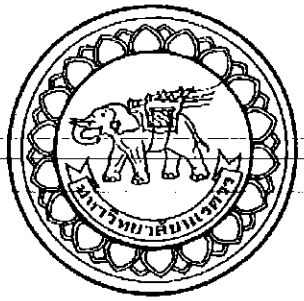


เครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

POWER TRANSFORMER OIL INSULATION TESTER

นายจักรกฤช สิงห์บำรุง รหัส 48361400

นายพูนศักดิ์ สาหร่ายสุวรรณ์ รหัส 48361691

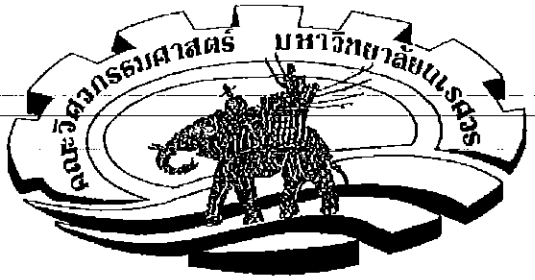
ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 25 / W.A. 2553 /
เลขทะเบียน 1500264
เลขเรียกหนังสือ ปร. 9215ก 2551
มหาวิทยาลัยนเรศวร
C.2

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2551



ใบรับรองโครงงานวิศวกรรม

หัวข้อโครงงาน	เครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง			
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายจักรกฤช	สิงห์บำรุง	รหัส	48361400
	นายพูนศักดิ์	สาหร่ายสุวรรณ์	รหัส	48361691
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.แคทรียา	สุวรรณศรี		
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า			
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์			
ปีการศึกษา	2551			

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการสอบโครงงานวิศวกรรม

.....ประธานกรรมการ
(ดร.แคทรียา สุวรรณศรี)

.....กรรมการ
(ดร.นิพัทธ์ จันทรมินทร์)

.....กรรมการ
(อาจารย์สราวุฒิ วัฒนวงค์พิทักษ์)

หัวข้อโครงงาน	เครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง		
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายจักรกฤช สิงห์บำรุง	รหัส	48361400
	นายพูนศักดิ์ สาหร่ายสุวรรณ์	รหัส	48361691
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.แคทรียา สุวรรณศรี		
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2551		

บทคัดย่อ

ฉนวนน้ำมันนิยมนำมาใช้เป็นฉนวนดับอาร์คภายในหรือระบายความร้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น สายเคเบิล หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง อุปกรณ์ตัดตอนไฟฟ้า และอุปกรณ์อื่นๆการทดสอบความเป็นฉนวนน้ำมันเป็นการทดสอบประจำ สำหรับทดสอบค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง เพื่อหาค่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเจือปนในน้ำมันและวิเคราะห์คุณภาพความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง ดังนั้นในโครงงานนี้จึงได้พัฒนาเครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมัน เครื่องต้นแบบเป็นเครื่องทดสอบฉนวนน้ำมันอย่างง่าย ใช้ทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดมากกว่า 30 kV ถูกต้องตามมาตรฐานการทดสอบอุตสาหกรรม ASTM D877-87 มีความเที่ยงตรง ราคาประหยัด ทนทาน ดูแลรักษาง่าย นำไปสู่การลดต้นทุนการผลิตและการผลิตเชิงพาณิชย์ได้

Prpject Title	Power Transformer Oil Insulation Tester
Neme	Mr. Jakkrid Singbumrung ID. 48361400
	Mr. Poonsak Sariasuwan ID. 48361691
Project Advisor	Cattareeya Suwanasri, D.Eng
Major	Electrical Engineering
Department	Electrical and Computer Engineering
Academic Year	2008

Abstract

The insulation of oil is often used as an arc insulator or heat reducer in high power equipment such as cable lines, power generator, circuit breaker and others. The oil insulation test is a routine test, which is used for voltage breakdown testing of power transformer oil insulation. In order to investigate hydro-carbon compound in the oil and analyze oil insulation quality, in this project the oil insulation tester is developed. The prototype is a simple oil insulation tester, which can be used to test voltage higher than 30 kV. It is qualified by industrial testing standard ASTM D877-87. It is reliable, low-cost, endurable and maintenance leading to reduce the production cost and a good commercial device.

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิศวกรรม เรื่อง เครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง คณะผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ดร.แคทรียา สุวรรณศรี และ ดร.ธนพงศ์ สุวรรณศรี บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธรไทย-เยอรมัน (TGGS) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดจนคำแนะนำต่างๆในการทำโครงงาน นายทองหล่อ สิทธิประเสริฐผล วิศวกรระดับ 10 ฝ่ายบำรุงรักษาระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สำหรับสถานที่ดูงาน อาจารย์พินิจ จิตจริง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง นายอณัณตชัย พงศ์ถาวรสวัสดิ์ นิสิตปริญญาโท จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับคำแนะนำในเรื่องการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม สำนักงานโครงการ IRPUS ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและให้ในครั้งนี้ สุดท้ายต้องขอขอบพระคุณพ่อ แม่ อาจารย์ทุกท่าน เพื่อนๆพี่ๆทุกคนที่ยังไม่ได้เอ่ยนามที่ให้คำแนะนำและให้การสนับสนุนผู้จัดทำโครงงาน และทำให้โครงงานสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้จัดทำ
นายจักรกฤช สิงห์บำรุง
นายพูนศักดิ์ สาหร่ายสุวรรณ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ข

กิตติกรรมประกาศ..... ค

สารบัญ..... ง

สารบัญตาราง..... ฉ

สารบัญรูป..... ช

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....1

1.3 ขอบเขตของโครงงาน.....2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ.....2

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงาน.....3

1.6 งบประมาณ.....3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 มาตรฐานการทดสอบ.....4

2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า.....10

บทที่ 3 การสร้างอุปกรณ์

3.1 การสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า.....26

3.2 การสร้างชุดปรับแรงดันไฟฟ้า.....31

3.3 การสร้างถ้วยทดสอบ.....36

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลอง.....40

4.2 ผลทดลอง.....44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....47

บทที่ 5 ปัญหาและการสรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลของโครงงาน.....52

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางการแก้ไข.....53

เอกสารอ้างอิง.....54

ประวัติผู้เขียนโครงงาน.....55

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ขั้นตอนการดำเนินการ....2

3.1 สัญลักษณ์และอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในวงจรควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า....33

4.1 ผลการทดสอบ Voltage Ratio Test....44

4.2 ผลการทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า....46

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สัญลักษณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า	10
2.2 หม้อแปลงประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด	11
2.3 แกนเหล็ก E – I	12
2.4 หลักการเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้าในการให้กำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 และ E_2 ที่มีทิศทางตรงกันข้ามกันในลักษณะต่อต้านกับแรงดันไฟฟ้า V_1 และ V_2 ของขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิตามลำดับ	13
2.5 ความสัมพันธ์ต่อกันระหว่างแรงดันไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า	14
2.6 หม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่ต่อกับโหลด $E_1 = V_1$ และ $E_2 = V_2$	17
2.7 วงจรเทียบเท่าของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่ต่อกับโหลด $I_1 = I_n = I_0 + I_m$	17
2.8 รูปคลื่นไฟฟ้าที่แสดงความสัมพันธ์ต่อกันระหว่าง I_m และ Φ_m กับ V_1 และ E_1 , E_2	18
2.9 เวกเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด	19
2.10 การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะต่ออยู่กับโหลด (Load condition)	21
2.11 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีเปิดวงจร (O.C. Test)	23
2.12 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีเปิดวงจร (O.C. Test)	23
2.13 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีลัดวงจร (S.C. Test)	25
3.1 (ก) บ๊อบบิ้นขนาด 8 cm และ 7 cm, (ข) บ๊อบบิ้นขนาด 15 cm	28
3.2 บ๊อบบิ้นที่รองพื้นด้วยกระดาษฉนวนชั้นแรก	28
3.3 บ๊อบบิ้นที่ห่อกระดาษฉนวนทับชั้นเดิม	29
3.4 ขดลวดปฐมภูมิจำนวน 1 ขดและขดลวดทุติยภูมิจำนวน 3 ขด	29
3.5 ขดลวดอาบน้ำยาวานิช	30
3.6 แกนเหล็กชนิด U-I Silicon Steel Sheet	30
3.7 (ก) ใส่แกนเหล็กตัว U ทางด้านขวา, (ข) ใส่แกนเหล็กแกนเหล็กตัว U ทางด้านซ้าย	30
3.8 การยึดแกนเหล็กเข้าด้วยกันด้วยน็อต	31
3.9 หม้อแปลงไฟฟ้า	31
3.10 ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า	32
3.11 ทดลองวงจรต้นแบบสำหรับการควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า	33
3.12 วงจรกำลังที่ใช้ในการควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 วงจรควบคุมที่ใช้ในการควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า	34
3.14 วงจรที่ใช้ในการควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า	35
3.15 (ก) อิเล็กโทรดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm, (ข) อิเล็กโทรดหนา 10 mm	36
3.16 ถ้วยทดสอบตามขนาดที่ออกแบบ	37
3.17 ฝาปิดถ้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านหน้า	37
3.18 ฝาปิดถ้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านบน	38
3.19 ฝาปิดถ้วยทดสอบและอิเล็กโทรดที่ถอดออกจากแท่งตัวนำทองแดง	38
3.20 แท่งตัวนำจากหม้อแปลงไฟฟ้า	39
3.21 ชุดถ้วยทดสอบที่นำมาประกอบ	39
3.22 เครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า	39
4.1 วงจรการทดสอบ Voltage Ratio Test	40
4.2 วงจรการทดสอบ Polarity Test	41
4.3 วงจรการทดสอบ Open Circuit Test	42
4.4 วงจรการทดสอบ Short Circuit Test	43
4.5 โวลเตจดิไวเดอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	45
4.6 โวลเตจดิไวเดอร์ต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้า	45
4.7 ผลการทดลอง Voltage Ratio Test ที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 10.51 V	45
4.8 ตำแหน่งขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิที่เกิดการลัดวงจร	46
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้จากการทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้าขาออก	47
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดปรับแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบไว้	50

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power transformer) เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญและจำเป็นต่อทุกๆฝ่ายในภาคอุตสาหกรรมการผลิตและใช้ไฟฟ้า หากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีปัญหาก็จะก่อให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างและสร้างความเสียหายอย่างมากต่อภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นการดูแลหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังให้ทำงานได้ปกติและไม่มีความเสี่ยงต่อความเสียหายจึงเป็นเรื่องที่ทุกฝ่ายควรปฏิบัติ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในปัจจุบันใช้น้ำมันเป็นฉนวน (Oil insulation) และเพื่อการระบายความร้อน หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังใหม่หรือหม้อแปลงไฟฟ้าเก่าที่มีระดับน้ำมันพร่องไปต้องมีการเติมด้วยน้ำมันผ่านการทดสอบความเป็นฉนวนตามมาตรฐานทุกครั้ง ทั้งนี้ในปัจจุบันมีการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นจำนวนมาก ในส่วนของภาคอุตสาหกรรมโดยเฉพาะโรงงานขนาดใหญ่ ซึ่งได้ทำการว่าจ้างบริษัทจากภายนอกมาทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าวก่อนใช้งาน เนื่องจากยังขาดผู้เชี่ยวชาญด้านการทดสอบในหน่วยงาน ขาดเครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer oil insulation tester) การทดสอบแต่ละครั้งจึงต้องใช้งบประมาณค่อนข้างสูง

ดังนั้นโครงงานนี้จึงมีความต้องการพัฒนาและสร้างเครื่องต้นแบบอย่างง่าย นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ที่ถูกต้องตามมาตรฐานการทดสอบ (ASTM D877-87) มีความเที่ยงตรงในการทดสอบ ราคาประหยัด ทนทาน ดูแลรักษาง่าย และซ่อมบำรุงได้โดยช่างปฏิบัติการ ส่งผลให้บริษัทสามารถพึ่งพาตนเองได้ โดยสามารถนำเครื่องทดสอบน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าไปทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันในหม้อแปลงไฟฟ้า และเปรียบเทียบค่าผลการทดสอบกับค่ามาตรฐานได้ด้วยตนเอง ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการจ้างเหมาบริษัทภายนอก นำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต ป้องกันความเสียหายที่เกิดจากหม้อแปลงไฟฟ้าและเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยรวม อีกทั้งยังเป็นแหล่งเรียนรู้ให้กับนิสิตในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษามาตรฐาน Dielectric breakdown voltage of insulating oil test (ASTM D877)
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องต้นแบบทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยได้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

สร้างเครื่องต้นแบบทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 80 kV 500 VA ซึ่งมีอัตราการเพิ่มแรงดัน 3 kV/S เพื่อการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าให้ถูกต้องตามมาตรฐาน ASTM D877-87 มีความเที่ยงตรง ราคาประหยัด ทนทาน ดูแลรักษาง่ายและซ่อมบำรุงได้โดยช่างปฏิบัติการ นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ได้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินการ

รายละเอียด	ปี2551							ปี2552		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูล										
2. ศึกษาเครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเพื่อทดสอบน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า										
3. จัดทำอุปกรณ์เครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเพื่อทดสอบน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า										
4. ทำการทดสอบเครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเพื่อทดสอบน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า										
5. จัดทำรายงาน และสรุปผลการทำงาน										

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงาน

1. เข้าใจในการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้านำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์
2. ได้เครื่องต้นแบบที่มีความเที่ยงตรง ราคาประหยัด ทนทาน ดูแลรักษาง่าย เคลื่อนย้ายสะดวก และซ่อมบำรุงได้โดยช่างปฏิบัติการ
3. เพื่อให้บริษัทที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าในอุตสาหกรรม มีเทคโนโลยีเป็นของตนเอง สามารถพึ่งพาตนเองได้ โดยสร้างเครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันและนำไปทดสอบตามมาตรฐานด้วยตนเอง
4. บริษัทสามารถลดค่าใช้จ่ายในการจ้างเหมาจากภายนอกเพื่อการทดสอบ นำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต
5. สามารถป้องกันความเสียหายที่เกิดจากหม้อแปลงไฟฟ้าและการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยรวม
6. เป็นแหล่งเรียนรู้และศึกษางานให้กับภาคอุตสาหกรรม และนิสิตในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงต่อไปได้

1.6 งบประมาณ

1. ถ่ายเอกสารและค่าเข้าเล่มโครงงานฉบับสมบูรณ์	500	บาท
2. ค่าอุปกรณ์	30,000	บาท
3. ค่าพิมพ์เอกสาร	500	บาท
รวมเป็นเงิน	31,000	บาท

หมายเหตุ : ถัวเฉลี่ยทุกรายการ

บทที่ 2
ทฤษฎีและผลงานที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและผลงานที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ มาตรฐานการทดสอบความเป็นฉนวนในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าโดยจะใช้ มาตรฐาน ANSI/ASTM D877 Standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating liquids using disk electrodes และทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้า

2.1 มาตรฐานการทดสอบ

มาตรฐาน ANSI/ASTM D877 Standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating liquids using disk electrodes ใช้ทดสอบแบบการทดสอบประจำ (Routine test) ทดสอบน้ำมันของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าใช้งานไม่เกิน 230 kV และการตรวจสอบเพื่อรับน้ำมันที่ยังไม่ได้ผ่านกรรมวิธีใดๆมาก่อน

2.1.1 ขอบข่าย

1. เป็นวิธีการหาค่า แรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว (Insulating liquids) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินค่า และเป็นเกณฑ์ของการทดสอบประจำ วิธีการนี้เหมาะสมใช้กับน้ำมันปิโตรเลียม, ไฮโดรคาร์บอน และ Askarels ซึ่งโดยทั่วไปใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนและเป็นตัวกลางระบายความร้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น สายเคเบิล, Oil circuit breaker และอุปกรณ์อื่นๆ ที่คล้ายคลึง ไม่ควรใช้วิธีการนี้กับของเหลวที่มีความหนืดเกินกว่า 900 CST (mm^2/S) (5000 sus) ที่ 40°C (104°F)

2. วิธีนี้แนะนำให้ใช้กับการทดสอบเพื่อตรวจรับของเหลวฉนวนชนิดที่ยังไม่ได้ผ่านกรรมวิธีใด ๆมาก่อน เช่น รับจากรถบรรทุกน้ำมัน, ถังน้ำมัน 200 ลิตร (Drum) และในภาชนะบรรจุเพื่อการขนส่ง และอาจจะใช้เป็นการทดสอบประจำของของเหลวฉนวนที่ใช้อยู่ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้า 230 kV หรือน้อยกว่า

3. วิธีการนี้ไม่แนะนำให้ใช้กับของเหลวฉนวนที่ผ่านกรรมวิธี Reconditioning หรือ Purify มาแล้ว และนำไปใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าเกิน 230 kV ซึ่งถ้าเกินไปกว่านี้จะใช้วิธีการทดสอบ ASTM D1816 แทน

4. หน่วยเมตริกและหน่วย U.S.Customery สามารถเทียบเคียงกันใช้ได้

2.1.2 ASTM Standard/IEEE Standard

- D484 Specification for hydrocarbon dry-cleaning solvents
- D923 Test method for sampling electrical insulating liquids

- D1816 Test method for dielectric breakdown voltage of insulating oils of petroleum origin using VDE electrodes
- D2255 Test method for testing silicon fluids use for electrical insulation
- IEEE Standard no.4 measurement of voltage in dielectric test

2.1.3 คุณประโยชน์ของการทดสอบ

ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวที่มีความสำคัญมาก โดยใช้เป็นการวัดค่าของขีดความสามารถของ ของเหลวที่จะทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าได้โดยไม่เกิดความเสียหาย และยังชี้บอกได้ว่า ในของเหลวมีสิ่งสกปรกปะปนแอบแฝงอยู่ เช่น น้ำ, ผงฝุ่นและเส้นใยเซลลูโลส ที่มีความชื้นหรือสารตัวนำเล็กๆที่ปะปนอยู่ในของเหลวแล้วจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการได้ค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงๆไม่ได้หมายความว่า ไม่มีพวกสิ่งสกปรกอยู่เลย เพราะการทดสอบแบบนี้เป็นการชี้แสดงถึงสิ่งสกปรกที่มารวมตัวกันอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดซึ่งอาจไม่พอเพียงในการที่จะไปเป็นผลกระทบกระเทือนต่อค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์มาก

2.1.4 เครื่องมือที่ใช้

1. **หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า** ต้องใช้ในการทดสอบ ทำได้ง่ายโดยใช้ Step up transformer ซึ่งด้านขดปฐมภูมิ เป็นแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สามารถปรับค่าได้ ความถี่ที่ใช้งานก็ใช้ความถี่กำลังเชิงพาณิชย์ (Commercial power frequency 50/60 Hz) ซึ่งตัวหม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมต้องมีขนาดและการออกแบบไว้อย่างดี รวมทั้งมีการทดสอบวงจรตัวอย่าง ค่า Crest factor (อัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดต่อค่าประสิทธิผล) ของแรงดันไฟฟ้าทดสอบชนิด 60 Hz จะต้องไม่แตกต่างเกินไป ± 5% (คิดจาก Sinusoidol wave over the upper half of the range of test voltage) ค่า Crest factor ตรวจสอบได้โดยใช้ Oscilloscope sphere gap หรือ Peak reading voltmeter ซึ่งต่อรวมกับ RMS โวลท์มิเตอร์ ถ้าหากว่าไม่สามารถตรวจสอบ รูปสัญญาณ ได้โดยสะดวกก็ให้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดไม่น้อยกว่า 0.5 kVA สำหรับการทดสอบ แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์โดยทั่วไปได้ หรือถ้าใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังไฟฟ้ามากๆ โดยค่ากระแสลัดวงจรมากๆ ในวงจรของตัวอย่างทดสอบอยู่ระหว่าง 1-10 mA/kV ของ Applied voltage การกำจัดค่ากระแสนี้กระทำโดยใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกันข้างนอกหรือออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) ตามต้องการ

2. **อุปกรณ์ตัดวงจร** วงจรทางด้านขดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าต้องมีระบบป้องกันโดยใช้อุปกรณ์ตัดวงจรอัตโนมัติ ซึ่งสามารถตัดวงจรได้ภายใน 3 ไซเคิลหรือน้อยกว่าของกระแสที่เกิดขึ้นในขณะแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของของเหลวที่ทดสอบ หรือจะให้ตัดวงจรได้ภายใน 5 ไซเคิลก็ได้ ถ้ากระแสที่ลัดวงจรมีค่าไม่เกิน 0.2 A ตัวตัดกระแส (Sensing) ที่ไปสั่งตัดวงจรเมื่อกระแสของวงจรทดสอบอยู่ในช่วง 2-20 mA กระแสที่เกินกว่านี้หรือนานกว่านี้ในขณะเบรกดาวน์

จะทำให้เกิด Carbonized ในน้ำมัน และทำให้อิเล็คโทรดสึกกร่อนและมีความร้อนสูง เป็นเหตุให้สิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษา

3. อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า กำหนดให้อัตราเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น 3 kV/S ± 20 % การปรับแรงดันไฟฟ้าทำได้อย่างปลอดภัยโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ (Motor driven variable ratio autotransformer) อัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าต้องให้สม่ำเสมอกันตลอดย่านแรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าของการทดสอบการใช้มอเตอร์ขับจะดีกว่าวิธีธรรมดา เพราะไม่ต้องยุ่งยากในการตรวจสอบ บำรุงรักษาและได้อัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่สม่ำเสมอโดยง่าย อัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสามารถคำนวณได้โดยคิดจากระยะเวลาที่ใช้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงแรงดันไฟฟ้าสุดท้าย เมื่อใช้มอเตอร์เป็นตัวขับแล้วควรตรวจสอบ และ Caribrate speed control rhelostat ให้แน่นอนคล้องจองกับอัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของ หม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบที่ใช้

4. แรงดันไฟฟ้า เพื่อให้การอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นที่ถูกต้อง โดยจะยึดถือตาม Requirement of IEEE Standard no.4 "Measurement of voltage in dielectric test" ซึ่งเป็นการให้ค่า RMS โดยจะใช้วิธีการและเครื่องมือต่อไปนี้ คือ

- ใช้โวลท์มิเตอร์ ต่อทางด้าน Secondary ของ Separated potential transformer หรือ
- ใช้โวลท์มิเตอร์ ต่อทางด้าน Tertiary winding ของหม้อแปลงไฟฟ้า (ถ้ามี)
- ใช้โวลท์มิเตอร์ ต่อทางด้าน Low voltage ของหม้อแปลงไฟฟ้าถ้าหากว่าเกณฑ์ความผิดพลาด ในการวัดไม่เกินกว่าที่ระบุไว้

2.1.5 อิเล็กโทรด

ต้องทำด้วยทองเหลืองผิวมันเรียบ ลักษณะแบบจานกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm (1 in.) ความหนาอย่างน้อย 3 mm (1/8 in.) มุมของขอบอิเล็กโทรดเป็นเหลี่ยมตัดฉาก

2.1.6 ถ้วยทดสอบ

จะต้องมีอิเล็กโทรด ติดประกบมาอย่างหนาแน่นแข็งแรง ผิวหน้าของอิเล็กโทรด ทั้งสองมีระยะห่างเท่าเทียมกันตลอดหน้าแนวแกน อิเล็กโทรดทั้งสองก็อยู่ในระนาบเดียวกันอิเล็กโทรดต้องห่างจากส่วนใดๆของถ้วยทดสอบไม่น้อยกว่า 13 mm (1/2 in.) ผลรวมของกระแสรั่วไหล และกระแสชาร์ตของถ้วยทดสอบเมื่อมีน้ำมันอย่างดีบรรจุอยู่ต้องน้อยกว่า 200 μA ที่ 20 kV 60 Hz ถ้วยทดสอบต้องทำจากวัสดุที่มีค่าความคงทนของฉนวนสูง และไม่มีความเสียหายถ้าสัมผัสกับของเหลวที่มาใส่ หรือจากการล้างต้องไม่ดูดซึมความชื้นหรือน้ำยาล้างทำความสะอาด หรือของเหลวที่นำมาทดสอบ ความสูงของถ้วยทดสอบประมาณ 33 mm (1.25 in.) จากขอบบนสุดของอิเล็กโทรด ถ้วยทดสอบควรออกแบบให้สามารถถอดอิเล็กโทรดได้ง่ายเพื่อประโยชน์ในการล้างทำความสะอาด การขัดผิวและการปรับระยะ Gap

2.1.7 การปรับระยะและการรักษาอิเล็กโทรด และถ้วยทดสอบ

1. ระยะ Gap ระหว่างอิเล็กโทรดขณะทดสอบต้องได้ 2.5 mm (0.100 in.) ซึ่งทำได้โดยใช้ Standard–pound-gage ขนาด 2.5 ± 0.01 mm (0.100 ± 0.0005 in.) หรือใช้แท่งเหล็กแบบที่เรียกว่า "GO" และ "NO-GO" Gate ที่มีความหนา 2.49 และ 2.51 mm (0.0995 in. และ 0.1005 in.) ตามลำดับทุกครั้งที่ขัด, เช็ด, ล้างอิเล็กโทรดรวมทั้งการเริ่มต้นทดสอบของแต่ละวัน ควรตรวจระยะ Gap เสมอ

2. การล้างทำความสะอาด การล้างทำความสะอาดอิเล็กโทรดสามารถทำได้โดยเช็ดด้วยกระดาษทิชชู่ที่สะอาด, แห้งและไม่ติดขน หรือเช็ดด้วยผ้าหนังชามัวส์ที่แห้งสะอาด ระวังอย่าให้นิ้วมือไปแตะต้องกับอิเล็กโทรด และ Gage แม้กระทั่งกระดาษทิชชู่หรือผ้าชามัวส์ ด้านที่มือจับอยู่ หลังจากที่ได้ระยะ Gap ดีแล้ว เทน้ำมัน Hydrocarbon solvent ใส่ถ้วยทดสอบแล้วเขย่าพลิกไปมา จะใช้น้ำมันก๊าซ หรือ Standard solvent ก็ได้ น้ำยา Solvent ที่มีจุดเดือดต่ำๆไม่ควรใช้ เพราะการระเหยเป็นไอได้เร็ว เป็นผลให้เกิดความเย็นขึ้นมาในถ้วยทดสอบ ทำให้ความชื้นที่มีอยู่สามารถควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำได้ ถ้าจะให้ดีควรครอบถ้วยทดสอบไล่ความชื้นสักเล็กน้อยก่อน สิ่งที่ควรระวังคือ อย่าให้มีการแตะต้องกับอิเล็กโทรดและภายในถ้วยทดสอบหลังจากการล้างและอบ ก่อนการทดสอบควรใช้น้ำมันที่สะอาดๆชนิดเดียวกับที่จะทดสอบ กรอกใส่ถ้วยทดสอบแล้วเอียงพลิกถ้วยไปมาเป็นการล้างครั้งสุดท้ายอีกทีหนึ่ง เสร็จแล้วเอาน้ำมันชนิดเดียวกับที่ล้างครั้งสุดท้ายนี้มาทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวน ถ้าได้ค่าสูงพอสมควรก็แสดงว่าถ้วยทดสอบนี้สามารถนำไปใช้ในการทดสอบอื่นๆได้ดีจริง ถ้าหากว่าได้ค่าต่ำก็ต้องล้างทำความสะอาด ถ้วยทดสอบใหม่และทดสอบซ้ำอีก

3. การใช้ประจำวัน ก่อนที่จะทำการทดสอบในแต่ละวันจะต้องตรวจดูอิเล็กโทรดว่าสกปรกหรือสึกกร่อนไปบ้างหรือไม่อาจจะต้องขัดบ้าง หากเกิดการสึกกร่อน ผงถ่านและสิ่งสกปรกทั้งหลายต้องเช็ดออกให้หมด ตั้งระยะ Gap ใหม่แล้วล้างทำความสะอาดตามแบบข้อ 2.

4. การเก็บถ้วยทดสอบ สำหรับการใช้งานแบบทดสอบเพื่อเป็นเกณฑ์สิน (Reference test) ต้องเก็บไว้ในน้ำมันที่สะอาด แห้ง ใหม่ ชนิดเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบและปิดภาชนะที่เก็บให้สนิท

2.1.8 ตัวอย่างทดสอบ

1. ตัวอย่างของของเหลวที่นำมาทดสอบต้องดำเนินตามวิธีการ ASTM D923 ตัวอย่างต้องบรรจุในขวดที่สะอาด, แห้ง และผนึกปิดไว้สนิท พร้อมทั้งป้องกันไม่ให้ถูกกับแสงสว่างด้วย ก่อนที่จะนำตัวอย่างไปทดสอบต้องตรวจดูว่ามีสิ่งสกปรก, คราบน้ำมัน ผงโลหะหรือสิ่งแปลกปลอมใดๆ หรือไม่ ถ้ามองเห็นว่ามีหยดน้ำแฝงอยู่ก็ไม่ต้องนำไปทดสอบ รายงานได้เลยว่าตัวอย่างไม่สมบูรณ์พอ (หมายเหตุ ในการเก็บตัวอย่างถ้าต้องการทดสอบเพื่อเป็นเกณฑ์ตัดสินควรเก็บตัวอย่างมา 2 ลิตร แต่ถ้าทดสอบประจำควรเก็บมา 1 ลิตร)

2. ตัวอย่างของของเหลวที่นำมาทดสอบต้องดำเนินตามวิธีการ ASTM D923 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนของของเหลวจะเสื่อมเสียลงไปถ้าหากมีสิ่งเจือปนเข้าไปปะปนผสมอยู่ในของเหลว เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาอย่างนี้ ก็ขอแนะนำกรรมวิธีในการใส่ของเหลวเข้าถ้วยทดสอบ ภาชนะที่บรรจุของเหลวที่มาทดสอบนั้นให้หมุนกลับไปมาช้าๆก่อนที่จะเทของเหลวลงถ้วยทดสอบ ห้ามกวนของเหลวแรงๆเพราะอาจทำให้มีอากาศเข้าไปผสมในของเหลวได้ เทของเหลวที่จะทดสอบลงไปในถ้วยทดสอบเล็กน้อยเพื่อการล้างและเคลือบและก็เททิ้งไป เสร็จแล้วก็เอาของเหลวตัวอย่างที่จะมาทดสอบเทลงไปในถ้วยทดสอบช้า ๆเพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศและไอน้ำในอากาศเข้ามาผสมเติมไปจนกระทั่งได้ในระดับของเหลวสูงกว่าอิเล็กโทรด ขอบบนสุดประมาณไม่ต่ำกว่า 20 mm (0.8 in.) เสร็จแล้วทิ้งไว้ให้นิ่งอย่างน้อย 2 นาที เพื่อเปิดโอกาสให้ฟองอากาศได้หนีออกไปได้ แต่ไม่ควรนานกว่า 3 นาที ก่อนการทดสอบ (หมายเหตุ วิธีนี้ อาจใช้ไม่ได้ ถ้าหากว่าของเหลวที่จะมาทดสอบมีความหนืด 10 mm/s) (60-100 sus) ที่ 100°C (212°F) ถ้าหากจะทดสอบกับของเหลวที่มีความหนืดสูง ๆ อย่างนี้ควรปล่อยทิ้งไว้ให้นิ่งและเย็นลงจนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งก็ต้องไม่ต่ำกว่า 20°C (68°F) ภาชนะที่บรรรจุของเหลวตัวอย่างจะไม่หมุนกวน แต่จะใช้วิธีพลิกกลับไปกลับมาอย่างน้อย 30 นาที ก่อนที่จะเทใส่เครื่องทดสอบ

2.1.9 อุณหภูมิสำหรับการทดสอบ

อุณหภูมิของตัวอย่างที่จะมาทดสอบ ควรให้เท่ากับอุณหภูมิห้องซึ่งก็ต้องไม่ต่ำกว่า 20°C การทดสอบที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องจะทำให้ได้ค่าที่ไม่แน่นอน และทำให้ได้ผลออกมาไม่ถูกต้อง

2.1.10 อัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า

ให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากศูนย์ และค่อยๆเพิ่มไปในอัตรา 3 kV/S ± 20% จนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ซึ่งแสดงได้จากการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันและบันทึกค่านั้นไว้ มีช่วงบางขณะหากเกิดดิสชาร์จ (Discharge) บ้าง ซึ่งไม่เป็นผลกระทบกระเทือนกับการทำงานของอุปกรณ์ตัดวงจร

2.1.11 ลำดับขั้นการทดสอบ

1. การทดสอบเป็นเกณฑ์ตัดสิน เป็นการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนของของเหลวใหม่เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ตัดสิน ทำการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ต่อ 5 ตัวอย่างของเหลวในถ้วยทดสอบ โดยแต่ละตัวอย่างให้เบรกดาวน์ได้เพียง 1 ครั้ง ค่าเฉลี่ยของทั้ง 5 ครั้งนี้จะถูกต้องตามหลักเกณฑ์ทางสถิติศาสตร์หรือไม่นั้นก็ให้คำนวณตามข้อ 3. ถ้าถูกต้องตามหลักเกณฑ์ก็รายงานค่าเฉลี่ยที่ได้ และถ้าหากเกินหลักเกณฑ์ไปก็ให้ทดสอบใหม่อีก 5 ครั้งใน 5 ถ้วยทดสอบ เสร็จแล้วหาค่าเฉลี่ยจากเบรกดาวน์ทั้ง 10 ครั้งเป็นรายงาน

2. การทดสอบเป็นประจำ ทำการทดสอบโดยหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ 5 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่างของเหลวในถ้วยทดสอบ ซึ่งให้พักพอ 1 นาที (คิดระหว่างเบรกดาวน์ต่อเบรกดาวน์) ค่าเฉลี่ยของทั้ง 5 ครั้งนี้คือค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนของของเหลวนั้นจะถูกต้องตามหลักเกณฑ์ทางสถิติศาสตร์ตามข้อ 2.

3. หากเกินหลักเกณฑ์ไปให้ทิ้งตัวอย่างเดิมไป แล้วใช้ตัวอย่างใหม่ 1 ถ้วยทดสอบ (ตัวอย่างมาจากแหล่งเดียวกัน) หากค่าเบรกดาวน์เดียวกัน 5 ครั้งเสร็จแล้วคิดค่าเฉลี่ยจาก แรงดันเบรกดาวน์ทั้ง 10 ครั้งเป็นรายงาน

4. หลักเกณฑ์การตัดสินค่าเฉลี่ยทางสถิติศาสตร์ หาค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐานของเบรกดาวน์ 5 ครั้ง ดังต่อไปนี้ [1]

$$\bar{x} = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} x_i \qquad (2.1)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{4}\left[\sum_{i=1}^{5} x_i^2 - 5\bar{x}^2\right]} \qquad (2.2)$$

เมื่อ $\bar{x}$ = ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 5 ครั้ง (V)

x_i = ค่าเบรกดาวน์ในแต่ละครั้ง (V)

S = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ถ้าหากว่าอัตราส่วนของ $S/\bar{x}$ เกิน 0.1 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของ แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จาก 5 ครั้งที่หามาได้เกินหลักเกณฑ์ไป

ยังมีอีกวิธีหนึ่ง ในการคิดโดยให้เลือกใช้ได้ โดยเอาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่สูงที่สุดลบจากค่าที่ต่ำสุด จาก 5 ครั้ง แล้วคูณผลลบนี้ด้วย 3 จะได้ผลลัพธ์ค่าหนึ่งซึ่งเอาไปเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ค่าถัดจากค่าที่ต่ำสุด ถ้าผลลัพธ์มากกว่าค่าถัดจากค่าที่ต่ำที่สุดแสดงว่าค่าเฉลี่ยที่หามาจาก 5 ครั้งแรกนั้นเกินหลักเกณฑ์ไป

2.1.12 การจัดทำรายงาน

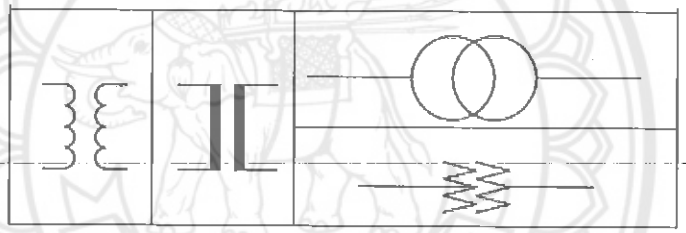
การจัดทำรายงานการทดสอบให้ทำและระบุสิ่งต่างๆ ดังนี้

- ASTM Code number ที่ใช้ทดสอบ เช่น ASTM D877
- เป็นการทดสอบเพื่อเป็นเกณฑ์ตัดสินหรือการทดสอบประจำ
- ประมาณค่าความหนืดของของเหลวที่นำมาทดสอบ
- อุณหภูมิของของเหลวที่ทดสอบและอุณหภูมิห้อง
- ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในแต่ละครั้ง และค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าซึ่งคิดตามวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง
- การทดสอบเป็นเกณฑ์ตัดสินจาก 5 ครั้งใน 5 ตัวอย่างและค่าไม่เกินหลักเกณฑ์ทางคณิตศาสตร์

- การทดสอบเป็นเกณฑ์ตัดสินจาก 10 ครั้งใน 10 ตัวอย่าง ซึ่งค่าเฉลี่ยใน 5 ครั้งแรกเกินหลักเกณฑ์ไป
- การทดสอบเป็นประจำจาก 5 ครั้งใน 1 ตัวอย่าง และค่าไม่เกินหลักเกณฑ์ทางคณิตศาสตร์
- การทดสอบเป็นประจำจาก 10 ครั้งใน 2 ตัวอย่าง ซึ่งค่าเฉลี่ยใน 5 ครั้งแรกเกินหลักเกณฑ์ไป ถ้าเห็นว่าตัวอย่างมีหยดน้ำหรือสิ่งสกปรกปะปนอยู่ ก็ต้องแจ้งเอาไว้เพื่อจะได้ทราบว่าทำไมถึงไม่ทำการทดสอบ

2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

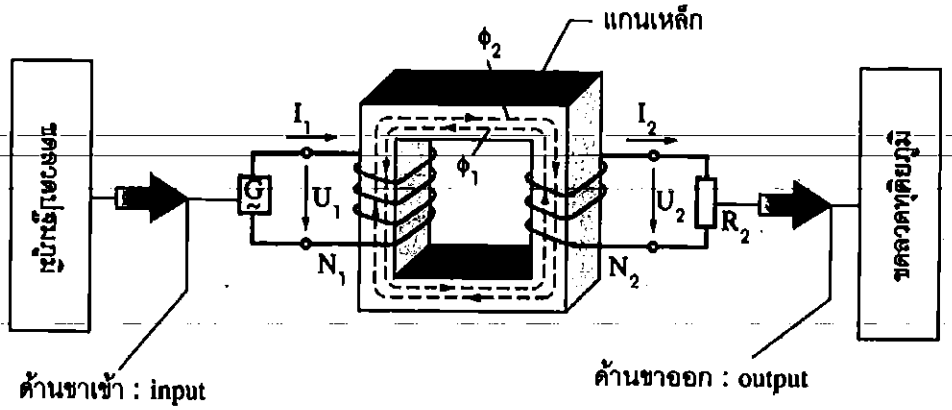
หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) เป็นเครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C. machine) ที่กำหนดให้มีภารกิจหลักในการแปลงแรงดันไฟฟ้าจากระดับของแรงดันไฟฟ้าใดๆ ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าในระดับที่ต้องการสามารถเขียนแทนสัญลักษณ์ได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า [2]

2.2.1 ลักษณะโครงสร้าง

หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด คือขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) กับขดลวดชุดทุติยภูมิ (Secondary winding) ที่พันอยู่บนแกนเหล็กแกนเดียวกัน ขดลวดทั้งสองชุดนี้แยกกันอยู่อย่างเด็ดขาดโดยอิสระในวงจรแม่เหล็กวงจรเดียวกัน ทั้งยังไม่มีวงจรไฟฟ้าต่อถึงกันดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด [2]

รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยส่วนสำคัญอยู่ 2 ส่วนด้วยกันคือ ขดลวดกับแกนเหล็ก

2.2.2 ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นขดลวดอาบน้ำยา หุ้มฉนวนด้วยกระดาษหรือด้าย ที่พันอยู่บนแกนเหล็กทั้งสองชุด ขดลวดชุดใดเป็นขดใดนั้น มิได้หมายความว่า ขดทางด้านซ้ายมือจะเป็นขดปฐมภูมิหรือทางด้านขวามือจะเป็นขดทุติยภูมิเสมอไปแต่อย่างใดแต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่กำหนดให้ของขดลวดแต่ละขดดังนี้

1. ขดลวดปฐมภูมิ เป็นขดลวดขดทางด้านขาเข้าที่ต่อรับพลังงานไฟฟ้าเข้ามา (Input) นิยมเขียนค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องห้อยท้ายด้วยเลข 1 ดังนี้

U_1 = แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (V)

E_1 = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ (V)

I_1 = กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า (A)

N_1 = จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิ (รอบ)

2. ขดลวดทุติยภูมิ เป็นขดลวดทางด้านขาออกที่ต่อนำพลังงานไฟฟ้าออกไปใช้งาน (Output) ค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องนิยมเขียนห้อยท้ายด้วยเลข 2 ดังนี้

U_2 = แรงดันไฟฟ้าจ่ายโหลด (V)

E_2 = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทุติยภูมิ (V)

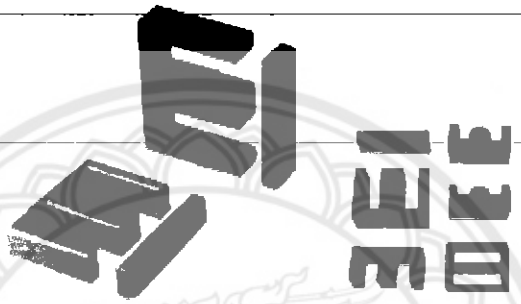
I_2 = กระแสจ่ายโหลด (A)

N_2 = จำนวนรอบขดลวดด้านทุติยภูมิ (รอบ)

เพื่อให้สะดวก รวดเร็วและง่ายต่อการพิจารณาหาค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้า มักจะกำหนดให้ขดลวดชุดปฐมภูมิอยู่ทางด้านซ้ายมือ และชุดทุติยภูมิอยู่ทางด้านขวามือเสมอ

2.2.3 แกนเหล็ก

แกนเหล็กของเครื่องกลไฟฟ้าทั้งหลาย ไม่เฉพาะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือมอเตอร์เท่านั้น หม้อแปลงไฟฟ้าก็เช่นเดียวกัน จะไม่ใช้แกนเหล็กที่เป็นแท่งเดียวกันอย่างเด็ดขาด แต่จะใช้แกนเหล็กแผ่นชนิดพิเศษ เพื่อเครื่องกลไฟฟ้าโดยเฉพาะที่ประกอบด้วยเหล็กแผ่นบางๆ หลายๆแผ่น แต่ละแผ่นเคลือบผิวทั้งสองหน้าด้วยวัสดุฉนวน และได้รับการตัด แต่ง ให้มีรูปร่าง ขนาด กว้าง ยาว ตามที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว นำมาเรียงกันเป็นแกนหม้อแปลงไฟฟ้าให้ได้ขนาดพื้นที่หน้าตัดตามที่ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แกนเหล็ก E – I [2]

แกนเหล็กของเครื่องกลไฟฟ้าต้องให้การเหนี่ยวนำกระแสสูง และกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Iron หรือ Core losses) ต่ำ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในเทคโนโลยีการสื่อสารทุกชนิด จะใช้แกนเหล็กเฟอร์ไรต์ที่เรียกว่า "Ferromagnetic alloy" ส่วนในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในเทคโนโลยีการส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้า ปัจจุบันนิยมใช้แกนเหล็กชนิด "Grain oriented silicon sheet steel" ซึ่งได้รับการยอมรับว่า เป็นแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้าที่ดีที่สุดจากประเทศญี่ปุ่น

2.2.4 สมรรถนะของหม้อแปลงไฟฟ้า

ด้วยเหตุที่หม้อแปลงไฟฟ้าต่อรับพลังงานไฟฟ้าเข้ามาทางด้านขาเข้า (Input) ในระดับของแรงดันไฟฟ้า V_1 และกระแส I_1 แล้วถ่ายทอดออกไปทางด้านขาออก (Output) ในระดับของแรงดันไฟฟ้าโหลด V_2 และกระแสจ่ายโหลด I_2

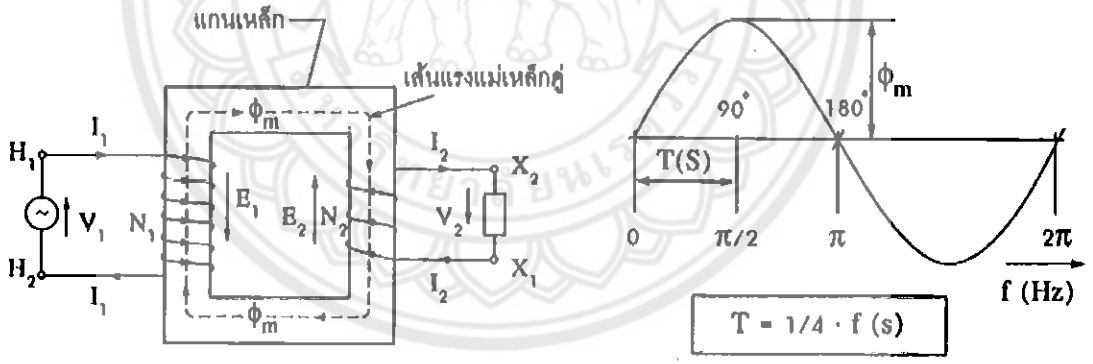
ถ้าให้ S คือกำลังไฟฟ้าปรากฏหน่วยเป็น VA หรือ kVA ดังนั้นกำลังไฟปรากฏทั้งขาเข้าและขาออกเท่ากันดังแสดงในสมการที่ (2.3)

$$S = V_1 I_1 = V_2 I_2 \tag{2.3}$$

ดังนั้น สมรรถนะของหม้อแปลงไฟฟ้า จึงหมายถึงความสามารถในการจ่ายโหลดทั้งด้านขาเข้าและขาออก ที่เป็นผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า หรือกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power) มีหน่วยเป็น VA หรือ kVA นั่นเอง และเนื่องจากกำลังไฟปรากฏนี้เป็นค่าคงที่ของหม้อแปลงไฟฟ้าใดๆที่ไม่ได้แปรผันไปตามโหลด ด้วยเหตุนี้ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงกำหนดเป็น VA หรือ kVA เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 500 VA, 1000 VA (หรือ 1000 kVA), 100 kVA, 500 kVA ฯลฯ จะไม่กำหนดขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็น หรือ อย่างเด็ดขาด ทั้งนี้เพราะว่ากำลังเป็น มีค่าที่ไม่คงที่ จะแปรผันไปตามค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของโหลด

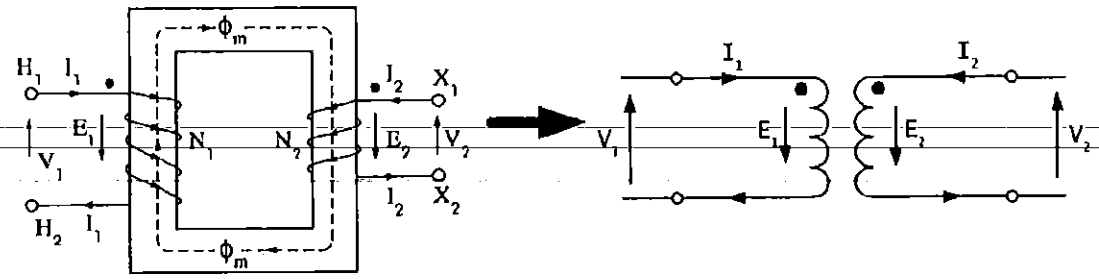
2.2.5 แรงดันไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้า

เมื่อขดลวดปฐมภูมิเข้ากับระบบไฟกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิกระแส จะทำให้กำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กคู่ รูปคลื่นไซน์ ที่เปลี่ยนค่าไปตามความถี่ของระบบไฟ ด้วยเวลา วินาที ไหลผ่านแกนเหล็กตัดขดลวดทั้งสองชุด เหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและ ขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าถ่ายทอดพลังงานไฟฟ้าออกไปจ่ายโหลดทางด้านขดลวดทุติยภูมิด้วยขนาดแรงดันไฟฟ้าโหลด และกระแส ความสัมพันธ์ต่อกันระหว่างแรงดันไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้า แสดงให้เห็นจริงได้ตาม รูปที่ 2.4 และ รูปที่ 2.5 ต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 หลักการเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้าในการให้กำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 และ E_2 ที่มีทิศทางตรงกันข้ามกันในลักษณะต่อต้านกับแรงดันไฟฟ้า V_1 และ V_2 ของขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิตามลำดับ [2]

แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 และ E_2 ที่เหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในขดลวดทั้งขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ ตามหลักการของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กในวงจรเหล็กใดๆจำนวน 1 เวเบอร์ เกิดการเปลี่ยนค่าในเวลา 1 วินาที จะให้กำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1 โวลต์ ขึ้นในวงจรแม่เหล็กนั้นๆ ขณะไม่ต่อโหลด (No load หรือ Open circuit condition) จะเท่ากับและมีทิศทางตรงกันข้ามกับ V_1 และ V_2 ตามลำดับ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.4)



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ต่อกันระหว่างแรงดันไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า [2]

$$E = 4.44 f N \Phi_m \tag{2.4}$$

เมื่อ E = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V)

N = จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)

Φ_m = เส้นแรงแม่เหล็ก (Wb)

f = ความถี่ไฟฟ้าของระบบไฟ (Hz)

ดังนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งทางด้านขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิคำนวณได้ตามสมการที่ (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ

$$E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \tag{2.5}$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m \tag{2.6}$$

จากทฤษฎีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่กล่าวไว้ว่า จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กใดๆต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดเท่ากับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.7)

$$B_m = \frac{\Phi_m}{A} \tag{2.7}$$

เมื่อนำความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มาแทนค่าในสมการที่ (2.5) และ (2.6) จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.8) และ (2.9)

$$E_1 = 4.44 f N_1 B_m A \tag{2.8}$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 B_m A \tag{2.9}$$

เมื่อ B_m = ความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก (T)

A = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (m^2)

2.2.5 อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า

อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า ในที่นี้หมายถึงความสัมพันธ์ต่อกันระหว่างค่าใดๆ ของขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และจำนวนรอบของขดลวด เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ a ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ต่อกันระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับจำนวนรอบของขดลวด

- อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าของสมการที่ (2.8) กับ (2.9) จะได้สมการที่ (2.10) และ (2.11) ตามลำดับ

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 f N_1 B_m A}{4.44 f N_2 B_m A} \tag{2.10}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{2.11}$$

- อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้ากับจำนวนรอบขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าต้องเท่ากันดังสมการที่ (2.12) ซึ่งจากการแก้สมการจะได้สมการที่ (2.13) แล้วนิยามให้สมการที่ (2.13) คือ อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าดังสมการที่ (2.14)

$$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2} \tag{2.12}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{2.13}$$

$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{2.14}$$

2. ความสัมพันธ์ต่อกันระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ตามสมการ (2.3) สมรรถนะในการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านขาเข้า (Input) เท่ากับทางด้านขาออก (Output) จะได้สมการที่ (2.15) และ (2.16) ถ้าไม่คำนึงถึงความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า จะได้ว่า $E_1 = V_1$ และ $E_2 = V_2$ ซึ่งเมื่อนำไปแทนในสมการที่ (2.16) จะได้สมการที่ (2.17)

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \tag{2.15}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \tag{2.16}$$

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} \tag{2.17}$$

3. ความสัมพันธ์ต่อกันระหว่างจำนวนรอบขดลวดกับกระแสไฟฟ้า ด้วยเหตุที่เส้นแรงแม่เหล็ก Φ_m ไหลในแกนเหล็ก ตัดขดลวดทั้งขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิ ดังนั้น แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetomotive force, m.m.f) จึงเท่ากันทั้งขาเข้าและขาออก ดังสมการที่ (2.18)

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \tag{2.18}$$

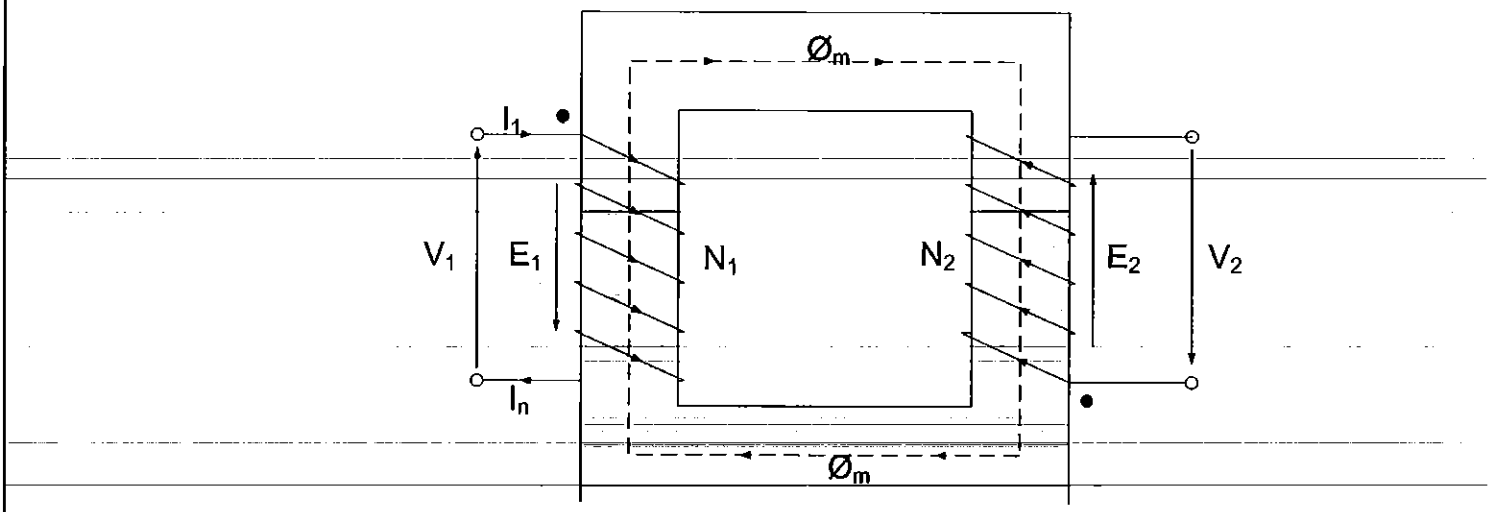
4. อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer ratio) ตามสมการ (2.14), (2.17) และ (2.18) จะได้อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้ารวมกันทั้งหมดดังดังสมการที่ (2.19)

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \tag{2.19}$$

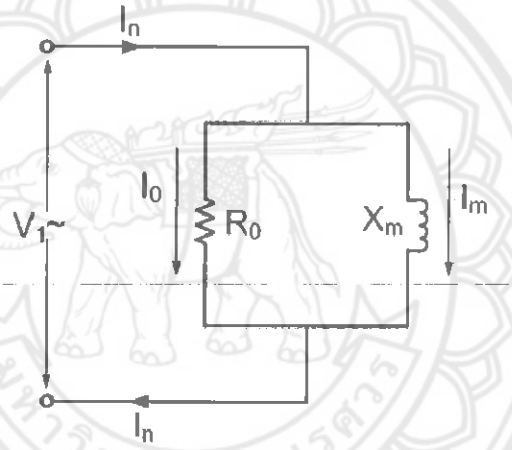
2.2.6 การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานขณะไม่ต่อกับโหลด กับหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานขณะต่ออยู่กับโหลด ทั้งสองลักษณะทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้านี้ จะให้ค่าต่างที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์ต่อเนื่องกันดังนี้

2.2.6.1 หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานขณะไม่ต่อกับโหลด ในที่นี้หมายถึง ลักษณะงานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่อขดลวดปฐมภูมิเข้ากับแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ V_1 ส่วนขดลวดทุติยภูมิให้เปิดวงจรไว้ ทำให้ขณะนี้มีกระแสไหลผ่านเฉพาะภายในขดลวดปฐมภูมิเพียงขดเดียวเท่านั้น หม้อแปลงไฟฟ้าในลักษณะงานเช่นนี้เรียกว่า การทำงานภายใต้เงื่อนไขเปิดวงจร (Open circuit condition) ดังรูปที่ 2.6 หรือเขียนด้วยวงจรเทียบเท่าหม้อแปลงไฟฟ้าดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 หม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่ต่อกับโหลด [2] $E_1 = V_1$ และ $E_2 = V_2$

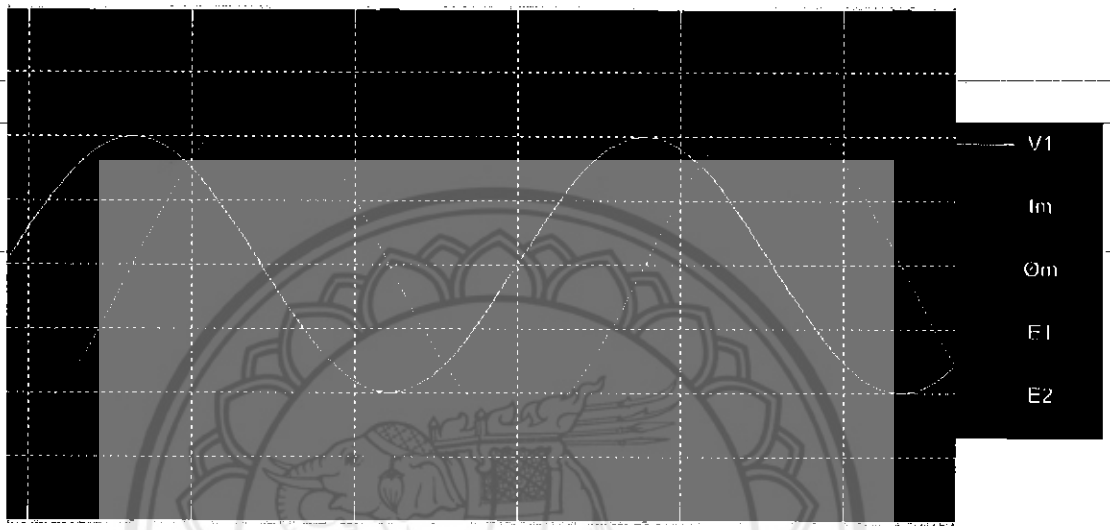


รูปที่ 2.7 วงจรเทียบเท่าของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่ต่อกับโหลด [2] $I_1 = I_n = I_0 + I_m$

กระแสไม่มีโหลด หรือกระแส I_n เป็นกระแสที่ใช้ไปในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเฉพาะ มีค่าน้อยมากประมาณไม่เกิน 5 % ของกระแสเต็มโหลดซึ่งหมายความว่า หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีสมรรถนะในการจ่ายโหลดเต็มโหลด 100 A มีกระแส I_n ไหลเพียง 5 A หรือน้อยกว่า ($I_n \leq 5$ A) ทั้งนี้เพราะว่ากระแส I_n ประกอบด้วยกระแส 2 ส่วนด้วยกันคือ

1. กระแสส่วนที่ใช้ไปเพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก Φ_m ให้ไหลในแกนเหล็ก กระแสส่วนนี้เรียกว่า "Magnetizing current" เขียนด้วยสัญลักษณ์ I_m เนื่องจาก I_m ให้กำเนิด Φ_m ดังนั้น I_m จึงซ้อนทับ (Inphase) กับ Φ_m และตามหลัง (Lag) แรงดันไฟฟ้า V_1 อยู่เป็นมุม 90^o กระแส I_m ซ้อนทับกับ Φ_m และตามหลังแรงดันไฟฟ้า V_1 อยู่เป็นมุม 90^o ด้วยเหตุที่เส้นแรงแม่เหล็ก Φ_m เป็นเส้นแรงแม่เหล็กรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal flux) ที่เปลี่ยนไปตามความถี่ไฟฟ้าของระบบไฟ กระแสสลับที่ต่อเข้ากับแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ V_1 ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 และ E_2 ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น ในขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิในขนาดที่เท่ากัน และมีทิศทางตรงกัน

ข้ามกับ แรงดันไฟฟ้า V_1 และ V_2 ตามกฎของเลนซ์ (Lenz's law) ตามที่ได้กล่าวแล้วในเบื้องต้น ตามลำดับ E_1 และ E_2 ที่ถูกเหนี่ยวนำด้วย Φ_m นี้จะตามหลัง I_m และ Φ_m อยู่ 90^o ไฟฟ้าและตามหลัง V_1 อยู่ 180^o (E_1 และ E_2 จะมีมุมเฟสต่างกัน 180^o กับ V_1) ตามรูปคลื่นไฟฟ้า รูปที่ 2.8 I_m, Φ_m ตามหลัง V_1 อยู่ 90^o และนำหน้า E_1, E_2 อยู่ 90^o ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าเคลื่อนไฟฟ้า E_1, E_2 จะมีมุมเฟสต่างกันกับ V_1 อยู่ 180^o



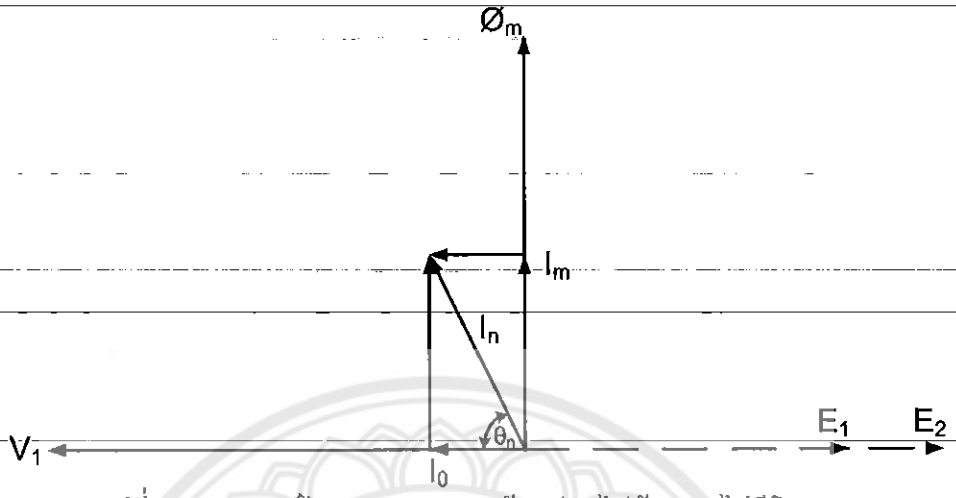
รูปที่ 2.8 รูปคลื่นไฟฟ้าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_m และ Φ_m กับ V_1 และ E_1, E_2 [2]

2. กระแสส่วนที่ใช้ไปเพื่อการสูญเสียบนแกนเหล็ก อันเนื่องจากความต้านทานของแกนเหล็ก ซึ่งได้แก่ hystersis และ eddy current losses กระแสส่วนนี้เรียกว่า core loss current เขียนแทนด้วย I_0 หรือ I_{h+e} และกระแส I_0 นี้จะซ้อนทับกับ V_1 หรือนำหน้า I_m อยู่ 90^o และมีค่าน้อยกว่า I_m มากๆ ($I_0 << I_m$) I_0 หรือ I_{h+e} จะซ้อนทับกับ V_1 และนำหน้า I_m อยู่ 90^o ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ากระแสไม่มีโหลด I_n ประกอบด้วยกระแส I_0 ที่ใช้ไปเพื่อการสูญเสียบนแกนเหล็กโดยเฉพาะกับกระแส I_m ที่ใช้ไปเพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก Φ_m ให้ไหลในแกนเหล็ก

เวกเตอร์ไดอะแกรมค่าต่างๆ ที่สัมพันธ์เกี่ยวข้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดนอกจากจะแสดงด้วยรูปคลื่นไฟฟ้า ตามรูปที่ 2.8 แล้วยังนิยมแสดงให้เห็นจริงได้ด้วยเวกเตอร์ไดอะแกรมตามรูปที่ 2.9 ที่ประกอบด้วย

- แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 และ E_2 ที่มีทิศทางตรงกันข้ามในลักษณะต่อต้านกับแรงดันไฟฟ้าเมน V_1 หรือ E_1, E_2 จะมุมเฟสต่างกัน 180^o กับ V_1
- กระแส I_m ที่ซ้อนทับกับ Φ_m และตามหลังแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ V_1 อยู่ 90^o หรือนำหน้า 90^o
- กระแส I_0 ที่ซ้อนทับกับ V_1 และนำหน้า I_m อยู่ 90^o

- ผลรวมทางเวกเตอร์ระหว่าง I_0 กับ I_m จะได้ I_n ทำให้ I_n นี้ตามหลังแรงดันไฟฟ้า V_1 อยู่เป็นมุม θ_n



รูปที่ 2.9 เวกเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด [2]

เมื่อ V_1 = แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิแรงเคลื่อนไฟฟ้า (V)

I_m = กระแสส่วนที่ใช้ไปเพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (A)

I_0 = กระแสส่วนที่ใช้ไปเพื่อการสูญเสียบนแกนเหล็ก (A)

I_n = กระแสไม่มีโหลด (A)

θ_n = มุมระหว่างเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด (องศาไฟฟ้า)

ค่าต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด คำนวณได้จากวงจรเทียบเท่าหม้อแปลงไฟฟ้า รูปที่ 2.7 และเวกเตอร์ไดอะแกรมรูปที่ 2.9 ตามสมการไฟฟ้าต่อไปนี้

1. กระแสไม่มีโหลดคำนวณได้จากสมการที่ (2.20) และ (2.21) ตามลำดับ

$$I_0 = I_n \cos\theta_n \tag{2.20}$$

$$I_m = I_n \sin\theta_n \tag{2.21}$$

ผลรวมของกระแสทางเวกเตอร์ระหว่างสมการที่ (2.20) และสมการที่ (2.21) จะได้กระแสตามสมการที่ (2.22)

$$I_n = \sqrt{I_0^2 + I_m^2} \tag{2.22}$$

เวกเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดตามรูปที่ 2.9 สามารถเขียนในรูปเวกเตอร์ได้ตามสมการที่ (2.23)

$$I_n = -I_0 - jI_m \tag{2.23}$$

2. มุมระหว่างเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด สามารถพิจารณาจากเวกเตอร์ไดอะแกรมรูปที่ 2.9 จะได้มุมระหว่างเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดได้ ตามสมการที่ (2.24), (2.25) และ (2.26) ตามลำดับ

$$\theta_n = \tan^{-1}\frac{I_m}{I_0} \tag{2.24}$$

$$\theta_n = \cos^{-1}\frac{I_0}{I_n} \tag{2.25}$$

$$\theta_n = \sin^{-1}\frac{I_m}{I_n} \tag{2.26}$$

ค่า $\cos\theta_n$ ของหม้อแปลงไฟฟ้าคำนวณได้ตามสมการที่ (2.27)

$$\cos\theta_n = \frac{I_0}{I_n} = \frac{I_0}{\sqrt{I_0^2 + I_m^2}} \tag{2.27}$$

3. กำลังสูญเสียบนแกนเหล็ก เป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ไปเพื่อการสูญเสียบนแกนเหล็กเนื่องจากฮีสเทอเรซิส และ กระแสไหลวน (ความต้านทานของแกนเหล็ก) เป็นกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดนั่นเอง สามารถคำนวณได้จากเวกเตอร์ไดอะแกรมรูปที่ 2.8 และวงจรเทียบเท่าหม้อแปลงไฟฟ้ารูปที่ 2.6 ตามสมการต่อไปนี้

$$P_0 = V_1 I_0 \tag{2.28}$$

$$P_0 = V_1 I_n \cos\theta_n \tag{2.39}$$

$$P_0 = I_0^2 R_0 \tag{2.30}$$

$$P_0 = \frac{V_1^2}{R_0} \tag{2.31}$$

เมื่อ P_0 = กำลังไฟรับเข้าของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด (No load power input) หรือกำลังไฟฟ้าสูญเสียบนแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้า (W)

$\cos\theta_n$ = เพาเวอร์แฟกเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด

R_0 = ความต้านทานของแกนเหล็ก (Ω)

4. ความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของแกนเหล็ก สามารถคำนวนได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_0 = \frac{V_1}{I_0} \tag{2.32}$$

$$X_m = \frac{V_1}{I_m} \tag{2.33}$$

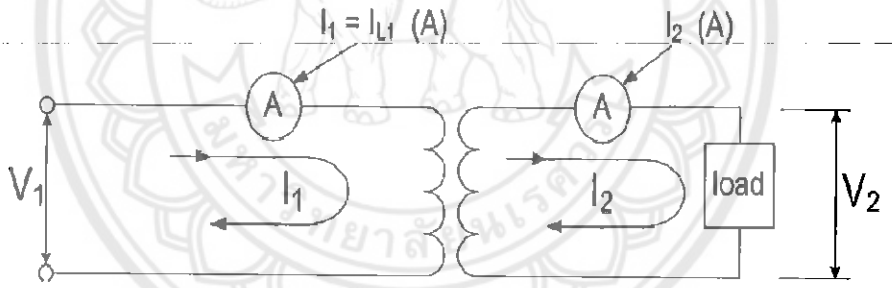
$$Z_n = \frac{V_1}{I_n} \tag{2.34}$$

$$\cos\theta_n = \frac{Z_n}{R_0} \tag{2.35}$$

เมื่อ X_m = รีแอกแตนซ์ของแกนเหล็ก (Ω)

Z_n = อิมพีแดนซ์ของแกนเหล็ก (Ω)

2.2.6.2 หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานขณะต่ออยู่กับโหลด เมื่อต่อขดลวดปฐมภูมิเข้ากับระบบไฟกระแสสลับแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ V_1 และขดลวดทุติยภูมิต่อเข้ากับโหลด แรงดันไฟฟ้าโหลด V_2 ขณะหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานจ่ายโหลดด้วยกระแสโหลด I_2 ทางด้าน I_1



รูปที่ 2.10 การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะต่ออยู่กับโหลด (Load condition) [2]

ขณะที่ขดลวดทุติยภูมิจ่ายกระแสโหลด I_2 ออกไปขดลวดปฐมภูมิจะดึงกระแสโหลด I_{L1} จากระบบไฟเข้ามาในอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าตามสมการที่ (2.17) จะได้สมการที่ (2.36) และ (2.37) ตามลำดับ

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_{L1}} \tag{2.36}$$

$$I_{L1} = \frac{I_2}{a} \tag{2.37}$$

เมื่อ I_{L1} = กระแสโหลดในขดลวดปฐมภูมิ (A)

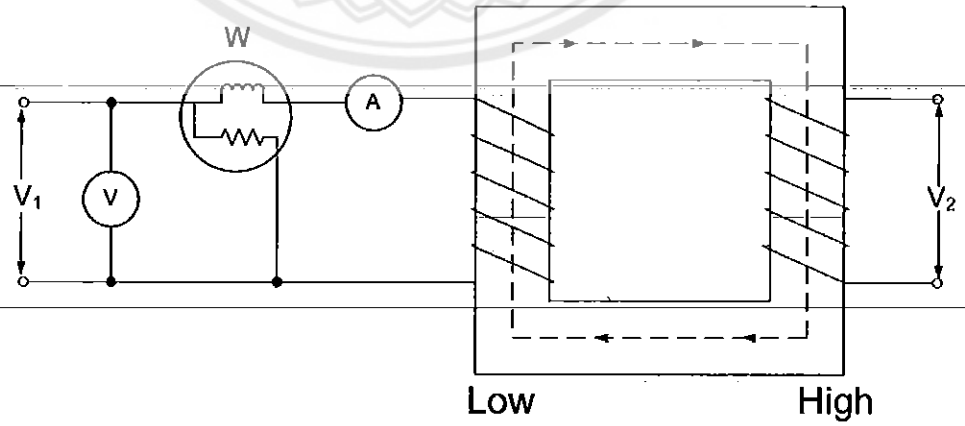
2.2.7 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

ค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้แก่ R_0, X_m, R_e และ X_e ซึ่งเป็นค่าคงที่ในวงจรไฟฟ้าเทียบเคียงหม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งในเทอมของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ที่ใช้เป็นวงจรพื้นฐานในการคำนวณค่าต่างๆ เพื่อแสดงคุณสมบัติ และคุณลักษณะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในลักษณะของงานต่างๆกันนั้น สามารถหาได้จากการทดสอบ (Transformer test) มีอยู่ 2 วิธีด้วยกัน ซึ่งการทดสอบทั้ง 2 วิธีนี้ นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ไม่เฉพาะเพียงแต่หม้อแปลงไฟฟ้าเท่านั้นเครื่องกลไฟฟ้าขนาดใหญ่ประเภทอื่นๆ ก็นิยมใช้การทดสอบแบบเดียวกันนี้เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เพราะว่า สะดวกรวดเร็ว ประหยัด ได้ข้อมูลที่ละเอียด ชัดเจนตามวัตถุประสงค์ทุกประการ โดยไม่จำเป็นต้องต่อกับโหลดจริงๆแต่อย่างใด

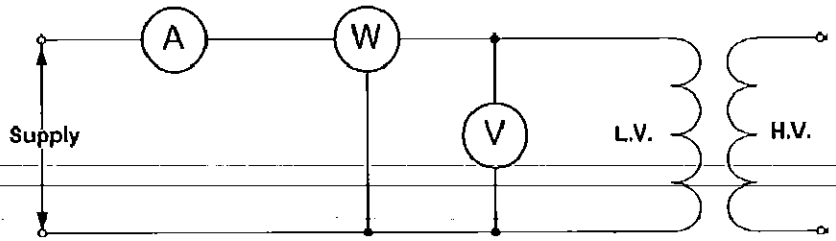
2.2.7.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีเปิดวงจร (Open circuit test หรือ No load test)

1. วัตถุประสงค์ เพื่อทดสอบหากำลังไฟฟ้ารับเข้าของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด (No load power input) หรือกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด (No load losses) หรือกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Iron loss หรือ Core loss) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนขั้วแม่เหล็กในเนื้อแกนเหล็ก

2. ลำดับขั้นตอนของการทดสอบ การทดสอบสามารถกระทำได้ทั้งด้านขดลวดไฟฟ้าแรงสูง และขดลวดไฟฟ้าแรงต่ำ แต่เพื่อความสะดวก รวดเร็ว ประหยัด และปลอดภัย จึงนิยมเปิดวงจรไว้ทางด้านขดไฟฟ้าแรงสูง (H.V.) ส่วนขดไฟฟ้าแรงต่ำ (L.V.) ให้ต่อกับเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า กระแส และกำลังไฟฟ้า แล้วต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยให้แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าตามพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีเปิดวงจร (O.C. Test) [2]



รูปที่ 2.12 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีเปิดวงจร (O.C. Test) [2]

ขณะทำการทดสอบให้ค่อยๆปรับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าไปเรื่อยๆ หลายระดับ จนกระทั่งได้แรงดันไฟฟ้าตามพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า แล้วบันทึกค่าที่อ่านได้จากมิเตอร์แต่ละตัว

3. การคำนวณค่าต่างๆจากการทดสอบ

- กำลังไฟฟ้ารับเข้าขณะไม่มีโหลด (No-load power input) : P_o ก็คือกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กเนื่องจาก Hysteresis และ Eddy current loss นั่นเองซึ่งสามารถคำนวนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P_0 = V_1 I_0 \tag{2.38}$$

$$P_0 = V_1 I_n \cos\theta_n \tag{2.49}$$

$$P_0 = I_0^2 R_0 \tag{2.40}$$

$$P_0 = \frac{V_1^2}{R_0} \tag{2.41}$$

- กระแสไม่มีโหลด เป็นกระแสที่ใช้ไปเพื่อให้กำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กภายในแกนเหล็กและใช้ไปเพื่อการสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งสามารถคำนวนได้ตามสมการต่อไปนี้

$$I_0 = I_n \cos\theta_n \tag{2.42}$$

$$I_m = I_n \sin\theta_n \tag{2.43}$$

$$I_n = \sqrt{I_0^2 + I_m^2} \tag{2.44}$$

- อิมพีแดนซ์ของแกนเหล็ก ซึ่งสามารถคำนวนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R_0 = \frac{V_1}{I_0} \tag{2.45}$$

$$X_m = \frac{V_1}{I_m} \tag{2.46}$$

$$Z_n = \frac{V_1}{I_n} \tag{2.47}$$

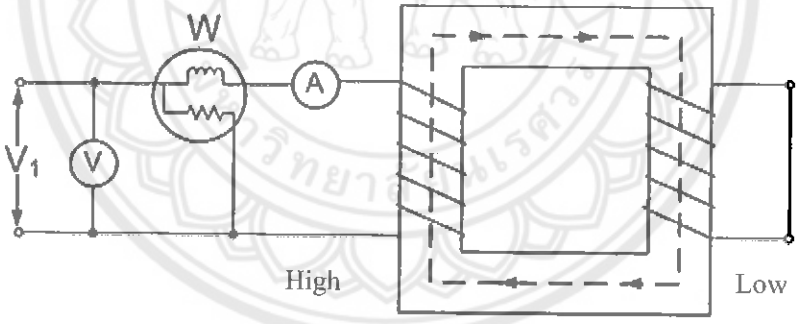
- เพาเวอร์แฟกเตอร์ สามารถคำนวนได้ดังสมการที่ (2.48)

$$\cos\theta_n = \frac{Z_n}{R_0} \tag{2.48}$$

2.2.7.2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีลัดวงจร (Short circuit test หรือ Impedance Test)

1. วัตถุประสงค์ เพื่อทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในเนื้อทองแดงของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 2 ชุด (Power copper loss : P_{Cu}) ขณะจ่ายโหลด ตลอดจนหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้แก่ อิมพีแดนซ์ ความต้านทาน และรีแอกแตนซ์ในเทอมของทั้งขดปฐมภูมิหรือขดทุติยภูมิ

2. ลำดับขั้นตอนของการทดสอบ การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีลัดวงจร สามารถกระทำได้ทั้งด้านไฟฟ้าแรงสูง และด้านไฟฟ้าแรงต่ำ แต่เพื่อให้ง่าย สะดวก รวดเร็ว ประหยัด นิยมต่อลัดวงจรทางด้านไฟฟ้าแรงต่ำ (L.V) แล้ววัดค่าต่างๆ ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง (H.V.)



รูปที่ 2.13 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีลัดวงจร (S.C. Test) [2]

ให้ปรับค่าแรงดันไฟฟ้า V_1 ไปเรื่อยๆประมาณ 5-10 % ของแรงดันไฟฟ้าปกติ สิ้นสุดจนกระทั่งวัดกระแสได้ตามโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านแรงสูง แล้วบันทึกค่าที่อ่านได้จากมิเตอร์แต่ละตัว

3. การคำนวณค่าต่างๆจากการทดสอบ ค่าต่างๆที่คำนวณได้จากการทดสอบ ขณะนี้เป็นค่าเทียบเท่าของหม้อแปลงไฟฟ้าในเทอมของขดลวดไฟฟ้าแรงสูง กำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในเนื้อทองแดงของขดลวดทั้งสองชุด ซึ่งแสดงดังสมการต่อไปนี้

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

วศ.
จ215ค
2551
ค.2
15007264

$$P_{cu} = I_{sc}^2 R_{eh} \quad (2.49)$$

$$Z_{eh} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (2.50)$$

$$X_{eh} = \sqrt{Z_{eh}^2 + R_{eh}^2} \quad (2.51)$$

เมื่อ R_{eh} = ความต้านทานรวมในเทอมของขดลวดไฟฟ้าแรงสูง (Ω)

X_{eh} = รีแอกแตนซ์รวมในเทอมของขดลวดไฟฟ้าแรงสูง (Ω)

Z_{eh} = อิมพีแดนซ์รวมในเทอมของขดลวดไฟฟ้าแรงสูง (Ω)

ถ้าจะโอนถ่ายค่าต่างๆจากฝั่งขดลวดแรงสูงไปยังฝั่งขดลวดแรงต่ำทำได้โดยใช้ อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นตัวคิด

$$Z_{eh} = a^2 \times Z_{el} \quad (2.52)$$

บทที่ 3
การสร้างอุปกรณ์

โครงงานในส่วนนี้จะมีการสร้างอุปกรณ์หลักได้แก่

1. หม้อแปลง
2. ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า
3. ถ้วยทดสอบ

อุปกรณ์แต่ละชิ้นจะทำงานสัมพันธ์กันคือ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดปรับแรงดันไฟฟ้า แล้วกดสวิตซ์เริ่มทำงานแรงดันไฟฟ้าขาออกจากชุดปรับแรงดันไฟฟ้าจะค่อยๆเพิ่มขึ้นและจ่ายเป็นแรงดันไฟฟ้าขาเข้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงไฟฟ้าจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นด้วย แรงดันไฟฟ้าในส่วนนี้จะถูกส่งไปยังอิเล็กโทรดในถ้วยทดสอบจนทำให้อิเล็กโทรดเกิดการเบรกดาวน์ อุปกรณ์ตัดวงจรจะตัดวงจรทันที จากนั้นอุปกรณ์ทุกอย่างจะกลับสถานะตัวเองเป็นแบบเริ่มต้นอีกครั้ง เพื่อเตรียมพร้อมที่จะทำการทดสอบในครั้งต่อไป

3.1 การสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า

โครงงานนี้ได้ดำเนินการการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าตามขั้นตอนดังนี้

1. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า
2. การพันขดลวดทองแดงของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

3.1.1 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

จะใช้กฎของฟาราเดย์ ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า โดยจะใช้สมการที่ (2.8) และ (2.9) ซึ่งเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$E = 4.44fNBA \tag{3.1}$$

โครงงานนี้ได้กำหนด ระดับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าไว้ที่ 230 V และระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 80 kV ความถี่ใช้งานอยู่ที่ 50 Hz จากนั้นคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิโดยต้องคำนึงถึงขนาดของแกนเหล็ก และบ๊อบบิ้นของหม้อแปลงไฟฟ้า

โครงงานนี้กำหนดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดไว้ที่ 1 เทสลา เพื่อป้องกันการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ส่วนพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กกำหนดไว้ที่ 0.0075 cm^2

3.1.2. การคำนวณจำนวนขดลวด

จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิ (N_P) และจำนวนรอบขดลวดด้านทุติยภูมิ (N_S) คำนวณได้จากสมการ 3.1 โดยถือว่าค่าความสูญเสียแกนเหล็กน้อยมากจนไม่ต้องนำมาพิจารณา

$$N_P = \frac{230}{4.44 \times 50 \times 1 \times 0.0075} = 139 \text{ รอบ}$$

โครงงานนี้ขดลวดทุติยภูมิถูกแบ่งออกเป็น 3 ขด ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าแต่ละขดมีค่าเท่ากับ $\frac{80000}{3} = 26700$ V จะได้จำนวนรอบ

$$N_S = \frac{26700}{4.44 \times 50 \times 1 \times 0.0075} = 16040 \text{ รอบ}$$

3.1.3 การเลือกขนาดของขดลวด

จากพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าคือ 500 VA ปริมาณกระแสไฟฟ้าหาได้จากสมการที่ (2.3) เมื่อด้านปฐมภูมิมีค่า

$$S = 500 \text{ VA}$$

$$V_1 = 230 \text{ V}$$

แทนค่า $500 = \frac{230}{I_1}$

ได้กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ $I_1 = 2.17\text{A}$

คำนวณค่ากระแสอินรัชไว้ 6 เท่าของกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิจะได้ $6 \times 2.17 = 13.02\text{A}$

เมื่อด้านทุติยภูมิมีค่า

$$S = 500$$

$$V_2 = 80000 \text{ V}$$

แทนค่า $500 = \frac{80000}{I_2}$

ได้กระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ $I_2 = 6.25 \text{ mA}$

คำนวณค่ากระแสอินรัชไว้ 8 เท่าของกระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิจะได้ $8 \times 6.25 = 50 \text{ mA}$

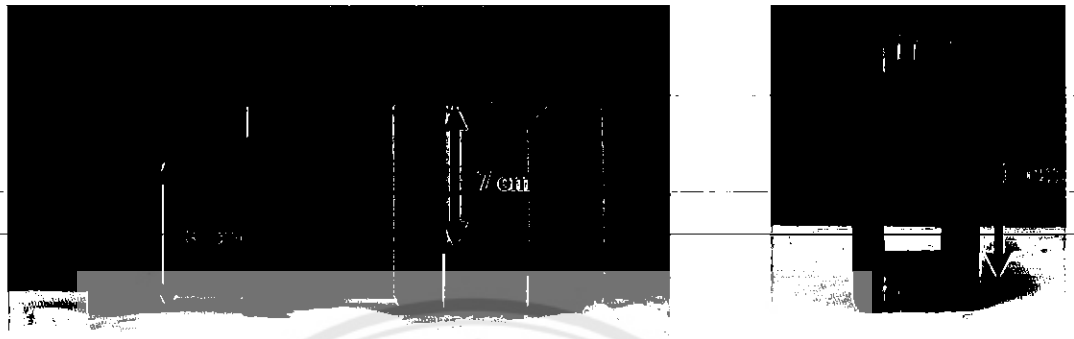
ใช้มาตรฐานของขดลวดชนิด S.W.G ในการเลือกขดลวดจะได้

ด้านทุติยภูมิใช้ขดลวด S.W.G 37 สามารถทนกระแสได้ 57 mA มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.173 mm

ด้านปฐมภูมิใช้ขดลวด S.W.G 13 สามารถทนกระแสได้ 12 A มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 2.337 mm

3.1.4 ขั้นตอนการพันขดลวดหม้อแปลง

1. ตัดบ๊อบบิ้น ขนาดความยาว 10 cm ออกเป็นความยาว 8 cm และ 7 cm ดังรูปที่ 3.1 (ก) แล้วนำมาประกอบกันจะได้ความยาว 15 cm ดังรูปที่ 3.1 (ข)



(ก) (ข)

รูปที่ 3.1 (ก) บ๊อบบิ้นขนาด 8 cm และ 7 cm, (ข) บ๊อบบิ้นขนาด 15 cm

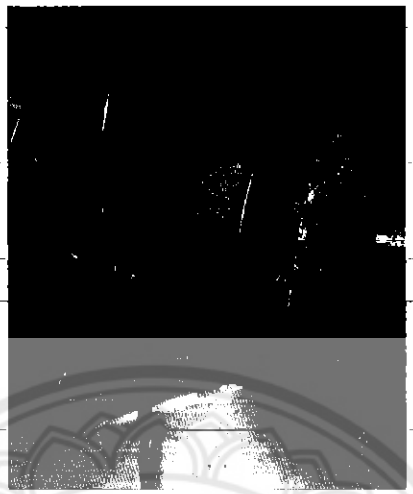
2. นำบ๊อบบิ้นที่ได้ใส่เครื่องพันหม้อแปลงไฟฟ้า แล้วห่อด้วยกระดาษฉนวนเพื่อรองพื้นเป็นฉนวนชั้นแรกดังรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 บ๊อบบิ้นที่รองพื้นด้วยกระดาษฉนวนชั้นแรก

3. เริ่มพันขดลวดชั้นแรก โดยเริ่มที่ขดลวดปฐมภูมิก่อน การนับรอบจะนับเมื่อพันขดลวดมาถึงตำแหน่งที่เริ่มพัน

4. พันจนครบ 1 ชั้นตามที่ได้คำนวณจำนวนรอบไว้ โดยพันขดลวดแบบเรียงชิดติดกัน

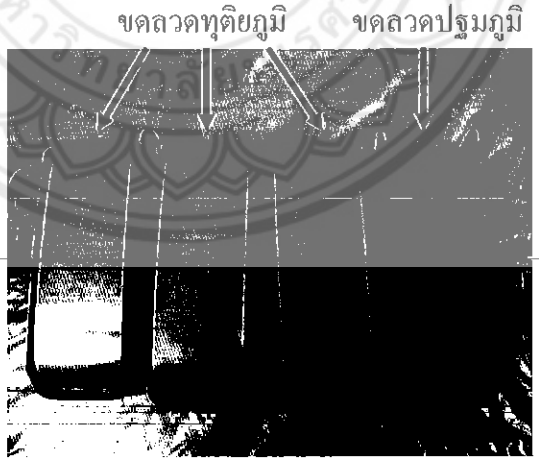
5. เมื่อพันจนครบ 1 ชั้น ต้องมีการเริ่มพันชั้นใหม่ โดยไล่ความชื้นในชั้นเดิมแล้วห่อด้วยกระดาษฉนวนทับชั้นเดิมเพื่อเป็นฉนวนรองระหว่างชั้นดังรูปที่ 3.3 แล้วเริ่มพันชั้นต่อไป



รูปที่ 3.3 บ็อบบิ้นที่ห่อกระดาษฉนวนทับชั้นเดิม

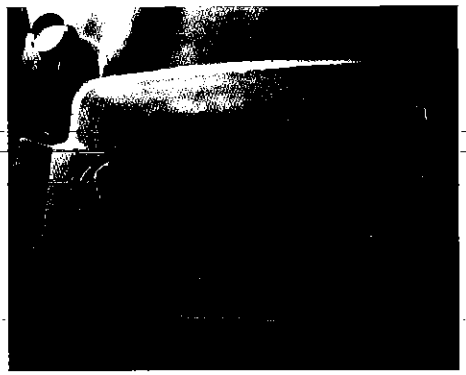
6. เมื่อพันจนได้ตามจำนวนรอบที่ต้องการ ให้ห่อด้วยไมก้าฟิล์ม 3 ชั้นเป็นชั้นสุดท้าย

7. เมื่อพันขดลวดปฐมภูมิเสร็จ ต่อไปพันขดลวดทุติยภูมิต่อ ซึ่งหลักการพันเป็นแบบเดียวกันกับขดลวดปฐมภูมิจะได้ขดลวดทั้งหมดดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขดลวดปฐมภูมิจำนวน 1 ขดและขดลวดทุติยภูมิจำนวน 3 ขด

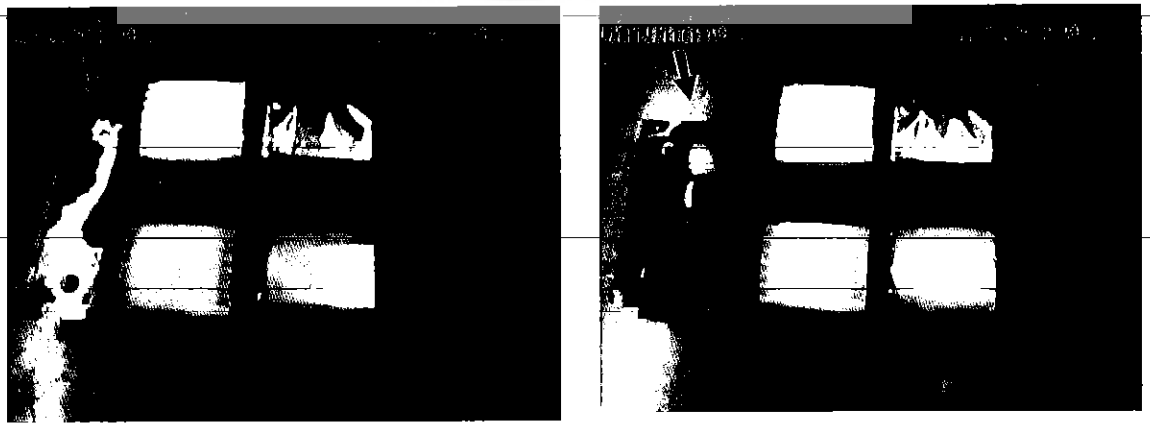
8. นำขดลวดมาอาบน้ำยาวานิช ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาทีดังรูปที่ 3.5 จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้ง



รูปที่ 3.5 ขดลวดอาบน้ำยาวานิช

9. นำขดลวดที่อาบน้ำยาวานิชเสร็จมาใส่แกนเหล็ก โดยแกนเหล็กที่ใช้เป็นแบบชนิด U-I ดังรูปที่ 3.6 การใส่แกนเหล็กจะใส่แบบสลับกันในแต่ละชั้นระหว่างแกนเหล็กตัว U กับแกนเหล็กตัว I ดังรูปที่ 3.7 (ก) และ (ข)

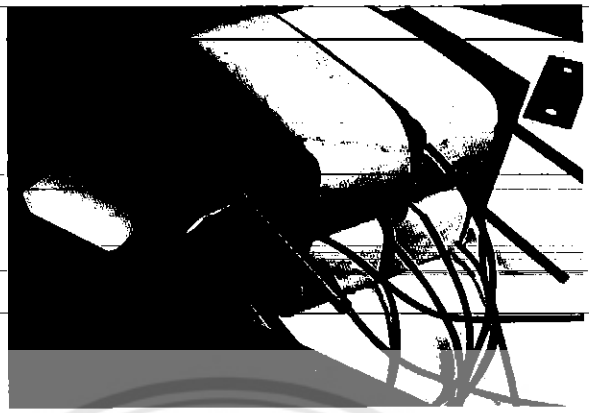
รูปที่ 3.6 แกนเหล็กชนิด U-I Silicon Steel Sheet



(ก) (ข)

รูปที่ 3.7 (ก) ใส่แกนเหล็กตัว U ทางด้านขวา,(ข) ใส่แกนเหล็กแกนเหล็กตัว U ทางด้านซ้าย

10. ใส่แกนเหล็กให้เต็มบ๊อบบิ้นหรือให้ได้ความสูง 15 cm แล้วยึดแกนเหล็กด้วยน็อตดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การยึดแกนเหล็กเข้าด้วยกันด้วยน็อต

รูปที่ 3.9 หม้อแปลงไฟฟ้า

3.2 การสร้างชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

3.2.1 การออกแบบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

ตามมาตรฐาน ASTM D877 ต้องการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้น 3 kV/S ± 20 % จึงเลือกออกแบบใช้อุปกรณ์คือ หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ได้เป็นอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้มอเตอร์เป็นตัวหมุนหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ได้และใช้เฟืองโซ่เป็นตัวทดรอบความเร็วระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้กับมอเตอร์ให้ได้ความเร็วรอบตามที่ต้องการ มอเตอร์ที่เลือกใช้ เป็นมอเตอร์ชนิด มอเตอร์เกียร์ มีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 220 V ความถี่ 50 Hz มีพิกัดกำลัง 0.5 แรงม้า ความเร็วรอบ 7 รอบต่อนาที และหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้มีแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 230 V แรงดันไฟฟ้าขาออก 300 V มีพิกัดกำลัง 1 kVA

3.2.2 การเลือกเฟืองทดรอบ

ความเร็วของหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ได้ที่ต้องการคือประมาณ 2.2 รอบต่อนาที เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้มีความเร็วรอบเป็น 7 รอบต่อนาที ดังนั้นจึงต้องใช้เฟืองที่มอเตอร์ให้มีจำนวนฟันเป็น 24 ฟัน และเฟืองที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ให้มีจำนวนฟันเป็น 60 ฟัน การคำนวณความเร็วรอบเฟืองตรง [3] สามารถหาได้ดังนี้

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{N_2}{N_1} \tag{3.2}$$

เมื่อ n_1 = ความเร็วรอบของมอเตอร์ (รอบต่อนาที)

n_2 = ความเร็วรอบของหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ (รอบต่อนาที)

N_1 = จำนวนฟันเฟืองที่มอเตอร์ (ฟัน)

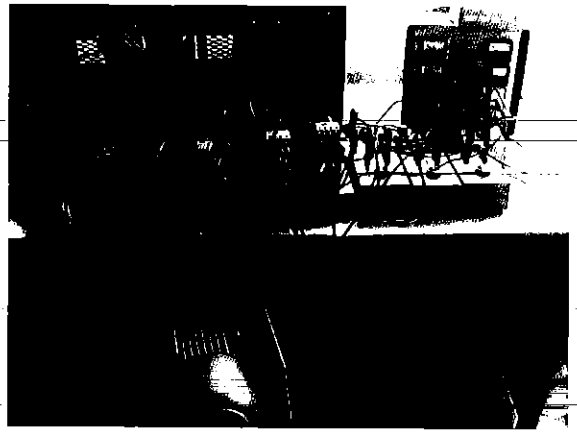
N_2 = จำนวนฟันเฟืองที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ได้ (ฟัน)

แทนค่าในสมการที่ (3.2) ได้ความเร็วรอบที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เป็น $n_2 = 2.8$ ซึ่งใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้ (2.2 รอบต่อนาที) ซึ่งชุดปรับแรงดันไฟฟ้าและชุดเฟืองโซ่ที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 3.10

รูปที่ 3.10 ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

3.2.3 การออกแบบวงจรควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

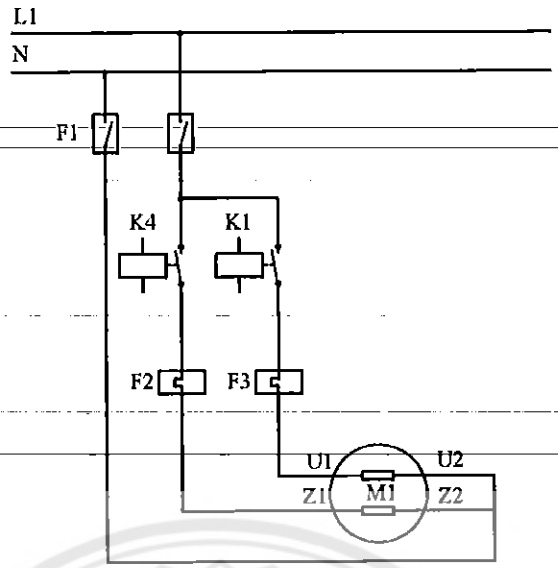
ทำการออกแบบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า แล้วทดลองต่อใช้เพื่อดูว่าได้ผลตามที่ได้ออกแบบหรือไม่ ดังรูปที่ 3.11 จากการออกแบบได้วงจรที่จะนำไปใช้ดังรูปที่ 3.12 และ 3.13 ซึ่งมีอุปกรณ์ต่างๆดังตารางที่ 3.1



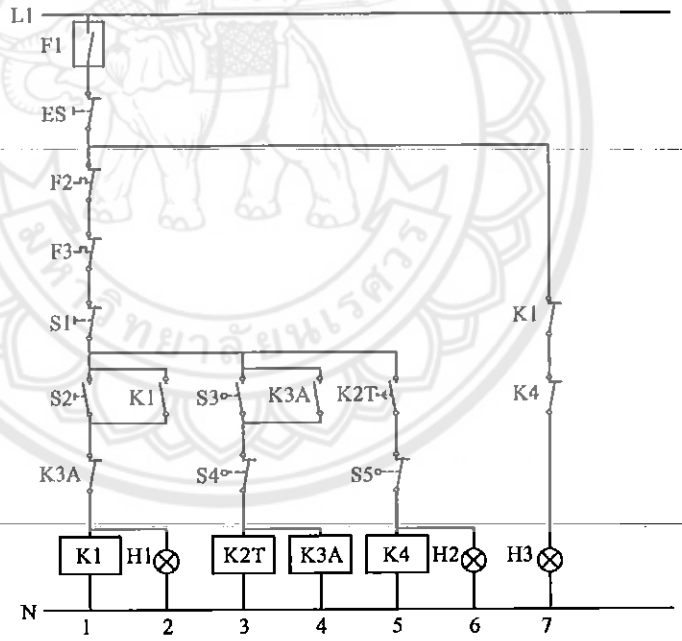
รูปที่ 3.11 ทดลองวงจรต้นแบบสำหรับการควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์และอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในวงจรควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

สัญลักษณ์	อุปกรณ์
F1	Circuit break
F2	Overload relay 1
F3	Overload relay 2
S1	Push button switch "STOP"
S2	Push button switch "START"
S3	Limit switch "RESTART"
S4	Limit switch "STOP1"
S5	Limit switch "STOP2"
ES	Emergency switch
K1	Forward contactor
K2T	Time delay relay
K3A	Auxiliary relay
K4	Reverse contactor
H1	Start lamp
H2	Restart lamp
H3	Stop lamp
M1	Motor gear



รูปที่ 3.12 วงจรกำลังที่ใช้ในการควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.13 วงจรควบคุมที่ใช้ในการควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

รูปที่ 3.14 วงจรที่ใช้ในการควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

วงจรที่ใช้ในการควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้าที่เสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 3.14 และลำดับขั้นการทำงานของวงจรตามรูปที่ 3.12 และ 3.13 อธิบายได้ว่า

1. เมื่อจ่ายไฟให้กลับวงจร มอเตอร์จะยังไม่ทำงาน H3 จะติด

2. เมื่อกด S2 จะทำให้คอนแทคเตอร์ K1 ทำงาน คอนแทคปกติเปิดของ K1 ในแถว 2 จะต่อวงจรอินเตอร์ ล็อกให้วงจรแถว 1 มอเตอร์จะหมุนทำให้ชุดปรับแรงดันไฟฟ้าหมุน คอนแทคปกติปิดของ K1 ในแถว 7 จะเปิดวงจร H3 จะดับและ H1 จะติด แรงดันไฟฟ้าจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนเกิดการเบรกดาวน์ แต่มอเตอร์ก็ยังคงหมุนต่อไป

3. มอเตอร์นั้นจะหมุนไปจนถึงแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ได้ที่กำหนดไว้ซึ่งมีค่าประมาณ 230 VAC เฟืองโซ่ที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ได้จะไปแตะ S3 ทำให้ K2T ทำงานเริ่มนับเวลาและ K3A ทำงาน คอนแทคปกติเปิดของ K3A ในแถว 4 จะต่อวงจรอินเตอร์ล็อกให้วงจรแถว 3 และคอนแทคปกติปิดของ K3A ในแถว 1 จะเปิดวงจร คอนแทคเตอร์ K1 จึงหยุดทำงาน

4. เมื่อ K2T นับจนถึงเวลาทำงานที่ตั้งไว้คือ 1 วินาที คอนแทคปกติเปิดของ K2T ในแถว 5 จะต่อวงจรในแถว 5 ทำให้คอนแทคเตอร์ K4 ทำงาน มอเตอร์จะหมุนกลับทางไปยังจุดเริ่มต้นหมุนหรือจุดที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ได้มีค่าเป็น 0 นั้นเองและ H2 จะติด

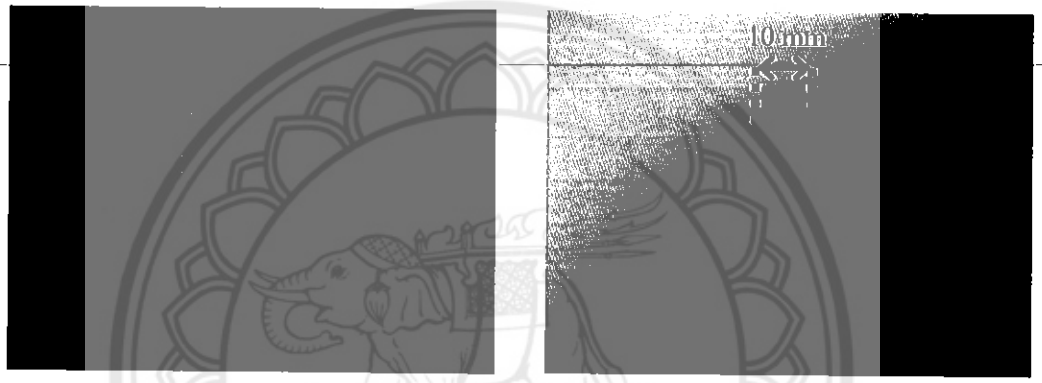
5. มอเตอร์จะหมุนกลับทางไปยังจุดเริ่มต้น ทำให้เฟืองโซ่ที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ได้จะไปแตะ S4 และ S5 ทำให้ K2T, K3A และ K4 หยุดทำงาน คอนแทคปกติปิดของ K1 และ K4 ในแถว 7 จะปิดทำให้ H3 ติด มอเตอร์จะหยุดทำงานและเตรียมพร้อมที่จะเริ่มทำงานในครั้งต่อไป

3.3 การสร้างชุดถ้วยทดสอบ

ชุดถ้วยทดสอบจะประกอบไปด้วยอิเล็กโทรด และถ้วยทดสอบ ซึ่งการออกแบบจะต้องออกแบบให้สอดคล้องกับมาตราฐานที่อ้างอิงนั้นคือ มาตรฐานการทดสอบ ASTM D877

3.3.1 การออกแบบอิเล็กโทรด

ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM D877 อิเล็กโทรดจะต้องทำด้วยทองเหลืองผิวมันเรียบ ลักษณะแบบจานกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm (1 in) ความหนาอย่างน้อย 3 mm (1/8 in) มุมของขอบอิเล็กโทรด เป็นเหลี่ยมตัดฉาก จึงออกแบบให้อิเล็กโทรดมีเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 25 mm และมีความหนา 10 mm ดังรูปที่ 3.15



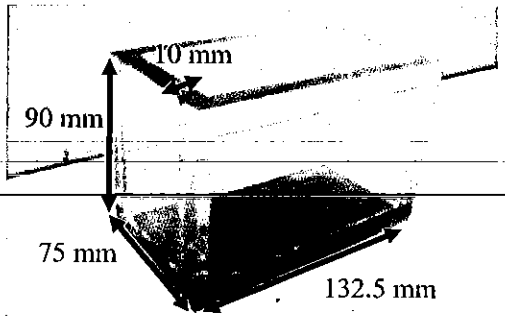
(ก) (ข)

รูปที่ 3.15 (ก) อิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm (ข) อิเล็กโทรดหนา 10 mm

3.3.2 การออกแบบถ้วยทดสอบ

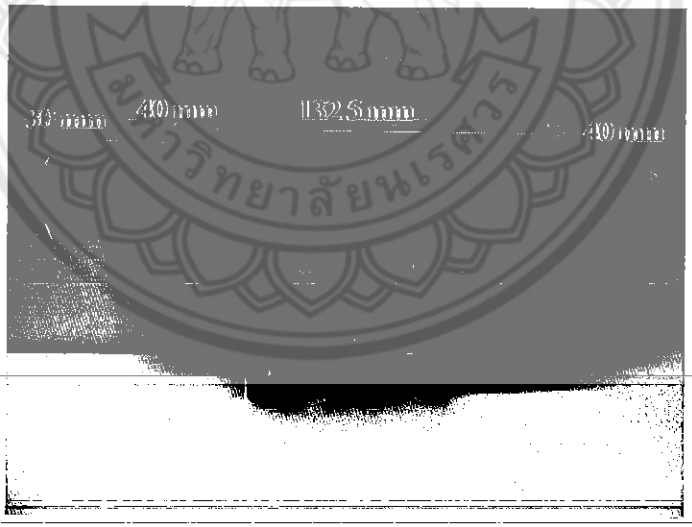
ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM D877 ถ้วยทดสอบต้องทำจากวัสดุที่มีค่าความคงทนของฉนวนสูง อิเล็กโทรดต้องห่างจากส่วนใดๆของถ้วยทดสอบไม่น้อยกว่า 13 mm (1/2 in) ความสูงของถ้วยทดสอบประมาณ 33 mm (1.25 in) จากขอบบนสุดของอิเล็กโทรด การออกแบบจะแบ่งตัวถ้วยทดสอบออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งสามารถถอดแยกจากกันได้เพื่อสะดวกในการทดสอบและทำความสะอาด ประกอบด้วย

1. ถ้วยทดสอบ ใช้อะคริลิคเป็นวัสดุในการทำ เนื่องจากอะครลิคขนาด 24 in^3 สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงถึง 2.2 MVA [4] ดังนั้นที่แรงดันไฟฟ้า 80 kV จะต้องออกแบบให้อะคริลิคมีขนาดอย่างน้อยสุดคือ $\frac{80000 \times 24}{2200000} = 0.8727$ in^3 โครงงานนี้จึงออกแบบให้ถ้วยทดสอบมีขนาดมีความหนา 10 mm และมีความยาว 132.5 mm ความกว้าง 75 mm ความสูง 90 mm เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรา ASTM D877 ดังรูปที่ 3.16

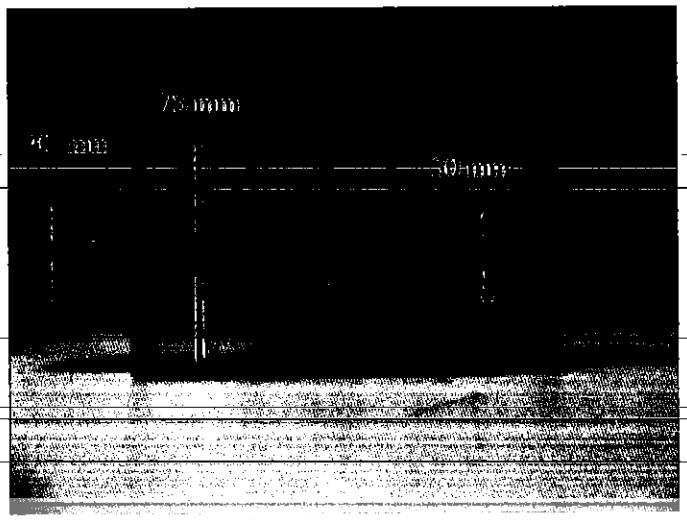


รูปที่ 3.16 ถ้วยทดสอบตามขนาดที่ออกแบบ

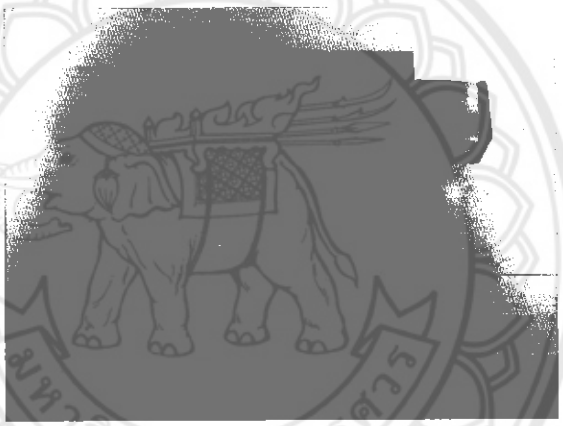
2. ฝาปิดถ้วยทดสอบ ใช้อะคริลิคเป็นวัสดุในการทำเช่นกัน ในส่วนนี้จะยึดติดกับตัวนำแท่งทองแดงและอิเล็กโทรดเพื่อต้องการให้อะคริลิคเป็นฉนวนให้กับตัวนำแท่งทองแดง โดยออกแบบให้มีขนาดความหนาวัดจากผิวตัวนำแท่งทองแดง 10 mm จึงได้ขนาดฝาปิดถ้วยทดสอบดังรูปที่ 3.17 และ 3.18 ตัวอิเล็กโทรดนั้นสามารถถอดออกจากตัวนำแท่งทองแดงได้ดังรูปที่ 3.19 เพื่อความสะดวกในการทำความสะอาดหรือต้องการเปลี่ยนอิเล็กโทรดเมื่อเกิดการชำรุด ตัวฝาปิดถ้วยทดสอบต้องออกแบบให้สอดคล้องกับตัวถ้วยทดสอบเพื่อต้องการให้ตัวฝาปิดถ้วยทดสอบปิดสนิทพอดีกับตัวถ้วยทดสอบ



รูปที่ 3.17 ฝาปิดถ้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านหน้า

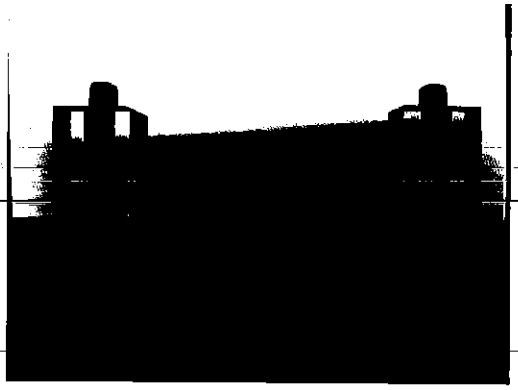


รูปที่ 3.18 ฝาปิดถ้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านบน



รูปที่ 3.19 ฝาปิดถ้วยทดสอบและอิเล็กโทรดที่ถอดออกจากแท่งตัวนำทองแดง

3. แท่งตัวนำจากหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับชุดถ้วยทดสอบทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้า ไปยังชุดถ้วยทดสอบ การออกแบบจะใช้ตัวนำเป็นแท่งทองแดงฝังอยู่ในเนื้ออะคริลิคเพื่อต้องการให้อะคริลิคเป็นฉนวนให้กับตัวนำทองแดง โดยออกแบบให้มีขนาดความหนาวัดจากผิวตัวนำแท่งทองแดง 10 mm เช่นเดียวกันกับฝาปิดถ้วยทดสอบดังรูปที่ 3.20

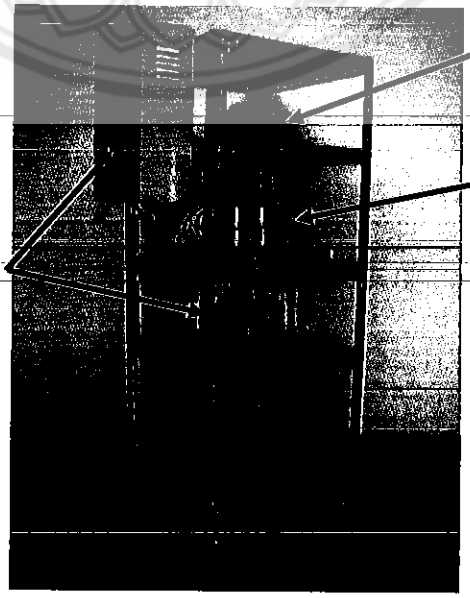


รูปที่ 3.20 แท่งตัวนำจากหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้นเสร็จ ให้นำมาประกอบกันดังรูปที่ 3.21

รูปที่ 3.21 ชุดถ้วยทดสอบที่นำมาประกอบกัน

เมื่ออุปกรณ์เสร็จทุกชิ้น ให้นำมาประกอบรวมกันดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 เครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าและการการทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าและชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

4.1 การทดลอง

4.1.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

1. Voltage ratio test

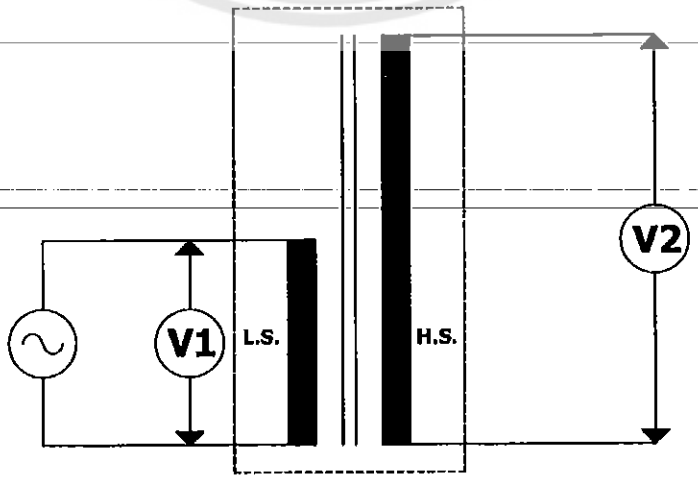
เป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาว่า หม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนั้นมีแรงดันไฟฟ้าขาออกถูกต้องตามอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบไว้หรือไม่

อุปกรณ์ที่ใช้

1. หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ โดยสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง 300 V
2. Multimeter 2 ตัว

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อวงจร Voltage ratio test ดังรูปที่ 4.1
2. ปรับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทีละ 10 V
3. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า V_1 และ V_2 ที่อ่านได้จาก Multimeter
4. ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจนถึงพิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ คือ 230 V



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบ Voltage ratio test

2. Polarity test

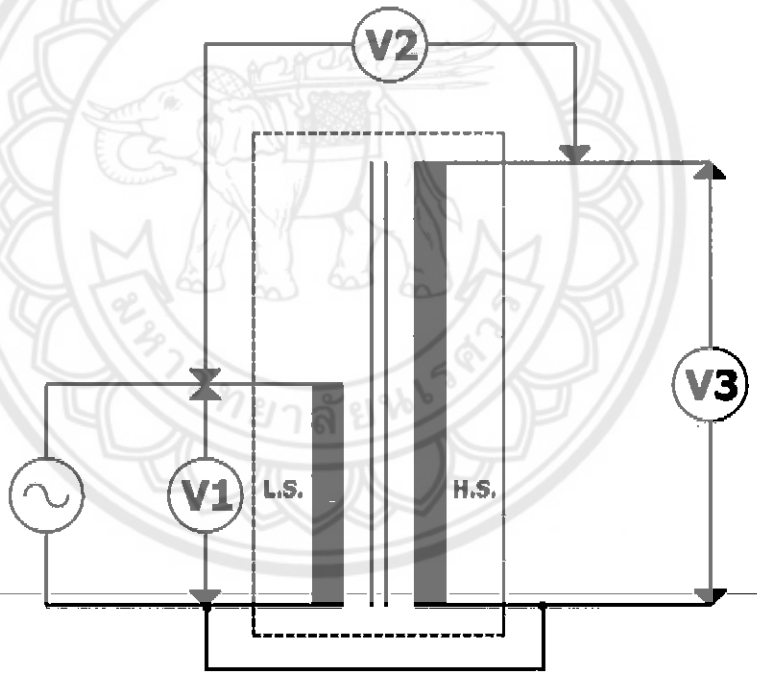
เป็นการทดสอบเพื่อหาขั้วของหม้อแปลง ทำได้โดยการวัดแรงดันไฟฟ้า 3 จุดดังรูปที่ 4.2 ถ้าวัดแรงดันไฟฟ้า V_2 ได้มากกว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ($V_2 = V_1 + V_3$) จะได้ขั้วบวก ถ้าวัดแรงดันไฟฟ้า V_2 ได้น้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ($V_2 = V_1 - V_3$) จะได้ขั้วลบ

อุปกรณ์ที่ใช้

1. หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ โดยสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง 300 V
2. Multimeter 3 ตัว

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อวงจร Polarity test ดังรูปที่ 4.2
2. ป้อนแรงดันไฟฟ้าขาเข้าพอสมควร
3. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า V_1, V_2 และ V_3 ที่อ่านได้จาก Multimeter



รูปที่ 4.2 วงจรการทดสอบ Polarity test

3. Open circuit test

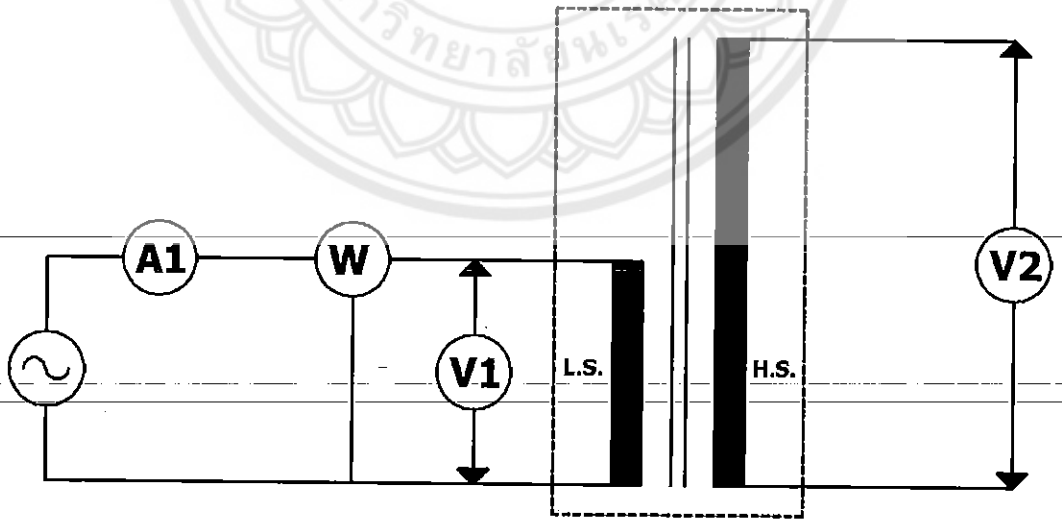
เป็นการเพื่อทดสอบหากำลังไฟฟ้ารับเข้าของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด (No load power input) หรือกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด (No load losses) หรือกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Iron loss หรือ Core loss) ซึ่งการทดสอบสามารถกระทำได้ทั้งด้านขดลวดไฟฟ้าแรงสูงและขดลวดไฟฟ้าแรงต่ำ แต่เพื่อความสะดวก รวดเร็ว ประหยัด และปลอดภัย จึงนิยมเปิดวงจรไว้ทางด้านขดไฟฟ้าแรงสูง (H.V.) ส่วนขดไฟฟ้าแรงต่ำ (L.V.) ให้ต่อกับเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้ากระแส และกำลังไฟฟ้า แล้วต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยให้แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าตามพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ใช้

1. หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ โดยสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง 300 V
2. Multimeter 3 ตัว
3. Wattmeter 1 ตัว

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อวงจร Open circuit test ดังรูปที่ 4.3
2. ปรับแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ไปจนมิเตอร์ V_1 ให้ถึงแรงดันไฟฟ้าพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า คือ 230 V
3. บันทึกค่า V_1, V_2, A_1 และ W ที่ได้จาก Multimeter ทั้ง 3 ตัว และจาก Wattmeter



รูปที่ 4.3 วงจรการทดสอบ Open circuit test

4. Short circuit test

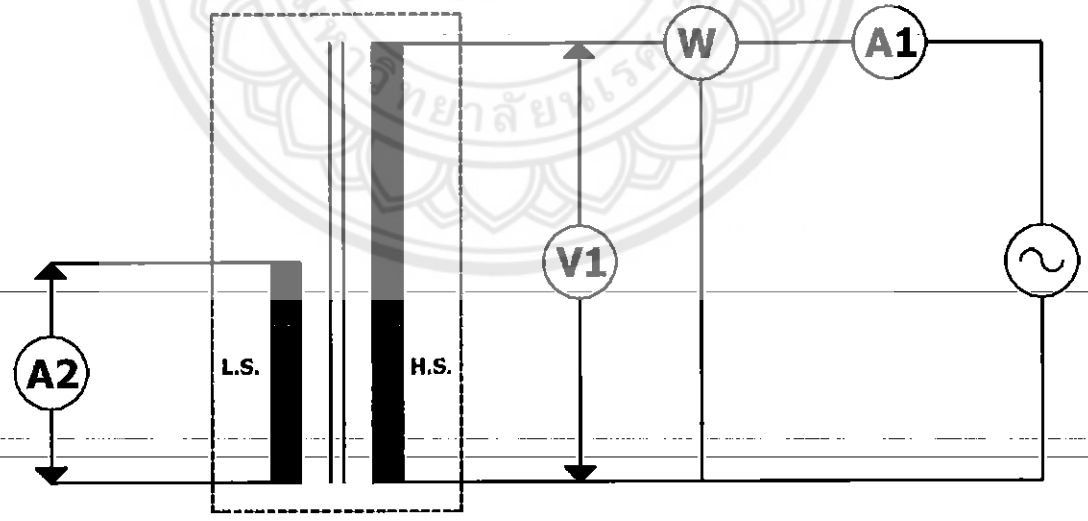
เป็นการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในเนื้อทองแดงของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 2 ชุด (Power copper loss) ขณะจ่ายโหลด ตลอดจนหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้แก่ อิมพีแดนซ์ ความต้านทาน และรีแอกแตนซ์ในเทอมของทั้งขดปฐมภูมิ หรือขดทุติยภูมิซึ่งการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีลัดวงจร สามารถกระทำได้ทั้งด้านไฟฟ้าแรงสูง และด้านไฟฟ้าแรงต่ำ แต่เพื่อให้ง่าย สะดวก รวดเร็ว ประหยัด นิยมต่อลัดวงจรทางด้านไฟฟ้าแรงต่อ (L.V.) แล้ววัดค่าต่างๆทางด้านไฟฟ้าแรงสูง (H.V.)

อุปกรณ์ที่ใช้

1. หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ โดยสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง 300 V
2. Multimeter 3 ตัว
3. Wattmeter 1 ตัว

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อวงจร Short circuit test ดังรูปที่ 4.4
2. ปรับแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ไปจนมิเตอร์ A_1 อ่านค่าได้กระแสพิกัดของชุดขดลวดแรงต่ำ
4. บันทึกค่า V_1, V_2, A_1 และ W ที่ได้จาก Multimeter ทั้ง 3 ตัว และจาก Wattmeter



รูปที่ 4.4 วงจรการทดสอบ Short circuit test

4.1.2 การทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

เป็นการทอสอบเพื่อพิจารณาว่า ชุดปรับแรงดันไฟฟ้าสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตามมาตรฐาน ASTM D877-87 หรือไม่ โดยมาตรฐานได้กล่าวไว้ว่า ให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากศูนย์และค่อยๆเพิ่มไปในอัตรา 3 kV/S ± 20 %

อุปกรณ์ที่ใช้

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 230 V 1 ชุด
2. Multimeter 1 ตัว

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดปรับแรงดันไฟฟ้า และใช้ Multimeter วัดแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดปรับแรงดันไฟฟ้า
2. กดปุ่มเริ่มทำงานของชุดปรับแรงดันไฟฟ้าให้ชุดปรับแรงดันไฟฟ้าเริ่มทำงาน
3. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จาก Multimeter ครั้งละ 3 วินาที โดยจับเวลาตั้งแต่ชุดปรับแรงดันไฟฟ้าเริ่มทำงาน

4.2 ผลการทดลอง

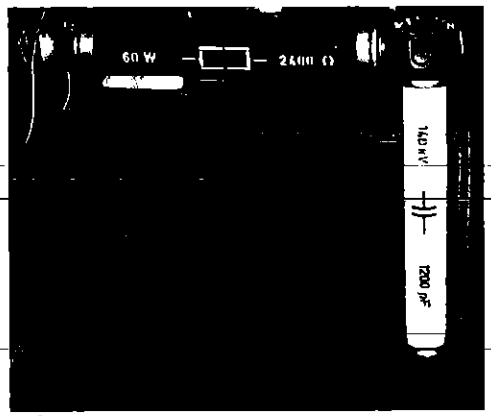
4.2.1 การทดสอบหม้อแปลง

1. Voltage ratio test

ทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี การทดสอบจะใช้โวลเตจดิไวเดอร์ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันไฟฟ้าสูงๆออกเป็นส่วนแรงดันไฟฟ้าต่ำพอที่จะวัดค่าออกมาได้ โดยโวลเตจดิไวเดอร์ที่ใช้จะประกอบด้วย ตัวต้านทานขนาด 2400 Ω และตัวเก็บประจุขนาด 1200 pF ดังรูปที่ 4.5 ใช้ออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า และใช้หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 80 kV ที่ต้องการทดสอบดังรูปที่ 4.6 ซึ่งผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.1 และรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าค่าออกที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.7

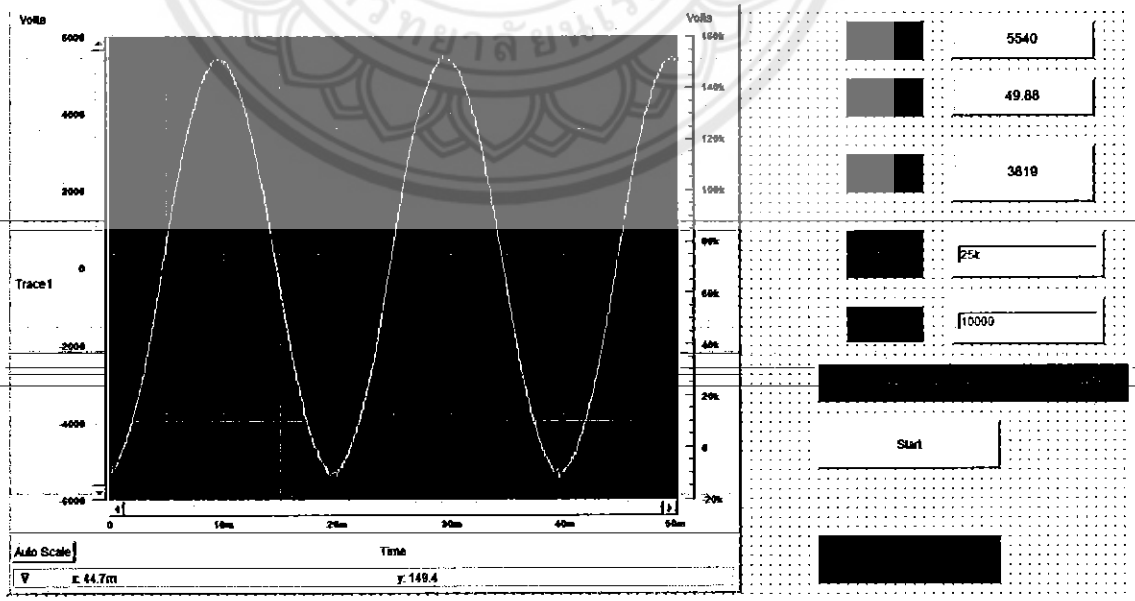
ตาราง 4.1 ผลการทดสอบ Voltage ratio test

แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V)	แรงดันไฟฟ้าขาออก RMS (V)	แรงดันไฟฟ้าสูงสุดขาออก (V)	ค่าความถี่ (Hz)
10.72	3819	5540	49.88



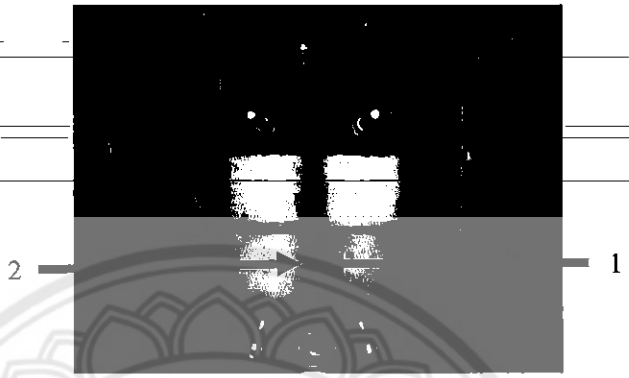
รูปที่ 4.5 โวลเตจดิไวเดอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

รูปที่ 4.6 โวลเตจดิไวเดอร์ต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 4.7 ผลการทดลอง Voltage ratio test ที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 10.51 V

หลังจากป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าไป 20 V ทำให้หม้อแปลงเกิดการลัดวงจรเนื่องจากระยะระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิตำแหน่งหมายเลข 1 และ 2 ตามลำดับดังรูปที่ 4.8 นั้นใกล้กันเกินเนื่องด้วยข้อจำกัดด้านโครงสร้าง จึงทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ ทำให้ไม่สามารถทดสอบหม้อแปลงต่อไปได้



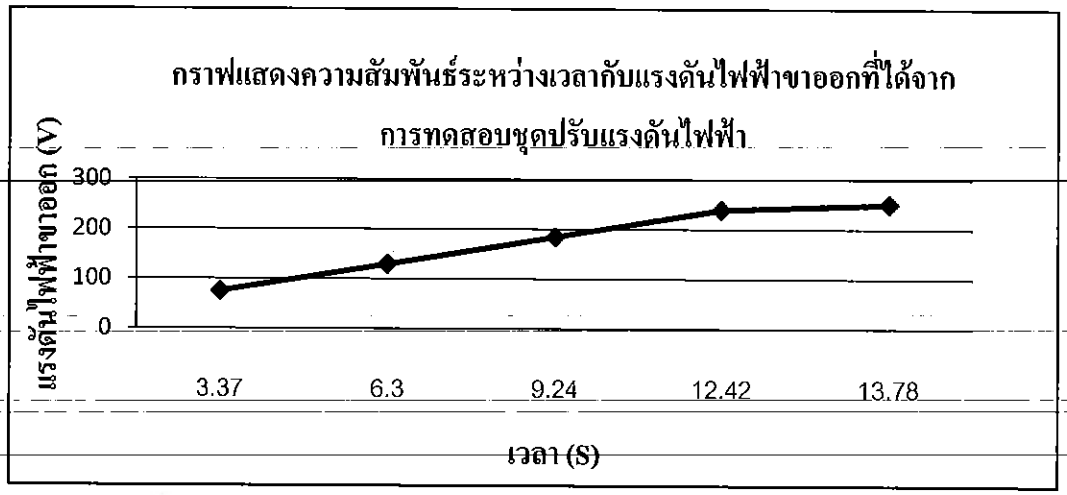
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิที่เกิดการลัดวงจร

4.2.2 ผลการทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

ทำการทดสอบโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาเข้าให้กับชุดปรับแรงดันไฟฟ้า แล้วจับเวลาการอ่านผลในแต่ละครั้งที่เวลา 3 วินาที เริ่มนับเวลาเมื่อกดสวิตซ์เริ่มทำงานของวงจรควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า แล้วอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดปรับแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลา ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2 และมีความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงดันไฟฟ้าขาออกชุดปรับแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

เวลา (s)	แรงดันไฟฟ้าขาออก (V)
3.37	75.4
6.30	129.9
9.24	184.5
12.42	239.5
13.78	250.8



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้จากการทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.3.1 Voltage ratio test

จากการทดสอบ Voltage ratio test ที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับ 10.51 V สามารถวิเคราะห์ได้ว่า

1. อัตราส่วนของหม้อแปลงใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้ จากสมการที่ (2.19) $\frac{V_1}{V_2} = a$

จากการออกแบบจะได้แรงดันไฟฟ้าค่าเข้า $(V_1) = 230$ V, แรงดันไฟฟ้าค่าออก $(V_2) = 80000$ V และ a_1 = อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ออกแบบ

ดังนั้นจะได้อัตราส่วนของหม้อแปลงที่ได้ออกแบบไว้ คือ $\frac{230}{80000} = 0.00287$

จากการทดสอบจะได้แรงดันไฟฟ้าค่าเข้า $(V_1) = 10.72$ V, แรงดันไฟฟ้าค่าออก $(V_2) = 3819$ V และ a_2 = อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าจากการทดสอบ

ดังนั้นจะได้อัตราส่วนของหม้อแปลงจากการทดสอบ คือ $\frac{10.72}{3819} = 0.0028$ จะเห็นว่า a_1 และ a_2 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.5 %

2. ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกเป็นรูปคลื่นซายน์ ตามหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเป็นลักษณะรูปคลื่นซายน์ แรงดันไฟฟ้าขาออกต้องเป็นลักษณะรูปคลื่นซายน์ด้วยเช่นกัน ซึ่งจากการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 10.72 V จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่า 3819 V และมีลักษณะของรูปคลื่นซายน์เช่นกัน (ดังรูปที่ 4.7)

3. ความถี่ขาออกใกล้เคียงกับความถี่ขาเข้า หม้อแปลงไฟฟ้าที่ดีควรมีความถี่เข้าเท่ากับความถี่ขาออก ในโครงงานนี้เมื่อทำการทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 10.72 V ที่มีความถี่ 50 Hz สามารถอ่านค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 49.88 Hz ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันกับความถี่ขาเข้า โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.0024 %

4. การลัดวงจรเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเป็น 20 V สามารถวิเคราะห์สาเหตุได้ว่าระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิไม่เพียงพอสำหรับให้อากาศเป็นฉนวน ซึ่งโดยปกติแล้ว อากาศสามารถทนแรงดันไฟฟ้าประมาณ 30 kV/cm แต่ในโครงงานนี้มีระยะระหว่างขดลวดเท่ากับ 0.5 mm ทฤษฎีการคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าชั้นฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ [5] จะได้

$$E_1 = \frac{U}{d_1 \times \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \times \frac{d_2}{d_1}\right)\right]} \tag{4.1}$$

$$E_2 = \frac{U}{d \times \left[1 + \left(\frac{d_2}{d}\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - 1\right)\right)\right]} \tag{4.2}$$

$$E_b = 24.4 + \frac{6.72}{\sqrt{d}} \tag{4.3}$$

เมื่อ U = แรงดันไฟฟ้าของตัวนำ (kV)

E_1 = ความเครียดสนามไฟฟ้าของชั้นฉนวนตัวที่ 1 (kV/cm)

E_2 = ความเครียดสนามไฟฟ้าของชั้นฉนวนตัวที่ 2 (kV/cm)

E_b = ความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศ (kV/cm)

d_1 = ระยะของฉนวนตัวที่ 1 (cm)

d_2 = ระยะของฉนวนตัวที่ 2 (cm)

ε_1 = ค่าความซึมซาบสนามไฟฟ้าของฉนวนตัวที่ 1

ε_2 = ค่าความซึมซาบสนามไฟฟ้าของฉนวนตัวที่ 2

d = ระยะของฉนวนอากาศ (cm)

เนื่องจากขณะเบรกดาวน์ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทางขดลวดปฐมภูมิ 20 V เพราะฉะนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากด้านทุติยภูมิมีค่า $\frac{20}{a_1} = 6.957$ kV

ถ้าให้ฉนวนตัวที่ 1 เป็นอากาศ และฉนวนตัวที่ 2 เป็นไมก้าฟิล์มซึ่งมีความหนาประมาณ 0.1 cm พันประมาณ 3 รอบในชั้นสุดท้าย ระยะของฉนวนอากาศ มีค่าเท่ากับ 0.05 cm ดังนั้น $d_1 = 0.05\,\text{cm}$ และ $d_2 = 3\times 0.1 = 0.3\,\text{cm}$

โดยทั่วไปแล้ว ε_1 =ค่าความซึมซาบสนามไฟฟ้าของอากาศมีค่าเท่ากับ 1 และ ε_1 =ค่าความซึมซาบสนามไฟฟ้าของไมก้าฟิล์มมีค่าเท่ากับ 4 ดังนั้น $\varepsilon_1 = 1$ และ $\varepsilon_2 = 4$

ความเครียดสนามไฟฟ้าของไมก้าฟิล์มที่แรงดันไฟฟ้า 6.957 kV หาได้จาก สมการที่ (4.2) จะได้

$$E_2 = \frac{6.957\times\sqrt{2}}{0.35\times\left[1+\left(\frac{0.3}{0.35}\left(\frac{4}{1}-1\right)\right)\right]} = 7.87\ \text{kV/cm}$$

ซึ่งโดยปกติแล้ว ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของไมก้าฟิล์ม อยู่ที่ประมาณ 170 kV/cm จึงเป็นผลให้ไม่เกิดการเบรกดาวน์ในไมก้าฟิล์ม

ความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศที่แรงดันไฟฟ้า 6.957 kV หาได้จาก สมการที่ (4.1) จะได้

$$E_1 = \frac{6.957\times\sqrt{2}}{0.05\times\left[1+\left(\frac{1}{4}\times\frac{0.3}{0.05}\right)\right]} = 78.697\ \text{kV/cm}$$

แต่ค่าความคงทนความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนของอากาศที่มีระยะเท่ากับ 0.05 cm นั้นหาได้จากสมการที่ (4.3) มีค่าเท่ากับ

$$E_b = 24.4 + \frac{6.72}{\sqrt{0.05}} = 54.45\ \text{kV/cm}$$

แสดงว่าความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนของอากาศนั้นมีค่ามากเกินกว่าที่อากาศจะรับได้ เป็นผลให้เกิดการเบรกดาวน์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ไม่สามารถทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในขั้นต่อไปได้

แนวทางแก้ไข คือใช้ขนาดของแกนเหล็กให้ใหญ่ขึ้นเพื่อทำให้ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิมีระยะห่างระหว่างกันเพียงพอสำหรับค่าความคงทนความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนอากาศที่ต้องการ

ถ้ากำหนดให้ระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิมีค่า 5 cm แรงดันไฟฟ้าสูงสุดตามพิกัดของหม้อแปลง 80 kV โดยให้ค่าตัวแปรอื่นๆคงเดิม แล้วจากสมการที่ (4.1) จะได้

$$E_1 = \frac{80\times\sqrt{2}}{5\times\left[1+\left(\frac{1}{4}\times\frac{0.15}{5}\right)\right]} = 22.46 \text{ kV/cm}$$

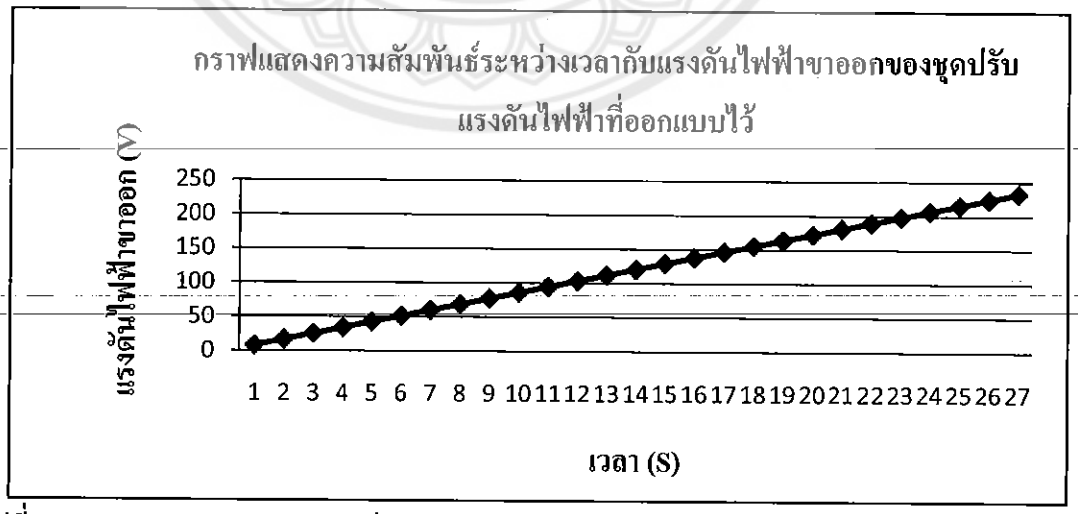
ค่าความคงทนความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนของอากาศที่มีระยะเท่ากับ 5 cm หาได้จากสมการที่ (4.3) มีค่าเท่ากับ

$$E_b = 24.4 + \frac{6.72}{\sqrt{5}} = 27.4 \text{ kV/cm}$$

จะเห็นได้ว่าอากาศสามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าได้เมื่อมีระยะ 5 cm เพราะฉะนั้นในโครงงานนี้ควรออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิอย่างน้อยที่สุด 5 cm ฉนวนอากาศจึงจะสามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าได้ แต่อย่างไรก็ตามแนวทางแก้ไขนี้ วิเคราะห์จากการเกิดแรงดันเบรกดาวน์ของหม้อแปลงที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 6.957 kV เท่านั้น

4.3.2 การทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

จากการออกแบบความสัพพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกกับเวลาเป็นดังรูปที่ 4.10 แต่จากการทดลอง ความสัพพันธ์ดังกล่าวไม่เป็นไปตามที่ออกแบบ เนื่องจากความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่า 8 รอบต่อนาที (ค่าที่ออกแบบไว้คือ 7) จึงทำให้ความเร็วที่เฟืองหม้อแปลงปรับค่าได้หมุนเร็วกว่าที่ต้องการ



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดปรับแรงดันไฟฟ้าจากการออกแบบ

$$n_2 = \frac{N_1}{N_2} \times n_1 = \frac{24}{60} \times 8 = 3.2 \text{ รอบต่อนาที}$$

จะเห็นว่าความเร็วรอบของหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้สูงกว่าที่ออกแบบไว้ (2.2 รอบต่อนาที) คิดค่าความคลาดเคลื่อนเป็น $\frac{3.2-2.2}{2.2} = 45.45\%$

แนวทางแก้ไข คือการเปลี่ยนเฟืองทดรอบที่มอเตอร์เป็นเฟือง 12 ฟันและเปลี่ยนเฟืองทดรอบที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ได้เป็นเฟือง 48 ฟัน จากสมการที่ (3.2) เมื่อ $n_1 = 8$, $N_1 = 12$ และ $N_2 = 48$ จะได้ความเร็วรอบของหม้อแปลงปรับค่าได้

$$n_2 = \frac{N_1}{N_2} \times n_1 = \frac{12}{48} \times 8 = 2 \text{ รอบต่อนาที}$$

ได้ความเร็วรอบที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เป็น $n_2 = 2$ รอบต่อนาที ซึ่งใกล้เคียงกับที่ได้คำนวณไว้ (2.2 รอบต่อนาที) คิดค่าความคลาดเคลื่อนเป็น $\frac{2.2-2}{2.2} = 9.09\%$

บทที่ 5

ปัญหาและการสรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลของโครงงาน

5.1.1 หม้อแปลงไฟฟ้า

1. Voltage ratio test เป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาว่า หม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมีแรงดันไฟฟ้าขาออกถูกต้องตามอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบไว้หรือไม่ จากการผลทดสอบพบว่า แรงดันไฟฟ้าขาเข้า $(V_1) = 10.72$ V แรงดันไฟฟ้าขาออก $(V_2) = 3819$ V จะได้อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าจากการทดสอบ คือ 0.0028 ซึ่งอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้ คือ 0.00287 จะพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.5 %

2. ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกเป็นรูปคลื่นซายน์ ตามหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเป็นลักษณะรูปคลื่นซายน์ แรงดันไฟฟ้าขาออกต้องเป็นลักษณะรูปคลื่นซายน์ด้วยเช่นกัน โดยคลื่นซายน์ดังกล่าวมีความถี่เท่ากับ 49.88 Hz ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ที่ต้องการคือ 50 Hz โดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.0024 %

3. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้านั้นประสบปัญหาค่อนข้างมาก ต้องใช้ความอดทนและพยายามในการพันขดลวดสูง เพราะจำนวนรอบของขดลวดสูง สิ่งที่สำคัญที่ต้องพึงระวังคือเรื่องการฉนวน ซึ่งการออกแบบฉนวนในโครงงานนี้การฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ายังไม่ดีพอ สาเหตุเพราะช่องว่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิน้อยเกินไป เป็นเหตุให้อากาศไม่สามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าได้ ทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิซึ่งเป็นสิ่งที่ควรแก้ไข

5.1.2 ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

จากผลการทดลองจะพบว่าคิดค่าความคลาดเคลื่อนเป็น 45.45 % ซึ่งมีค่าสูงพอสมควร เหตุผลที่คลาดเคลื่อนสูงเพราะมอเตอร์ที่นำมาใช้มีความเร็วรอบ 8 รอบต่อนาที ซึ่งไม่เป็นไปตามพิกัดความเร็วรอบของมอเตอร์ที่มีความเร็วรอบ 7 รอบต่อนาที ซึ่งแนวทางแก้ไขคือการเปลี่ยนเฟืองทดรอบที่มอเตอร์เป็นเฟือง 12 ฟันและเปลี่ยนเฟืองทดรอบที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ได้เป็นเฟือง 48 ฟัน จากผลการทดลองจะพบว่าคิดค่าความคลาดเคลื่อนที่เปลี่ยนเฟืองจะเท่ากับ 9.09 % ซึ่งมาตรฐาน ASTM D877-87 [1] ยอมรับได้

5.1.3 ชุดถ้วยทดสอบ

การออกแบบใช้โปรแกรม SolidWorks ทำให้ง่ายต่อการออกแบบและเขียนแบบ ซึ่งโปรแกรมนี้เป็นระบบ 3 มิติ ทำให้เห็นชิ้นงานได้ทุกมุมมอง ซึ่งในส่วนของชุดถ้วยทดสอบนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ อิเล็กโทรดและถ้วยทดสอบ

1. อิเล็กโทรดจะทำมาจากทองเหลืองขัดมัน ตามมาตรฐาน ASTM D877-87 [1] ส่วนตัวนำที่ต่อกับอิเล็กโทรดทำมาจากแท่งทองแดง เนื่องจากแท่งเงินมีราคาแพง จึงใช้แท่งทองแดงที่นำไฟฟ้าได้ดีแทน

2. ถ้วยทดสอบ ทำมาจากวัสดุอะคริลิค เนื่องจากอะคริลิคเป็นวัสดุที่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าสูงได้ดี

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข

1. ปัญหา : ไม่มีขนาดของป๊อบบิ้นตามที่ต้องการ

สาเหตุ : จากการคำนวณขนาดของป๊อบบิ้นต้องการขนาด 15×5 cm แต่ตามท้องตลาดมีขายแต่ขนาด 10×5 cm ซึ่งไม่เป็นไปตามที่คำนวณไว้

วิธีการแก้ไข : ตัดป๊อบบิ้นขนาด 10×5 cm ออกมาเป็น 8×5 cm กับ 7×5 cm แล้วนำมาประกอบกัน จะได้ขนาด 15×5 cm

2. ปัญหา : ขดลวดปฐมภูมิลงป๊อบบิ้นไม่ได้

สาเหตุ : จากคำนวณค่ากระแสอินรัช 7 เท่าของกระแสปฐมภูมิจึงเลือกใช้ขดลวดเบอร์ S.W.G 12 แต่เมื่อนำพันลงป๊อบบิ้นแล้ว ขดลวดเกินป๊อบบิ้นออกมามาก จะเป็นอันตราย ต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเอง

วิธีการแก้ไข : ลดขนาดกระแสอินรัชลงเหลือ 6 เท่าของกระแสปฐมภูมิ ซึ่งสามารถเลือกใช้ขดลวดเบอร์ S.W.G 13 ทำให้สามารถพันลงป๊อบบิ้นแล้ว ขดลวดเกินป๊อบบิ้นออกมาน้อยลง

3. ปัญหา : ขดลวดทุติยภูมิลงป๊อบบิ้นไม่ได้

สาเหตุ : จากขดลวด S.W.G 37 นั้น ลงป๊อบบิ้น ขนาด 15×5 cm ได้แค่ประมาณ 16000 กว่ารอบเท่านั้น ซึ่งตามที่คำนวณไว้ นั้นป๊อบบิ้นหนึ่งจะต้องลงได้ ประมาณ 26700 รอบ

วิธีการแก้ไข : แบ่งป๊อบบิ้นออกเป็น 3 ป๊อบบิ้น โดยหนึ่งป๊อบบิ้น ต้องลงขดลวด 16040 รอบแล้วนำมาอนุกรมกัน จะได้แรงดันไฟฟ้า 80 kV

4. ปัญหา : หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการลัดวงจร เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 20 V

สาเหตุ : ระยะระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิใกล้กันเกินไป

วิธีการแก้ไข : เพิ่มระยะห่างของขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ โดยการเปลี่ยนขนาดของแกนเหล็ก

5. ปัญหา : ชุดปรับแรงดันไฟฟ้ามีอัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสูงเกินไป

สาเหตุ : มอเตอร์มีความเร็วรอบไม่เป็นไปตามพิกัดของมอเตอร์

วิธีการแก้ไข : เปลี่ยนเฟืองทดรอบที่มอเตอร์เป็นเฟือง 12 ฟันและเปลี่ยนเฟืองทดรอบที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ได้เป็นเฟือง 48 ฟัน

เอกสารอ้างอิง

[1] ศรีสุดา ไชยทองสุก. พงเทพ ปลดเปลื้อง. " **การปรับปรุงเครื่องทดสอบความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน** " ปริญญานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ2543.

[2] อณัณเตชัย พงศ์ถาวรสวัสดิ์. **"ชุดสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ชนิดปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 6-15 kV และปรับความถี่ได้ 5-60 Hz กระแส 1.5 mA"** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2550.

[3] ศ.ดร.วริทธ์ อึ้งภากรณ์. รศ.ชาญ ถนัดงาน. **การออกแบบเครื่องจักรกล**. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน). 2550.

[4] "A 1.6 million volt lightning bolt is captured within a block of clear acrylic plastic". [online]. Available : http://capturedlightning.com/frames/longarc.htm.

[5] ดร. สำรวย สังข์สะอาด. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย'2528.

[6] สัมพันธ์ ภู่เจริญ. อดิศักดิ์ บุญชูวงศ์. " **เครื่องทดสอบไดอิเล็กทริคโวลท์เตจของฉนวนน้ำมันแบบอัตโนมัติโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์** " ปริญญานิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2538.

[7] ผศ.อำนาจ ทองผาสุก. ผศ.วิทยา ประยงค์พันธ์. **การควบคุมมอเตอร์**. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ประวัติผู้เขียนโครงงาน

ชื่อ นายจักรกฤช สิงห์บำรุง

วันเกิด 15 เมษายน 2530

ภูมิลำเนา 142/2 หมู่ที่ 15 ตำบลหนองกระโดน อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์ 60240

ประวัติการศึกษา

- จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนลาซาลโชติรวีนครสวรรค์
- ปัจจุบันศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
  สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
  มหาวิทยาลัยนเรศวร

e-mail : mawawja@hotmail.com

ชื่อ นายพูนศักดิ์ สาหร่ายสุวรรณ์

วันเกิด 23 พฤษภาคม 2529

ภูมิลำเนา 824/2 หมู่ที่ 10 ถนนพหลโยธิน ตำบลนครสวรรค์ตก อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์ 60000

ประวัติการศึกษา

- จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนนวมินทราชูทิศ มัชฌิม
- ปัจจุบันศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
  สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
  มหาวิทยาลัยนเรศวร

e-mail : soul_mate_ee@hotmail.com