่งก้านตรงเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด แต่ผลการทดสอบความถี่ขาออกที่วัดได้จากลูกถ้วยหลัก ไม่เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด และโครงสร้างของหม้อแปลงเตสลาที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ จึงไม่สะดวกต่อการทดสอบในพื้นที่จำกัด

ในปี พ.ศ. 2552 จากผลงานของ อุดม พรหมศรีจันทร์ นรงค์ฤทธิ์ เสนาจิตร และ ไชยพร หล่อทองคำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร [6] ได้ทำการออกแบบหม้อแปลงเตสลาโดยใช้เทคนิคฟลูบริดจ์อินเวอร์เตอร์แทนหลักการเดิมที่ใช้การสปาร์กผ่านเกาเบิ โดยสามารถสร้างแรงดันขาออกได้ 35 kV ใช้การควบคุมสัญญาณด้วย TL 494 ให้กับมอสเฟตในขณะสวิตช์ ความถี่การสวิตช์ของมอสเฟตสามารถควบคุมการทำงานอยู่ในช่วงความถี่ 30-200 kHz ผลการทดสอบพบว่าสามารถทดสอบการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนชนิด 52-1 ได้ และความถี่ที่วัดได้อยู่ในช่วง 170-200 kHz แต่ยังคงขาดข้อมูลการฟรุบคลื่นความถี่ที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งทำให้ไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าความถี่ที่วัดได้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ เนื่องจากแรงดันที่สร้างได้มีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนชนิด 52-1 อย่างมาก (ประมาณ 60 kV) อย่างไรก็ตามผลงานนี้นับได้ว่าเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการศึกษาและการสร้างแบบทดสอบลูกถ้วยฉนวน

ในปี พ.ศ. 2557 มีการศึกษาวิเคราะห์การออกแบบสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตทเตสลา ขนาดพิกัด 100 kV 150 kHz ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี [7] โดย สุพจน์ วรธิพรหมมา ได้ทำการออกแบบสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตทเตสลา พิกัด 100 kV 150 kHz เพื่อทำการศึกษารูปแบบสวิตช์ที่เหมาะสมในการสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตทเตสลา โดยจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink ใน 4 รูปแบบคือ การใช้สวิตช์แบบสปาร์กแกป การใช้สวิตช์ซีเล็คทรอนิกส์แบบต่อตรง, ฮาล์ฟบริดจ์และฟลูบริดจ์ อินเวอร์เตอร์ ซึ่งผลการวิจัยพบว่า รูปแบบการสวิตช์แบบฮาล์ฟบริดจ์ เป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในการสร้าง ซึ่ง หม้อแปลงโซลิตสเตทเตสลาเมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงเตสลาที่ใช้สปาร์กแกปเป็นสวิตช์มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการทดสอบการวาวไฟตามผิวกับลูกถ้วยฉนวน ทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าทำการทดสอบกับลูกถ้วยฉนวนได้หรือไม่ และโครงสร้างของหม้อแปลงเตสลา ยังคงมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่เกินไป จึงไม่สะดวกต่อการทดสอบในพื้นที่ที่จำกัด

ในปี พ.ศ. 2557 มีการพัฒนางจรสวิตช์สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้า ความถี่สูง แรงดันสูง กระแสสลับ โดย มณฑิร ผ่องแผ้ว และคณะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี [8] โดยใช้อุปกรณ์โซลิตสเตทเข้ามาประยุกต์ใช้ในการสร้างและใช้อิเล็กทรอนิกส์กำลังควบคุมและสร้างความถี่สูงเพื่อทดแทนหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม จากการทดสอบพบว่ามีความถี่ขาออกสูงสุดที่ 151.5 kHz และแรงดันขาออก 140 kV_p ซึ่งสามารถทดสอบกับลูกถ้วยก้านตรงชนิด 55-5 ได้ แต่อย่างไรก็ตามความถี่ที่วัดได้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน แต่ถือได้ว่าผลงานนี้เป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการศึกษาลักษณะการทำงานของวงจรสวิตช์สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้า ความถี่สูง แรงดันสูง กระแสสลับ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ พิกัดแรงดัน 120 kV ความถี่ 200 kHz เพื่อใช้ทดสอบความผิดพร่องของลูกถ้วยฉนวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความกะทัดรัด น้ำหนักเบา มีค่าใช้จ่ายในการประกอบสร้างที่ต่ำและอุปกรณ์สามารถหาได้ภายในประเทศ

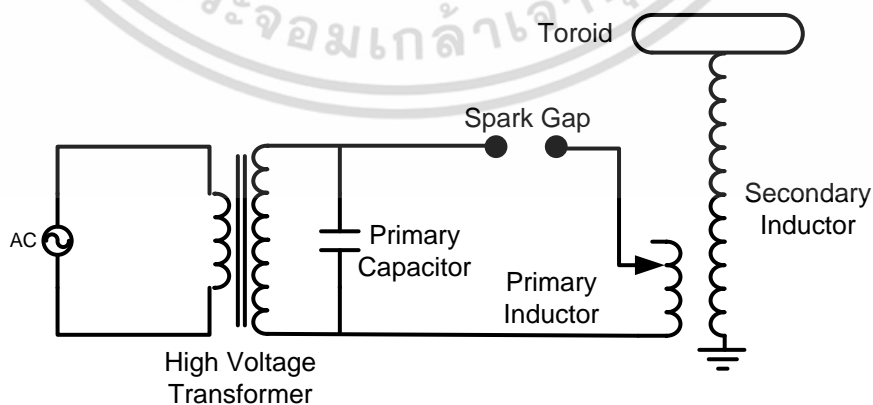
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทนั้น ก่อนอื่นต้องทราบทฤษฎีและหลักการทำงานของหม้อแปลงเทสลาแบบดั้งเดิม และหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทเสียก่อน รวมถึงองค์ประกอบพื้นฐานที่เกี่ยวกับส่วนประกอบและการทดสอบต่างๆ ของหม้อแปลง เช่น คุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวน การทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลน หลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อที่จะนำไปใช้ในการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

2.2 ทฤษฎีทั่วไป [2]

หม้อแปลงเทสลา (Tesla Transformer) จัดได้ว่าเป็นประเภทของหม้อแปลงชนิดพิเศษ โดยที่แกนของหม้อแปลงจะเป็นแกนอากาศ ขดลวดด้านปฐมภูมิ (Primary) และขดลวดด้านทุติยภูมิ (Secondary) จะติดตั้งอยู่ในแกนร่วมกัน การสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงและความถี่สูงของหม้อแปลงเทสลาจะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนรอบ (Turn Ratio) ของขดลวดด้านปฐมภูมิและขดลวดด้านทุติยภูมิ แต่จะอาศัยหลักการ การเกิดเรโซแนนซ์ (Resonance) ระหว่างวงจรด้านปฐมภูมิและวงจรด้านทุติยภูมิ ซึ่งมีลักษณะของวงจรเป็นวงจร LC เมื่อ L คือ ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance) และ C คือ ความจุไฟฟ้า (Capacitance) โดยขดลวดทั้งสองจะเกิดการคาบเกี่ยว (Coupling) กันด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางผ่านอากาศ (Air Core) เพราะฉะนั้นค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) จะมีค่าต่ำ ขดลวดด้านทุติยภูมิจะเป็นตัวรับพลังงานจากขดลวดด้านปฐมภูมิ ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency) จะเป็นผลทำให้เกิดแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่าระหว่าง 50 Hz ถึง 400 kHz แรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกจะมีค่าเริ่มต้นตั้งแต่ 100 kV ขึ้นไป หากแรงดันที่ป้อนให้มีค่าเพียงพอแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกจะมีค่าเพิ่มขึ้นถึงช่วงเมกกะโวลต์ และถ้ามีแรงดันเพิ่มสูงขึ้นถึงช่วงที่มีระดับแรงดันที่แน่นอนแล้ว จะทำให้เกิดการสปาร์ก (Spark) และจะเปลี่ยนเป็นลำฟ้าผ่า (Lightning) ซึ่งจะสังเกตเห็นลำแสงได้ชัดเจน

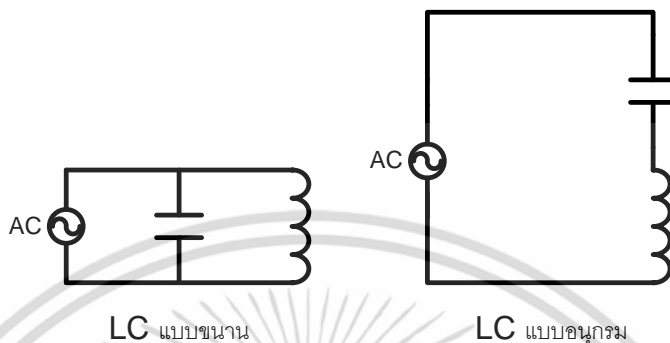


รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของหม้อแปลงเทสลาแบบดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การเกิดเรโซแนนซ์ในวงจร LC [9]

วงจรไฟฟ้าที่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นส่วนประกอบของวงจร สามารถก่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ขึ้นในวงจรได้ ในการพิจารณาวงจร LC เราสามารถแบ่งชนิดของวงจร LC ออกเป็น 2 ประเภทคือ วงจร LC แบบขนาน และวงจร LC แบบอนุกรม



LC แบบขนาน

LC แบบอนุกรม

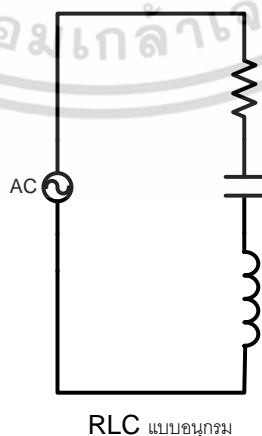
รูปที่ 2.2 วงจร LC แบบขนานและแบบอนุกรม

วงจร LC แบบขนาน แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ จะมีมูฟเฟสและค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เท่ากัน ในขณะที่รูปคลื่นกระแสจะแตกต่างกัน 180 องศา และขนาดของกระแสก็อาจจะมีค่าที่แตกต่างกันด้วย

วงจร LC แบบอนุกรม กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่รูปคลื่นแรงดันจะแตกต่างกัน 180 องศา และขนาดของแรงดันก็อาจจะมีค่าที่แตกต่างกันด้วย สำหรับวงจรหม้อแปลงเทสเหล่านั้น การต่อร่วมกันระหว่างตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ รวมทั้งตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิ จะก่อให้เกิดเป็นวงจร LC แบบอนุกรมขึ้น

2.3.1 วงจรเรโซแนนซ์อนุกรม

วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมเป็นลักษณะของการต่อวงจร RLC อนุกรมกัน ในความเป็นจริงชิ้นส่วนวงจรประเภทรีแอคทีฟจะมีส่วนที่ทำให้เกิดพลังงานสูญเสียเปล่า (Energy Loss) โดยสามารถจำลองพลังงานที่สูญเสียให้อยู่ในรูปของความต้านทานอนุกรมเข้ากับ L และ C ดังนี้



RLC แบบอนุกรม

รูปที่ 2.3 วงจรเรโซแนนซ์อนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจร RLC อนุกรมจากสมการที่ (2.1)

$$Z = Z_R + Z_L + Z_C \quad (2.1)$$

เนื่องจาก $Z_L = jX_L$ และ $Z_C = jX_C$ แทนค่าลงในสมการที่ (2.1) จะได้

$$Z(j\omega) = R + j\omega L - \frac{1}{j\omega C} \quad (2.2)$$

ณ จุดเรโซแนนท์ $\omega = \omega_0$ จะได้ $Z(j\omega_0) = R$ นั่นคือเทอมที่เป็นจำนวนจินตภาพเท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้น จากสมการที่ (2.2) จะได้

$$\begin{aligned} j\left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right) &= 0 \\ \omega_0 L &= \frac{1}{\omega_0 C} \\ \omega_0^2 &= \frac{1}{LC} \\ \omega_0 &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

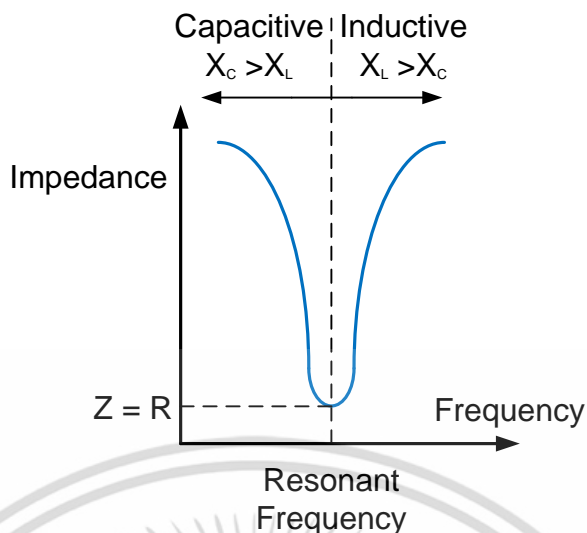
เมื่อ ω_0 คือ ความถี่เชิงมุม ณ จุดเรโซแนนท์ (rad/s)
 f_0 คือ ความถี่เรโซแนนท์ (Hz)
 L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (H)
 C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (F)

ดังนั้นความถี่เรโซแนนท์คือ

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.4)$$

กรณี $\omega < \omega_0$ อิมพีแดนซ์ของ C จะมีค่าสูง แต่อิมพีแดนซ์ของ L จะมีค่าต่ำ ทำให้กระแส I นำหน้าแรงดันไฟฟ้า V แสดงว่าความถี่ต่ำมีผลจากเทอมคาปาซิทีฟ ส่วนกรณี $\omega > \omega_0$ อิมพีแดนซ์ของ C จะมีค่าลดลง แต่อิมพีแดนซ์ของ L เพิ่มขึ้น ทำให้กระแส I ล้าหลังแรงดันไฟฟ้า V คือที่ความถี่สูงจะมีผลจากเทอมอินดักทีฟ แต่ ณ ความถี่เรโซแนนท์ ($\omega = \omega_0$) ค่าอิมพีแดนซ์ของ L และ C จะเท่ากันและหักล้างกันพอดี

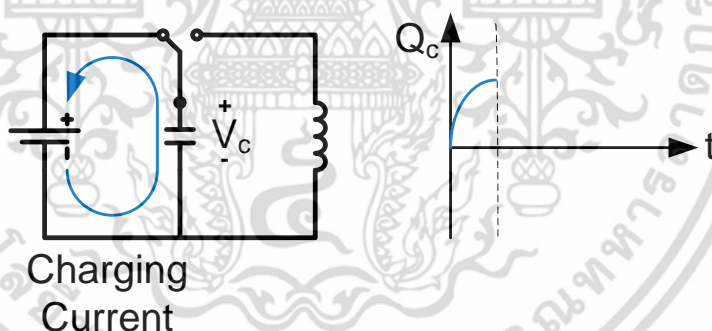
ที่ความถี่เรโซแนนท์ แรงดันและกระแสจะมีเฟสตรงกัน ทำให้มีมุมเฟส (θ) เป็นศูนย์ จากสมการที่ (2.2) จะได้ว่าวงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรม ค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าต่ำที่สุด ทำให้กระแสไหลในวงจรมากที่สุด



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงลักษณะอิมพีแดนซ์ในวงจร RLC แบบอนุกรม

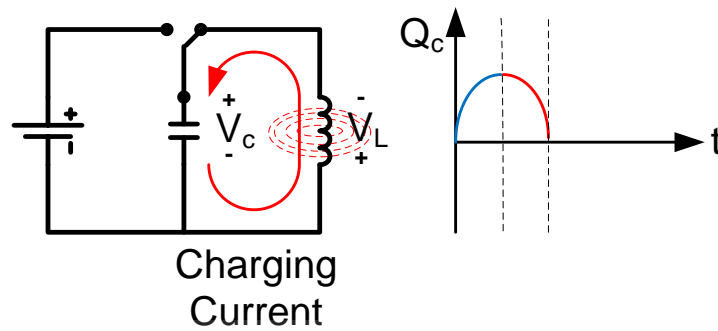
2.4 การเกิดออสซิลเลทในวงจรหม้อแปลงเทสลา [9]

การทำงานของวงจรหม้อแปลงเทสลาเริ่มจากหม้อแปลงตัวจ่ายกำลังไฟฟ้า แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ให้เป็นแรงดันสูง เพื่อจ่ายให้กับวงจรด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิจะถูกอัดประจุจากหม้อแปลงแรงดันสูงด้วยแรงดันค่าหนึ่ง



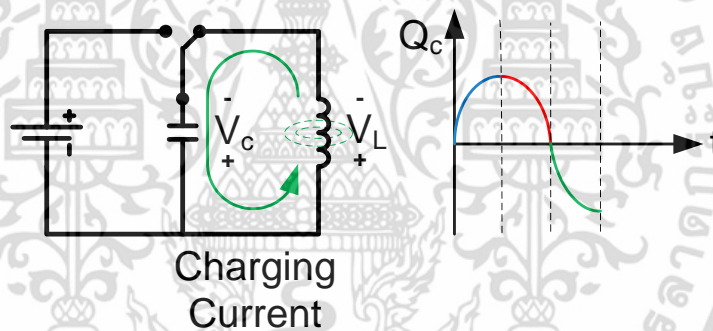
รูปที่ 2.5 การเกิดออสซิลเลชันในวงจรหม้อแปลงเทสลา (ขณะอัดประจุ)

เมื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุจนได้รับแรงดันไฟฟ้าสูงมากพอ จนถึงระดับที่ทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างช่องอากาศ (Air Gap) สูญเสียค่าความเป็นฉนวน จะทำให้เกิดการเบรกตาวนระหว่างช่องอากาศที่ตัวแกปดับอาร์ก (Quenching Gap) ทำให้วงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเทสลาครบวงจร เป็นผลให้ตัวเก็บประจุคายประจุไปสู่ขดลวดด้านปฐมภูมิ ในขณะที่กระแสและแรงดันจากตัวเก็บประจุมีค่าลดลง (จนกระทั่งมีค่าเป็น 0) กระแสที่ไหลผ่านขดลวดด้านปฐมภูมิจะมากยิ่งขึ้น ความเข้มของสนามแม่เหล็กรอบขดลวดเพิ่มขึ้น เกิดการขยายตัวของสนามเป็นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีทิศทางหรือขั้วของแรงดันต้านการเพิ่มขึ้นของกระแส



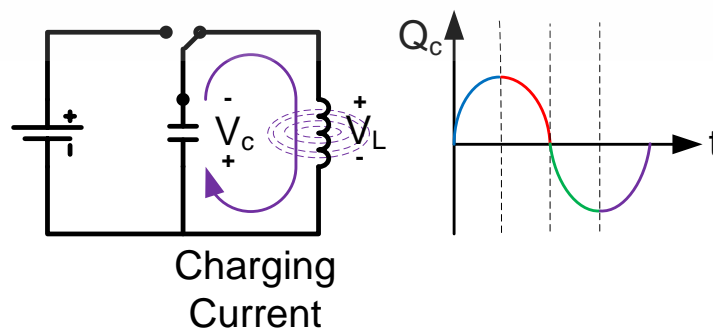
รูปที่ 2.6 การเกิดออสซิลเลชันในวงจรหม้อแปลงเทสลา (ขณะคายประจุ)

เมื่อตัวเก็บประจุคายประจุจนหมด (กระแสและแรงดันที่ตัวเก็บประจุมีค่าเป็นศูนย์) ในขณะที่กระแสไหลผ่านขดลวดต้านปฏิกิริยาเริ่มลดลง เป็นผลให้สนามแม่เหล็กยุบตัวลง ขดลวดต้านปฏิกิริยาจะทำการอัดประจุคืนให้กับตัวเก็บประจุ ด้วยค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีขั้วตรงกันข้ามกับขั้วเดิมของตัวเก็บประจุ (ตอนเริ่มอัดประจุ) เมื่อตัวเก็บประจุได้รับการอัดประจุใหม่อีกครั้งโดยแรงดันอัดประจุจากศูนย์ไปยังค่าลบใหม่ ทิศทางของกระแสการอัดประจุจะมีทิศทางเดียวกันกับเมื่อตอนคายประจุในครั้งแรก



รูปที่ 2.7 การเกิดออสซิลเลชันในวงจรหม้อแปลงเทสลา (ขณะอัดประจุใหม่)

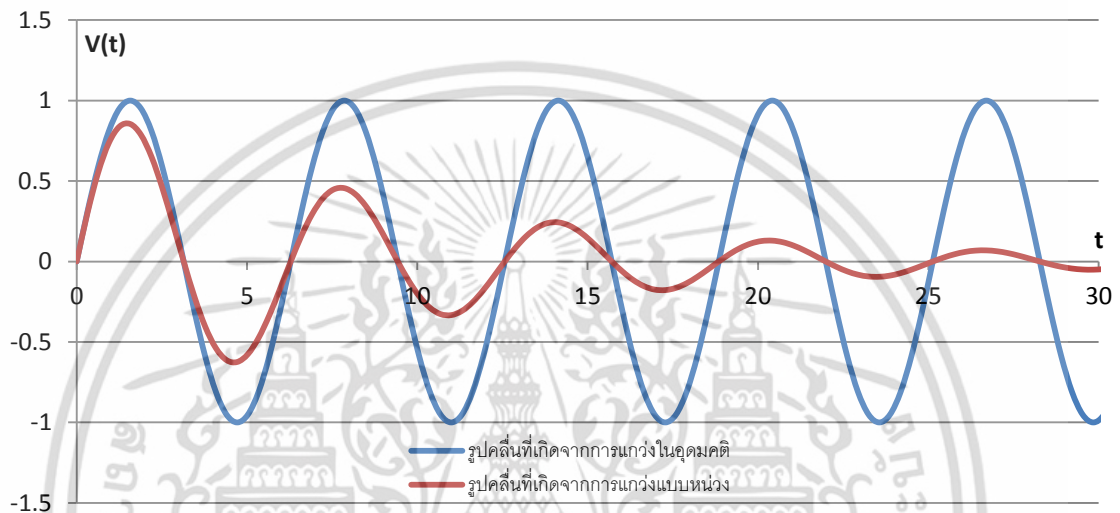
การอัดประจุจะยังคงดำเนินต่อไปจนกระทั่งแรงดันและกระแสที่ขดลวดต้านปฏิกิริยาเริ่มลดลง ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุสูงกว่า เหมือนกับเป็นแหล่งจ่ายไฟในวงจร ตัวเก็บประจุก็จะคายประจุคืนให้แก่ขดลวดต้านปฏิกิริยาอีกครั้ง จนกระทั่งแรงดันและกระแสภายในตัวเก็บประจุเท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.8 การเกิดออสซิลเลชันในวงจรหม้อแปลงเทสลา (ขณะคายประจุใหม่)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอสซิลเลทนี้จะเป็นการส่งผ่านพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุและขดลวดด้านปฐมภูมิ กลับไปกลับมา โดยไม่มีการคืนพลังงานให้แก่แหล่งจ่ายแรงดัน และจะเกิดต่อเนื่องไปเรื่อยๆ แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะมีการสูญเสียพลังงานให้แก่ความต้านทานภายในระบบ ทำให้ไม่สามารถเกิดการอสซิลเลทได้อย่างต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมช่องอากาศจะต่ำเกินกว่าที่จะเกิดการสปาร์กเพื่อส่งผ่านพลังงาน ส่งผลให้ตัวเก็บประจุได้รับการอัดประจุใหม่ ยิ่งตัวเก็บประจุอาร์กมีความสามารถในการดับอาร์กเร็ว จะทำให้เกิดการอัดและคายประจุของตัวเก็บประจุได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีกระแสไหลในวงจรด้านปฐมภูมิมาก ท้ายที่สุดทำให้แรงดันด้านทุติยภูมิสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นที่เกิดจากการแกว่ง (Oscillation) ในหม้อแปลงเตสลา

2.5 ลูกถ้วยฉนวน (Insulators) [2]

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับยึด หรือรองรับตัวนำไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าดิน เพื่อไม่ให้กระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน หรือลัดวงจรลงดิน และการลัดวงจรระหว่างสายตัวนำหรือแกว่งเข้าใกล้กันจนเกิดการสปาร์กหรือเบรกดาว์น นอกจากนี้ในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูงมักใช้ลูกถ้วยแขวนซึ่งสายในอากาศ เพราะประหยัดตัวนำสายไฟฟ้าหรือรองรับด้วยลูกถ้วยฉนวน เพื่อรองรับน้ำหนักและแรงกลทั้งหลายรูปแบบที่เกิดขึ้น ดังนั้นลูกถ้วยฉนวนจึงมีความสำคัญตราบใดเท่าที่ ยังมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปตามสายเหนือดิน (Overhead line) ทั้งสายส่งแรงสูง (Transmission line) และสายระบบจำหน่าย (Distribution line)

2.5.1 คุณสมบัติของลูกถ้วย (Properties of Insulators)

ในการใช้งานลูกถ้วยฉนวนในขณะที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าอยู่นั้น ลูกถ้วยฉนวนจะต้องรับและคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าใช้งานหรือแรงดันเสิร์จ (Surge) ที่เกิดขึ้นในระบบแล้ว ลูกถ้วยฉนวนยังต้องรับแรงทางกลจากน้ำหนักของสายไฟ แรงกลไฟฟ้าจากกระแสลัดวงจร แรงลม ยิ่งกว่านั้นยังต้องมีความคงทนต่อความร้อนที่เกิดวาปไฟตามผิวหรือกระแสลัดวงจร กล่าวคือฉนวนที่ติดตั้งจะต้องมีคุณสมบัติที่ดีทั้งทางไฟฟ้า ทางกล และทางความร้อน ในกรณีของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลนนั้นมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ดินเหนียว ดินขาว หินฟันม้า หินแก้ว และอลูมินา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การฉนวนภายนอก (External Insulation) และการฉนวนภายใน (internal Insulation)

การฉนวนภายนอก คือ ฉนวนอากาศกับฉนวนแข็งของอุปกรณ์ที่รับสภาวะบรรยากาศ เช่น ความชื้น สิ่งเปราะเปื้อนทั้งหลาย เป็นต้น ส่วนการฉนวนภายใน ซึ่งประกอบด้วยฉนวนแข็งกับฉนวนเหลวหรือก๊าซฉนวนภายใน จะอยู่ในถังในสิ่งห่อหุ้มไม่ได้รับสัมผัสกับสภาวะบรรยากาศ ลักษณะและสภาพของฉนวนกำหนดด้วย

- ระยะรั่ว (Leakage Distance) หมายถึง ระยะที่สั้นที่สุดระหว่างอิเล็กโทรดหรือโลหะประกอบติดลูกถ้วยฉนวน โดยวัดไปตามผิวฉนวนภายนอก

- ระยะอาร์ก (Arcing Distance) หมายถึงระยะตามแนวที่เกิดอาร์กหรือสปาร์กผ่าน นั่นคือระยะที่สั้นที่สุดระหว่างอิเล็กโทรดหรือโลหะประกอบติดลูกถ้วยฉนวน โดยวัดผ่านไปในอากาศหรือฉนวนก๊าซ หรือฉนวนเหลวที่ล้อมรอบฉนวนแข็ง ในสภาพแห้งระยะอาร์กจะยาวกว่าในสภาพเปียกหรือสภาพเปื้อน

- สภาพแห้ง (Dry Conditions) หมายถึง ตัวอย่างที่ทดสอบอยู่ในสภาพแห้งและสะอาด โดยมีเงื่อนไขเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

- สภาพเปียก (Wet Conditions) หมายถึง ตัวอย่างทดสอบที่เลียนแบบสภาวะการใช้งานในสภาพเปียกฝน เพื่อทดสอบผลกระทบจากฝนตกตามธรรมชาติที่มีต่อการฉนวนภายนอก ลักษณะน้ำฝนกำหนดด้วยความต้านทานจำเพาะ อัตราการตก แนวและทิศทางของการตกของฝนที่ผิวฉนวนภายนอก

2.5.3 ชนิดของลูกถ้วยฉนวน (Type of Insulators)

1. ลูกถ้วยก้านตรง (Pin Insulator) ลูกถ้วยก้านตรงเป็นลูกถ้วยที่ใช้ยึดสายแรงสูงแบบตรึงอยู่กับที่ โดยพาดสายไฟฟ้าอยู่ในร่องพาดสายไฟฟ้าที่อยู่ส่วนบนของลูกถ้วย ตัวลูกถ้วยจะประกอบด้วยปีกหลายชั้น ด้านในมีรูใส่ก้านยึดเป็นเกลียว



รูปที่ 2.10 ลูกถ้วยก้านตรง (Pin Insulator)

2. ลูกถ้วยก้านตรงแบบฟ็อก (Fog Type Pin Insulator) มีลักษณะพื้นฐานแบบลูกถ้วยก้านตรง เพียงแต่เพิ่มระยะรั่ว โดยเฉพาะระยะรั่วป้องกันจะยาวกว่าลูกถ้วยก้านตรงธรรมดา ทั้งนี้เพื่อนำไปใช้งานในที่ที่มีความเปราะเปื้อนสูง เช่น ชายทะเล



รูปที่ 2.11 ลูกถ้วยก้านตรงแบบฟ็อก (Fog Type Pin Insulator)

3. ลูกถ้วยแท่ง (Line Post Insulator) จะมีลักษณะคล้ายลูกถ้วยก้านตรง แต่มีคอยาวกว่า ส่วนยอดมีปารับสาย ส่วนล่างมีแท่นโลหะยึดก้านตรง เนื่องจากมีคอตันยาวจึงมีข้อเด่นที่จะไม่เกิดการเจาะทะลุ



รูปที่ 2.12 ลูกถ้วยแท่ง (Line Post Insulator)

4. ลูกถ้วยแท่งก้านตรง (Pin Post Insulator) ทำหน้าที่เช่นเดียวกับลูกถ้วยก้านตรงแบบฟ็อก คือใช้งานในย่านที่มีความเปรอะเปื้อนสูง แต่จะดีกว่าเพราะไม่เกิดการเจาะทะลุเนื่องจากแกนเป็นแบบแบนคอตันของเนื้อพอร์ซเลน



รูปที่ 2.13 ลูกถ้วยแท่งก้านตรง (Pin Post Insulator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ลูกถ้วยหลัก (Post Insulator) เป็นลูกถ้วยที่มีลักษณะคล้ายลูกถ้วยแต่ง เพียงแต่ ยอดบนและฐานล่างจะเป็นหัวครอบโลหะซึ่งเป็นที่ยึดตัวเองหรือยึดตัวต่อที่นำมาซ้อนต่อ มีปีกครีบ เช่นเดียวกับลูกถ้วยคอตันยาว ใช้สำหรับยึดตรึงตัวนำไฟฟ้าให้มั่นคง โดยทั่วไปใช้สำหรับยึดบัสบาร์



รูปที่ 2.14 ลูกถ้วยหลัก (Post Insulator)

6. ลูกถ้วยแขวน (Suspension Insulator) เป็นลูกถ้วยแรงดันสูงสามารถห้อยแขวนต่อกันเป็นพวงได้ ส่วนบนของลูกถ้วยจะมีฝาครอบโลหะ มีรูหรือช่องที่จะไปห้อยเกี่ยวกับก้านที่อยู่ด้านล่างของลูกถ้วยลูกบนได้ ในกรณีที่จะยึดสายไฟแรงดันสูงมากขึ้น จำนวนลูกถ้วยก็จะเพิ่มมากขึ้น ด้วยเพื่อให้สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.15 ลูกถ้วยแขวน (Suspension Insulator)

7. ลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน (Solid Core Suspension Insulator) มีลักษณะเหมือนลูกถ้วยแขวนสองลูกมาต่อกันด้วยเนื้อพอร์ซเลนเป็นคอตัน ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันจะดีกว่าลูกถ้วยแขวนธรรมดาเนื่องจากจะไม่เกิดการเจาะทะลุหัวของลูกถ้วย



รูปที่ 2.16 ลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน (Solid Core Suspension Insulator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ลูกถ้วยคอตันยาว (Long Rod Insulator) เป็นลูกถ้วยแรงดันสูง มีปีกเป็นชั้นเหมือนลูกถ้วยก้านตรง ตัวลูกถ้วยเป็นแกนตันสามารถแขวนห้อยต่อกันได้



รูปที่ 2.17 ลูกถ้วยคอตันยาว (Long Rod Insulator)

2.5.4 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลน

อิเล็กทรอนิกส์ที่ลูกถ้วยฉนวนทำหน้าที่ยึดหรือรองรับน้ำหนัก มีลักษณะเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เมื่อลูกถ้วยฉนวนได้รับแรงดันไฟฟ้าเกินที่สูงพอจะทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน ดังนั้นการเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยจึงเป็นปรากฏการณ์การเกิดเบรกดาวนของก๊าซในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีสตรีมเมอร์ แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนจึงมีหลายรูปแบบซึ่งให้ผลที่แตกต่างกัน

2.5.5 การทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลน (Porcelain Insulator Test)

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 354-2523 ได้แบ่งการทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน (Porcelain) ออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. การทดสอบเฉพาะแบบ (Type Test)
2. การทดสอบรับรอง (Acceptance Test)
3. การทดสอบประจำ (Routine Test)

2.5.5.1 การทดสอบเฉพาะแบบ (Type Test)

หมายถึง การทดสอบเพื่อตรวจสอบหรือพิสูจน์ว่าลักษณะการออกแบบคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ การทดสอบเฉพาะแบบทางไฟฟ้าประกอบด้วย

- 1.) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าตามผิวในสภาพแห้งและเปียกด้วยแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ
- 2.) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤติด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกและชั่วลบ
- 3.) การทดสอบแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ (Radio Influence Voltage Test = RIV)

จัดเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย เป็นการทดสอบเพื่อหาคุณภาพลูกถ้วยเมื่อใช้รองรับหรือยึดสายไฟแรงสูง จะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงบริเวณสายไฟพาดยึดติดกับลูกถ้วย หรือส่วนที่เป็นโลหะประกอบด้วยลูกถ้วย ถ้าหากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าขีดความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศ ก็จะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนหรือโคโรนา และส่งคลื่นสั้นในย่านความถี่วิทยุสื่อสารแผ่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร ฉะนั้นลูกถ้วยฉนวนที่จะนำมาใช้ยึดสายในระบบส่งจำหน่ายโดยเฉพาะในย่านชุมชนหรือในเมือง ยอมให้มีคลื่นรบกวน (RIV) ได้ไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด ตามมาตรฐาน ANSI กำหนดค่า RIV เป็น μV ในกรณีสภาพบรรยากาศไม่ใช่สภาวะมาตรฐาน ต้องใช้แฟคเตอร์แก้ความหนาแน่นบรรยากาศ k_d และแฟคเตอร์แก้ความชื้น ในบรรยากาศ k_n ซึ่งค่า k_n สำหรับลูกถ้วยอ่านได้จากเส้นกราฟ

2.5.5.2) การทดสอบรับรอง (Acceptance Test)

หมายถึง การตรวจสอบวัสดุอุปกรณ์ ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่ายังมีคุณภาพได้ตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ การทดสอบรับรองทางไฟฟ้าก็คือการทดสอบความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า เป็นการทดสอบที่เลียนแบบการใช้งานจริง เพราะลูกถ้วยในขณะใช้งานนั้นจะต้องรับทั้งแรงทางกลและความเครียดสนามไฟฟ้า

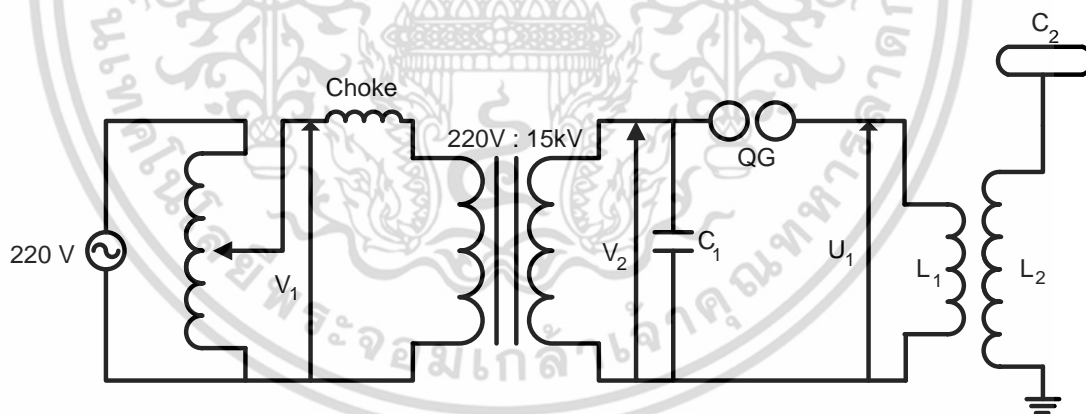
การทดสอบรับรองทางไฟฟ้าอีกประการหนึ่งก็คือ การทดสอบเจาะผ่าน (Puncture) เป็นการทดสอบแตกสลาย เพื่อต้องการตรวจสอบดูความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของเนื้อลูกถ้วย (อาจเป็นพอร์ซเลนหรือแก้ว)

2.5.5.3) การทดสอบประจำ (Routine Test)

หมายถึงการทดสอบที่ทำเป็นประจำในโรงงาน เป็นการทดสอบกับลูกถ้วยฉนวนทุกลูก เพื่อตรวจสอบว่าลูกถ้วยนั้นไม่มีความบกพร่องจากการผลิต การทดสอบประจำทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนได้แก่ การทดสอบวาวไฟตามผิว ซึ่งอาจจะใช้แรงดันความถี่สูงแบบหน่วง (Damped High Frequency Voltage) มีความถี่ประมาณ 200 kHz ซึ่งได้จากหม้อแปลงเทสลาให้เกิดวาวไฟตามผิวต่อเนื่องกันเป็นเวลา 3 ถึง 5 วินาที หรืออาจจะทดสอบวาวไฟด้วยความถี่ต่ำให้เกิดวาวไฟตามผิวแห่งต่อเนื่องกันเป็นเวลา 3 ถึง 5 นาที

2.6 หลักการทำงานของหม้อแปลงเทสลา

2.6.1 หลักการทำงานของหม้อแปลงเทสลาโดยทั่วไป [2]



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลของหม้อแปลงเทสลาที่ออกแบบ

- เมื่อ
- C_1 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรทางด้านปฐมภูมิ (F)
 - C_2 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรทางด้านทุติยภูมิ (F)
 - L_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ (H)
 - L_2 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทุติยภูมิ (H)
 - QG คือ แกปต์บอาร์ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.19 เป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงเตสลาที่ได้ทำการออกแบบ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับตัวเก็บประจุ C_1 และเมื่อตัวเก็บประจุ C_1 ถูกอัดประจุจนได้รับแรงดันไฟฟ้าจนถึงระดับที่ทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างช่องอากาศ (Air Gap) สูญเสียค่าความเป็นฉนวน จะทำให้เกิดการเบรกดาว์นระหว่างช่องอากาศที่ตัวแกปดับอาร์ก (Quenching Gap) ทำให้วงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลาครบวงจร เป็นผลให้ C_1 คายประจุที่เก็บไว้ในรูปของสนามไฟฟ้าไปสู่ขดลวดปฐมภูมิ L_1 และขดลวด L_1 จะเก็บพลังงานในรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อขดลวด L_1 เก็บพลังงานเต็มที่แล้วก็ถ่ายทอดพลังงานที่เก็บไว้ไปให้ C_1 อีกครั้ง การถ่ายทอดพลังงานกลับไปกลับมา ระหว่าง C_1 กับ L_1 จะทำให้เกิดการ ออสซิลเลท (Oscillate) ต่อเนื่องแบบ Damped Oscillation ที่ความถี่สูง สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 50 Hz หรือ 1/50 วินาที ใน 1 Cycle ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ C_1 ใน 1 Cycle ทำให้เกิดการอัดประจุและคายประจุในช่วงครึ่งไซเคิลบวกและไซเคิลลบ ดังนั้นจะทำให้เกิดการออสซิลเลทแบบ Damped Oscillation อย่างต่อเนื่อง 100 ครั้ง ใน 1 วินาที ความถี่ออสซิลเลทที่ใช้จะสูงประมาณ 50 – 500kHz

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) และค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของตัวออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) ค่าโดยประมาณของความถี่ที่ทำให้เกิดการออสซิลเลทนั้นสามารถหาได้จากสมการ

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} \quad (2.5)$$

เมื่อ L_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิ (H)
 C_1 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรทางด้านปฐมภูมิ (F)
 f_1 คือ ความถี่ออสซิลเลทด้านปฐมภูมิ (Hz)

การเกิดออสซิลเลท (Oscillation) ในวงจรทางด้านปฐมภูมิ (Primary) ของหม้อแปลงเตสลา จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดด้านทุติยภูมิ (Secondary) ของหม้อแปลงเตสลา ซึ่งมีความถี่เช่นเดียวกันกับทางด้านปฐมภูมิ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ คือ

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (2.6)$$

เมื่อ L_2 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ (H)
 C_2 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรทางด้านทุติยภูมิ (F)
 f_2 คือ ความถี่ออสซิลเลทด้านทุติยภูมิ (Hz)

$$\text{จะได้} \quad L_1C_1 = L_2C_2 \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.7) วงจรทางด้านปฐมภูมิ (L_1 , C_1) จะส่งพลังงานไปยังวงจรทางด้านทุติยภูมิ (L_2 , C_2) ในลักษณะแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเริ่มลดลงและในขณะที่แรงดันด้านทุติยภูมิเพิ่มขึ้น หากผลคูณระหว่างค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าในด้านปฐมภูมิมิค่าเท่ากับค่าความเหนี่ยวนำ

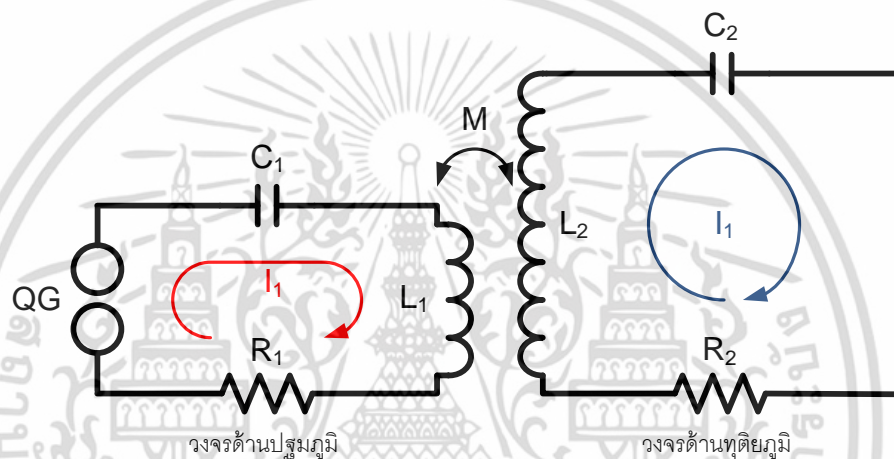
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าความจุไฟฟ้าในด้านทุติยภูมิแล้วจะทำให้เกิดการออสซิลเลทแบบหน่วง (Damped Oscillation) อย่างต่อเนื่องและจะเกิดพลังงานขึ้น ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.8)

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.8)$$

- เมื่อ W คือ พลังงานที่เกิดขึ้น (J)
 C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (F)
 V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวเก็บประจุ (V)

สำหรับการวิเคราะห์วงจรสามารถทำได้ดังนี้



รูปที่ 2.19 การเหนี่ยวนำของหม้อแปลงเทสลาโดยมีค่า M เป็นค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำตามกฎของเคอร์ซอพ ผลรวมของแรงดันไฟฟ้าในวงจรปิดจะมีค่าเท่ากับศูนย์คือ

$$R_1 i_1 + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = 0 \quad (2.9)$$

$$R_2 i_2 + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0 \quad (2.10)$$

ถ้า q_i เป็นพลังงานในตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ของวงจรจะได้

$$I_i = \frac{dq_i}{dt}, \quad i = 1, 2 \quad (2.11)$$

แทนค่าลงในสมการที่ (2.9) และ (2.10) จะได้

$$R_1 \frac{dq_1}{dt} + \frac{q_1}{C_1} + L_1 \frac{d^2 q_1}{dt^2} + M \frac{d^2 q_2}{dt^2} = 0 \quad (2.12)$$

$$R_2 \frac{dq_2}{dt} + \frac{q_2}{C_2} + L_2 \frac{d^2 q_2}{dt^2} + M \frac{d^2 q_1}{dt^2} = 0 \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดสมการใหม่และกำหนดให้ D เท่ากับตัวดำเนินการดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับเวลา t

$$\left[D^2 + \frac{R_1}{L_1} D + \frac{1}{L_1 C_1} \right] q_1 + \frac{M}{L_1} D^2 q_2 = 0 \quad (2.14)$$

$$\left[D^2 + \frac{R_2}{L_2} D + \frac{1}{L_2 C_2} \right] q_2 + \frac{M}{L_2} D^2 q_1 = 0 \quad (2.15)$$

จากสมการข้างต้น เมื่อกำหนดให้ $R \approx 0$ ทำการแก้สมการจะได้

$$(1-k^2)D^4 + (\omega_1^2 + \omega_2^2)D^2 + \omega_1^2\omega_2^2 \quad (2.16)$$

เมื่อ

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2.17)$$

$$\omega_i = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}}, \quad i = 1, 2 \quad (2.18)$$

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการคาบเกี่ยวกันด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ($0 < k < 1$) ขณะที่ ω_1 และ ω_2 คือ ความถี่เรโซแนนท์เชิงมุมของวงจรด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิขณะที่ไม่มีการคาบเกี่ยวกันด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามลำดับ (หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเป็นการเรโซแนนท์แบบวงจรเปิด) จากสมการที่ (2.16) เป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลเชิงเส้นอันดับที่ 4 ซึ่งจะมีค่ารากเชิงซ้อนทั้งหมดจำนวน 4 ค่า $D_i, i = 1 \dots 4$

$$Y_i = e^{D_i t}, \quad i = 1 \dots 4 \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.14) และ (2.15) จะได้

$$q_1 = \sum_{i=1}^4 A_i e^{D_i t} \quad (2.20)$$

$$q_2 = \sum_{i=1}^4 B_i e^{D_i t} \quad (2.21)$$

ให้ A_i และ B_i เป็นค่าคงที่ เมื่อ $t = 0$

$$\begin{aligned} q_1 = 0, q_2 = q_0 \\ Dq_1 = Dq_2 = 0 \end{aligned} \quad (2.22)$$

เมื่อ q_0 คือ ค่าประจุเริ่มต้นบนตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ และคนที่ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_1 = \frac{q_1}{C_1} = \frac{1}{C_1} \sum_{i=1}^4 A_i e^{D_i t} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_2 = \frac{q_2}{C_2} = \frac{1}{C_2} \sum_{i=1}^4 B_i e^{D_i t} \quad (2.24)$$

ผลเฉลยในรูปแบบปิดสำหรับ V_1 และ V_2 สามารถหาได้สำหรับกรณีอุดมคติคือไม่มีการหน่วงเลย ($R_1=R_2=0$) ค่าราก D_i ของสมการ (2.16) มีเพียงส่วนจินตภาพเท่านั้นและค่าแรงดันด้านทุติยภูมิสามารถแทนด้วย

$$V_2(t) = \frac{2kV_1}{\sqrt{(1-t)^2 + 2k^2T}} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \sin\left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2}\right) \quad (2.25)$$

เมื่อ

$$T = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \frac{L_2 C_2}{L_1 C_1} \quad (2.26)$$

$$\omega_1 = \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) - \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}}{2(1-k^2)}} \quad (2.27)$$

$$\omega_2 = \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) + \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}}{2(1-k^2)}} \quad (2.28)$$

T คืออัตราส่วนการจูน ซึ่งแทนด้วยรากที่สองของอัตราส่วนของความถี่เรโซแนนซ์ในสถานะไม่มีการคัปเปิลกันด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะที่ V_1 คือค่าแรงดันที่ตกคร่อม C_1 ในส่วนของ ω_1 และ ω_2 คือความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเมื่อมีการคัปเปิลกันด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อวงจรอยู่ในสภาวะการจูนที่เหมาะสม กล่าวคือการส่งผ่านพลังงานที่สอดคล้องกันที่ความถี่เรโซแนนซ์จะได้ว่า ω_1 เท่ากับ ω_2 เป็นเงื่อนไขที่สำคัญในการทำงานของหม้อแปลงเทสลา นั่นเอง การเกิดการแกว่ง (Oscillation) จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกมามีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ความถี่สูงแบบหน่วง (Damped Oscillation)

2.6.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิดสเตท [10]

ในปี พ.ศ. 2545 ได้มีการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิดสเตทขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Jimmy Hynes โดยหลักการทำงานของหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิดสเตทนี้ จะเป็นการนำอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบสร้าง และควบคุมการทำงานแทนสปาร์กแกปของหม้อแปลงเทสลาแบบเดิม โดยการใช้วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรกำลังทางด้านขาออกของวงจรสวิตชิ่ง และใช้วงจรควบคุม ควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ ปัจจุบันหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิดสเตทสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

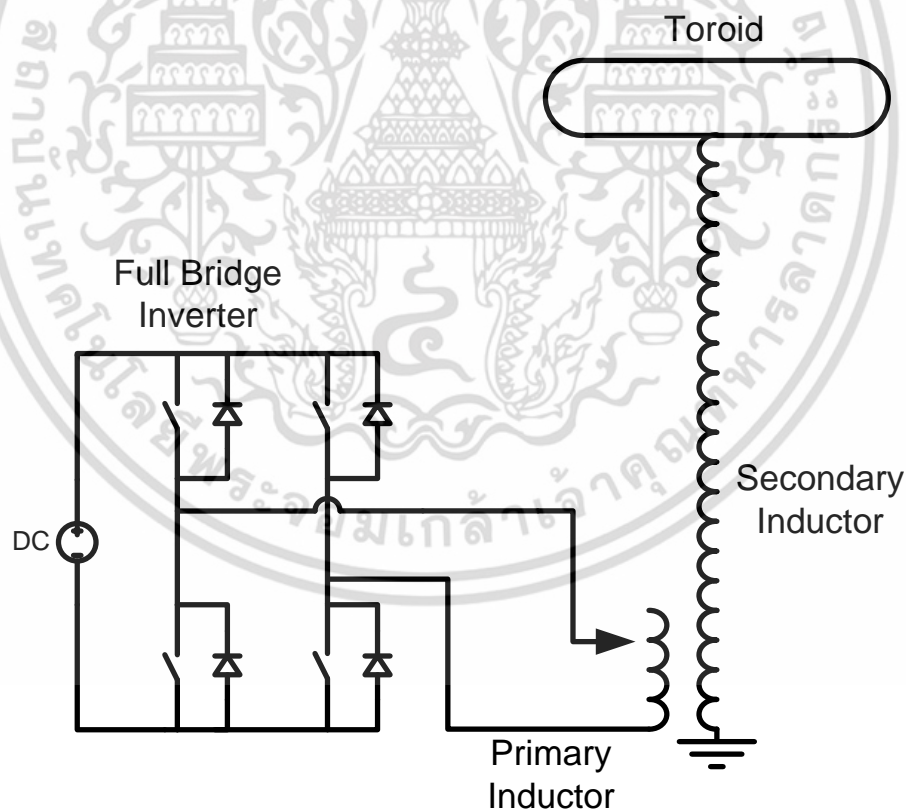
- 1) หม้อแปลงเทสลาแบบโซลิดสเตท (Solid State Tesla Coil; SSTC)
- 2) หม้อแปลงเทสลาแบบโซลิดสเตทเรโซแนนซ์คู่ (Dual Resonant Solid State Tesla Coil; DRSSTC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ วงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรควบคุม ขดลวดด้านปฐมภูมิ ขดลวดด้านทุติยภูมิ และตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิ การทำงานของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท จะแตกต่างจากการทำงานของหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิมและแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ คือ ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์จะเท่ากับความถี่เรโซแนนท์ของวงจรด้านทุติยภูมิ เนื่องจากวงจรด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทจะไม่มีตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ

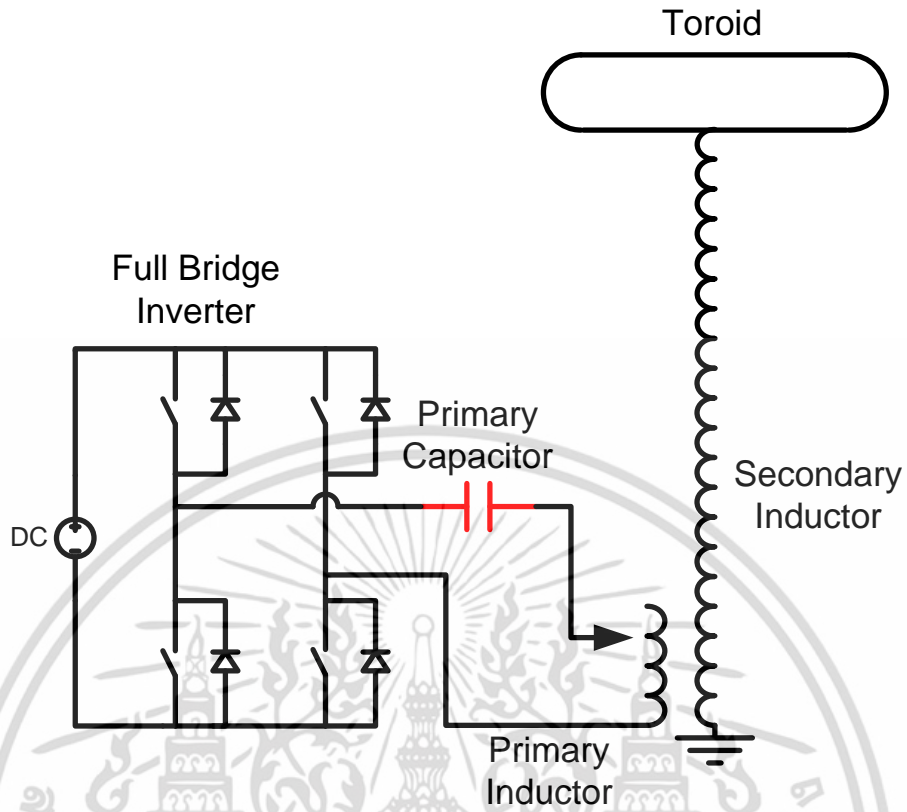
ส่วนวงจรของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ วงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรควบคุม ขดลวดด้านปฐมภูมิ ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ ขดลวดด้านทุติยภูมิ และตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิ การทำงานของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่จะแตกต่างจากการทำงานของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท คือ มีการเพิ่มตัวเก็บประจุนุกรมเข้าไปกับขดลวดด้านปฐมภูมิ ซึ่งความถี่ในการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์จะมีค่าเท่ากับกับความถี่เรโซแนนท์ของวงจรด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ

ข้อดีของการเพิ่มตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจรด้านปฐมภูมิคือ จะก่อให้เกิดเป็นวงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรมขึ้น ซึ่งข้อดีของวงจรเรโซแนนท์คือจะทำให้เกิดกระแสและแรงดันในวงจรด้านปฐมภูมิเพิ่มขึ้นอย่างมาก (มากกว่าหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท) และจะส่งผลให้แรงดันทางด้านขาออกของวงจรด้านทุติยภูมิเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 วงจรสมมูลของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่

ข้อแตกต่างของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทและหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทและหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่

พารามิเตอร์	หม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท	หม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่
วงจรอินเวอร์เตอร์	ฮาล์ฟบริดจ์หรือฟูลบริดจ์	ฮาล์ฟบริดจ์หรือฟูลบริดจ์
อุปกรณ์สวิตซ์	มอสเฟต	ไอจีบีที
วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ (ในการสวิตซ์)	วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ที่ปรับค่าได้	สัญญาณป้อนกลับ
แรงดันขาเข้า	เรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น	เรียงกระแสแบบเต็มคลื่น
รูปแบบการขับอุปกรณ์สวิตซ์	ต่อเนื่อง	พัลส์
Duty Cycle	50%	< 50%

ข้อแตกต่างของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทและหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทและหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม

พารามิเตอร์	หม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท	หม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม
หม้อแปลงแรงดันสูง	✗	✓
รูปแบบการสวิตช์	อิเล็กทรอนิกส์	สปาร์กแกป
รูปแบบวงจร	ซับซ้อน	ง่าย

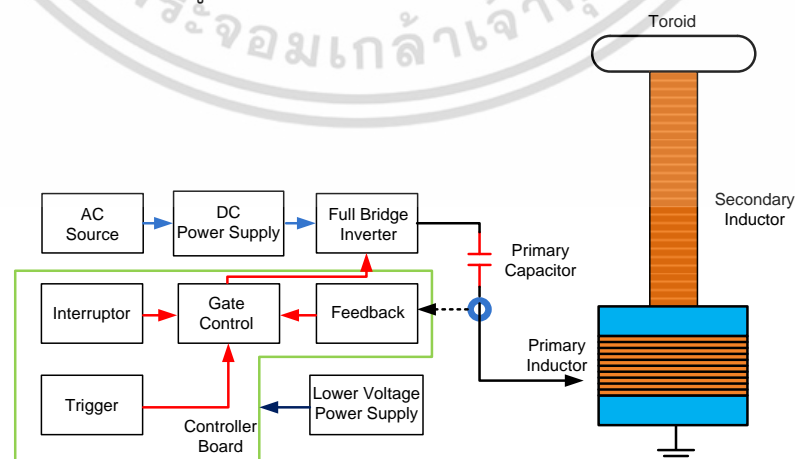
จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์สวิตช์ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์ของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่จะใช้ไอจีบีที ในขณะที่หม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทจะใช้มอสเฟต เนื่องจากหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ในสภาวะเรโซแนนท์ กระแสที่ไหลผ่านวงจรถ่านประมุขจะมีค่าที่สูงมาก ($>100\text{ A}$) ซึ่งพลังงานที่สูญเสียจากการนำกระแสของมอสเฟตจะถูกกำหนดโดยกระแสที่ไหลผ่านระหว่างเดรนและซอร์ส (I_D) และความต้านทานระหว่างเดรนและซอร์ส (R_{DS}) ในขณะที่ไอจีบีทีจะมีพลังงานที่สูญเสียจากการนำกระแส จากกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) และแรงดันระหว่างคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์ (V_{CE}) พลังงานที่สูญเสียจากการนำกระแสของอุปกรณ์สวิตช์ทั้งสอง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 พลังงานที่สูญเสียจากการนำกระแสของอุปกรณ์สวิตช์

อุปกรณ์สวิตช์	พลังงานที่สูญเสียจากการนำกระแส
มอสเฟต	$I_D(t)^2 \times R_{DS}$
ไอจีบีที	$I_C(t) \times V_{CE}$

จากตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าพลังงานที่สูญเสียจากการนำกระแสของมอสเฟตจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล ในขณะที่ไอจีบีทีจะมีพลังงานที่สูญเสียจากการนำกระแสแบบเชิงเส้น ซึ่งหากใช้มอสเฟตในสภาวะที่กระแสมีค่าสูง อาจจะทำมอสเฟตเกิดความร้อนและส่งผลให้มอสเฟตเกิดความเสียหายในที่สุด ดังนั้นไอจีบีทีจึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการใช้เป็นอุปกรณ์สวิตช์ให้แก่หม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท

วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่เพื่อทำการทดสอบลูกถ้วยฉนวน ซึ่งมีหลักการทำงานของวงจรดังนี้



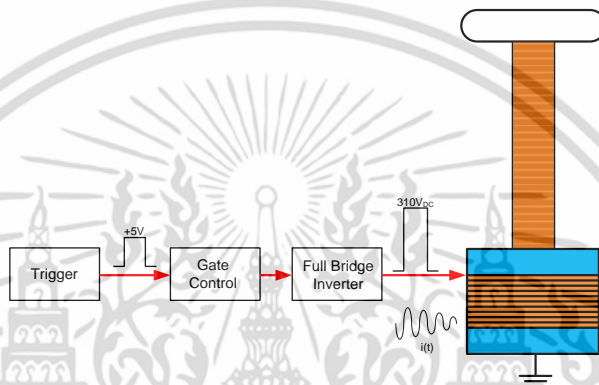
รูปที่ 2.22 แผนผังการทำงานของวงจรหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทำงานของวงจรหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ

- สถานะเริ่มการทำงานของวงจร

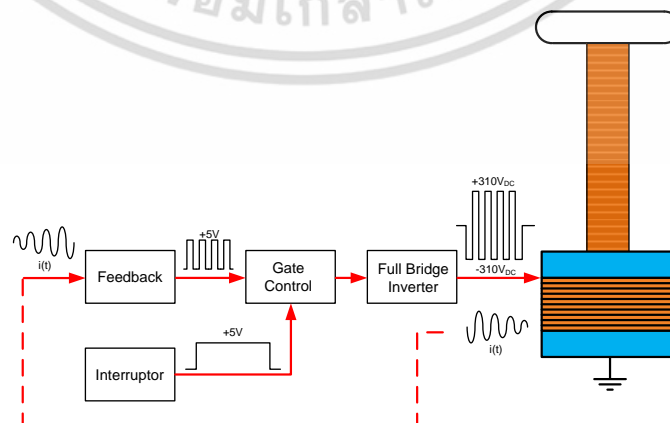
เนื่องจากการทำงานของวงจรควบคุมที่ออกแบบสร้างนี้ จะใช้วิธีการป้อนกลับของสัญญาณ เพื่อนำมาควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซิ่ง (IGBT) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างสัญญาณเริ่มต้นการทำงานให้แก่วงจรควบคุมขึ้น โดยใช้ไอซี 555 ในการสร้างสัญญาณพัลส์เดี่ยว (Single pulse) เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงาน (โดยได้รับสัญญาณจากวงจรควบคุม) พลังงานจะถูกส่งผ่านไปยังวงจรด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลา ส่งผลให้เกิดการออสซิลเลทขึ้นระหว่างตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิและขดลวดด้านปฐมภูมิ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 สถานะเริ่มการทำงานของวงจรหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่

- สถานะการทำงานอย่างต่อเนื่อง

เมื่อเกิดการออสซิลเลทขึ้นในวงจรด้านปฐมภูมิแล้ว สัญญาณออสซิลเลทจะถูกป้อนกลับคืนให้แก่วงจรควบคุมผ่านทางหม้อแปลงกระแส (Current transformer) จากนั้นวงจรควบคุมจะทำการเปลี่ยนกระแสที่ได้รับให้เป็นแรงดันที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้กับไอซีภายในชุดวงจรควบคุม โดยสัญญาณที่ได้นี้จะถูกนำไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซิ่ง เวลาการทำงานของอุปกรณ์สวิตซิ่งจะถูกควบคุมโดยวงจรซัดจิงหวะ ซึ่งจะถูกกำหนดขึ้นตามความเหมาะสมกับปริมาณพลังงานที่วงจรหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทนี้ต้องการ



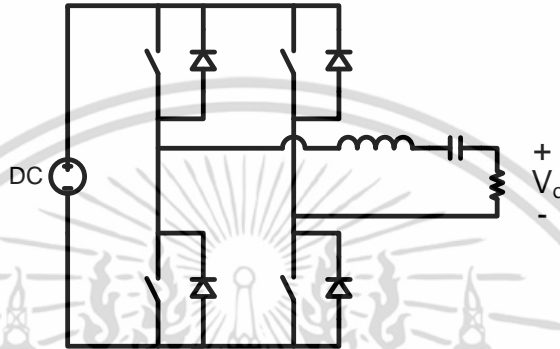
รูปที่ 2.24 สถานะการทำงานของวงจรหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่อย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม [11]

2.7.1 หลักการทำงานเบื้องต้น

อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมก็คือคอนเวอร์เตอร์ที่แปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับดังรูปที่ 2.24 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมเพราะมีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุวางอนุกรมกันกับโหลดความต้านทาน การสวิตช์จะทำให้เกิดแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม โดยที่ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ จะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งจะมีค่าเท่ากับความถี่สวิตช์



รูปที่ 2.25 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม



รูปที่ 2.26 วงจรสมมูล R-L-C

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1. ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร R - L - C

$$Z_t = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (2.29)$$

2. พิจารณาผลตอบผลสนองเชิงความถี่ของวงจร R - L - C จะได้อัตราขยายแรงดันของวงจร ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{Z_t} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (2.31)$$

2. ความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่าเท่ากับ

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.32)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.33)$$

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะหักล้างกัน จึงมองเห็นเป็นโหลดมีค่าเฉพาะความต้านทานเท่านั้น

เมื่อแรงดันไฟฟ้าด้านนอกเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ f_0 ผลของ L- C จะทำหน้าที่คล้ายเป็นตัวกรองความถี่ คือทำให้ความถี่หลักมูลผ่านไป และจะลดขนาดสัญญาณของฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆ ทำให้รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมความต้านทานเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เดียวกันกับความถี่ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

3. ขนาดของแรงดันความถี่หลักมูลของสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม $\pm V_{dc}$ จะมีขนาดเท่ากับ

$$V_1 = \frac{4V_{dc}}{\pi} \quad (2.34)$$

4. ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรความถี่จะแสดงในพจน์ของแบนด์วิดท์ โดยแสดงในรูปตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor: Q) ดังนี้

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} \quad (2.35)$$

5. อัตราขยายแรงดันในสมการที่ (2.9) สามารถแสดงในพจน์ของ ω_0 และ Q ดังนี้

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \quad (2.36)$$

6. แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานจะลดลงเมื่อค่า Q มีค่าสูงขึ้น ขณะที่การเพิ่มค่า L และ C จะมีผลทำให้ Q มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน

2.7.2 การสูญเสียจากการสวิตซ์

จุดเด่นของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์คือ การลดการสูญเสียของการสวิตซ์เมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป หากความถี่เรโซแนนซ์และค่า Q ของวงจรมีค่าสูง สวิตซ์จะทำงานเมื่อกระแสโหลดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้อุปกรณ์สวิตซ์มีการสูญเสียต่ำ วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้จึงมีประสิทธิภาพ

ค่อนข้างสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 การควบคุมขนาดแรงดัน

หากความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่โหลดไม่ใช่จุดสำคัญ ขนาดสัญญาณของความถี่หลักมูลที่ตกคร่อมความต้านทานจะถูกควบคุมโดยการเลื่อนความถี่สวิตชิงจากจุดเรโซแนนท์ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่โหลดความต้านทานจะถูกควบคุมด้วยความถี่สวิตชิง หลักการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบทำความร้อนจากการเหนี่ยวนำ

นอกจากนั้นขณะควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออก ควรจะควบคุมให้ความถี่สวิตชิงปรับเลื่อนให้มีความมากกว่าความถี่เรโซแนนท์ เพราะจะย้ายฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมออกไป ทำให้การกรองความถี่ดีและง่ายขึ้น แต่หากเลื่อนความถี่ให้ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนท์จะย้ายฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆ โดยอาจทำให้ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่สามเข้าใกล้เรโซแนนท์ จะทำให้สัญญาณด้านออกมีขนาดเพิ่มขึ้นได้



บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง หรือหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ ซึ่งประกอบด้วย ชุดวงจรเรียงกระแส ตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ ขดลวดด้านปฐมภูมิ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ (อิเล็กทรอนิกส์แบบวงแหวนและลูกถ้วยฉนวน) ขดลวดด้านทุติยภูมิ ชุดวงจรควบคุม และชุดวงจรฟูลบริดจ์ ซึ่งส่วนประกอบทั้งหมดจะถูกประกอบอยู่บนฐานที่สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก

3.1 เงื่อนไขการออกแบบ

หม้อแปลงเทสลาที่ต้องการออกแบบนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับการทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า งานวิจัยนี้เลือกการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่มาตรฐานกำหนด (ANSI C29.1(R2012) และ มอก. 354 - 2523) ผู้วิจัยจึงได้กำหนดเงื่อนไขในการออกแบบและการประกอบสร้างดังนี้

- ความถี่ขาออกของวงจรด้านทุติยภูมิประมาณ 200 kHz (เงื่อนไขตามที่มาตรฐานกำหนด)
- ความสูงของขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 18 นิ้ว หรือ 45 เซนติเมตร (เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการออกแบบสร้าง คือ มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก และเพื่อให้สามารถประมาณค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดด้านทุติยภูมิได้)
- เนื่องจากค่าความจุของลูกถ้วยแห้งมีน้อยกว่าค่าความจุของลูกถ้วยแฉนวนอย่างมาก ทำให้ปรับจูนวงจรให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมได้ลำบาก งานวิจัยนี้จึงเลือกการออกแบบขดลวดด้านทุติยภูมิ 2 รูปแบบคือ

- 1). แบบที่ใช้ทดสอบกับลูกถ้วยแห้ง
- 2). แบบที่ใช้ทดสอบกับลูกถ้วยแฉนวน

3.2 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ (C_2)

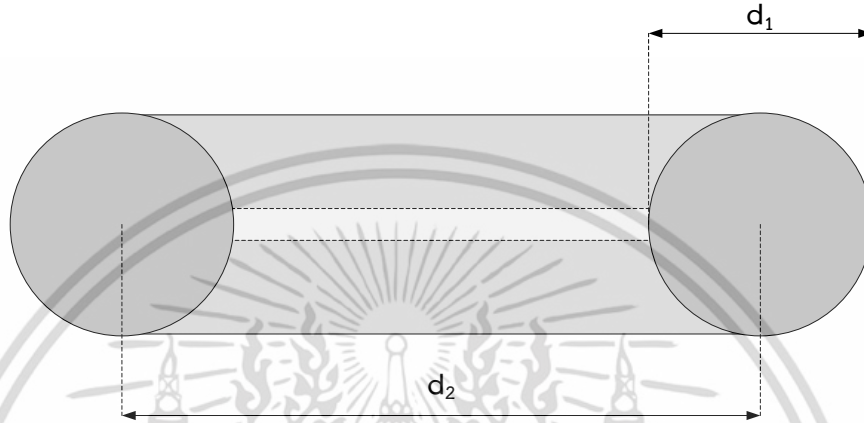
ค่าความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านทุติยภูมิเป็นปัจจัยแรกที่ต้องคำนึงถึงว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด เนื่องจากแรงดันและความถี่ด้านขาออกจะมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อขนาดของโหลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านทุติยภูมิจะประกอบไปด้วย ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบวงแหวน ค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดด้านทุติยภูมิ และค่าความจุไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

3.2.1 ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบวงแหวน (Toroid; C_T) [12]

อิเล็กทรอนิกส์แบบวงแหวนทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง และช่วยกระจายความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆ ส่วนบนของขดลวดด้านทุติยภูมิ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1) ดังนี้

$$C_T = 1.4 \left(1.2781 - \frac{d_1}{d_2} \right) \sqrt{\pi d_1 (d_2 - d_1)} \quad (3.1)$$

- เมื่อ C_T คือ ค่าความจุของอิเล็กโทรดแบบวงแหวน (pF)
 d_1 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (นิ้ว)
 d_2 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนทอรอยด์ (นิ้ว)



รูปที่ 3.1 พารามิเตอร์อิเล็กโทรดแบบวงแหวน (Toroid)

กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวน (d_2) เท่ากับ 9 นิ้ว ซึ่งทำมาจากท่อ อะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_1) 0.75 นิ้ว จะได้ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบวงแหวน เท่ากับ 7.37 pF

$$C_T = 1.4 \left(1.2781 - \frac{d_1}{d_2} \right) \sqrt{\pi d_1 (d_2 - d_1)}$$

$$C_T = 1.4 \left(1.2781 - \frac{0.75}{9} \right) \sqrt{\pi \times 0.75 (9 - 0.75)}$$

$$C_T = 7.37 \text{ pF}$$



รูปที่ 3.2 อิเล็กโทรดแบบวงแหวนของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท

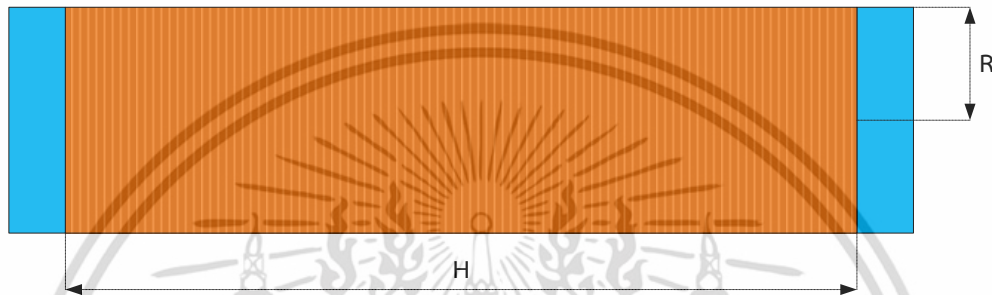
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดด้านทุติยภูมิ (Self-Capacitance; C_S) [12]

ขดลวดด้านทุติยภูมิจะมีค่าความจุไฟฟ้าแฝงซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2)

$$C_S = 0.29H + 0.41R + 1.94R\sqrt{\frac{R}{H}} \quad (3.2)$$

- เมื่อ C_S คือ ค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดด้านทุติยภูมิ (pF)
 H คือ ความสูงของระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ (นิ้ว)
 R คือ รัศมีของขดลวดด้านทุติยภูมิ (นิ้ว)



รูปที่ 3.3 พารามิเตอร์ของความจุไฟฟ้าแฝง (Self-Capacitance)

- กรณีค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตท เรโซแนนท์คู่ (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแห้ง)

กำหนดให้ความสูงของระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 18 นิ้ว ซึ่งพันบนท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว จะได้ค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 7.33 pF

$$C_S = 0.29H + 0.41R + 1.94R\sqrt{\frac{R}{H}}$$

$$C_S = (0.29 \times 18) + (0.41 \times 2) + \left(1.94 \times 2 \times \sqrt{\frac{2}{18}}\right)$$

$$C_S = 7.33 \text{ pF}$$

- กรณีค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตท เรโซแนนท์คู่ (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแขวน)

กำหนดให้ความสูงของระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 18 นิ้ว ซึ่งพันบนท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 นิ้ว จะได้ค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 6.99 pF

$$C_S = 0.29H + 0.41R + 1.94R\sqrt{\frac{R}{H}}$$

$$C_S = (0.29 \times 18) + (0.41 \times 1.75) + \left(1.94 \times 1.75 \times \sqrt{\frac{1.75}{18}}\right)$$

$$C_S = 6.99 \text{ pF}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านทุติยภูมิ (L_2) [12]

การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านทุติยภูมิในงานวิจัยนี้ จะแบ่งการนำเสนอออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ

3.3.1 กรณีการออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลา

แบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแห้ง)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว เป็นแกนกลางในการพันขดลวดด้านทุติยภูมิและระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 18 นิ้ว การหาขนาดของเส้นลวดทองแดงที่เหมาะสมต่อพันขดลวดด้านทุติยภูมิตามเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนดไว้คือเลือกใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ความยาว 18 นิ้ว และค่าความถี่ขาออกของขดลวดด้านทุติยภูมิประมาณ 200 kHz สามารถพิจารณาจากตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมต่อพันขดลวดด้านทุติยภูมิตามเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนด

ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วและระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 18 นิ้ว				
ขนาดเส้นลวด (AWG)	\varnothing ของลวดที่ใช้พัน (นิ้ว)	จำนวนรอบ	ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)	ความถี่ขาออก (kHz)
20	0.032	562.50	6.392	519.210
22	0.025	720.00	10.473	405.626
24	0.020	900.00	16.363	324.511
26	0.016	1,125.00	25.568	259.605
28	0.013	1,384.61	38.730	210.929
30	0.010	1,800.00	65.454	162.253

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ลวดเบอร์ 26 AWG ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.016 นิ้ว (0.40 มิลลิเมตร) ในการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางที่ 3.1 มีขั้นตอนการในการคำนวณดังนี้

1) จำนวนรอบของการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ

จำนวนรอบของการพันขดลวดด้านทุติยภูมิโดยพิจารณาจากขนาดของเส้นลวดที่ใช้พันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3)

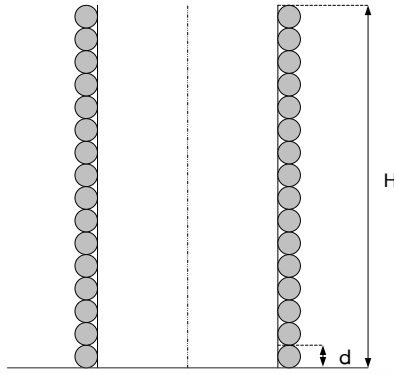
$$N = \frac{H}{d} \quad (3.3)$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบของการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ

H คือ ความสูงของระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ (นิ้ว)

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองแดง (นิ้ว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 พารามิเตอร์จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (3.3) จะได้จำนวนรอบของการพันขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ

$$N = \frac{H}{d}$$

$$N = \frac{18}{0.016}$$

$$N = 1,125$$

จะได้จำนวนรอบของการพันขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 1,125 รอบ

2) ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ

ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.4)

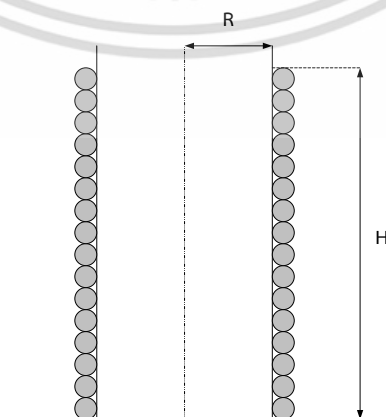
$$L_2 = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \quad (3.4)$$

เมื่อ L_2 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ (μH)

N คือ จำนวนรอบของการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ

H คือ ความสูงของระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ (นิ้ว)

R คือ รัศมีของขดลวดด้านทุติยภูมิ (นิ้ว)



รูปที่ 3.5 พารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ

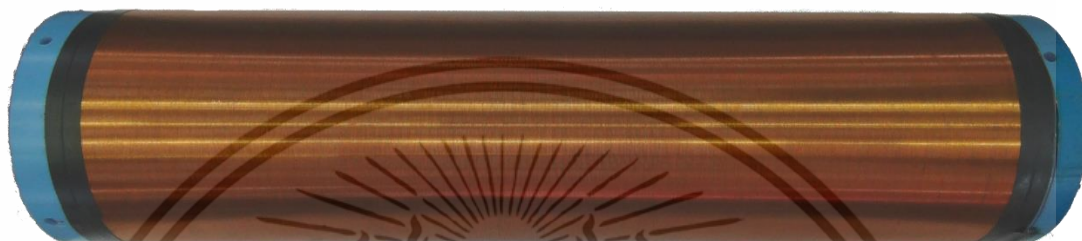
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (3.4) จะได้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ

$$L_2 = \frac{(NR)^2}{9R + 10H}$$

$$L_2 = \frac{(1,125 \times 2)^2}{(9 \times 2) + (10 \times 18)}$$

$$L_2 = 25,568 \text{ } \mu\text{H}$$



รูปที่ 3.6 ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแห้ง)

3.3.2 กรณีการออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแขวน)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 นิ้ว เป็นแกนกลางในการพันขดลวดด้านทุติยภูมิและระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 18 นิ้ว การหาขนาดของเส้นลวดทองแดงที่เหมาะสมต่อพันขดลวดด้านทุติยภูมิตามเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนดไว้คือเลือกใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 นิ้ว ความยาว 18 นิ้ว และค่าความถี่ขาออกของขดลวดด้านทุติยภูมิประมาณ 200 kHz สามารถพิจารณาจากตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 ค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมต่อพันขดลวดด้านทุติยภูมิตามเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนด

ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 นิ้วและระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 18 นิ้ว				
ขนาดเส้นลวด (SWG)	Ø ของลวดที่ใช้พัน (นิ้ว)	จำนวนรอบ	ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)	ความถี่ขาออก (kHz)
20	0.036	500.00	3.911	671.582
21	0.032	562.50	4.950	596.953
22	0.028	642.85	6.465	522.346
23	0.024	750.00	8.800	447.714
24	0.023	782.61	9.582	429.056
25	0.020	900.00	12.672	373.095

*** ที่ค่าความเหนี่ยวนำ 8.80 mH เมื่อคำนวณรวมกับค่าความจุของลูกถ้วยแขวนที่มีค่าประมาณ 50 pF จะได้ความถี่ขาออกเท่ากับ 211.48 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ลวดเบอร์ 23 SWG ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.024 นิ้ว (0.61 มิลลิเมตร) ในการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางที่ 3.2 มีขั้นตอนการในการคำนวณดังนี้

- 1) จำนวนรอบของการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ
เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (3.3) จะได้จำนวนรอบของการพันขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ

$$N = \frac{H}{d}$$

$$N = \frac{18}{0.024}$$

$$N = 750$$

จะได้จำนวนรอบของการพันขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 750 รอบ

- 2) ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ
เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (3.4) จะได้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ

$$L_2 = \frac{(NR)^2}{9R + 10H}$$

$$L_2 = \frac{(750 \times 1.75)^2}{(9 \times 1.75) + (10 \times 18)}$$

$$L_2 = 8,800 \text{ } \mu\text{H}$$

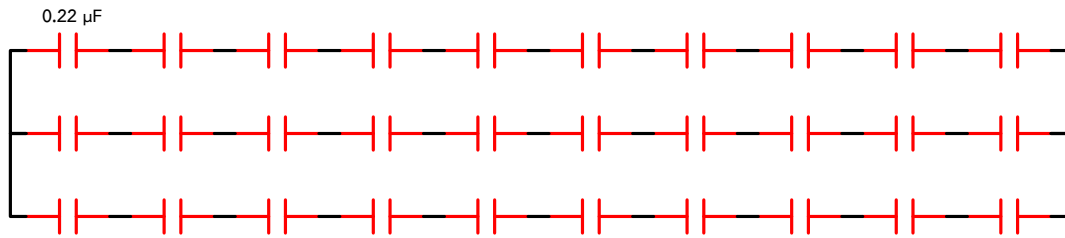


รูปที่ 3.7 ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตท (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแขวน)

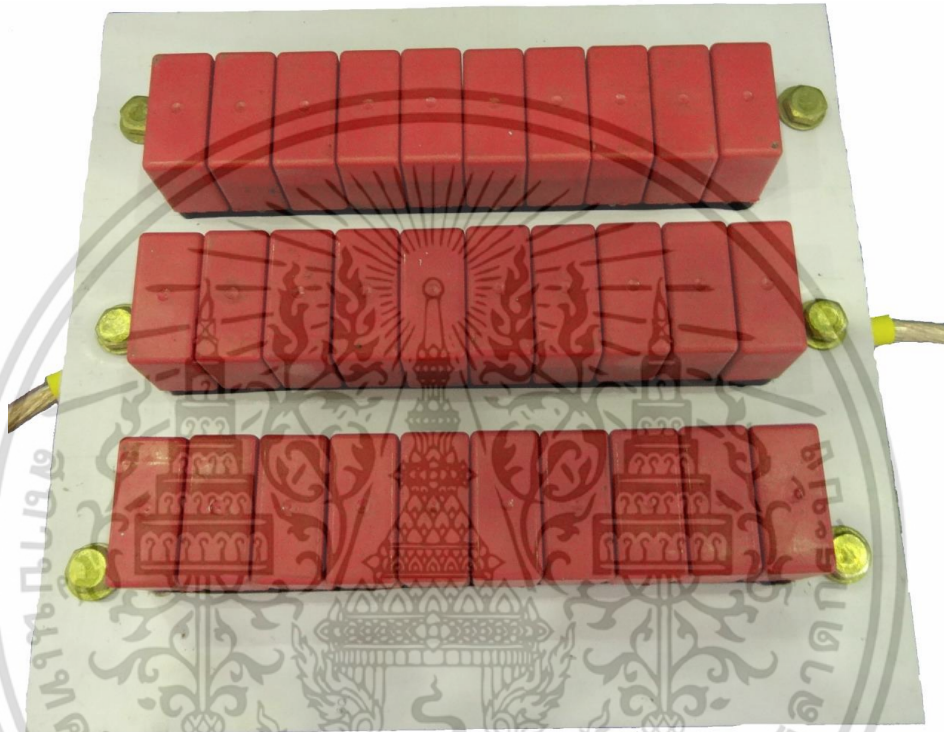
3.4 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (C_1)

งานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านปฐมภูมิเท่ากับ 66 nF เนื่องจากเป็นค่าความจุที่ไม่สูงหรือต่ำจนเกินไป ซึ่งจะช่วยให้สามารถออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านปฐมภูมิที่มีมิติที่เหมาะสมต่อไปได้ จากนั้นทำการจำลองผลด้วยโปรแกรม OrCAD เพื่อหาขนาดแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ผลการจำลองพบว่าค่าแรงดันที่ได้มีค่าประมาณ 4 kV_{AC} จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุยี่ห้อ WIMA ชนิด Polypropylene ที่มีค่าความจุ 0.22 μF พิกัดแรงดันกระแสสลับ 650 V โดยออกแบบให้ต่อตัวเก็บประจุนุกรมกัน 10 ตัว และนำมาขนานกัน 3 ชุด จะได้ค่าความจุของตัวเก็บประจรรวมเท่ากับ 66 nF โดยมีค่าความคงทนแรงดันของตัวเก็บประจุเท่ากับ 6.5 kV_{AC}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงการต่อตัวเก็บประจุขนานกัน 3 ชุด และอนุกรมชุดละ 10 ตัว



รูปที่ 3.9 ตัวเก็บประจุต้านปฏุมุมของหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่

3.5 การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดต้านปฏุมุม (L_1)

การพันขดลวดต้านปฏุมุมจะเลือกใช้แบบ Helical Coil หรือการพันแบบทรงกระบอก เนื่องจากจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าระหว่างขดลวดต้านปฏุมุมและทุติยภูมิสูงกว่าแบบ Flat Pancake Coil หรือการพันแบบแนวราบและแบบ Inverse Conical Coil หรือการพันแบบก้นหอย ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการในกรณีที่ยังไม่ได้ทดสอบกับลูกถ้วยฉนวนสามารถคำนวณได้จาก

$$L_1 C_1 = L_2 C_2$$

$$L_1 \times (66 \times 10^{-9}) = (25.568 \times 10^{-3}) \times (14.70 \times 10^{-12})$$

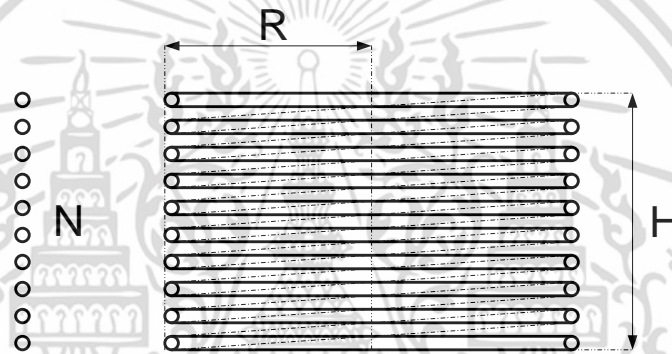
$$L_1 = 5.695 \mu\text{H}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านปฐมภูมิ เลือกใช้ท่อทองแดงขนาด 0.25 นิ้ว (6.35 มิลลิเมตร) หนา 0.70 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของแต่ละรอบเท่ากับ 0.50 นิ้ว รัศมีของขดลวดด้านปฐมภูมิ (R) เท่ากับ 4.25 นิ้ว ความสูงของขดลวดด้านปฐมภูมิ (H) เท่ากับ 5.25 นิ้ว และพันจำนวนรอบ (N) ทั้งหมด 10.5 รอบ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.5)

$$L_1 = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \quad (3.5)$$

เมื่อ L_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิ (μH)
 N คือ จำนวนรอบของการพันขดลวดด้านปฐมภูมิ
 H คือ ความสูงของระยะการพันขดลวดด้านปฐมภูมิ (นิ้ว)
 R คือ รัศมีของขดลวดด้านปฐมภูมิ (นิ้ว)



รูปที่ 3.10 พารามิเตอร์ในการพันขดลวดด้านปฐมภูมิแบบ Helical Coil

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (3.5) จะได้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิสูงสุดเท่ากับ

$$L_1 = \frac{(NR)^2}{9R + 10H}$$

$$L_1 = \frac{(10.5 \times 4.25)^2}{(9 \times 4.25) + (10 \times 5.25)}$$

$$L_1 = 21.94 \mu\text{H}$$

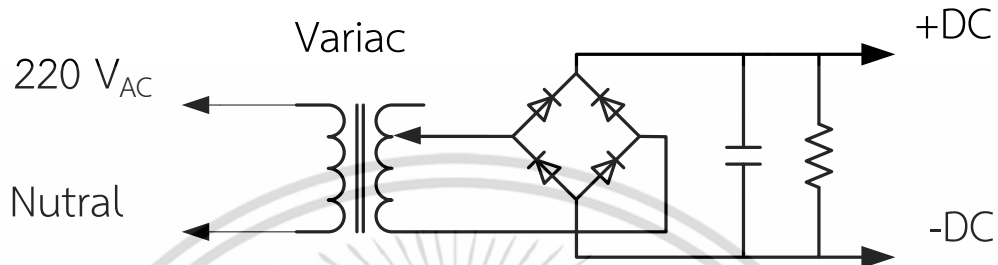


รูปที่ 3.11 ขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรกำลัง [10]

วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V_{AC} 50 Hz เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 311 V_{DC} ซึ่งสามารถปรับระดับแรงดันที่ต้องการใช้งานได้จากการเชื่อมต่อผ่านหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า (Variac) วิธีการเรียงกระแสสามารถทำได้โดยต่อวงจรผ่านไดโอดแบบบริดจ์ จากนั้นกรองแรงดันให้เรียบโดยการต่อตัวเก็บประจุที่มีค่าสูง 3500 μ F แรงดัน 450 V_{DC}



รูปที่ 3.12 แผนผังการทำงานของวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรกำลัง

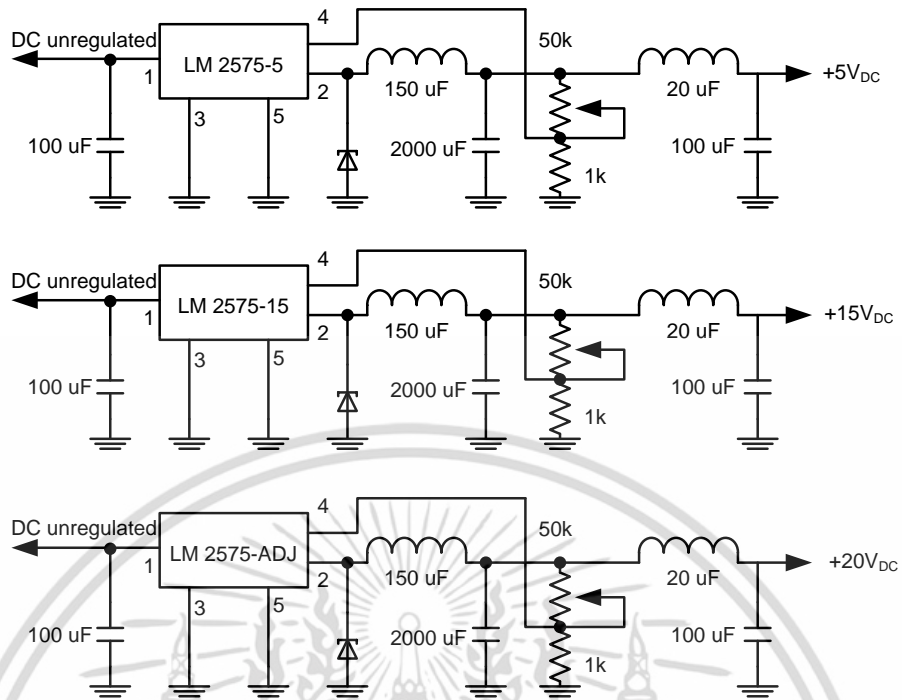


รูปที่ 3.13 วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรกำลัง (Bridge Rectifier)

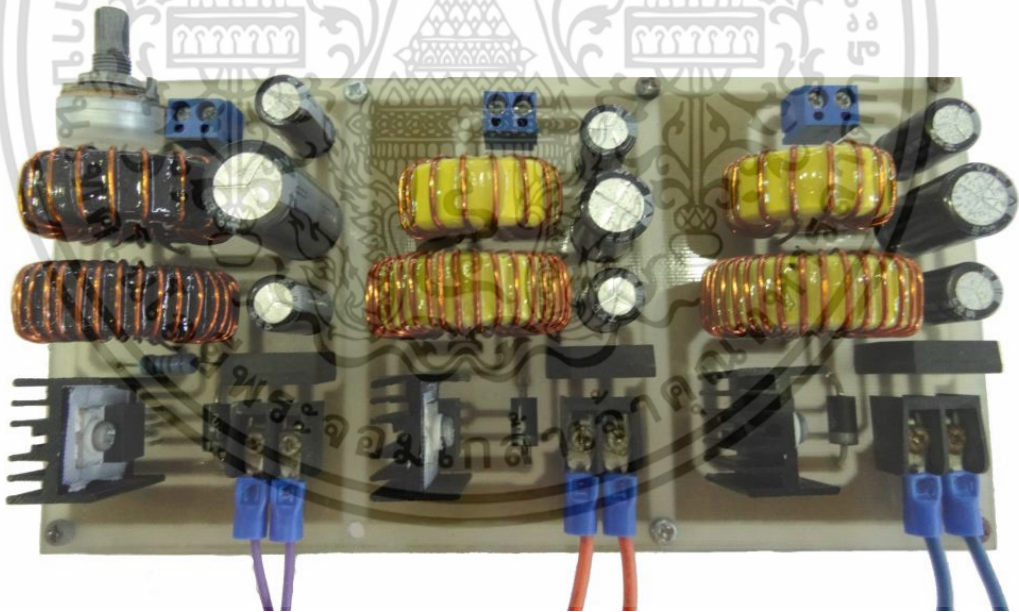
3.7 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรควบคุม

วงจรเรียงกระแสแรงดันต่ำทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V_{AC} 50 Hz เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 V_{DC}, 15 V_{DC} และ 20 V_{DC} เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับชุดวงจรควบคุม โดยการลดแรงดัน 220 V_{AC} 50 Hz ผ่านหม้อแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าลง (Step-Down) จากนั้นทำการปรับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านไดโอดแบบบริดจ์ แล้วนำแรงดันที่ได้ผ่านวงจรรักษาระดับแรงดันต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แผนผังการทำงานของวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรควบคุม

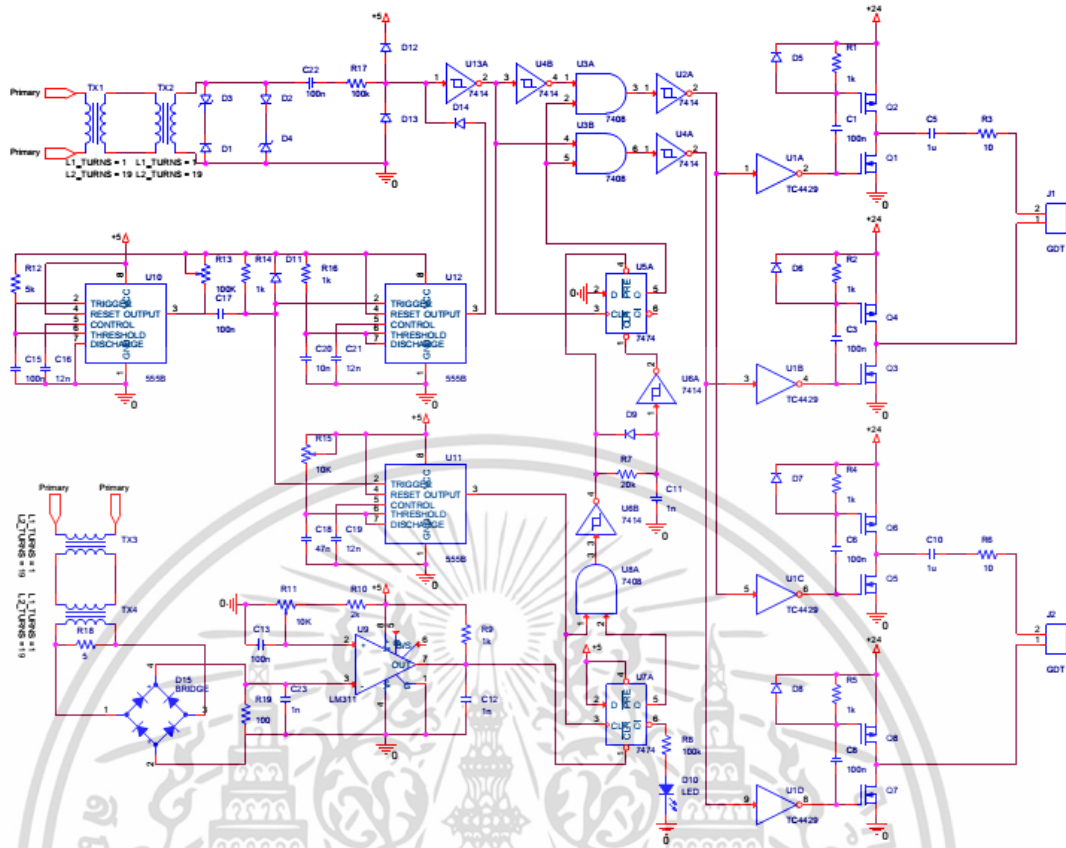


รูปที่ 3.15 วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรควบคุม

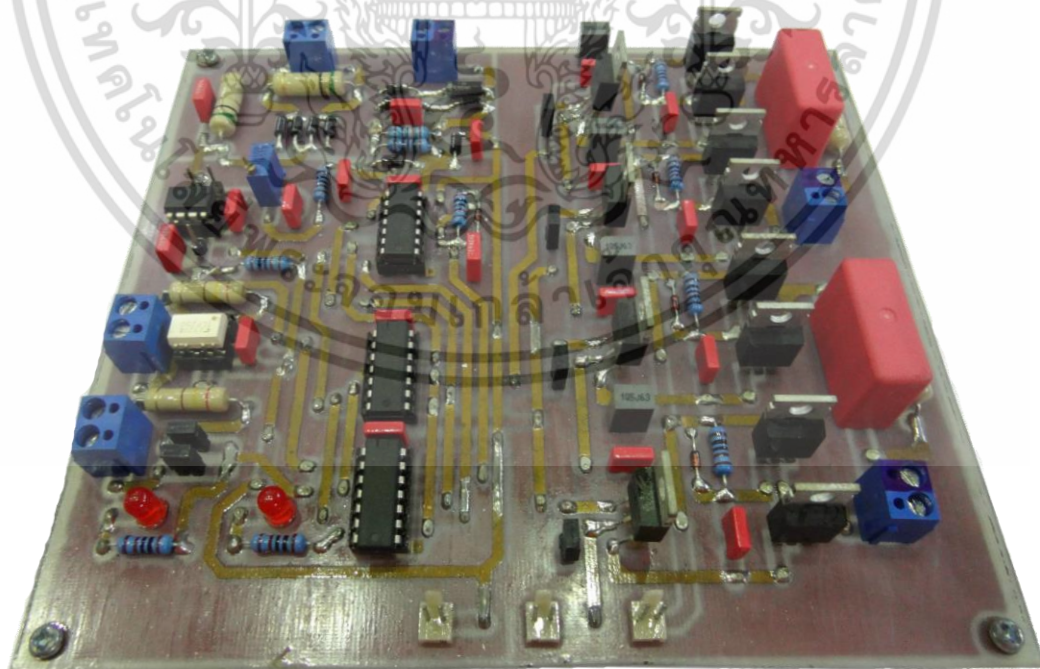
3.8 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรควบคุม [10]

วงจรควบคุมทำหน้าที่ควบคุมการสวิตช์ของไอจีบีที (IGBT) ภายในวงจรควบคุมจะประกอบไปด้วย วงจรตรวจจับกระแสเกิน วงจรป้องกันกลับ วงจรทริกสัญญาณ วงจรอินเทอร์รัพท์ (ควบคุมระยะเวลาในการเปิดปิดสวิตช์ของไอจีบีที) และวงจรขยายสัญญาณการขับไอจีบีที วงจรทั้งหมด

เหล่านี้จะวางอยู่บนแผ่นลายวงจรพิมพ์ เชื่อมถึงกันด้วยวิธีการบัดกรี เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แผนผังการทำงานของวงจรควบคุม

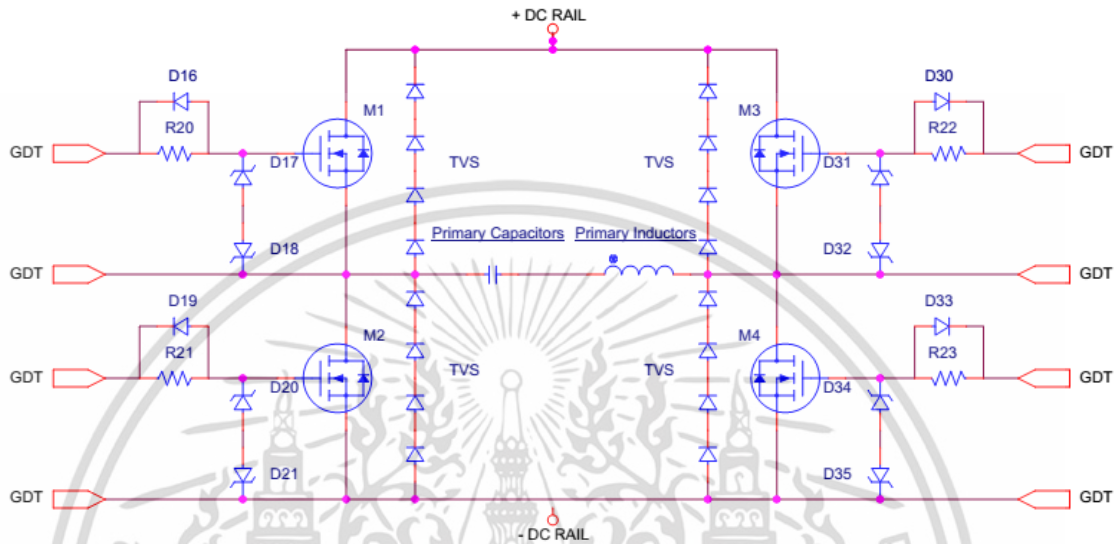


รูปที่ 3.17 วงจรควบคุม

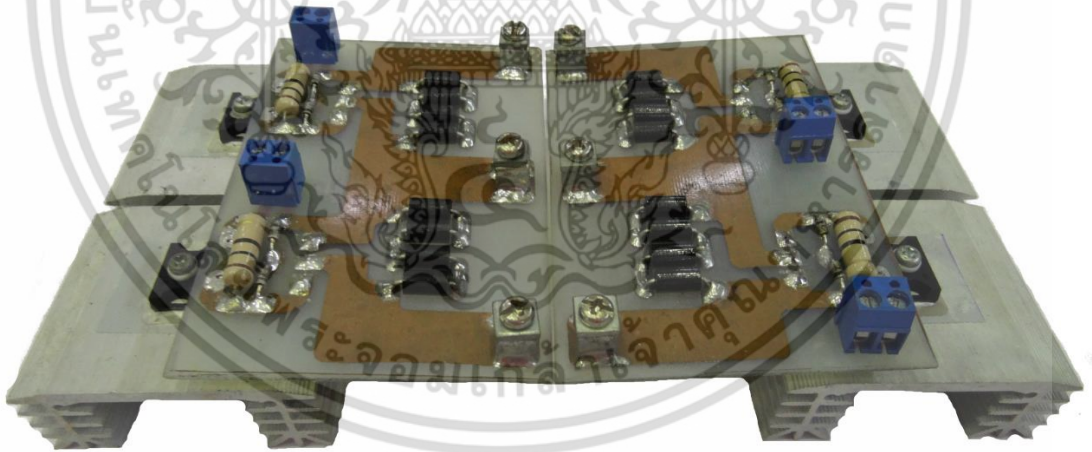
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ [10]

วงจรในส่วนนี้จะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับจากแหล่งจ่าย ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดตามพิกัดแรงดันที่ได้รับจากแหล่งจ่าย ความถี่โดยประมาณ 200 kHz วงจรอินเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้เป็นแบบฟูลบริดจ์ ซึ่งใช้ ไอจีบีที เบอร์ HGTG30N60C3D 63A 600V เป็นสวิตซ์ในการส่งจ่ายพลังงานให้แก่ขดลวดและตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ



รูปที่ 3.18 แผนผังการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.19 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

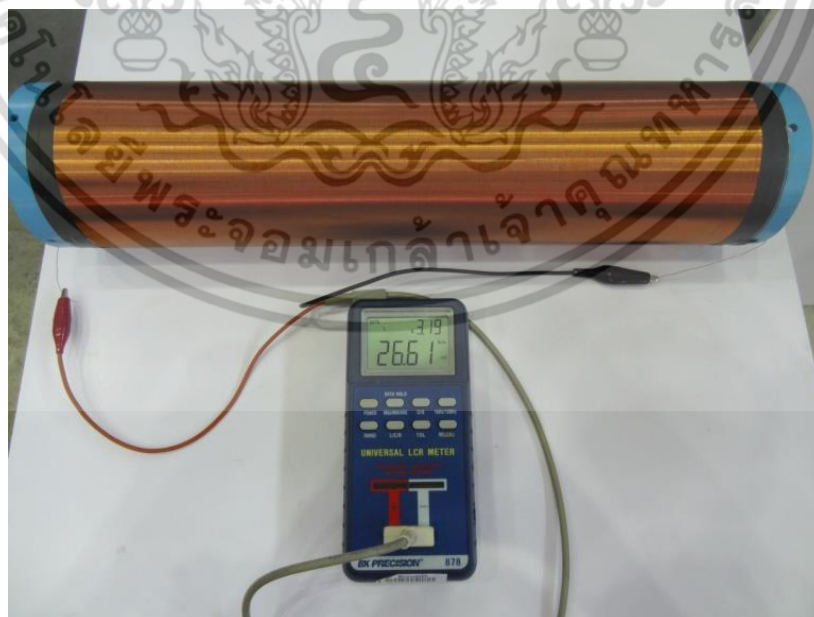
4.1 กล่าวนำ

เนื่องจากที่มาตรฐาน ANSI C29.1 (R2012) และ มอก. 354-2523 กำหนดไว้ว่า “การทดสอบ วาบไฟตามผิว อาจจะใช้แรงดันความถี่สูงแบบหน่วง (Damped High Frequency Voltage) ที่มีความถี่ประมาณ 200 kHz ซึ่งได้จากหม้อแปลงเตสลาให้เกิดวาบไฟตามผิวต่อเนื่องกันเป็นเวลา 3 ถึง 5 วินาที หรืออาจจะทดสอบวาบไฟด้วยความถี่ต่ำให้เกิดวาบไฟตามผิวห่างต่อเนื่องกันเป็นเวลา 3 ถึง 5 นาที” นั้น เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพและความถูกต้องแม่นยำในการออกแบบและประกอบสร้าง จึงได้มีการทดสอบหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ขึ้น โดยจะทำการตรวจสอบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ ค่าความเหนี่ยวนำสูงสุดของขดลวดด้านปฐมภูมิ ค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ และทำการทดสอบการวาบไฟตามผิวของลูกแฉวนและลูกถ้วยแห้ง ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อต่อไป

4.2 การทดสอบหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่

4.2.1 การตรวจสอบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแห้ง)

การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านทุติยภูมิที่ได้คำนวณไว้ ดังที่แสดงในบทที่ 3 นั้น จากการคำนวณจะได้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 25.568 mH เมื่อทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิโดยใช้ LC meter พบว่าค่าที่วัดได้เท่ากับ 26.61 mH เห็นได้ว่าค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้

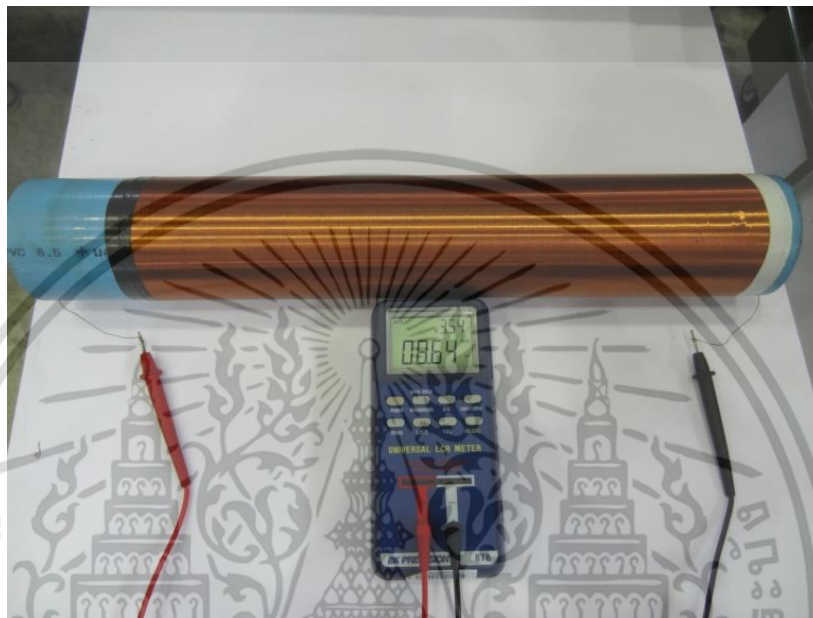


รูปที่ 4.1 ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดด้านทุติยภูมิ (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแห้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การตรวจสอบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแขวน)

การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านทุติยภูมิที่ได้คำนวณไว้ ดังที่แสดงในบทที่ 3 นั้น จากการคำนวณจะได้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 8.800 mH เมื่อทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิโดยใช้ LC meter พบว่าค่าที่วัดได้เท่ากับ 8.64 mH เห็นได้ว่าค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้



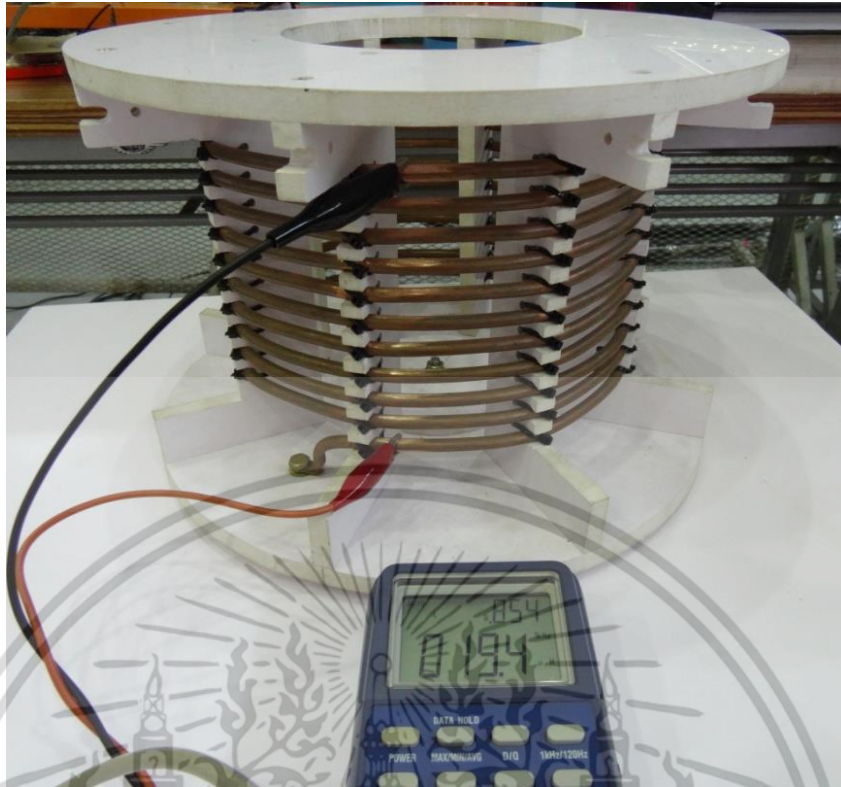
รูปที่ 4.2 ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดด้านทุติยภูมิ (สำหรับทดสอบลูกถ้วยแขวน)

4.2.3 การตรวจสอบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิที่ได้จากการวัด

จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิ	ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)
1	2.70
2	3.90
3	5.40
4	7.20
5	9.10
6	11.50
7	13.80
8	15.30
9	17.20
10	19.40

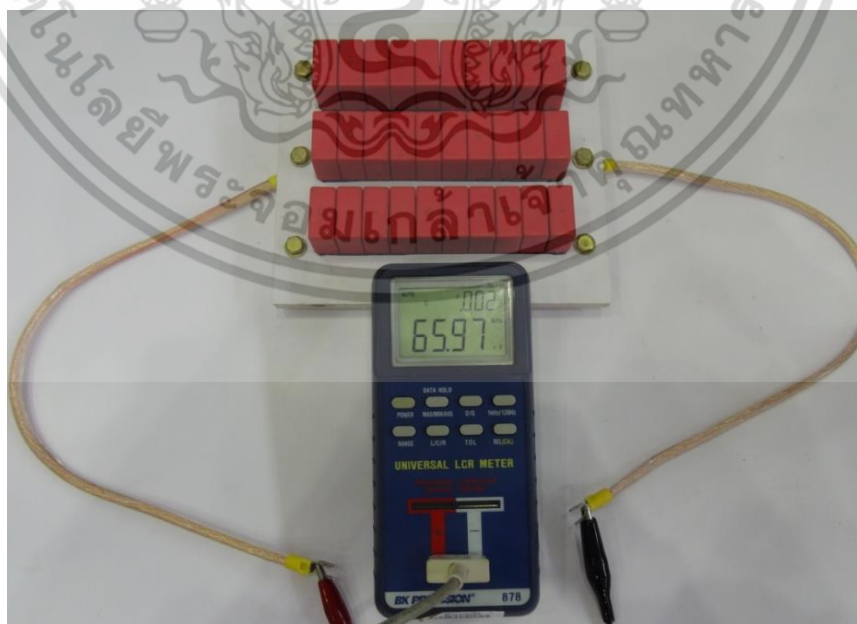
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิรอบที่ 10

4.2.4 การตรวจสอบค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ

การออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิดังที่แสดงในบทที่ 3 นั้น จากการคำนวณจะได้ค่าความจุของตัวเก็บประจุเท่ากับ 66 nF เมื่อทำการวัดจริงโดยใช้ LC meter พบว่าค่าที่วัดได้เท่ากับ 65.97 nF เห็นได้ว่าค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้

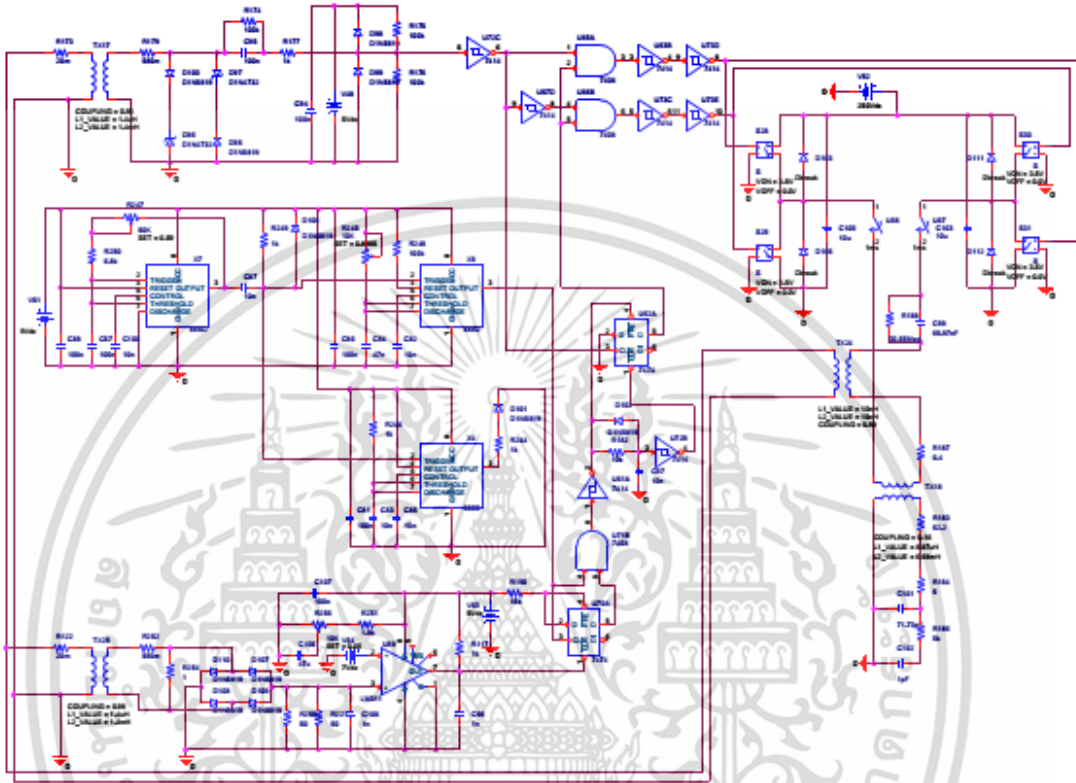


รูปที่ 4.4 การวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

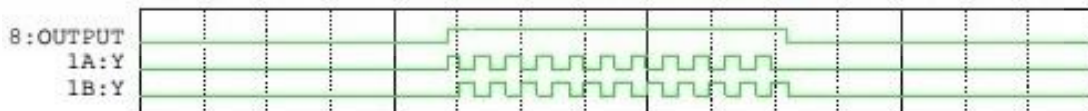
4.2.5 การจำลองระบบการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ OrCAD

การจำลองระบบการทำงานของหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ นั้น ผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้ทำการออกแบบไว้ มาใช้เป็นข้อมูลในการ จำลองระบบการทำงาน เพื่อจำลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงาน รวมไปถึงข้อจำกัดต่างๆ ที่ อาจจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่างๆ ของหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่



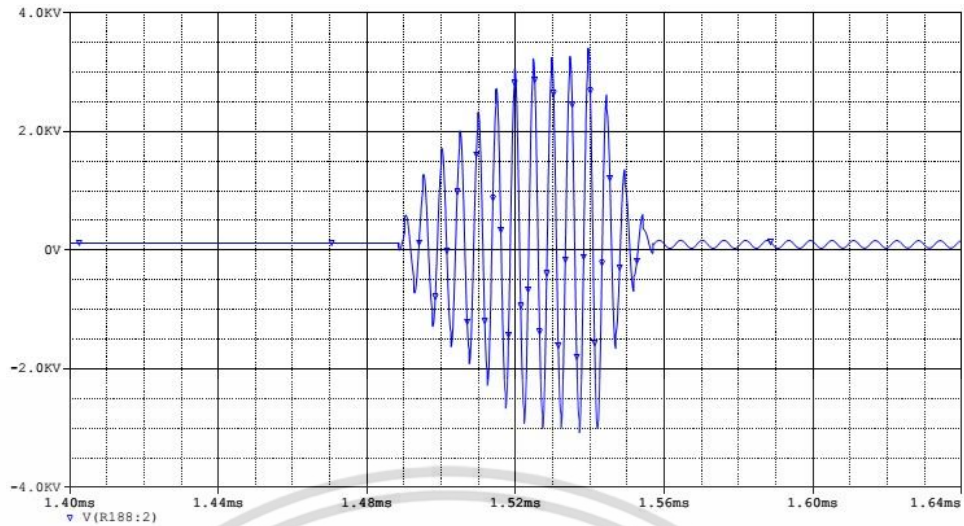
รูปที่ 4.5 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบการทำงานของหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่

ในการจำลองระบบการทำงาน ผู้วิจัยได้กำหนดความถี่ที่ใช้กับอุปกรณ์สวิตชิง ซึ่งได้ จากการป้อนกลับของสัญญาณผ่านวงจรป้อนกลับที่ความถี่ 200 kHz โดยมีคาบการทำงานของวงจร ควบคุมเท่ากับ 5-20 ms ดิวตี้ไซเคิล 1-20 % แรงดันขาเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ 0-310 V_{DC} จากนั้นทำการวัดกระแสและแรงดันขาออกของวงจรด้านปฐมภูมิ และแรงดันขาออกของวงจรด้าน ทุติยภูมิ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

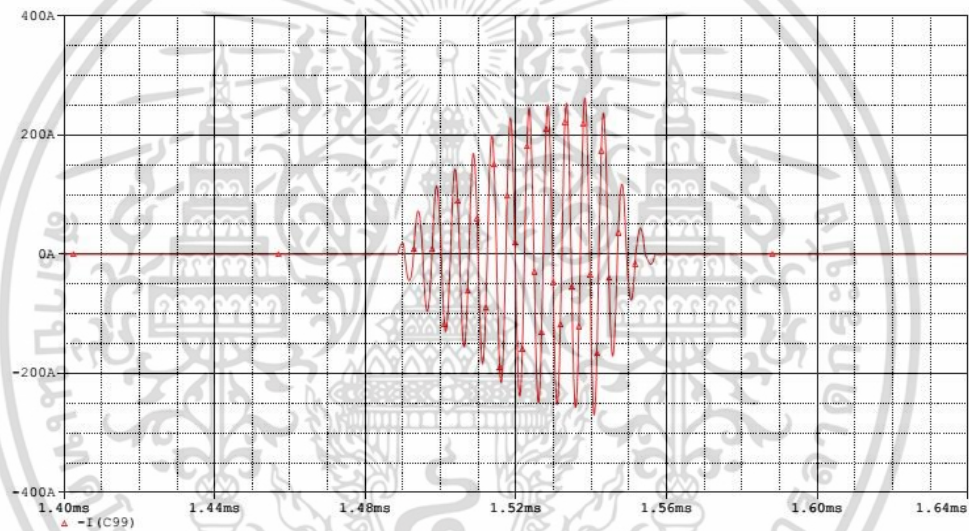


รูปที่ 4.6 ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิง

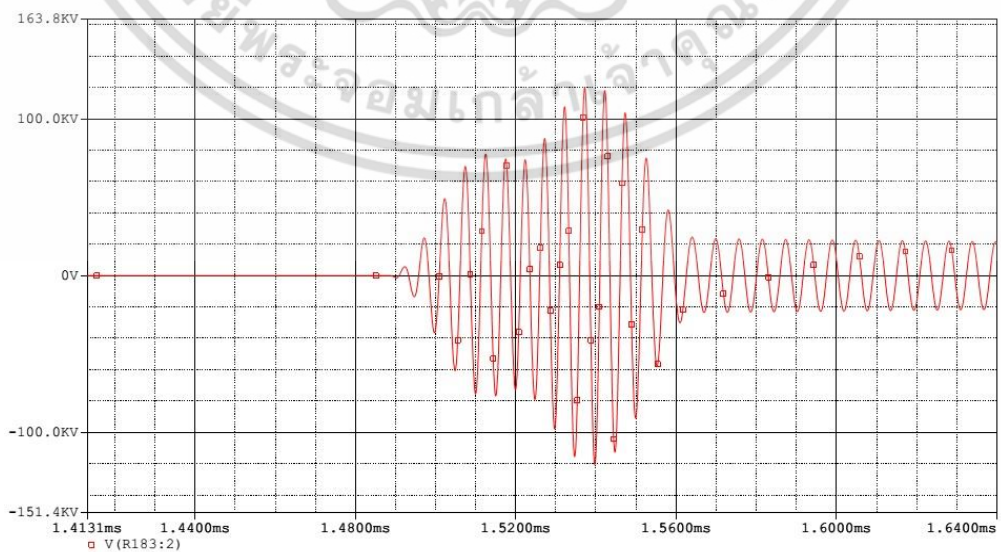
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แรงดันที่ขดลวดของวงจรด้านปฐมภูมิ



รูปที่ 4.8 กระแสที่ขดลวดของวงจรด้านปฐมภูมิ



รูปที่ 4.9 แรงดันที่ขดลวดของวงจรด้านทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการจำลองระบบการทำงานพบว่า หม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ที่ได้ทำการออกแบบไว้ สามารถสร้างแรงดันขาออกที่เหมาะสมในวงจรด้านทุติยภูมิเท่ากับ 120 kV ที่ความถี่เรโซแนนท์ 200 kHz แรงดันขาเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ 230 V_{DC} โดยมีคาบการทำงานของวงจรควบคุมเท่ากับ 5 ms ดิวตี้ไซเคิล 2 % สาเหตุที่เลือกใช้แรงดันขาเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 230 V_{DC} เนื่องจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งที่เลือกใช้เป็น ไอจีบีที เบอร์ HGTG30N60C3D 63A 600V สามารถทนกระแสชั่วขณะได้ 252 A ซึ่งหากทำการปรับระดับแรงดันขาเข้าสูงเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ จะทำให้กระแสที่ไหลในวงจรอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นจนสร้างความเสียหายให้แก่อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งได้

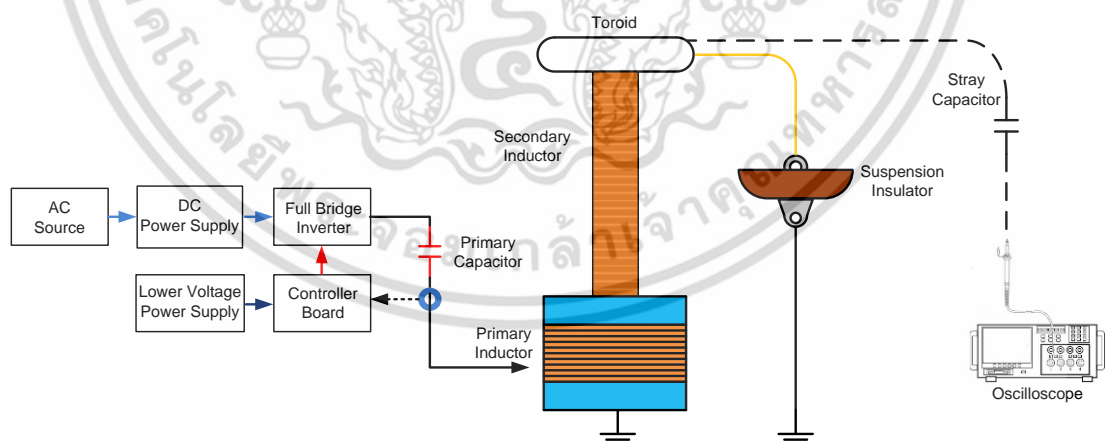
4.2.6 การทดสอบวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนโดยหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตท

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย

- | | |
|---|-----------|
| 1. หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-250 V _{ac} 50 Hz 20 A | 1 เครื่อง |
| 2. หม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ | 1 ชุด |
| 3. Oscilloscope | 1 เครื่อง |
| 4. Volt meter | 1 เครื่อง |
| 5. Clamp on Power meter | 1 เครื่อง |

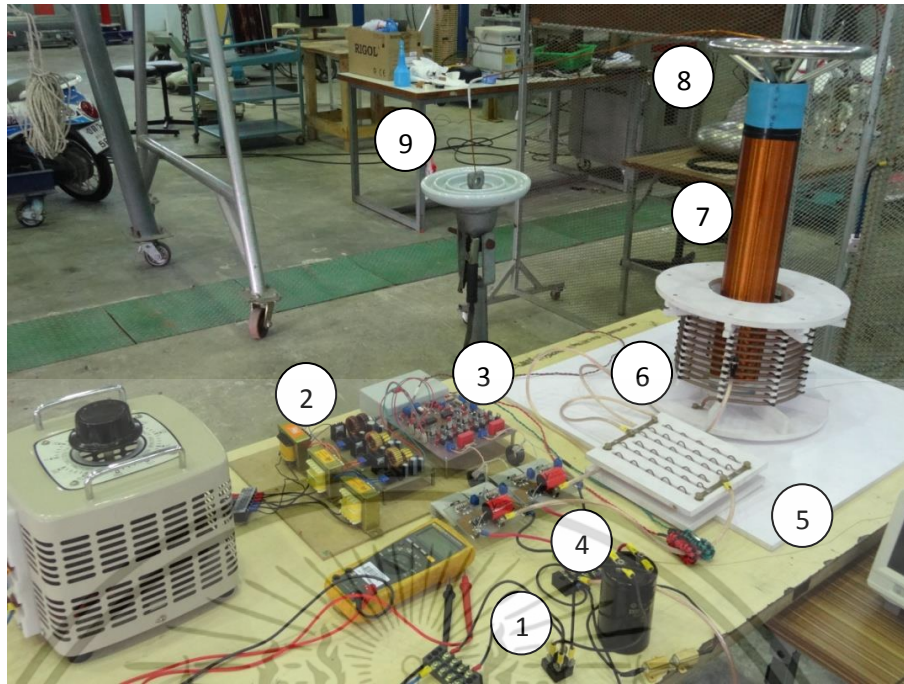
ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อดังวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.12
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตท
3. ปรับหาความถี่เรโซแนนท์ ซึ่งสังเกตได้จากการวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน โดยวิธีการปรับลดหรือเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ
4. บันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 4.10 วงจรที่ใช้ทดสอบหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 วงจรที่ใช้ทดสอบหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่

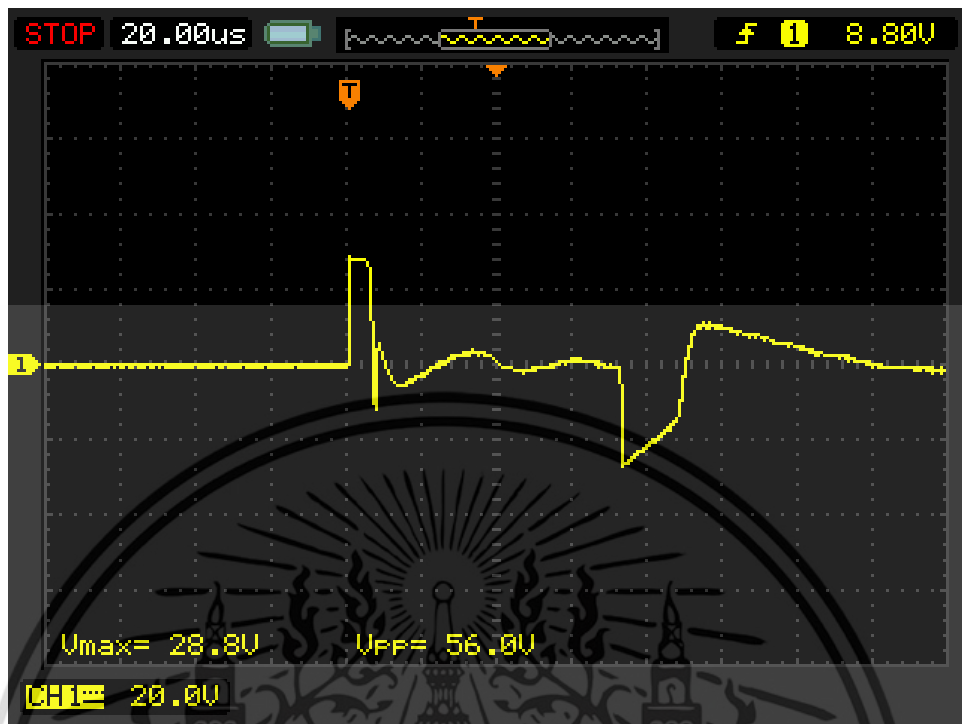
- เมื่อ
1. คือ วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรกำลัง
 2. คือ วงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรควบคุม
 3. คือ วงจรควบคุม
 4. คือ วงจรฟลูบริจอินเวอร์เตอร์
 5. คือ ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ
 6. คือ ขดลวดด้านปฐมภูมิ
 7. คือ ขดลวดด้านทุติยภูมิ
 8. คือ อิเล็กโตรดแบบวงแหวน
 9. คือ ลูกถ้วยฉนวน

การทดสอบลูกถ้วยฉนวนนั้น จะต้องปรับจูนให้วงจรหม้อแปลงเทสลาอยู่ในสภาวะจูนที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะทำให้แรงดันที่ออกมามีค่าสูงและเกิดการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนได้ง่าย ในการทดสอบเพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของหม้อแปลงเทสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ที่ได้ ออกแบบและประกอบสร้างนี้ จะทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่างๆ ของวงจร และทำการทดสอบวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนชนิด 52-1, 52-4 และลูกถ้วยแท่ง 57-2 ซึ่งผลจากการทดลองสามารถแสดงได้จากตารางที่ 4.2

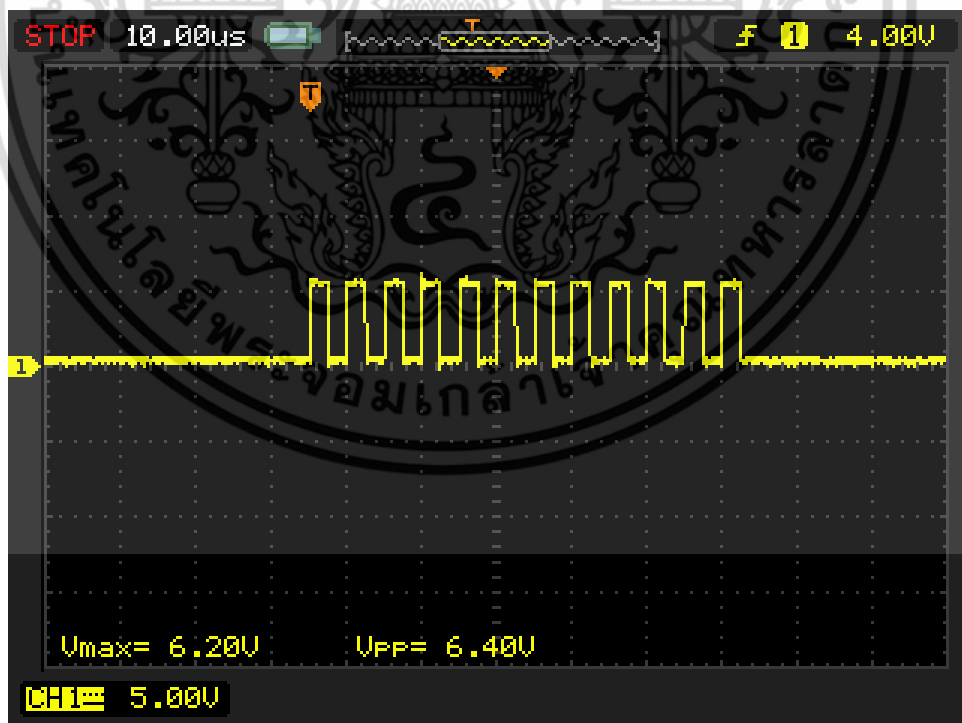
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบเพื่อหาความถี่จากการทดสอบวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน

ชนิดของลูกถ้วยฉนวน	ความถี่ที่ได้จากการวัด (kHz)
ลูกถ้วยแหวน 52-1	201.6
ลูกถ้วยแหวน 52-4	192.3
ลูกถ้วยแท่ง 57-2	180.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

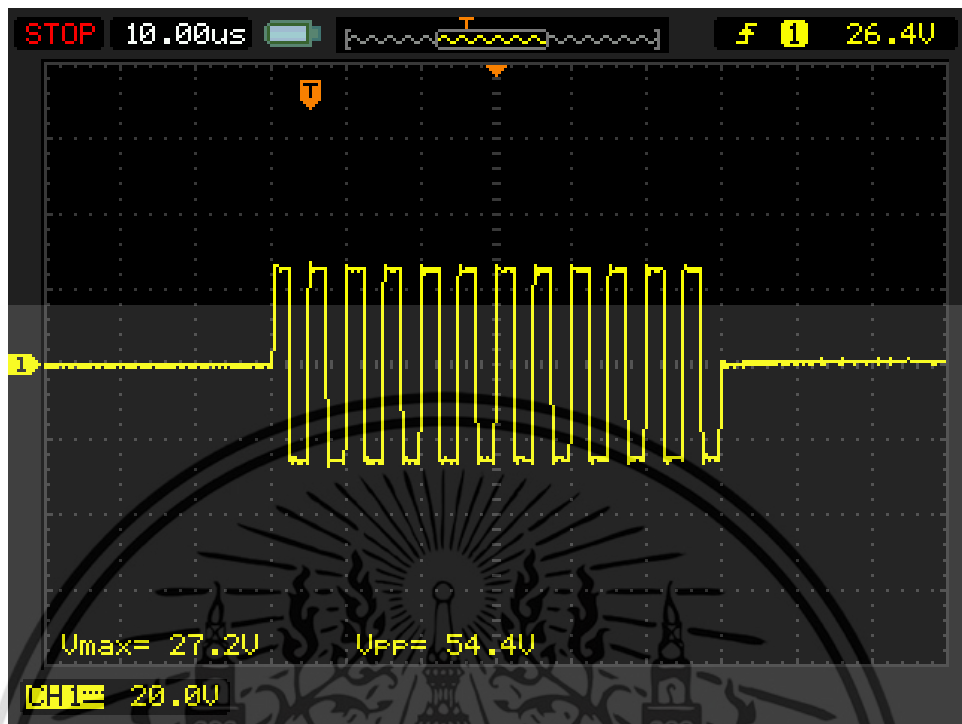


รูปที่ 4.12 ลักษณะสัญญาณทริกเกอร์เริ่มการทำงานของวงจรควบคุม

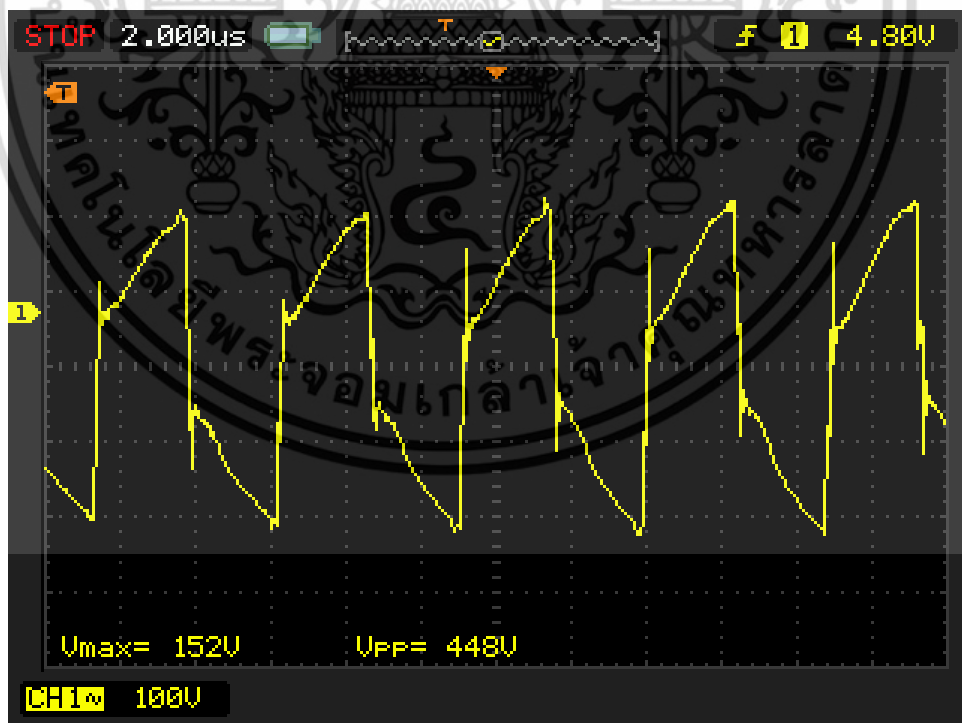


รูปที่ 4.13 ลักษณะสัญญาณป้อนกลับจากวงจรป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ลักษณะสัญญาณขับนำเกตไอจีบีที

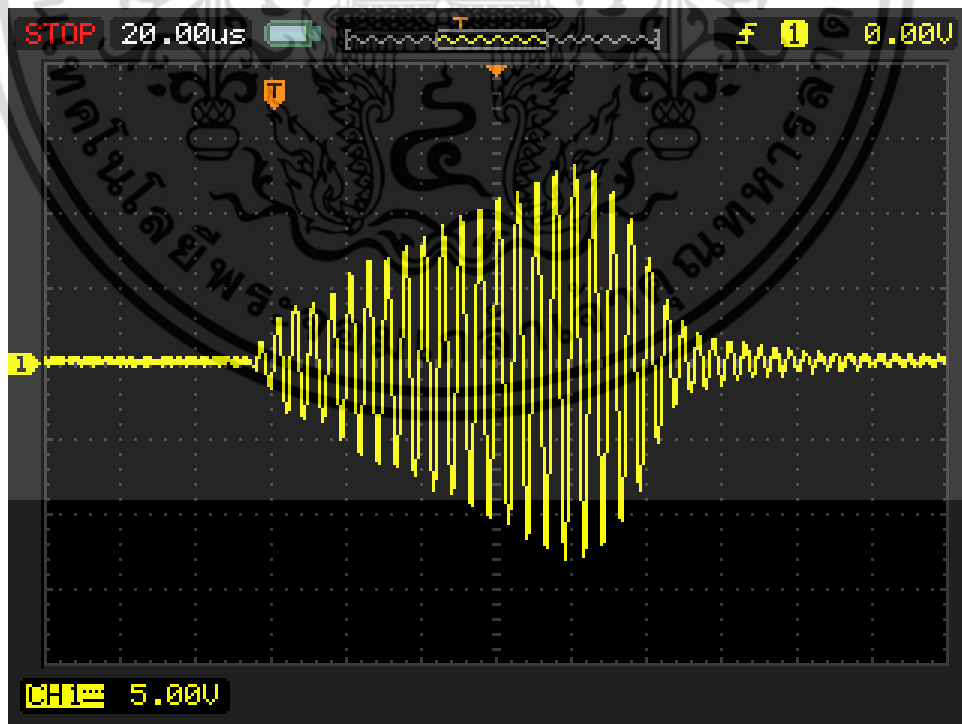


รูปที่ 4.15 สัญญาณขาออกของวงจรรินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

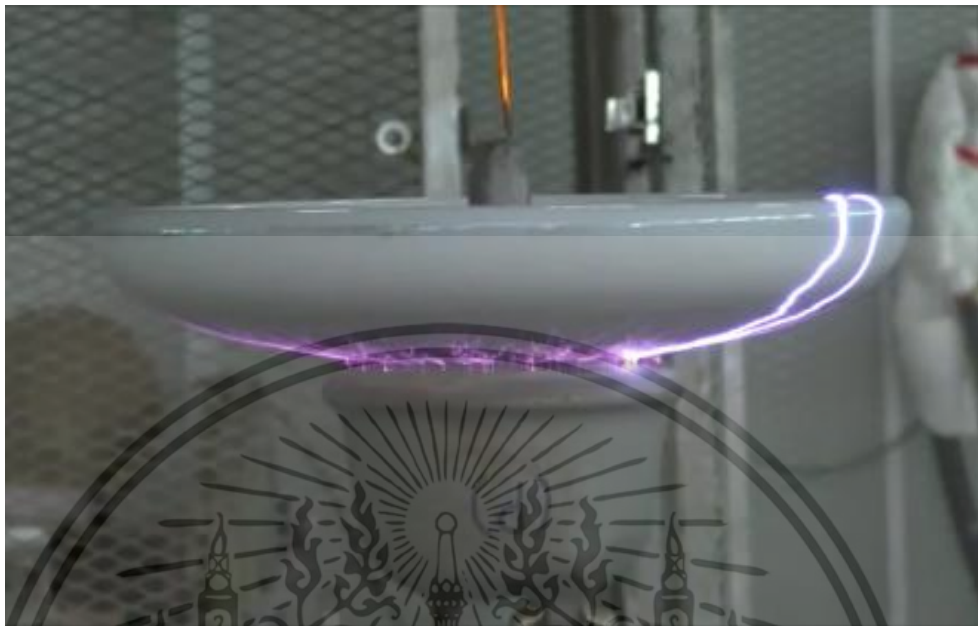


รูปที่ 4.16 การทดสอบวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยแขวนชนิด 52-1

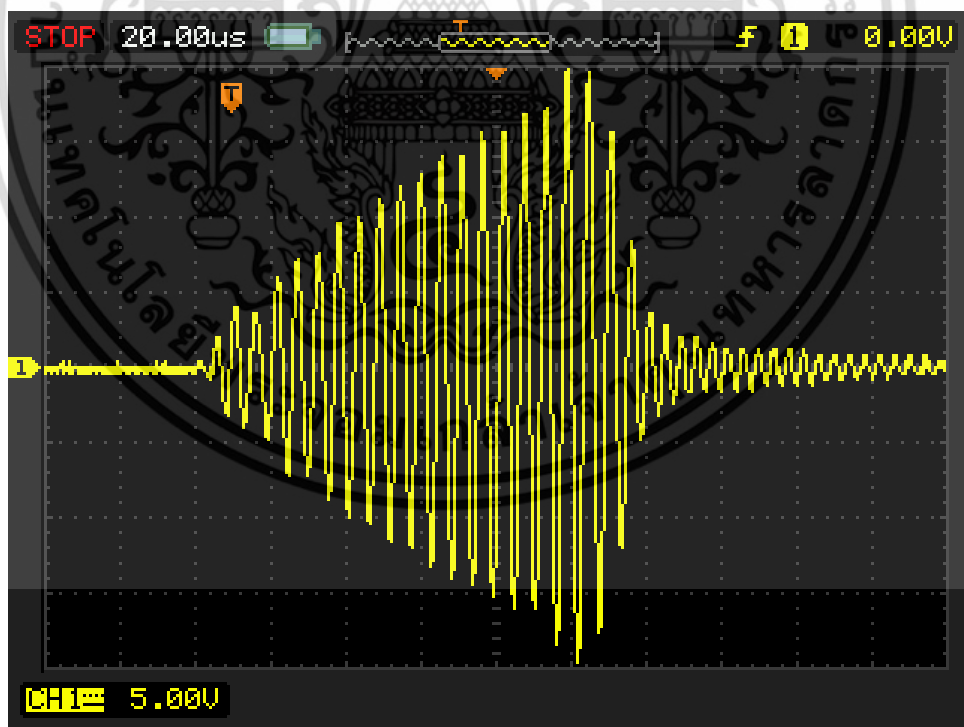


รูปที่ 4.17 รูปคลื่นความถี่ที่วัดได้จากการทดสอบวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยแขวนชนิด 52-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

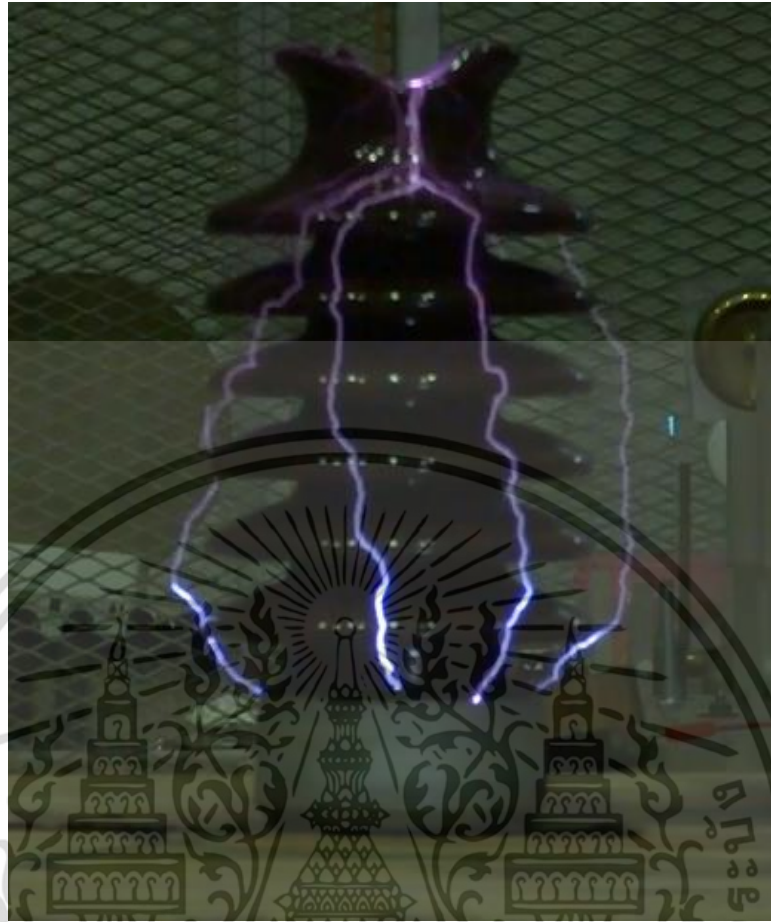


รูปที่ 4.18 การทดสอบวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยแขวนชนิด 52-4

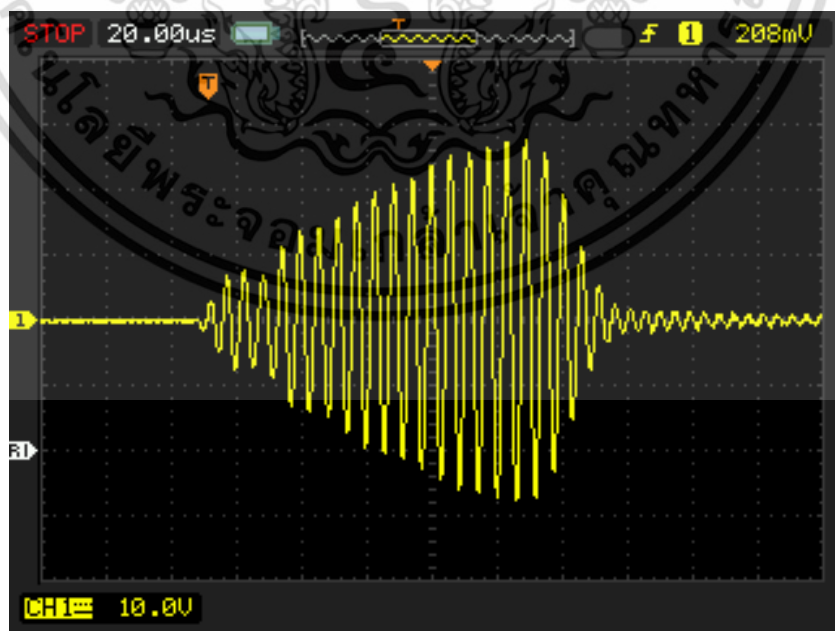


รูปที่ 4.19 รูปคลื่นความถี่ที่วัดได้จากการทดสอบวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยแขวนชนิด 52-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 การทดสอบวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยแท่งชนิด 57-2



รูปที่ 4.21 รูปคลื่นความถี่ที่วัดได้จากการทดสอบวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยแท่งชนิด 57-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ตัวอย่างทดสอบวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยบกร่อง

จากการทดสอบหม้อแปลงเตสลาแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ จะเห็นได้ว่าสามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยการนำลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนมาทดสอบกับชุดทดสอบนี้ ซึ่งสามารถทดสอบความผิดพร่องของลูกถ้วยฉนวนได้ จึงทำให้สามารถแยกลูกถ้วยฉนวนที่ผิดปกติกับลูกถ้วยฉนวนที่สมบูรณ์ได้ โดยการสังเกตการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 4.23 โครงสร้างรองรับอุปกรณ์หลังจากติดตั้งส่วนประกอบต่างๆ แล้ว ขั้นตอนการดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

เนื่องจากปัจจุบันห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีหม้อแปลงทดสอบที่ใช้ในการทดสอบวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน ซึ่งหม้อแปลงทดสอบแบบดั้งเดิมที่ใช้ทดสอบความผิดพลาดของลูกถ้วยฉนวนนั้น มีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่ น้ำหนักมากและมีราคาแพง อันเนื่องมาจากจะต้องมีสปาร์กแก๊ป หม้อแปลงปรับระดับแรงดันและหม้อแปลงแรงดันสูง อีกทั้งยังมีพลังงานสูญเสียที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากการสปาร์กของสปาร์กแก๊ป จึงจำเป็นที่จะต้องมีการระบายความร้อนที่ดี ซึ่งส่งผลให้เคลื่อนย้ายได้ลำบากและไม่สะดวกมากนัก สำหรับการทดสอบทางไฟฟ้าในห้องทดสอบที่มีขนาดเล็กภายในโรงงานจริง

ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาของหม้อแปลงทดสอบแบบดั้งเดิม วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ขึ้น โดยการประยุกต์ใช้ความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดสอบความผิดพลาดของลูกถ้วยฉนวนให้เป็นไปตามที่มาตรฐาน ANSI C29.1 (R2012) และ มอก. 354-2523 กำหนดสามารถทดสอบความผิดพลาดของลูกถ้วยฉนวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความกะทัดรัด น้ำหนักเบา มีค่าใช้จ่ายในการประกอบสร้างที่ต่ำและอุปกรณ์สามารถหาได้ภายในประเทศ

จากการทดสอบหม้อแปลงทดสอบแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ที่พัฒนาขึ้นนี้ โดยการทดสอบวาทไฟตามผิวกับลูกถ้วยฉนวนชนิด ANSI 52-1, ANSI 52-4 และลูกถ้วยแท่งชนิด ANSI 57-2 พบว่าหม้อแปลงทดสอบแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ที่ได้ประกอบสร้างขึ้น สามารถสร้างแรงดันสูง 120 kV ที่ความถี่ประมาณ 200 kHz (180 kHz - 201 kHz) และสามารถทดสอบการวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยแบบแขวนและลูกถ้วยแบบแท่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้หม้อแปลงทดสอบแบบโซลิตสเตทเรโซแนนท์คู่ที่ได้ประกอบสร้างขึ้น ยังเป็นหม้อแปลงทดสอบที่มีขนาดกะทัดรัดที่สุดที่สามารถใช้ในการทดสอบลูกถ้วยแขวนในระบบจำหน่ายได้จริงในทางปฏิบัติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ไม่สามารถทำการทดสอบวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนเป็นเวลานานๆ ได้ เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์สวิตซ์ที่นำมาใช้ หากมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งเดิมในงานวิจัยนี้ใช้ประเภท TO-247 เปลี่ยนเป็นประเภท Module ก็อาจจะสามารถทดสอบการวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนเป็นเวลานานขึ้นได้

2) ไม่สามารถเพิ่มระดับแรงดันของแหล่งจ่ายเกิน 180 V_{ac} ได้ เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์สวิตซ์ที่นำมาใช้ในงานวิจัย ซึ่งหากเพิ่มระดับแรงดันสูงกว่านี้จะทำให้กระแสที่ไหลในวงจรอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นจนสร้างความเสียหายให้แก่อุปกรณ์สวิตซ์ได้

3) ควรมีระบบระบายความร้อนให้แก่อุปกรณ์สวิตซ์ เพื่อช่วยให้อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งนำกระแสได้นานขึ้น

4) ค่าความเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ (L₁) อาจมีค่าความเหนี่ยวนำที่คลาดเคลื่อนเนื่องจากท่อทองแดงที่ใช้ในการพันเป็นท่อทองแดงชนิดแข็งทำให้ยากต่อการตัดโค้ง ทำให้ระยะห่างระหว่างขดลวดในแต่ละรอบมีค่าไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำราญ สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2549.
- [2] นายพุทธิรักษ์ มธุรส, นายขวัญชัย เขียวขวัญ และนายสมศักดิ์ บุญธรรม. “หม้อแปลงเตสลา 400 kV 200 kHz” ปรินิพนธ์วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [3] รัฐติพงษ์ สมัครพงศ์. “การออกแบบหม้อแปลงเตสลาโดยใช้แหล่งจ่ายแบบสวิตช์สำหรับใช้ทดสอบฉนวน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2546.
- [4] Test Methods for Electrical Power Insulators, ANSI C29.1 (R2012), 2012.
- [5] ประพัฒน์ รั้วไธสง, นนท หุ่นทอง, วัลลภ อินพรม. “การสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงชนิดความถี่สูง” ปรินิพนธ์วิทยานิพนธ์เทคโนโลยีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 2551.
- [6] อุดม พรหมศรีจันทร์ นรงค์ฤทธิ์ เสนาจิตร และ ไชยพร หล่อทองคำ. “การออกแบบและสร้างหม้อแปลงเตสลาโดยใช้เทคนิคฟลูบริดจ์อินเวอร์เตอร์” การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON 32). ตุลาคม 2552. หน้า 259-262.
- [7] สุพจน์ วรธิพรหมมา. “การศึกษาวิเคราะห์การออกแบบสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา ขนาดพิกัด 100 kV 150 kHz” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 2557.
- [8] มณฑิยา ผ่องแผ้ว. “การพัฒนางจรสวิตซ์สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูง แรงดันสูง กระแสสลับ” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52. กุมภาพันธ์ 2557. หน้า 210-218
- [9] ธิรพงศ์ กิษรวัฒน์ และพีรพล จิราพงศ์ “การพัฒนาหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงความถี่สูงสำหรับทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน” สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2544.
- [10] Daniel H. McCauley, “DRSSTC Building the Modern Day Tesla Coil First Edition.” United State of America. Lulu Press, 2006.
- [11] รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน, วุฒิพล ธาราธิเรศเรษฐ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronics พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง. 2549.
- [12] Mitch Tilbury, “The ultimate Tesla Coil Design and construction Guide.” United State of America. McGraw-Hill, 2008.
- [13] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, “ลูกถ้วยแขวน: พอร์ซเลน,” มาตรฐานเลขที่ มอก. 354-2523
- [14] Steve Ward. “DRSSTC Logbook.” [Online]. Available: www.stevehv.4hv.org
- [15] Gao Guangyan. “DRSSTC1.” [Online]. Available: www.loneoceans.com
- [16] Richie Burnett. “Typical gate drive waveforms.” [Online]. Available: www.richieburnett.co.uk

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก1. การออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง หรือหม้อแปลงเตสลา (Tesla Transformer) ซึ่งประกอบด้วย หม้อแปลงแรงดันสูง ตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิ (อิเล็กทรอนิกส์แบบวงแหวน) ขดลวดด้านทุติยภูมิ ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ ขดลวดด้านปฐมภูมิ อุปกรณ์จำกัดกระแสเกินและสปาร์กแกป

ก1.1 เงื่อนไขการออกแบบ

หม้อแปลงเตสลาที่ต้องการออกแบบนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สาธิตการเกิดเบรกดาวน์ในอากาศ โดยในการออกแบบและประกอบสร้างจะคำนึงถึงระยะทางการเกิดเบรกดาวน์ในอากาศเป็นหลัก ผู้วิจัยจึงได้กำหนดเงื่อนไขในการออกแบบ เพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณและการประกอบสร้างดังนี้

- พิกัดแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงแรงดันสูงเท่ากับ 12 kV_{AC}
- เลือกใช้ท่อพีวีซีในการพันขดลวดด้านทุติยภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว ระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ 78 นิ้ว (เพื่อให้สามารถสังเกตปรากฏการณ์การเกิดเบรกดาวน์ในอากาศได้อย่างชัดเจนและเพื่อให้สามารถประมาณค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดด้านทุติยภูมิได้ ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าด้านทุติยภูมิเป็นปัจจัยแรกที่ต้องคำนึงถึง)
- เลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิที่สูงที่สุด เพื่อที่จะให้เกิดแรงดันขาออกสูงสุด (V_{Peak}) [12] โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$V_s = V_p \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} \quad (1)$$

เมื่อ V_s คือ แรงดันขาออกของขดลวดด้านทุติยภูมิ (V_{Peak})

V_p คือ แรงดันขาออกของหม้อแปลงแรงดันสูง (V_{Peak})

L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ (H)

L_p คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิ (H)

ก1.2 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ (C_2)

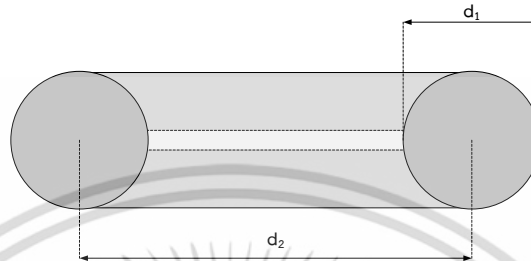
ค่าความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านทุติยภูมิเป็นปัจจัยแรกที่ต้องคำนึงถึงว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด เนื่องจากแรงดันและความถี่ด้านขาออกจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อขนาดของโหลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านทุติยภูมิจะประกอบไปด้วย ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบวงแหวนและค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดด้านทุติยภูมิ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

ก1.2.1 ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบวงแหวน (Toroid; C_T) [12]

อิเล็กทรอนิกส์แบบวงแหวนทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง และช่วยกระจายความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆ ส่วนบนของขดลวดด้านทุติยภูมิ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) ดังนี้

$$C_T = 1.4 \left(1.2781 - \frac{d_1}{d_2} \right) \sqrt{\pi d_1 (d_2 - d_1)} \quad (2)$$

เมื่อ C_T คือ ค่าความจุของอิเล็กโทรดแบบวงแหวน (pF)
 d_1 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (นิ้ว)
 d_2 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนทอรอยด์ (นิ้ว)



รูปที่ ก1.1 พารามิเตอร์อิเล็กโทรดแบบวงแหวน (Toroid)

กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวน (d_2) เท่ากับ 41 นิ้ว ซึ่งทำมาจากท่ออะลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_1) 2.5 นิ้ว จะได้ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบวงแหวนเท่ากับ

$$C_T = 1.4 \left(1.2781 - \frac{d_1}{d_2} \right) \sqrt{\pi d_1 (d_2 - d_1)}$$

$$C_T = 1.4 \left(1.2781 - \frac{2.5}{41} \right) \sqrt{\pi \times 2.5 (41 - 2.5)}$$

$$C_T = 29.63 \text{ pF}$$



รูปที่ ก1.2 อิเล็กโทรดแบบวงแหวนของหม้อแปลงเทสลาแบบดั้งเดิม

ก1.2.2 ค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดด้านทุติยภูมิ (Self-Capacitance; C_S) [12]

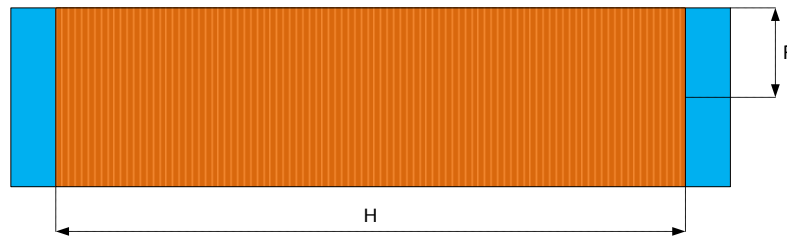
ขดลวดด้านทุติยภูมิจะมีค่าความจุไฟฟ้าแฝงซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$C_S = 0.29H + 0.41R + 1.94R \sqrt{\frac{R}{H}} \quad (3)$$

เมื่อ C_S คือ ค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดด้านทุติยภูมิ (pF)
 H คือ ความสูงของระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ (นิ้ว)

R คือ รัศมีของขดลวดด้านทุติยภูมิ (นิ้ว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก1.3 พารามิเตอร์ของความจุไฟฟ้าแฝง (Self-Capacitance)

กำหนดให้ความสูงของระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 78 นิ้ว ซึ่งพันบนท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว จะได้ค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ

$$C_S = 0.29H + 0.41R + 1.94R \sqrt{\frac{R}{H}}$$

$$C_S = (0.29 \times 78) + (0.41 \times 5) + \left(1.94 \times 5 \times \sqrt{\frac{5}{78}} \right)$$

$$C_S = 27.13 \text{ pF}$$

ก1.3 การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านทุติยภูมิ (L_2) [12]

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว เป็นแกนกลางในการพันขดลวดด้านทุติยภูมิและระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 78 นิ้ว การคำนวณหาขนาดเส้นลวดทองแดงที่เหมาะสมต่อการพันขดลวด เพื่อให้จะได้ค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมและให้ค่าแรงดันขาออกสูงที่สุดสามารถพิจารณาได้จากตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ ก1.1 ค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดแรงดันขาออกสูงที่สุด

ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้วและระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 78 นิ้ว				
ขนาดเส้นลวด (SWG)	Ø ของลวดที่ใช้พัน (นิ้ว)	จำนวนรอบ	ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)	แรงดันขาออก (kV _{Peak})
20	0.036	2,166.67	142.256	740.11
22	0.028	2,785.71	235.157	740.23
24	0.023	3,391.30	348.512	740.24
26	0.018	4,333.33	569.022	740.21
28	0.014	5,571.43	940.631	740.22
30	0.012	6,500.00	1,280.303	740.20

* หมายเหตุ: แรงดันขาออกของขดลวดด้านทุติยภูมิคิดที่แรงดันขาออกของหม้อแปลงแรงดันสูงเท่ากับ 12 kV_{rms}

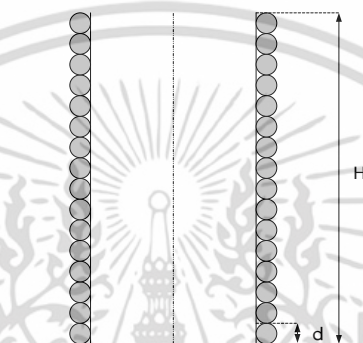
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ลวดเบอร์ 24 SWG ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.023 นิ้ว (0.56 มิลลิเมตร) ในการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางที่ ก.1 มีขั้นตอนการในการคำนวณดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) จำนวนรอบของการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ
 จำนวนรอบของการพันขดลวดด้านทุติยภูมิโดยพิจารณาจากขนาดของเส้นลวดที่ใช้พัน
 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$N = \frac{H}{d} \quad (4)$$

- เมื่อ N คือ จำนวนรอบของการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ
 H คือ ความสูงของระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ (นิ้ว)
 d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองแดง (นิ้ว)



รูปที่ ก1.4 พารามิเตอร์จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (4) จะได้จำนวนรอบของการพันขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ

$$N = \frac{H}{d}$$

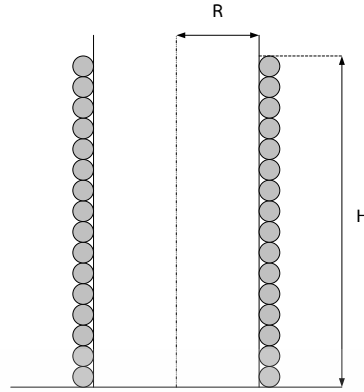
$$N = \frac{78}{0.023}$$

$$N = 3,391.30$$

- 2) ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ
 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$L_2 = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \quad (5)$$

- เมื่อ L_2 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ (μH)
 N คือ จำนวนรอบของการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ
 H คือ ความสูงของระยะการพันขดลวดด้านทุติยภูมิ (นิ้ว)
 R คือ รัศมีของขดลวดด้านทุติยภูมิ (นิ้ว)



รูปที่ ก1.5 พารามิเตอร์ความเหนียวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (5) จะได้ค่าความเหนียวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ

$$L_2 = \frac{(NR)^2}{9R + 10H}$$

$$L_2 = \frac{(3,391.30 \times 5)^2}{(9 \times 5) + (10 \times 78)}$$

$$L_2 = 348,512 \mu\text{H}$$

3) แรงดันขาออก (V_{Peak}) ของขดลวดด้านทุติยภูมิ

แรงดันขาออกของขดลวดด้านทุติยภูมิสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบคือค่าความเหนียวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิ สามารถคำนวณได้จาก

$$L_1 C_1 = L_2 C_2$$

$$L_1 \times (108 \times 10^{-9}) = (348.512 \times 10^{-3}) \times (56.760 \times 10^{-12})$$

$$L_1 = 183.162 \mu\text{H}$$

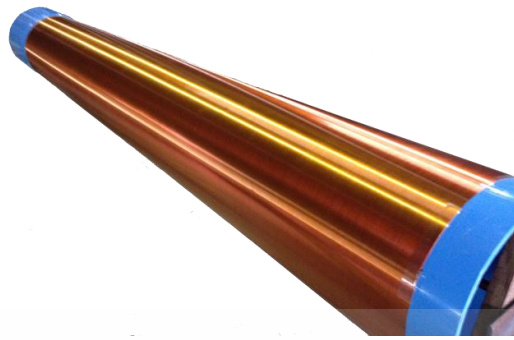
เมื่อแรงดันขาออกของหม้อแปลงแรงดันสูงเท่ากับ $12 \text{ kV}_{\text{rms}}$ ($16.97 \text{ kV}_{\text{Peak}}$) แทนค่าลงในสมการที่ (1) จะได้แรงดันขาออกของขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ

$$V_s = V_p \sqrt{\frac{L_s}{L_p}}$$

$$V_s = 16.97 \sqrt{\frac{348.512 \times 10^{-3}}{183.162 \times 10^{-6}}}$$

$$V_s = 740.24 \text{ kV}_{\text{Peak}}$$

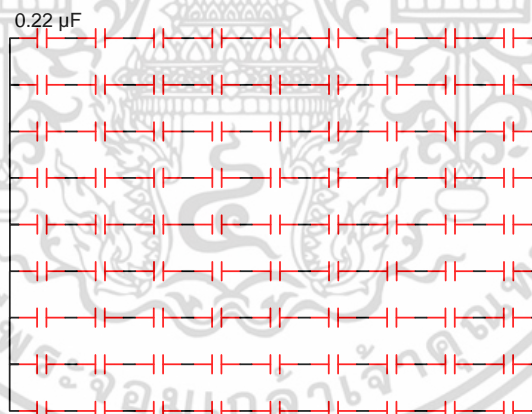
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก1.6 ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม

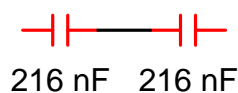
ก1.4 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (C_1)

จากพิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของหม้อแปลงแรงดันสูง คือ 15 kV_{AC} ในการออกแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงคือความคงทนต่อแรงดันของตัวเก็บประจุที่สามารถคงทนต่อแรงดันของหม้อแปลงได้ จึงทำการออกแบบค่าความคงทนแรงดันของตัวเก็บประจุต่อชุดคือ 5.85 kV_{AC} ออกแบบไว้เป็นจำนวนทั้งสิ้น 2 ชุด จะได้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านปฐมภูมิที่สามารถคงทนแรงดันไฟฟ้าได้ 11.7 kV_{AC} ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวเก็บประจุยี่ห้อ WIMA ชนิด Polypropylene มีค่าความจุ $0.22 \mu\text{F}$ พิกัดแรงดันกระแสสลับ 650 V โดยออกแบบให้ต่อตัวเก็บประจุอนุกรมกัน 9 ตัว และนำมาขนานกัน 9 ชุด ได้ค่าเก็บประจุรวมเท่ากับ 216 nF



รูปที่ ก1.7 แสดงการต่อตัวเก็บประจุขนานกัน 9 ชุด และอนุกรมชุดละ 9 ตัว

เนื่องจากในการใช้งานชุดหม้อแปลงแรงดันสูงที่เลือกใช้เป็นแบบ 2 ขั้ว กล่าวคือ พิกัดใช้งานสูงสุด 15 kV_{AC} โดยแบ่งเป็น $+7.5 \text{ kV}_{AC}$ และ -7.5 kV_{AC} ในการออกแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ จึงต้องออกแบบให้มีลักษณะการใช้งานแบบ 2 ด้านโดยได้ค่าเก็บประจุไฟฟ้า (C_1) รวมเท่ากับ 108 nF



รูปที่ ก1.8 แสดงการต่อตัวเก็บประจุตามที่ได้ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก1.9 ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเทสลาแบบดั้งเดิม

ก1.5 การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านปฐมภูมิ (L_1)

การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเทสลาแบบดั้งเดิมนั้น เนื่องจากความถี่ที่ทำให้เกิดการออสซิลเลทระหว่างขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิจะต้องมีค่าเท่ากัน เพราะฉะนั้นสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิได้จาก

$$L_1 C_1 = L_2 C_2$$

$$L_1 \times (108 \times 10^{-9}) = (348.512 \times 10^{-3}) \times (56.760 \times 10^{-12})$$

$$L_1 = 183.162 \mu\text{H}$$

ในส่วนของการพันขดลวดด้านปฐมภูมิ การพันขดลวดแบบ Flat Pancake Coil หรือพันแบบแนวราบ มีข้อดีคือ มีความปลอดภัยจากการเบรกดาวนที่ขดลวดด้านทุติยภูมิกับขดลวดด้านปฐมภูมิ เนื่องจากมีระยะการเบรกดาวนจากขดลวดด้านทุติยภูมิกับขดลวดด้านปฐมภูมิที่ค่อนข้างมาก ส่วนการพันแบบ Helical Coil หรือพันแบบทรงกระบอก จะมีข้อดีคือ การพันแบบทรงกระบอกจะมีการเหนี่ยวนำของขดลวดดีกว่าการพันแบบแนวราบ งานวิจัยในส่วนนี้เลือกใช้การพันแบบ Inverse Conical Coil หรือพันแบบก้นหอย ข้อดีของการพันแบบก้นหอย คือ การเอาข้อดีของการพันแบบแนวราบและการพันแบบทรงกระบอกมารวมกัน ซึ่งการพันขดลวดด้านปฐมภูมิแบบ Inverse Conical Coil [12] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

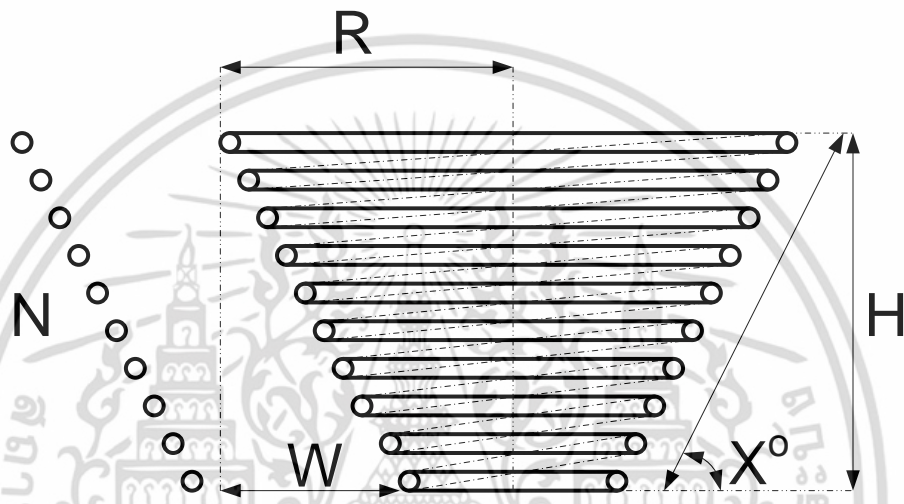
$$L_1 = \sqrt{(A \sin(x))^2 + (B \cos(x))^2} \quad (6)$$

$$A = \frac{(NR)^2}{9R + 10H}$$

$$B = \frac{(NR)^2}{8R + 11W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ L_1 = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดต้านปฐมภูมิ (μH)
 A = Helix Factor (μH)
 B = Spiral Factor (μH)
 N = จำนวนรอบ
 R = รัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางของขดลวด (นิ้ว)
 W = ความกว้างของขดลวด (นิ้ว)
 H = ความสูงของขดลวด (นิ้ว)
 X = มุมระหว่างขดลวดกับระนาบ



รูปที่ ก1.10 พารามิเตอร์ในการพันขดลวดต้านปฐมภูมิแบบ Inverse Conical Coil Inductance

งานวิจัยนี้เลือกใช้ท่อทองแดงขนาด 0.375 นิ้ว ที่มีความหนา 0.70 มิลลิเมตร ในการพันขดลวดต้านปฐมภูมิ มุมระหว่างขดลวดกับระนาบพื้น (X) เท่ากับ 30° ขดลวดทองแดงแต่ละชั้นห่างกัน 0.5 นิ้ว จำนวนการพันขดลวดต้านปฐมภูมิ (N) เท่ากับ 19 รอบ รัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางของขดลวด (R) เท่ากับ 16 นิ้ว ความกว้างของขดลวด (W) เท่ากับ 15 นิ้วและความสูงของขดลวด (H) เท่ากับ 12 นิ้ว จากการคำนวณจะได้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดต้านปฐมภูมิสูงสุดเท่ากับ

$$A = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \quad B = \frac{(NR)^2}{8R + 11W}$$

$$A = \frac{(19 \times 16)^2}{(9 \times 16) + (10 \times 12)} \quad B = \frac{(19 \times 16)^2}{(8 \times 16) + (11 \times 15)}$$

$$A = 350.06 \mu\text{H} \quad B = 315.41 \mu\text{H}$$

$$L_1 = \sqrt{(A \sin(x))^2 + (B \cos(x))^2}$$

$$L_1 = \sqrt{(350.06 \sin(30))^2 + (315.41 \cos(30))^2}$$

$$L_1 = 349.275 \mu\text{H}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก1.11 ขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเทสลาแบบดั้งเดิม

ก1.6 การออกแบบและประกอบสร้างอุปกรณ์จำกัดกระแสเกิน (Line Reactor)

เพื่อเป็นการจำกัดกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า ขณะที่แกปเกิดการสปาร์กและในขณะที่แกปไม่เกิดการสปาร์ก จะจำกัดกระแสให้ไหลผ่านเพียง 50 % โดยกำหนดให้

$$X_L = 0.5X_C \quad (7)$$

เมื่อ X_L คือ Inductive Reactance (Ω)
 X_C คือ Capacitive Reactance (Ω)

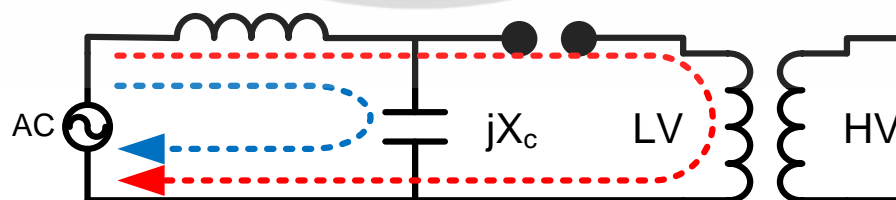
กรณีที่ 1. เมื่อแกปไม่เกิดการสปาร์ก

$$\begin{aligned} V_S &= jX_L - jX_C \\ V_S &= j0.5X_C - jX_C \\ V_S &= -j0.5X_C \end{aligned}$$

กรณีที่ 2. เมื่อแกปเกิดการสปาร์ก

$$\begin{aligned} V_S &= jX_L \\ V_S &= j0.5X_C \end{aligned}$$

Line
Reactor



รูปที่ ก1.12 วงจรเมื่อมีการใส่ Line Reactor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสม สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C' = C \times a^2$$

$$C' = (108 \times 10^{-9}) \times \left(\frac{15000}{220}\right)^2$$

$$C' = 0.5 \text{ mH}$$

$$X'_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$X'_C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 0.5 \times 10^{-3}}$$

$$X'_C = 6.37 \text{ } \Omega$$

จาก

$$X_L = 0.5 X_C$$

$$X_L = 0.5 \times 6.37$$

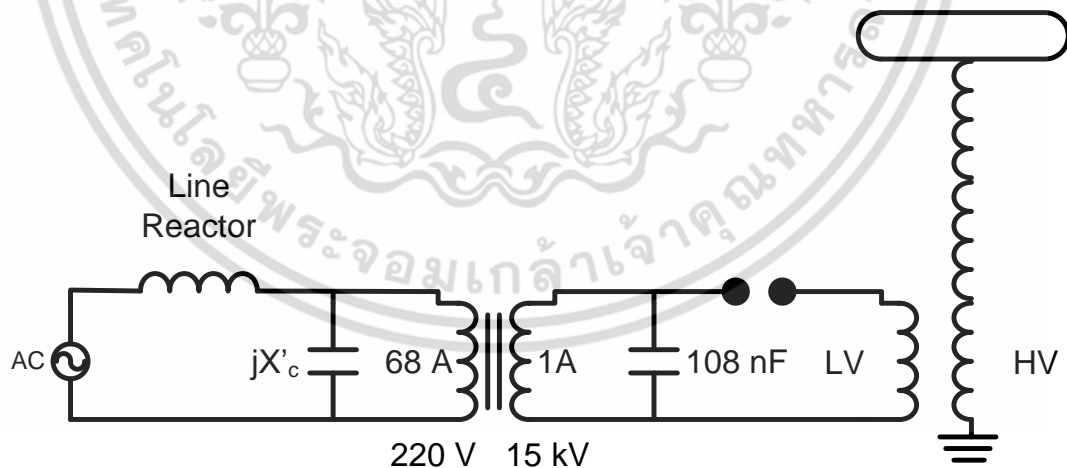
$$X_L = 3.185 \text{ } \Omega$$

จะได้

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

$$L = \frac{3.185}{2\pi \times 50}$$

$$L = 10 \text{ mH}$$



รูปที่ ก1.13 วงจรสมมูลเมื่อมีการใส่ Line Reactor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก1.14 อุปกรณ์จำกัดกระแสเกิน (Line Reactor)

ก1.7 การเลือกพิกัดหม้อแปลงแรงดันสูง

การเลือกแหล่งจ่ายหม้อแปลงแรงดันสูงมีความสำคัญ เนื่องจากจะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ (C_1) ในโครงงานนี้เลือกใช้หม้อแปลงส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Distribution Transformer) โดยมีพิกัดดังนี้

- | | | |
|-----------------------|---------------------|---------|
| 1) พิกัดกำลังไฟฟ้า | 15 kVA | 50 Hz |
| 2) พิกัดด้านปฐมภูมิ | 220 V _{AC} | 68.18 A |
| 3) พิกัดด้านทุติยภูมิ | 15 kV _{AC} | 1 A |



รูปที่ ก1.15 หม้อแปลงส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Distribution Transformer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก1.8 การออกแบบและประกอบสร้างสปาร์กแกป (Spark Gap) [2]

สปาร์กแกปสำหรับที่ใช้ในวงจรหม้อแปลงเตสลาโดยทั่วไปแล้ว แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ สปาร์กแกปแบบไม่เคลื่อนที่ (Static Gap) และสปาร์กแกปแบบเคลื่อนที่ (Rotary Gap, Quenching Gap) โดยการออกแบบและประกอบสร้างสปาร์กแกปในงานวิจัยนี้ เลือกใช้สปาร์กแกปแบบเคลื่อนที่ ชุดสปาร์กแกปดับอาร์กของหม้อแปลงเตสลาทำหน้าที่หลัก 2 ประการ คือ ประการแรกกำหนดแรงดันอัดประจุทางด้านปฐมภูมิ (C_1) โดยการปรับระยะแกปให้ห่างมากขึ้นก็จะทำให้ได้แรงดันอัดประจุที่สูงขึ้น ประการที่สองทำหน้าที่ตัดอาร์กเมื่อเกิดการสปาร์กที่สปาร์กแกป เมื่อแรงดันอัดประจุของตัวเก็บประจุทางด้านปฐมภูมิสูงพอและดิสชาร์จผ่านสปาร์กแกป จะส่งพลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุทางด้านปฐมภูมิในรูปสนามไฟฟ้า ไปสู่ขดลวดด้านปฐมภูมิ (L_1) ในรูปของสนามแม่เหล็กเพื่อทำให้เกิดการออสซิลเลชัน เหตุที่ต้องการตัดอาร์กเพื่อทำให้เกิดการอัดประจุจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับแหล่งจ่ายตัวเก็บประจุทางด้านปฐมภูมิใหม่ แล้วเกิดดิสชาร์จในช่วงใหม่ต่อไป เพราะฉะนั้นในการออกแบบสปาร์กแกปนั้นลำอาร์กจะดับได้เมื่อยึดออกจนมีระยะเป็น 20 เท่าของระยะแกป การออกแบบจะหาระยะ 2 เท่าของระยะแกปได้เมื่อ C_1 ทนแรงดันได้ 11.7 kV_{AC} และเมื่อค่าความคงทนต่อการเบรกดาวนของอากาศมีค่าเท่ากับ 30 kV/cm จะได้

$$2g = \frac{11.7 \text{ kV}}{30 \text{ kV/cm}} \quad (8)$$

เมื่อ g คือ ระยะแกป (cm)

จากการคำนวณจะได้ระยะแกปเท่ากับ 0.39 เซนติเมตร จากนั้นทำการคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุนอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อความเร็วตามเส้นรอบวงของจานหมุนอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ $[(\pi dn) / (60 \text{ cm/s})]$ ถ้าช่วงเวลาในการดับอาร์กเป็น $1/4$ ของรูปสัญญาณอินพุต 50 Hz ($T/4$) จะได้ระยะเท่ากับ $[(\pi dn/60) \times (T/4)]$ และจากข้อกำหนดลำอาร์กจะดับได้เมื่อยึดออกจนมีระยะเป็น 20 เท่าของระยะแกป สามารถหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กทรอนิกส์ได้จากสมการที่ (9) ดังนี้

$$[(\pi dn / 60) \times (T / 4)] \geq 20g \quad (9)$$

เมื่อ d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุนอิเล็กทรอนิกส์ (cm)

n คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำอินดักชัน 1 เฟส (rpm)

$T/4$ คือ ช่วงเวลาในการดับอาร์ก (s)

g คือ ระยะแกป (cm)

งานวิจัยนี้เลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำอินดักชัน 1 เฟส ที่มีความเร็วรอบเท่ากับ 1450 rpm สำหรับใช้เป็นตัวหมุนจานหมุนอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (9) จะได้จานหมุนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ

$$[(\pi dn / 60) \times (T / 4)] \geq 20g$$

$$\left[\left(\frac{\pi \times d \times 1450}{60} \right) \times \left(\frac{20 \times 10^{-3}}{4} \right) \right] \geq (20 \times 0.39)$$

$$d \geq 20.55 \text{ cm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้เลือกใช้จานหมุนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20 เซนติเมตร จากนั้นทำการคำนวณหาจำนวนตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้บนจานหมุนอิเล็กทรอนิกส์ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (10)

$$P = \frac{120f}{n} \quad (10)$$

เมื่อ P คือ จำนวนตัวนำอิเล็กทรอนิกส์
 n คือ ความเร็วของมอเตอร์ (rpm)
 f คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Hz)

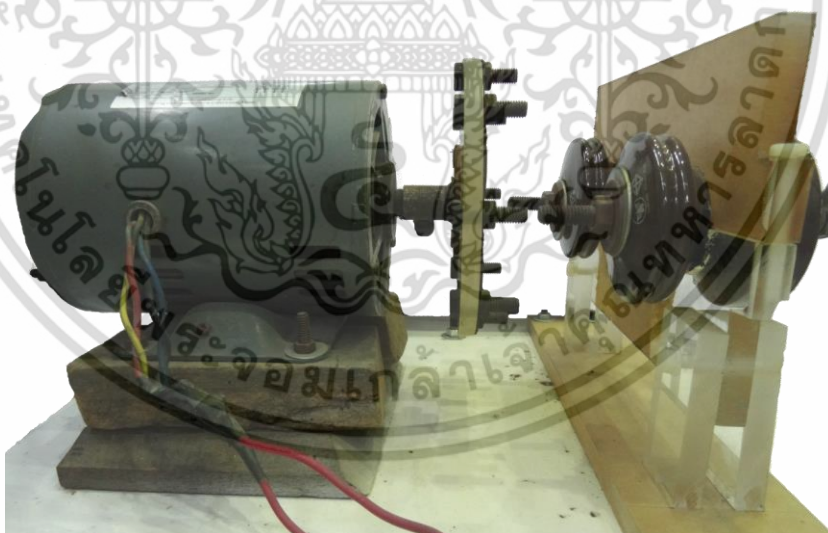
เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (10) จะได้

$$P = \frac{120f}{n}$$

$$P = \frac{120 \times 50}{1450}$$

$$P = 4$$

จากการคำนวณมอเตอร์นี้จะต้องใช้อิเล็กทรอนิกส์ 4 ตัวนำ ในการอัดประจุแต่ละรอบ โดยในแต่ละตำแหน่งของการอัดประจุต้องใช้อิเล็กทรอนิกส์ 2 ตัวนำ ในการส่งผ่านพลังงาน เพราะฉะนั้นจึงต้องใช้อิเล็กทรอนิกส์ทั้งสิ้น 8 ตัวนำ



รูปที่ ก1.16 สปาร์กแกป (Quenching Gap)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก2. การทดลองและสรุปผลการทดลองหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม

ก2.1 กล่าวนำ

เนื่องจากการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิมนั้น จะคำนึงถึงระยะการเบรกดาวนีย์ในอากาศเป็นหลัก จึงได้มีการทดสอบและตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิมที่ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างขึ้น โดยจะทำการตรวจสอบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิ ค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ การทดสอบเพื่อหาระยะการเบรกดาวนีย์สูงสุดของหม้อแปลงเตสลาที่ได้ทำการประกอบสร้างขึ้น และรูปคลื่นความถี่ของหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม

ก2.2 การทดสอบหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม

ก2.2.1 การตรวจสอบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ

การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดด้านทุติยภูมิ จากการคำนวณจะได้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 348.512 mH เมื่อทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิโดยใช้ LC meter พบว่าค่าที่วัดได้เท่ากับ 356.8 mH เห็นได้ว่าค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้



รูปที่ ก2.1 ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก2.2.2 การตรวจสอบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิ

ตารางที่ ก2.1 ผลการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิที่ได้จากการวัด

จำนวนรอบขดลวด ด้านปฐมภูมิ	ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)	จำนวนรอบขดลวด ด้านปฐมภูมิ	ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)
1	0.0014	11	0.0958
2	0.0043	12	0.1135
3	0.0088	13	0.1326
4	0.0146	14	0.1531
5	0.0217	15	0.1748
6	0.0304	16	0.1970
7	0.0405	17	0.2226
8	0.0521	18	0.2469
9	0.0652	19	0.2725
10	0.0797		



รูปที่ ก2.2 ตัวอย่างการวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิรอบที่ 16
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก2.2.3 การตรวจสอบค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ

การออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ จากการคำนวณจะได้ค่าความจุของตัวเก็บประจุเท่ากับ 108 nF เมื่อทำการวัดจริงโดยใช้ LC meter พบว่าค่าที่วัดได้เท่ากับ 109.3 nF เห็นได้ว่าค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้



รูปที่ ก2.3 การวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ

ก2.2.4 การทดสอบหาระยะการเบรกดาวนในอากาศของหม้อแปลงเทสลาแบบดั้งเดิม

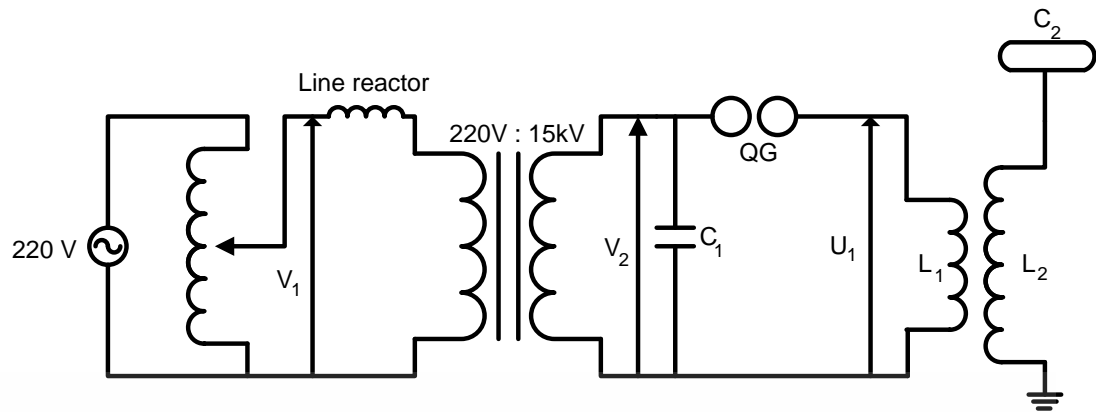
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- | | |
|---|-----------|
| 1. หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-250 V _{ac} 50 Hz 64 A | 1 เครื่อง |
| 2. อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน (Choke) ขนาด 0-20 mH | 1 เครื่อง |
| 3. หม้อแปลงเทสลา | 1 ชุด |
| 4. Rogowski Coil | 1 ชุด |
| 5. Oscilloscope | 1 เครื่อง |
| 6. Volt meter | 1 เครื่อง |
| 7. Clamp on Power meter | 1 เครื่อง |

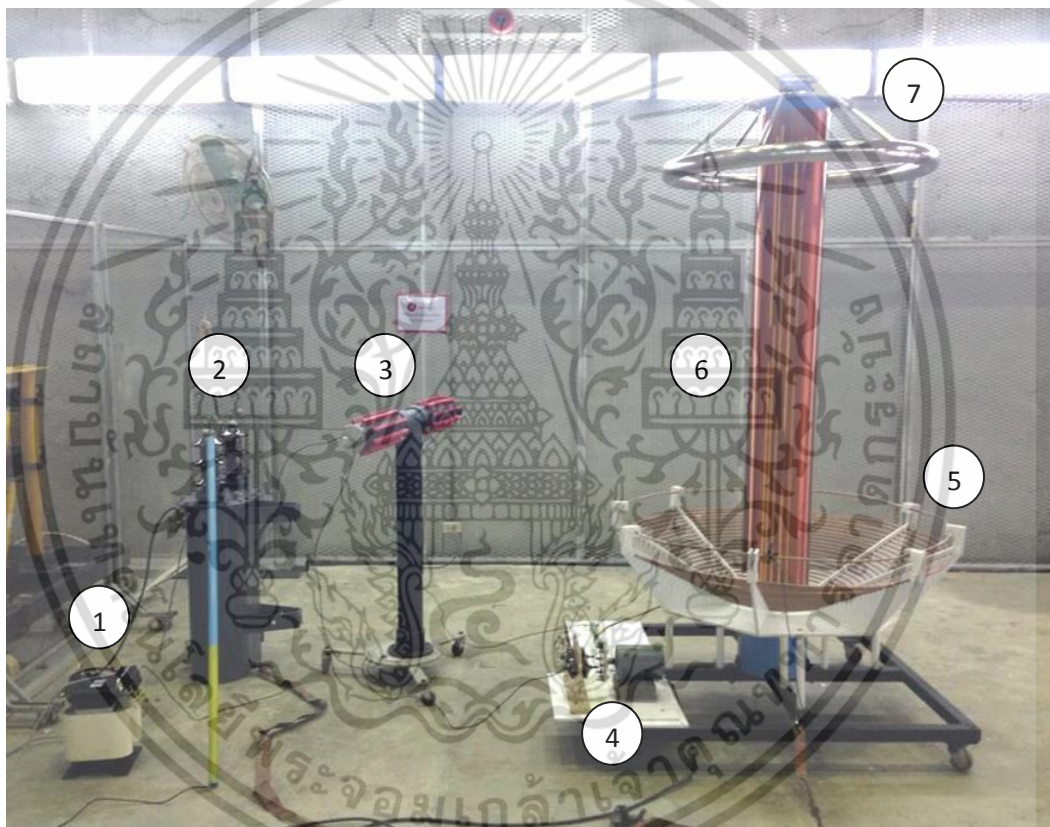
ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อยंत्रการทดสอบดังรูปที่ 4.4
2. เริ่มต้นปรับระยะห่างระหว่างตัวนำของ Quenching Gap 3 มิลลิเมตร และทำการปรับจำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ โดยเริ่มต้นรอบที่ 13 ซึ่งมีค่าความเหนี่ยวนำ 0.14 mH แล้วทำการปรับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้น จนเกิดการสปาร์ค ที่ Quenching Gap และทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป และระยะการเบรกดาวน ซึ่งมีการทดสอบที่ระยะ 150 ถึง 200 เซนติเมตร
3. ทำการทดสอบอีกครั้งตั้งแต่ข้อที่ 2 โดยปรับจำนวนรอบเพิ่มขึ้นทีละ 1 รอบ จนถึงจำนวนรอบสูงสุดของหม้อแปลงแรงดันความถี่สูง และบันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก2.4 วงจรที่ใช้ทดสอบหม้อแปลงเทสลา



รูปที่ ก2.5 วงจรที่ใช้ทดสอบหม้อแปลงเทสลา

- เมื่อ
1. คือ อุปกรณ์จำกัดกระแสเกิน (Line Reactor, Choke)
 2. คือ หม้อแปลงแรงดันสูง
 3. คือ ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ
 4. คือ สปาร์กแกป (Quenching Gap)
 5. คือ ขดลวดด้านปฐมภูมิ
 6. คือ ขดลวดด้านทุติยภูมิ
 7. คือ อิเล็กโตรดแบบวงแหวน

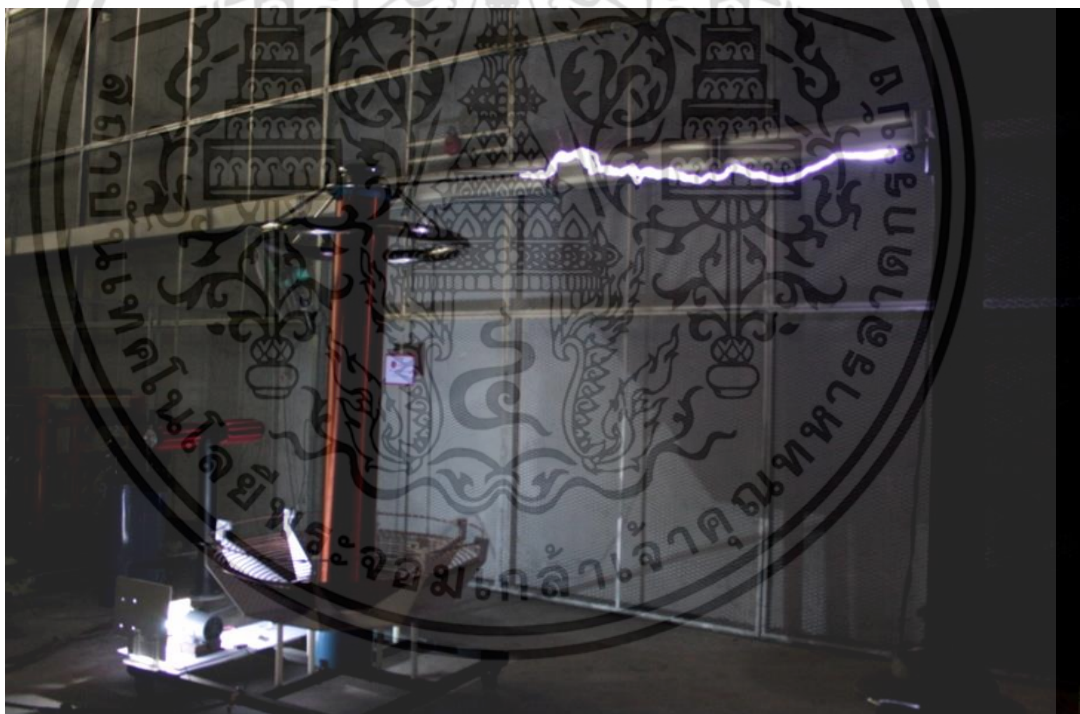
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก2.2 ระยะการเบรกดาวนในอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดต้านปฐมภูมิ

จำนวนรอบของ ขดลวดต้านปฐมภูมิ	ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)	ระยะเบรกดาวนในอากาศ (cm)					
		150	160	170	180	190	200
13	0.1326	X	X	X	X	X	X
14	0.1531	O	X	X	X	X	X
15	0.1748	O	O	O	X	X	X
16	0.1970	O	O	O	O	O	O
17	0.2226	O	O	O	O	O	O
18	0.2469	X	X	X	X	X	X
19	0.2725	X	X	X	X	X	X

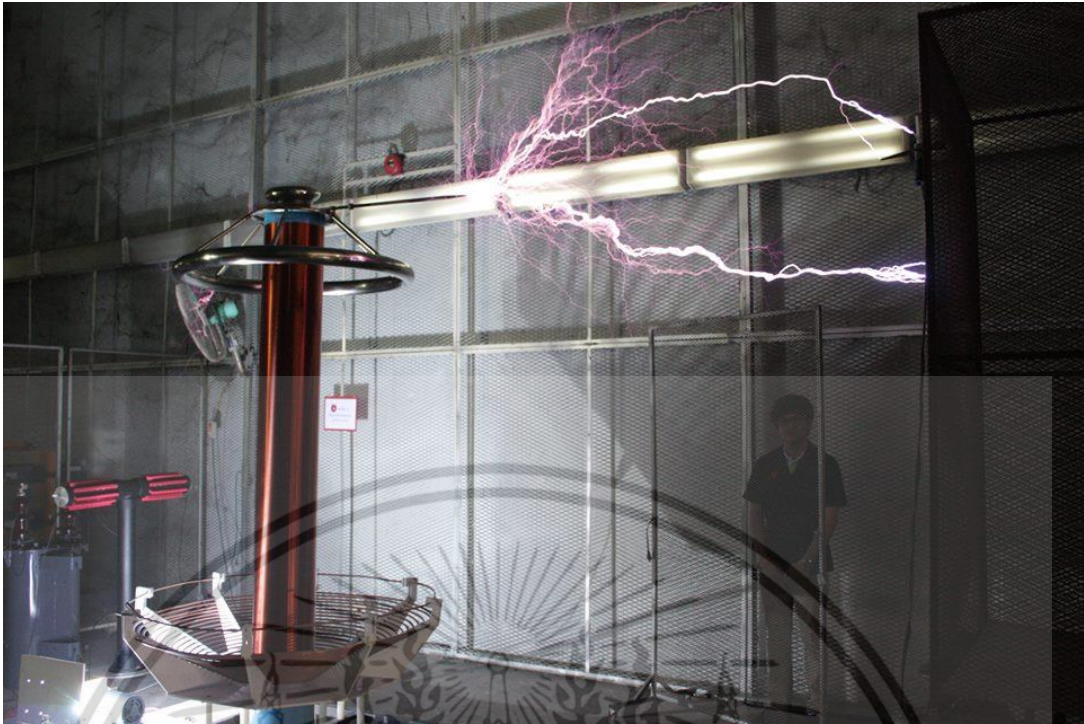
*หมายเหตุ: X คือ ไม่สามารถเบรกดาวนในอากาศได้, O คือ สามารถเบรกดาวนในอากาศได้

หม้อแปลงเตสลาที่ทำการทดสอบนั้น วงจรจะต้องอยู่ในสภาวะการจูนที่เหมาะสมที่สุด จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่ามากที่สุด ซึ่งทำให้สามารถทดสอบระยะการเบรกดาวนในอากาศได้ตามเป้าหมายที่ตั้งไว้หรือไกลที่สุด



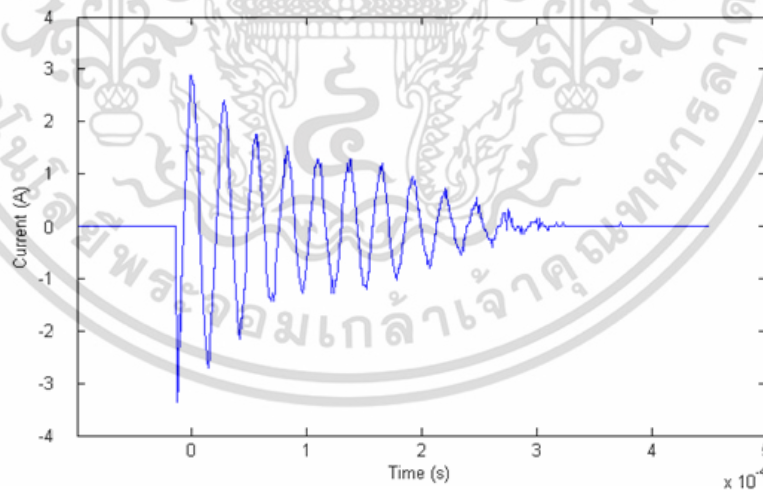
รูปที่ ก2.6 การทดสอบเพื่อหาระยะการเบรกดาวนในอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก2.7 การเกิดลอาร์กในระหว่างการทดสอบ

จากการทดสอบหม้อแปลงเทสลาแบบดั้งเดิม พบว่าความถี่ที่วัดได้จาก Rogowski coil มีค่าเท่ากับ 35.70 kHz ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นมีค่าเท่ากับ 35.36 kHz จะพบว่าค่าที่วัดได้และค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นแตกต่างกันเล็กน้อย



รูปที่ ก2.8 กราฟกระแสและความถี่ที่วัดได้ทางด้านขาออกของหม้อแปลงเทสลาที่ออกแบบสร้าง

ก2.2.5 สรุปผลการทดลอง

เนื่องจากปัจจุบันห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีหม้อแปลงเทสลาสำหรับการทดสอบวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน ซึ่งเมื่อนำมาใช้ในการศึกษาเรื่องการเบรกดาวนในอากาศ จะได้ระยะเบรกดาวนในอากาศไม่ยาวมากนัก (น้อยกว่า 30 cm) ทำให้ไม่เห็นภาพที่ชัดเจน และหม้อแปลงเทสลาที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิมขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการวิจัยและศึกษาปรากฏการณ์การเกิดเบรกดาวนในอากาศ รวมไปถึงใช้เป็นสื่อในการประชาสัมพันธ์ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิม โดยมีเงื่อนไขในการออกแบบคือจะคำนึงถึงระยะการเบรกดาวนในอากาศเป็นหลัก ซึ่งหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิมที่ได้จากการออกแบบสร้างนี้ มีค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิรวมเท่ากับ 56.76 pF (ซึ่งเกิดจากผลรวมของค่าความจุของวงแหวนทอรอยด์และค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดด้านทุติยภูมิ) และค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิเท่ากับ 356.8 mH ค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิเท่ากับ 109.3 nF ในส่วนของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมินั้น จะเกิดจากการปรับระดับจำนวนรอบจนอยู่ในสถานะที่เหมาะสม ซึ่งสามารถสังเกตได้จากลำอาร์กที่เกิดจากการเบรกดาวนในอากาศจะมีระยะที่ยาวที่สุด

จากการทดสอบพบว่า วงจรหม้อแปลงเตสลาแบบดั้งเดิมที่ได้ออกแบบสร้างนั้น จะมีสถานะการจูนที่เหมาะสมเมื่อทำการปรับระดับจำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิในรอบที่ 16 และ 17 ซึ่งมีค่าความเหนี่ยวนำระหว่าง 0.1970 mH - 0.2226 mH โดยหม้อแปลงเตสลาที่ได้ทำการออกแบบสร้างสามารถสร้างลำอาร์กที่เกิดจากการเบรกดาวนในอากาศได้ระยะมากกว่า 2 m และได้ความถี่ขาออกสูงสุด 35.70 kHz ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดเบรกดาวนในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Watchara Pongsathit, Surasak Noimor, Norasage Pattanadech and Peerawut Yutthagowith.
“A Tesla Transformer for Producing 2 – m Length Air Breakdown,” 2nd AUN/SEED-Net
Regional Conference on Energy Engineering 2014, Bangkok, Thailand, 13.-14.11.2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Tesla Transformer for Producing 2 – m Length Air Breakdown

Watchara Pongsathit, Surasak Noimor, Norasage Pattanadech, and Peerawut Yutthagowith
Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand.
kypeeraw@kmitl.ac.th, black.hole1990@hotmail.com

Abstract — This paper presents the design and construction of Tesla transformer to be used for investigating air breakdown characteristics. The Tesla transformer comprises of the primary inductance of 0.19 mH, primary capacitance of 108 nF, the secondary inductance of 371.79 mH, and the secondary capacitor with toroid form 101.60 cm diameter. The toroid was constructed by an aluminum tube with diameter of 6.35 cm. The developed tesla transformer can generate an oscillating test voltage with approximate frequency of 35 kHz and maximum breakdown length in air more than 2 m. Tesla transformer can be used as a model for demonstrating and studying of corona discharge and air breakdown. Furthermore, the developed Tesla transformer has been used as an instruction media for high voltage engineering study. It also increases the testing performance of KMITL's high voltage laboratory.

Index Terms — Air breakdown, high frequency, high voltage, Tesla transformer.

I. INTRODUCTION

Due to the limitation of maximum testing voltage of the former Tesla transformer installed at high voltage laboratory of King Mongkut's institute of technology Ladkrabang, the studying of corona discharge and air breakdown was not meet the research requirement which is called for brightly gas discharge and long air gap breakdown with more than 1 m discharge length. Besides Tesla transformer imported from overseas is expensive therefore a new tesla transformer was designed and constructed. This research represents the details of design and constructions of the tesla transformer by consideration of the distances air breakdown as the mainly objective and also used for research work including for promotion of the high voltage laboratory of King Mongkut's institute of technology Ladkrabang for higher testing voltage rating for any application.

II. THEORETICAL

Tesla transformer can be constructed by the equivalent circuit shown in Fig. 1 which consists of a primary capacitance (C_1), a primary inductance (L_1), a secondary capacitance (C_2),

a secondary inductance (L_2), quenching gap (QG) and line reactor (Choke).

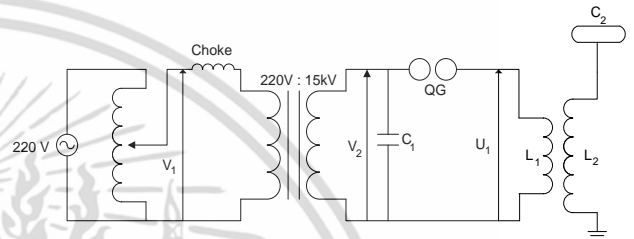


Fig. 1. Equivalent circuit of Tesla transformer.

A high voltage transformer was employed to charge a primary capacitor for temporarily store energy. This capacitor is connected to a unique high voltage switch known as a spark gap. When the capacitor is charged to a sufficient voltage which causes the ionization of the air between the electrodes of the spark gap, the spark gap will conduct. The conduction is seen from the circuit as a closed switch. Next to the spark gap, a primary coil was constructed. When the spark gap conducts, the energy within the capacitor is released causing the LC circuit performs damping voltage with a high frequency oscillation (travel back and forth through the primary coil) at a specific rate determined by the LC circuit resonant frequency [1]. The formula to determine a resonant frequency is:

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

where: f = Resonant frequency (Hz),
 L = Inductance (H), and
 C = Capacitance (F).

During the occurring of damping primary oscillation voltage, the primary energy from the primary side via air coupling mechanism transfers to the secondary. The voltage of the primary and the secondary LC circuit must oscillate at the same frequency to achieve maximum power transfer [1]. This condition can be mathematically expressed as:

$$f_1 = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where $L_1 C_1 = L_2 C_2$ (3)

where: f_1 = Primary resonant frequency (Hz),
 f_2 = Secondary resonant frequency (Hz),
 L_1 = Primary inductance (H),
 L_2 = Secondary inductance (H),
 C_1 = Primary capacitance (F), and
 C_2 = Secondary capacitance (F).

III. DESIGN AND CONSTRUCTIONS

A. Design of the secondary capacitances

The secondary capacitance consists the self-capacitance of the secondary winding to ground (C_s) and the capacitance of the toroid (C_t) which can be calculated as follows:

1) Toroid

The toroid used as the high voltage capacitor [1] can be calculated from eq. (4),

$$C_t = 1.4 \left(1.2781 - \frac{d_1}{d_2} \right) \sqrt{\pi d_1 (d_2 - d_1)} \quad (4)$$

where: C_t = Toroid capacitance (F),
 d_1 = Diameter of the pipe (inches), and
 d_2 = Diameter of toroid (inches).

The toroid has already created with the outer diameter of toroid (d_2) of 101.60 cm which was made from aluminum pipe diameter (d_1) of 6.35 cm. It has the capacitance equal to 29.20pF.

2) Self-Capacitance

$$C_s = 0.29H + 0.41R + 1.94R \sqrt{\frac{R}{H}} \quad (5)$$

where: C_s = Self-capacitance (F),
 R = Radius of secondary coil (inches), and
 H = Height (length) of winding (inches).

The height of the secondary coil windings (H) is set to 190.5 cm and the radius of secondary coil (R) is 12.7 cm. It has the capacitance of 26.30 pF and the total secondary capacitance of 55.5 pF

B. Design of secondary coil

1) Inductance of secondary coil

In this research, 25.4 cm diameter of a PVC tube is used as a core of the secondary coil. The height of secondary coil is determined for 190.5 cm. In order to calculate the wire sizes which are to be selected from appropriate size of the winding shown in Table I, the secondary capacitance will be considered.

TABLE I. The optimize induction and resonance frequency for the capacitance of the secondary coil

PVC pipe (Diameter 10 inches and high 75 inches)	Wire gauge (SWG)	Ø of wire (mm)	L_2 (mH)	Secondary capacitance		
				30 kHz	35 kHz	40 kHz
20	0.92	147.05	191.40	140.62	107.66	
22	0.71	233.74	120.41	88.46	67.73	
24	0.56	371.79	75.70	55.61	42.58	
26	0.46	591.17	47.60	34.97	26.78	

Due to the capacitance of secondary circuit is 55.5 pF which causes the resonant frequency at 35 kHz, the inductance of secondary coil will be 371.79 mH which can be calculated from eq. (6),

$$L_2 = \frac{1}{2\pi^2 f_2^2 C_2} \quad (6)$$

Therefore, the inductance of secondary coil is 371.79 mH

2) The number of turn in the secondary coil

The required number of turns of the secondary coil [1] can be determined from eq. (7),

$$L_2 = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \quad (7)$$

where: L_2 = Secondary inductance (H),
 N = Number of turns required ,
 R = Radius of secondary coil (inches), and
 H = Height (length) of winding (inches).

The number of turn of the secondary coil from the calculation is 3,438.

C. Design of primary capacitances

Due to the working condition, A 2 poles transformer which has the rated voltage of +7.5 kV and -7.5 kV is chosed for supplying the total voltage of 15 kV to the primary capacitor. Following the specification of transformer, the designed withstand voltage of the capacitor of each pole is 5.85 kV, so the withstand voltage of primary capacitor is 11.7 kV. In each unit, 9 poly propylene capacitors which each capacitance of them is 0.22 µF, with rated ac voltage of 650 V are connected in series, then the 9 connected capacitors will be parallel, so the total capacitance is 216 nF. After that, two capacitor units will be connected in series, with total capacitance is 108 nF.

D. Design of primary coil

1) Inductance of primary coil

The inductance of the primary coil can be calculated from eq. (3). Because the primary capacitor is 108 nF, the secondary

capacitor is 55.5 pF and the secondary inductor is 371.79 mH, therefore the inductance of primary coil is equal to 0.19 mH

2) The primary coil windings

Inverse conical coil inductor is used in this research as the primary coil which can be calculated from the eq. (8),

$$L_1 = \sqrt{(A \sin(x))^2 + (B \cos(x))^2} \quad (8)$$

$$A = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \quad (9)$$

$$B = \frac{(NR)^2}{8R + 11W} \quad (10)$$

where: L_1 = Primary inductance (H),

A = Helix Factor,

B = Spiral Factor,

N = Number of turns,

R = Average radius of primary coil (inches),

H = Height (length) of winding (inches),

W = Width of primary (inches), and

X = Angle between the coil and plane (degree).

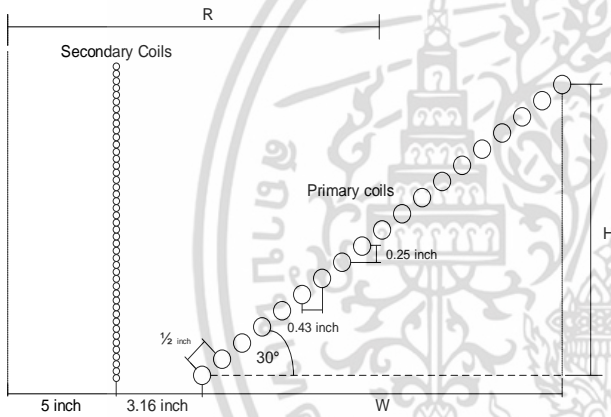


Fig. 2. Parameters In the primary coil.

The primary coil was made from the copper tube with the diameter size of 0.95 cm and a thickness of 0.71 mm. The angle between the coil and plane (X) is equal to 30°. The spacing of each the copper coil is 1.27 cm and 20 turn winding was constructed to be the primary coil. The radius of the primary coil measured from the center of the coil (R) is equal to 40.64 cm. The height of the primary coil (H) is 30.48 cm and the width of the winding (W) is 38.10 cm. The total of primary inductance is 0.3021 mH

E. Line Reactor (Choke Reactor)

To protect the transformer from the short circuit when spark gap operated. the current flowing through the transformer circuit is limited around 50% of the transformer rated by controlling the reactance of the line reactor according to eq. (11),

$$X_L = 0.5X_c \quad (11)$$

where: X_L = Inductive reactance (Ω), and
 X_c = Capacitive reactance (Ω).

Due to the primary capacitance equal to 108 nF. Thus, Inductance of line reactor is 10 mH

F. Power supply

The AC power supplies were used for the Tesla transformer because it can easily step the voltage up to the required high voltage. AC power transformer with the rated of 15 kVA 50 Hz, it can supply 220 V 63.18 A from low voltage side and 15 kV 1 A from high voltage side.

G. Design of quenching gap

1) Number of electrodes conductors in quenching gap

The single phase motor which of speed 1450 rpm is used as the rotating disc electrode. The number of electrode conductors can be determine from eq. (12),

$$P = \frac{120f}{n} \quad (12)$$

where: P = Number of electrodes conductors,

f = Frequency of supply (Hz), and

n = Motor speed (rpm).

This motor requires about 4 electrode conductors. Each position of the charging electrode requires two conductors to transmit power. Therefore, a total of 8 electrode conductors is required [3].

2) Spacing of conductors in quenching gap

Because breakdown voltage of air about 30 kV/cm [3], distance between each gap can be calculated from the eq. (13),

$$2g = \frac{11.7kV}{30 \text{ kV/cm}} \quad (13)$$

where: g = distance between each gap (cm)

By giving the withstand voltage of the primary capacitor 11.7 kV the distance between a gap is g = 0.39 cm

3) Determine the diameter of electrode in quenching gap

Arc will extinguish when the arc length extends more than 20 times of spacing gap [3] with the circumferential speed of the rotating electrode equal to $\pi dn/60$ (cm/s). Diameter of electrodes in quenching gap can be calculated by eq. (14),

$$\left[\left(\frac{\pi dn}{60} \right) \times \left(\frac{T}{4} \right) \right] \geq 20g \quad (14)$$

where: d = Diameter of electrodes (cm),

n = Motor Speed (rpm),

g = Distance between a gap (cm), and

T = Arc extinction time (s).

If arc extinction time is one fourth of 20 ms input signal period (50 Hz). Hence, the diameter of the electrode should be $d \geq 20$ cm. The electrode diameter 20 cm was selected construction of Tesla transformer is shown in Fig. 3.

IV. RESULTS

A. Experimental results of frequency

The measuring frequency of the tesla transformer measured by the rogowski coil is equal to 35.7 kHz which is harmonized to the calculation to value, 35 kHz, from eq. (1). So the error 2%. The resonant frequency of the current waveforms is shown in Fig. 4.

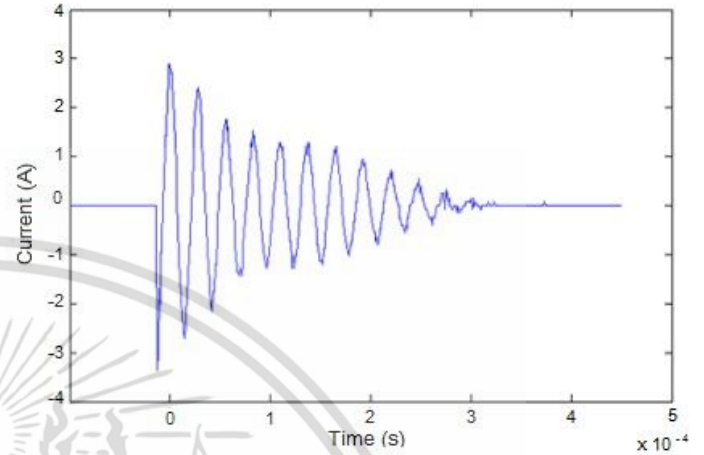


Fig. 5. The current of the secondary coil against time deviation.

B. Length of the air breakdown.

To confirm the performance of the developed Tesla transformer with the breakdown length over 2 m, the primary inductance was tuned to obtain the longest breakdown length corresponding to the highest voltage. The experimental result is shown in Table II and experiment demonstrating the 2-m breakdown length is shown in Fig. 6. From the Fig. 6 the breakdown direction also agrees with the electric field simulation as explained the previous section.

Table II. Tuned primary inductance and the number of turns versus breakdown length.

turns	Inductance of primary coil (mH)	Breakdown length (cm)					
		150	160	170	180	190	200
13	0.1204	x	x	x	x	x	x
14	0.1404	o	x	x	x	x	x
15	0.1623	o	o	o	x	x	x
16	0.1861	o	o	o	o	o	o
17	0.2119	o	o	o	o	o	o
18	0.2398	x	x	x	x	x	x
19	0.2699	x	x	x	x	x	x

O = Able to breakdown on the air
X = Unable to breakdown on the air

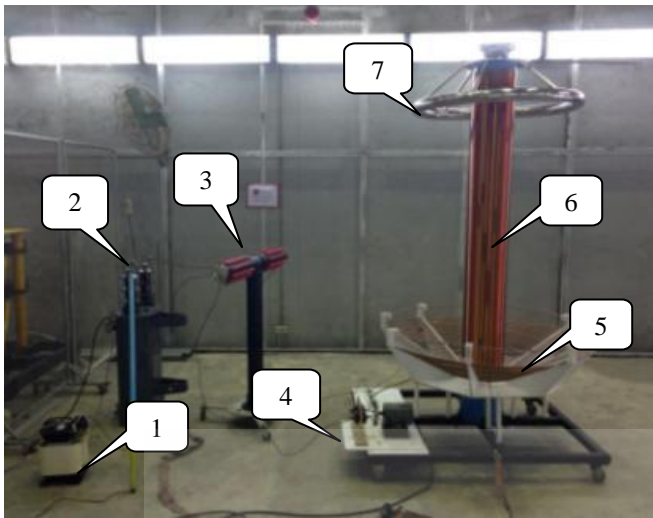


Fig. 3. Test circuit for Tesla transformer

where: 1 = Line Reactor,
2 = Power Transformer,
3 = Primary capacitor,
4 = Quenching gap,
5 = Primary coil,
6 = Secondary coil, and
7 = Toroid.

The simulated direction of electric field with COMSOL Multiphysics 3.5 is shown in Fig. 4.

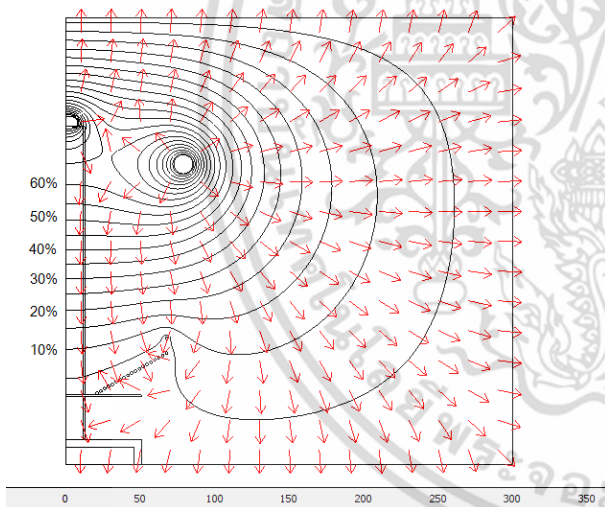


Fig. 4. The electric field of the designed Tesla transformer with COMSOL Multiphysics 3.5.

From the simulation result the direction of the electric field are more likely to spread out from the secondary coil body which it leads to the air breakdown in the direction perpendicular to the secondary body. It can be seen the breakdown direction in the experiment shown in the next section.

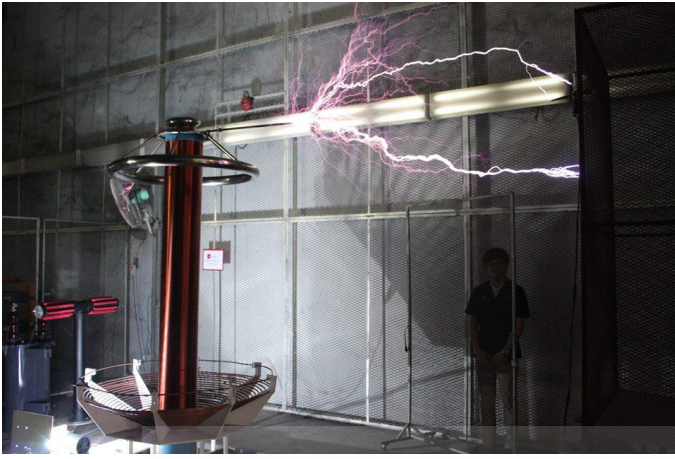


Fig. 6. Breakdown in air during experiment.

V. CONCLUSION

The designed Tesla transformer comprised of primary inductance of 0.19 mH, the primary capacitance of 108 nF, the secondary capacitance 55.5 pF, and the secondary inductance 371.79 mH. This transformer can generate the voltage and current with the resonant frequency of 35.7 kHz. The maximum arc length can be produce more than 2 meter which efficiently facilitates in demonstrate and used as a medium of instruction of air breakdown and corona

REFERENCES

- [1]. Mitch Tilbury, "The ultimate Tesla Coil Design and construction Guide," United State of America. McGraw-Hill, 2008.
- [2]. A. Haddad and D.F. Warne, "Advances in High Voltage Engineering," London, United Kingdom, The Institution of Electrical Engineers, 2004, pp 1-32.
- [3]. Putthirug Mathuros, Khwanchai Choenkhan and Somsuk Boontham, Tesla Transformer 400 kV 200 kHz, senior project report, Department of Electrical Engineering, King Mongkut's institute of technology Ladkrabang. 2002
- [4]. COMSOL Multiphysics 3.5, COMSOL, Inc. 1 New England Executive Park Burlington, MA 01803 USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายวิชา พงศ์สถิต
วัน เดือน ปีเกิด 14 กุมภาพันธ์ 2533 ที่อุบลราชธานี
ที่อยู่ 76/1 ถ. สติยนิมานการ ตำบล พิบูล
อำเภอ พิบูลมังสาหาร จังหวัด อุบลราชธานี 34110
ประวัติการศึกษา 2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้