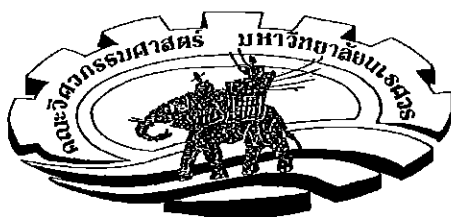


การทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกความของฉนวนน้ำมัน
BREAKDOWN-VOLTAGE TEST OF INSULATING OIL

นายปัญญาพร พูลสุข	รหัส 49361133
นายพลากร รอทอง	รหัส 49361270
นายเกรียงไกร อยู่สุภาพ	รหัส 49380417

ชื่อสมาชิกและวิชาวิศวกรรมศาสตร์	
ชั้นปีที่เรียน	19 31.ค. 2555
เลขทะเบียน	15736560
เลขเรียงลำดับ	2/5
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	W52317 2552


ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 ปีการศึกษา 2552




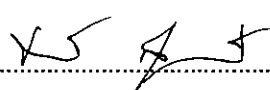
ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกความถี่ของฉนวนน้ำมัน
ผู้ดำเนินโครงการ นายปัญญา พูลสุข รหัส 49361133
นายพลากร รอทอง รหัส 49361270
นายเกรียงไกร อยู่สุภาพ รหัส 49380417
ที่ปรึกษาโครงการ ดร. แททริยา สุวรรณศรี
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


..... ที่ปรึกษาโครงการ
(ดร. แททริยา สุวรรณศรี)


..... กรรมการ
(ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์)


..... กรรมการ
(ดร. ธนพงศ์ สุวรรณศรี)

ชื่อหัวข้อโครงการ การทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกความถี่ของฉนวนน้ำมัน

ผู้ดำเนินโครงการ นายปัญญา พูลสุข รหัส 49361133

นายพลากร รอทอง รหัส 49361270

นายเกรียงไกร อยู่สุภาพ รหัส 49380417

ที่ปรึกษาโครงการ ดร. แททริยา สุวรรณศรี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2552

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกความถี่ของฉนวนน้ำมัน ซึ่งมีวัตถุประสงค์ดังนี้
1) ศึกษาการทำงานของหม้อแปลงทดสอบแรงสูง 50 kV 6 kVA 2) ศึกษามาตรฐาน ASTM D877-87, ASTM D1816 และ IEC 156 3) ปรับปรุงชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน ASTM D877-87, ASTM D1816 และ IEC156 และ 4) ทดสอบการทำงานของหม้อแปลง และชุดทดสอบฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ทั้ง 3 มาตรฐานสำหรับน้ำมันบริสุทธิ์และน้ำมันผสมน้ำพบว่า ค่าแรงดันเบรกความถี่ไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบ เหตุผลสำคัญคือ 1) ระยะเก็บประหว่างอิเล็กโทรดสามารถเคลื่อนที่ได้เนื่องจากแรงผลักระหว่างอิเล็กโทรด 2) การเบรกความถี่ทำให้ผิวของอิเล็กโทรดเสียหายโดยเกิดรอยขรุขระที่ผิวของอิเล็กโทรดทำให้ความเครียดของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 3) การเบรกความถี่ทำให้มีเขม่าเกาะที่หัวอิเล็กโทรดทำให้แรงดันเบรกความถี่มีแนวโน้มลดลงเพิ่มขึ้น 4) น้ำมันที่ผสมน้ำเกิดความไม่คงรูปของหยดน้ำในน้ำมันในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอทำให้แรงดันเบรกความถี่ลดลง

Project title Breakdown-Voltage Test Of Insulating Oil
Name Mr. Panchaporn Punsuk ID. 49361133
Mr. Palakorn Rothong ID. 49361270
Mr. Kriangkrai Yusuphab ID. 49380417

Project advisor Mrs. Cattareeya Suwanasri, D.Eng.
Major Electrical Engineering
Department Electrical and Computer Engineering
Academic year 2009

.....

Abstract

This project is breakdown-voltages test of insulating oil by aiming at 1) studying the performance of the high voltage transformer 50 kV 6 kVA; 2) studying ASTM D877-87, ASTM D1816 and IEC 156 standard; 3) developing the test set of oil transformer to meet ASTM D877-87, ASTM D1816 and IEC 156 standard; and 4) testing the performance of the transformer and the test set of power transformer insulating oil.

The results and the analysis of three standards for both pure-oil and oil-mixed-water showing that breakdown-voltages are unsatisfied the standards. The significant reasons are 1) gab range between electrodes could be moved because of the forces to the electrode; 2) breakdown damaged the skin of electrodes resulting to skin-corrosion and increasing of electric field stress; 3) breakdown produced dust around the electrodes and then increases the breakdown-voltages and; 4) the unstable form of liquid droplets in insulating oil with in the non-uniform electric field resulting to decrease breakdown-voltages.

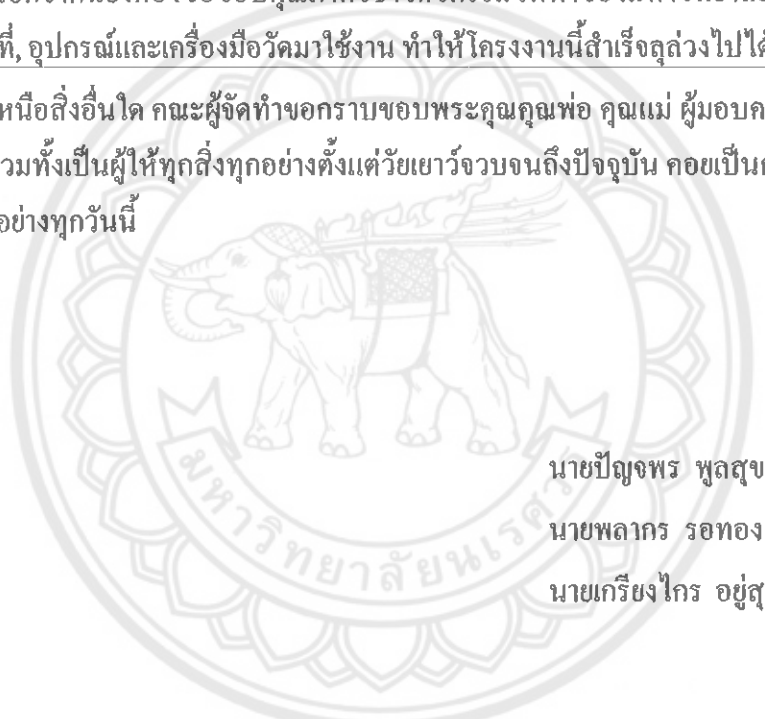
กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก ดร. แกทริยา สุวรรณศรี และ ดร. ชนพงศ์ สุวรรณศรี ที่ให้ความช่วยเหลือ ตลอดการเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และให้ความกรุณาในการตรวจทานปริญญานิพนธ์ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงและขอระลึกถึงความกรุณาของท่านไว้ตลอดไป

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์ ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาเพิ่มเติม อันเป็นประโยชน์ในการแก้ไขปรับปรุงโครงการนี้

นอกจากนี้ยังต้องขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรีที่ให้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดมาใช้งาน ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

เหนือสิ่งอื่นใด คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ผู้มอบความรักความเมตตา สติปัญญา รวมทั้งเป็นผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างตั้งแต่วัยเยาว์จวบจนถึงปัจจุบัน คอยเป็นกำลังใจทำให้ได้รับความสำเร็จอย่างทุกวันนี้



นายปัญญาพร พูลสุข
นายพลากร รอทอง
นายเกรียงไกร อยู่สุภาพ

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 แนวทางการทำโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 ขอบเขตที่ใช้.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและมาตรฐานการทดสอบ.....	5
2.1 มาตรฐานการทดสอบ.....	5
2.1.1 มาตรฐาน ANSI/ASTM D877.....	5
2.1.2 มาตรฐาน ANSI/ASTM D1816.....	6
2.1.3 มาตรฐาน IEC 156.....	6
2.1.4 มาตรฐานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในโครงการ.....	6
2.1.5 คุณสมบัติของการทดสอบ.....	7
2.1.6 เครื่องมือที่ใช้.....	7
2.1.7 อิเล็กโทรด.....	8

สารบัญ (ต่อ)

2.1.8 ถ้วยทดสอบ	9
2.1.9 การปรับระยะและการรักษาอิเล็กทรอนิกส์และถ้วยทดสอบ	10
2.1.10 ตัวอย่างทดสอบ	11
2.1.11 อุณหภูมิสำหรับการทดสอบ	12
2.1.12 อัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า.....	12
2.1.13 การทดสอบค่าแรงดันเบรกควานซ์ของน้ำมันหม้อแปลง	13
2.1.14 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ.....	14
2.1.15 การจัดทำรายงาน	15
2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า	16
2.2.1 ลักษณะ โครงสร้าง	16
2.2.2 ขดลวดหม้อแปลง ไฟฟ้า	17
2.2.3 การออกแบบขดลวดแรงต่ำและแรงสูง.....	17
2.2.4 การออกแบบแกนเหล็ก.....	19
2.2.5 การถ่ายเทความร้อน (Heat Dissipation)	21
2.2.6 การนำความร้อน	21
2.2.7 การพาความร้อน	22
2.2.8 การแผ่รังสีความร้อน	23
2.2.9 การคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}).....	24
2.2.10 กำลังไฟฟ้าลัดวงจร (S_{sc}).....	24
2.2.11 สมรรถนะของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	25
2.2.12 การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	25
2.2.13 หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานขณะไม่ต่อกับ โหลด	25
2.2.14 หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานขณะต่ออยู่กับ โหลด	30
2.3 ความเครียดสนามไฟฟ้า.....	31
2.3.1 ความเครียดของสนามไฟฟ้าวิกฤติ.....	32
2.3.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองก๊าซในฉนวนน้ำมันเหลว	32

สารบัญ (ต่อ)

2.4 ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า.....	32
<hr/>	
บทที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	33
3.1 หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 kV 6 kVA	33
3.1.1 แกนเหล็ก.....	33
3.1.2 การจัดวางแผ่นเหล็ก	36
3.1.3 ขดลวดแรงต่ำ.....	37
3.1.4 ขดลวดแรงสูง	339
3.1.5 การประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็ก	40
3.1.6 การต่อสาย	41
3.1.7 บุชชิง	42
3.1.8 วิธีการเติมน้ำมัน	43
3.2 การสร้างชุดปรับแรงดันไฟฟ้า.....	44
3.2.1 ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า	44
3.2.2 เฟืองทดรอบ	44
3.3 วงจรควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า.....	44
3.4 ชุดถ้วยทดสอบ	47
3.4.1 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์	47
3.4.2 การออกแบบถ้วยทดสอบ	49
<hr/>	
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	53
4.1 การทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า	53
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้.....	53
4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ	53
4.1.3 ผลการทดสอบ.....	54
4.1.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	55
4.2 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกคาว์นของฉนวนเหลว.....	57

สารบัญ (ต่อ)

4.2.1 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877.....	58
4.2.2 การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1816	63
4.2.3 การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156.....	67
4.3 สรุปผลการวิเคราะห์.....	72
4.4 การทดสอบชุดถ้วยทดสอบ	73
4.4.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	73
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและปัญหา	75
5.1 สรุปผลการทดสอบ	75
5.1.1 ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า	75
5.1.2 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกคาวมน์ของฉนวนเหลว.....	75
5.1.3 ชุดถ้วยทดสอบ	75
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางการแก้ไข.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก ก	79
ภาคผนวก ข	80
ภาคผนวก ค	81
ภาคผนวก ง.....	83
ภาคผนวก จ.....	84
ภาคผนวก ฉ	85
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	86

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ขนาดของอิเล็กโทรดตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156	9
2.2 ขนาดของถ้วยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156	10
2.3 ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156	11
2.4 อัตราแรงดันที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเบรคความถี่ตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC156	13
2.5 กรณีตรวจรับน้ำมันห้อง Main tank	13
2.6 กรณีบำรุงรักษาน้ำมันห้อง Main tank	14
2.7 จำนวนครั้งที่ทดสอบและอัตราส่วน S/\bar{x} ที่ไม่ควรเกินตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156	15
3.1 รายละเอียดหม้อแปลงทดสอบ	34
3.2 สรุปลักษณะแกนเหล็ก M-4	36
3.3 สรุปลักษณะของขดลวดแรงต่ำ	38
3.4 สรุปลักษณะของขดลวดแรงสูง	40
3.5 การแสดงค่าที่ได้จากการต่อสายของขดลวดแรงสูง	42
3.6 สัญลักษณ์และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า	46
4.1 ผลการทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า	55
4.2 สรุปผลการคำนวณชุดปรับแรงดันที่ได้จากการทดสอบ	57
4.3 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความถี่ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน ASTM D877 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5 ± 0.01 mm	61
4.4 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความถี่ของฉนวนเหนือน้ำมันปนน้ำตามมาตรฐาน ASTM D877 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5 ± 0.01 mm	61
4.5 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความถี่ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน ASTM D1816 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 ± 0.03 mm	66
4.6 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความถี่ของฉนวนเหนือน้ำมันปนน้ำตามมาตรฐาน ASTM D1816 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 ± 0.03 mm	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกคาว์ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน IEC 156 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5 ± 0.05 mm70	70
4.8 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกคาว์ของฉนวนเหนือน้ำมันผสมน้ำตามมาตรฐาน IEC 156 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5 ± 0.05 mm71	71
4.9 ตารางสรุปผลการทดสอบทั้ง 3 มาตรฐาน72	72



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สัญลักษณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	16
2.2 หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวด 2 ชุดและแกนเหล็ก	16
2.3 หม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่ต่อกับโหลด $E_1 = V_1$ และ $E_2 = V_2$	26
2.4 วงจรเทียบเท่าของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่ต่อโหลด $I_1 = I_n = I_0 + I_m$	26
2.5 คลื่นไฟฟ้าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_m และ Φ_m กับ V_1 และ E_1, E_2	27
2.6 เวกเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด.....	28
2.7 การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะต่ออยู่กับโหลด (Load condition)	30
2.8 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิล็กโทโรดลักษณะต่าง ๆ	31
3.1 แกนเหล็กแบบวงกลม 7 ชั้น บรรจุอยู่ในวงกลม.....	34
3.2 ภาพก่อนและหลังตัดมุมแกนเหล็ก	35
3.3 ขนาดของแกนเหล็ก	35
3.4 ลักษณะการพันขดลวดล้อมแกนเหล็ก	36
3.5 การวางเหล็ก	37
3.6 ป्लอกขดลวดแรงต่ำ	38
3.7 การพันขดลวดแรงต่ำ	38
3.8 ป्लอกขดลวดแรงสูง	39
3.9 ภาพการขดลวดแรงสูง	39
3.10 การประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็ก	41
3.11 แบบการพันขดลวดและต่อสาย	41
3.12 ตำแหน่งของต้นและปลายลวดแรงสูงและแรงต่ำ.....	42
3.13 แบบการพันขดลวดและต่อสาย	42
3.14 บุชชิง	43
3.15 ตัวถังหม้อแปลง.....	43
3.16 ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า	44
3.17 ตู้ควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า.....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 วงจรกำลังที่ใช้ในการควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า	45
3.19 วงจรควบคุมที่ใช้ในการควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า	45
3.20 แบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกระบอก.....	47
3.21 อิเล็กโทรดทรงกระบอก	47
3.22 แบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงดอกเห็ด	48
3.23 อิเล็กโทรดทรงดอกเห็ด	48
3.24 แบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกลม	48
3.25 อิเล็กโทรดทรงกลม	49
3.26 แบบถ้วยทดสอบตามขนาดที่ออกแบบ	49
3.27 ถ้วยทดสอบตามขนาดที่ออกแบบ.....	50
3.28 แบบฝาปิดด้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านหน้า	50
3.29 ฝาปิดด้วยทดสอบที่มองจากด้านหน้า	51
3.30 แบบฝาปิดด้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านบน.....	51
3.31 ฝาปิดด้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านบน	51
3.32 ฝาปิดด้วยทดสอบและอิเล็กทรอนิกส์โทรดที่ถอดออกจากแท่งตัวนำทองแดง	52
4.1 วงจรการทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า	53
4.2 การทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า	54
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเก็บแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้รับจากการทดสอบชุดปรับ แรงดันไฟฟ้า ทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้าด้วยออสซิลโลสโคป	54
4.4 วงจรการทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877	58
4.5 อุปกรณ์การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877	59
4.6 ตัวเก็บประจุขนาด 140 kV 1200 pF	59
4.7 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877	59
4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกคาว์นของมาตรฐาน ASTM D877	62
4.9 วงจรการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1816	64
4.10 การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1816	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกความถี่ของมาตรฐาน ASTM D1816	67
4.12 วงจรการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156	68
4.13 การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156.....	69
4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกความถี่ของมาตรฐาน IEC 156	71
4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกความถี่ของฉนวนเหลว	73
4.16 แบบที่แก้ไขชุดด้วยทดสอบที่มองจากด้านหน้า	74
4.17 แบบที่แก้ไขชุดทดสอบที่มองจากด้านล่าง	74



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยได้เพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี ส่งผลให้ผู้ผลิตไฟฟ้าและผู้ดูแลระบบส่งไฟฟ้า เช่น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ต้องเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าและขยายระบบส่งไฟฟ้าขึ้นอีกด้วย สำหรับด้านระบบจำหน่ายและผู้ใช้ไฟฟ้าก็ต้องมีการเพิ่มเติมชุดอุปกรณ์เพื่อนำกำลังไฟฟ้าไปใช้ตามความต้องการ

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญและจำเป็นต่อทุกฝ่ายในภาคอุตสาหกรรมการผลิตและใช้ไฟฟ้า หากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีปัญหา ก็จะก่อให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างและสร้างความเสียหายอย่างมากต่อภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นการดูแลหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังให้ทำงานได้ปกติและไม่มีความเสี่ยงต่อความเสียหายจึงเป็นเรื่องที่ทุกฝ่ายควรปฏิบัติ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในปัจจุบันใช้น้ำมันเพื่อเป็นฉนวน (Oil Insulation) และการระบายความร้อน หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังใหม่หรือหม้อแปลงเก่าที่มีระดับน้ำมันพร่องไปต้องมีการเติมน้ำมันที่ผ่านการทดสอบความเป็นฉนวนตามมาตรฐานทุกครั้ง ทั้งนี้ในปัจจุบันมีการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นจำนวนมาก ในส่วนของภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะโรงงานขนาดใหญ่ ซึ่งได้ทำการว่าจ้างบริษัทจากภายนอกมาทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงดังกล่าวก่อนเติมน้ำมันหม้อแปลงและนำเข้าใช้งานทุกครั้ง เนื่องจากยังขาดผู้เชี่ยวชาญด้านการทดสอบในหน่วยงาน ขาดเครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง (Transformer Oil Insulation Tester) ขาดองค์ความรู้และเวลาที่มีไม่เพียงพอที่จะสร้างอุปกรณ์ทดสอบดังกล่าว การทดสอบแต่ละครั้งจึงต้องใช้งบประมาณค่อนข้างสูง

สำหรับเฟสที่ 1 นั้นนิสิตนำความรู้มาใช้ในการพัฒนาและสร้างเครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงต้นแบบอย่างง่าย โดยออกแบบให้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถผลิตแรงดันที่มีขนาดมากกว่า 30 kV ตามมาตรฐานการทดสอบ (ASTM D877-87) ใช้ทดสอบแบบการทดสอบประจำ (Routine Test) เพื่อทดสอบฉนวนน้ำมันของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีแรงดันใช้งานไม่เกิน 230 kV

แต่เนื่องจากประสบปัญหาหลายประการดังแสดงไว้ในสรุปโครงการวิจัย IRPUS เลขที่โครงการ I351C07001 [3] คือ 1) ลักษณะแกนเหล็ก (Core) และการพันขดลวดระหว่างขั้วแรงสูงและขั้วแรงต่ำ (High-voltage and Low-voltage Windings) ยังไม่สามารถทำได้ตามมาตรฐานสากล เนื่องจากวัสดุที่หาซื้อจากท้องตลาดทั่วไปมีรูปแบบและขนาดจำกัด ทำให้ต้องมีการดัดแปลงรูปแบบหม้อแปลง 2) การฉนวนระหว่างขดลวดของหม้อแปลงขั้วแรงสูงและขั้วแรงต่ำไม่ดีพอทำให้เกิดการเบรคดาวน์ (Breakdown) ระหว่างขดลวดที่ระดับแรงดันเพียง 10 kV และ 3) ชุดควบคุมแรงดันต้องปรับปรุงให้มีการเพิ่มระดับของแรงดันให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM D877-87, ASTM D1816 และ

IEC 156 ดังนั้นในเฟสที่ 2 นี้ จะทำการปรับปรุงข้อเสียตามปัญหาที่ประสบในเฟสที่ 1 โดยจะดำเนินการดังนี้

1) ในส่วนของวัสดุจะทำการออกแบบและจัดสร้างร่วมกับผู้เชี่ยวชาญให้ได้ตามแบบและขนาดที่ต้องการ คือ 50 kV 6 kVA

2) ปรับปรุงชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

การปรับปรุงเครื่องต้นแบบทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยจะทำการปรับปรุงข้อเสียตามปัญหาที่ประสบในเฟสที่ 1 ซึ่งมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1) ศึกษาการทำงานของหม้อแปลงทดสอบแรงสูง 50 kV 6 kVA

2) ศึกษามาตรฐาน ASTM D877-87, ASTM D1816 และ IEC 156

3) ปรับปรุงชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน ASTM D877-87, ASTM D1816 และ IEC156

4) ทดสอบการทำงานของหม้อแปลง และชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลง

1.3 แนวทางการทำโครงการ

1) ศึกษาการทำงานของหม้อแปลงทดสอบแรงสูง 50 kV 6 kVA

2) ศึกษาวิธีการทดสอบ ASTM D877-87, ASTM D1816 และ IEC 156

3) ปรับปรุงด้วยทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงแรงสูง

4) ทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน

5) รวบรวมข้อมูลเข้ารูปเล่มพร้อมทั้งจัดงาน เสนอแนะแนวทางพัฒนาต่อ

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) นักศึกษานำความรู้ที่ได้ศึกษามาใช้ในปรับปรุงเครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง
- 2) ได้เครื่องต้นแบบที่มีความเที่ยงตรง ราคาประหยัด ทนทาน ดูแลรักษาง่าย เคลื่อนย้ายสะดวก และซ่อมบำรุงได้โดยช่างปฏิบัติการ

1.6 งบประมาณที่ใช้

1) ค่าเอกสารและค่าเช่าเล่มโครงการฉบับสมบูรณ์	3,000 บาท
2) ค่าวัสดุทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์	34,000 บาท
3) ค่าวัสดุทางเครื่องกล และอื่นๆ	6,000 บาท
4) ค่าเดินทางเก็บข้อมูล ขนย้ายเครื่องจักร และอื่นๆ	5,000 บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (สี่หมื่นแปดพันบาทถ้วน)	<u>48,000 บาท</u>

หมายเหตุ: ถัวเฉลี่ยทุกรายการ



บทที่ 2

ทฤษฎีและมาตรฐานการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและมาตรฐานการทดสอบซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ มาตรฐานการทดสอบความเป็นฉนวนในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าโดยจะใช้ มาตรฐาน ANSI/ASTMD877 Standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating liquids using disk electrodes มาตรฐาน ANSI/ASTMD1816 Standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating oils using of Petroleum origin using VDE electrodes มาตรฐาน IEC156 International electrotechnical commission และทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้า

2.1 มาตรฐานการทดสอบ

2.1.1 มาตรฐาน ANSI/ASTM D877

ใช้การทดสอบแบบการทดสอบประจำ (Routine test) ทดสอบน้ำมันของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าใช้งานไม่เกิน 230 kV และการตรวจสอบเพื่อรับน้ำมันที่ยังไม่ได้ผ่านกรรมวิธีใด ๆ มาก่อน

เป็นวิธีการหาค่า แรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว (Insulating liquids) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินค่า และเป็นเกณฑ์ของการทดสอบประจำ วิธีการนี้เหมาะที่จะใช้กับน้ำมันปิโตรเลียม และสารประกอบกลุ่มไฮโดรคาร์บอน เช่น Askarels ซึ่งโดยทั่วไปใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนและเป็นตัวกลางระบายความร้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น สายเคเบิล และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่คล้ายคลึง ไม่ควรใช้วิธีนี้กับของเหลวที่มีความหนืดเกินกว่า 900 CST (centistroke) หรือ 5000 sus (Saybolt Universal Seconds) ที่ 40°C (104°F)

1) วิธีนี้แนะนำให้ใช้กับการทดสอบเพื่อตรวจสอบรับของฉนวนชนิดที่ยังไม่ได้ผ่านกรรมวิธีใด ๆ มาก่อน เช่น รับจากรถบรรทุกน้ำมัน ถังน้ำมัน 200 ลิตร (Drum) และในภาชนะบรรจุเพื่อการขนส่ง และอาจจะใช้เป็นการทดสอบประจำของเหลวของฉนวนที่ใช้อยู่ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้า 230 kV หรือน้อยกว่า

2) วิธีนี้ไม่แนะนำให้ใช้กับฉนวนที่ผ่านกรรมวิธีปรับสภาพ หรือ ฟอก มาแล้วและนำไปใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าเกิน 230 kV ซึ่งถ้าเกินไปกว่านี้จะใช้วิธีการทดสอบ ASTM D1816 แทน

3) หน่วยเมตริกและหน่วย U.S. Customery สามารถเทียบเคียงกันใช้ได้

2.1.2 มาตรฐาน ANSI/ASTM D1816

ใช้การทดสอบแบบการทดสอบประจำ (Routine test) ทดสอบน้ำมันของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าใช้งานเกิน 230 kV และการตรวจสอบเพื่อรับน้ำมันที่ยังไม่ได้ผ่านกรรมวิธีใดๆมาก่อน

วิธีการนี้เป็นวิธีการหาค่า แรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว (Insulating liquids) วิธีการนี้เหมาะสมที่จะใช้กับน้ำมันปิโตรเลียม โดยทั่วไปใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนและเป็นตัวกลางระบายความร้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น สายเคเบิลหม้อแปลง และอุปกรณ์อื่นๆ ที่คล้ายคลึง ไม่ควรใช้วิธีนี้กับของเหลวที่มีความหนืดเกินกว่า 19 CST (centistroke) หรือ 100 sus (Saybolt Universal Seconds) ที่ 40°C (140°F)

1) วิธีการนี้ มีความไวต่อแสงมาก เป็นอันตรายต่อของเหลวมากกว่าการทดสอบด้วยวิธีของ D877, โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อน้ำมันเป็นเส้นใยเซลลูโลส แต่มันจะมีประโยชน์ในการวิเคราะห์ และการวิจัยในแล็บถึงกำลัง (strength) ของน้ำมันในระบบฉนวน

2) วิธีการนี้ เลือกใช้สำหรับทดสอบน้ำมัน ของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการเติมน้ำมันและสูญญากาศ

3) หน่วยเมตริกและหน่วยนิ้ว-ปอนด์ (inch-pound) สามารถเทียบเคียงกันใช้ได้

2.1.3 มาตรฐาน IEC 156

จะระบุถึงวิธีการสำหรับหาแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวที่มีความถี่ทางไฟฟ้า ส่วนของการทดสอบประกอบด้วย การระบุถึงเครื่องมือ การเพิ่มไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C.) โดยค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ของอัตราส่วนแรงดันจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์ วิธีนี้ประยุกต์ใช้กับชนิดของของเหลวทั้งหมดที่มีความหนืดมากกว่า 350 mm²/s ที่อุณหภูมิ 40°C มันเป็นความเหมาะสมของการยอมรับในการทดสอบของ ๑ เหลวในกรณีที่พักรับมา

1) ในการทดสอบ อุณหภูมิของ ๑ เหลวและอุณหภูมิรอบข้าง จะต้องไม่แตกต่างกันเกินกว่า 5°C และสำหรับอุณหภูมิที่ใช้อ้างอิงในการทดสอบของเหลวคือ 20°C ± 5°C และสำหรับอุณหภูมิที่ใช้อ้างอิงในการทดสอบของเหลวคือ 20°C ± 5°C

2.1.4 มาตรฐานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในโครงการงาน

- D923 Test method for sampling electrical insulating liquids
- D877 Standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating liquids using disk electrodes
- 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

- IEC156 International electrotechnical commission
- IEEE Standard no.4 measurement of voltage in dielectric test

2.1.5 คุณสมบัติของการทดสอบ

ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวที่มีความสำคัญมาก โดยให้เป็นการวัดค่าแรงดัน ความสามารถของของเหลวที่จะทนต่อความเครียดทางไฟฟ้าได้โดยไม่เกิดความเสียหาย และยังชี้บ่งบอกได้ว่า ในของเหลวมีสิ่งสกปรกปะปนแอบแฝงอยู่ เช่น น้ำ ผงฝุ่น และ เส้นใยเซลลูโลส ที่มีความชื้น หรือสารตัวนำเล็ก ๆ ที่ปะปนอยู่ในของเหลวแล้วจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการได้ค่าแรงดันเบรกดาวน์สูง ๆ ไม่ได้หมายความว่า ไม่มีสิ่งสกปรกอยู่เลย เพราะการทดสอบแบบนี้เป็นการชี้แสดงถึงสิ่งสกปรกที่มารวมตัวกันอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดซึ่งอาจไม่พอเพียงในการที่จะไปเป็นผลกระทบทกระเทือนต่อค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์มาก

2.1.6 เครื่องมือที่ใช้

1. หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า ต้องใช้ในการทดสอบ ทำให้ง่ายโดยใช้หม้อแปลงยกระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งด้านขดลวดปฐมภูมิ เป็นแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สามารถปรับค่าได้ ความถี่ที่ใช้งานก็ใช้ความถี่กำลังเชิงพาณิชย์ (Commercial power frequency 50/60 Hz) ซึ่งตัวหม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมต้องมีขนาดและการออกแบบไว้อย่างดี รวมทั้งมีการทดสอบวงจรตัวอย่าง ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดต่อค่าประสิทธิภาพผล (Crest factor) ของแรงดันไฟฟ้าทดสอบชนิด 60 Hz จะต้องไม่แตกต่างกันไป $\pm 5\%$ (คิดจากรูปคลื่นครึ่งบวกของไซน์ซวยคอด) ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดต่อค่าประสิทธิภาพผล ตรวจสอบได้โดยการใช้ออสซิลโลสโคป ซึ่งต่อรวมกับ RMS โวลต์มิเตอร์ ถ้าหากว่าไม่สามารถตรวจสอบ รูปสัญญาณได้โดยสะดวกก็ให้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดไม่น้อยกว่า 0.5 kVA สำหรับการทดสอบ แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์โดยทั่วไปได้ หรือถ้าใช้หม้อแปลงกำลังไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังไฟฟ้ามาก ๆ โคนค่ากระแสลัดวงจรมาก ๆ ในวงจรของตัวอย่างทดสอบอยู่ระหว่าง 1-10 mA/kV ของแรงดันประยุกต์ (Applied voltage) การจำกัดค่ากระแสทำได้โดยใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกันข้างนอกหรือออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) ตามต้องการ

2. อุปกรณ์ตัดวงจร วงจรทางด้านขดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าต้องมีระบบป้องกัน โดยใช้อุปกรณ์ตัดวงจรอัตโนมัติ ซึ่งสามารถตัดวงจรได้ภายใน 3 ไซเคิลหรือน้อยกว่าของกระแสที่เกิดขึ้น ในขณะที่แรงดันเบรกดาวน์ของของเหลวที่ทดสอบ หรือจะให้ตัดวงจรได้ภายใน 5 ไซเคิลก็ได้ ถ้ากระแสที่ลัดวงจรมีค่าไม่เกิน 0.2 A ตัวตรวจจับกระแส (Sensing) ที่ไปสั่งตัดวงจรเมื่อกระแสของวงจรทดสอบอยู่ในช่วง 2-20 mA กระแสที่เกินกว่านี้หรือนานกว่านี้ในขณะที่เบรกดาวน์จะทำให้เกิด คาร์บอนไนต์ (Carbonized) ในน้ำมันและทำให้อิเล็กโทรดสึกกร่อนและมีความร้อนสูง เป็นเหตุให้สิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษา

3. อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า กำหนดให้อัตราเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น 3 kV/s \pm 20% การปรับแรงดันไฟฟ้าทำอย่างปลอดภัยโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ (Motor driven variable ratio autotransformer) อัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าต้องสม่ำเสมอตลอดย่านแรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าของการทดสอบการใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนจะดีกว่าวิธีธรรมดา เพราะไม่ต้องยุ่งยากในการตรวจสอบ บำรุงรักษาและได้อัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ โดยง่าย อัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสามารถคำนวณได้โดยคิดจากระยะเวลาที่ใช้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงแรงดันไฟฟ้าสุดท้าย เมื่อใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนแล้วควรตรวจสอบ และการสอบเทียบชุดควบคุมปรับความเร็ว (Caribrate speed control rheostat) ให้แน่นอนคล้องจองกับอัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบที่ใช้

4. แรงดันไฟฟ้า เพื่อให้การอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าที่ถูกต้อง โดยจะยึดถือตามมาตรฐาน IEEE (Requirement of IEEE Standard no.4 ("Measurement of voltage in dielectric test") ซึ่งเป็นการให้ค่า RMS โดยจะใช้วิธีการและเครื่องมือต่อไปนี้ คือ

- ใช้โวลต์มิเตอร์ ต่อด้านปฐมภูมิ (Secondary) ของส่วนแยกของหม้อแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Separated potential transformer) หรือ
 - ใช้โวลต์มิเตอร์ ต่อด้านขดลวดตติภูมิ (Tertiary winding) ของหม้อแปลงไฟฟ้า (ถ้ามี)
 - ใช้โวลต์มิเตอร์ ต่อด้านแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำ (Low voltage) ของหม้อแปลงไฟฟ้า
- ถ้าหากว่าเกณฑ์ความผิดพลาดในการวัดไม่เกินกว่าที่ระบุไว้

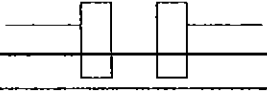
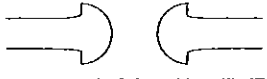
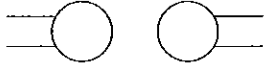
2.1.7 อิเล็กโทรด

1. มาตรฐาน ASTM D877 ต้องทำด้วยทองเหลืองผิวมันเรียบ ลักษณะแบบจานกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm (1 in.) ความหนาอย่างน้อย 3 mm (1/8 in.) มุมของขอบอิเล็กโทรดเป็นเหลี่ยมตัดฉาก

2. มาตรฐาน ASTM D1816 ต้องทำด้วยทองเหลืองผิวมันเรียบ ลักษณะแบบทรงดอกเห็ดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm (1 in.) ความกว้างของหัวดอกเห็ดมีความกว้าง 36 mm (1.45 in.) ความหนาของหัวดอกเห็ด 13 mm (1/2 in.)

3. มาตรฐาน IEC 156 ต้องทำด้วยทองเหลืองผิวมันเรียบ ลักษณะแบบทรงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม 25 mm (1 in.) ซึ่งอิเล็กโทรดทั้ง 3 มาตรฐานแสดงตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดของอิเล็กโทรดตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156

มาตรฐานการทดสอบ	สัญลักษณ์ของอิเล็กโทรด	เส้นผ่านศูนย์กลาง(mm)	ความหนา (mm)	ความกว้างส่วนหัว(mm)
ASTM D877		25	≥ 3	-
ASTM D1816		25	13	36
IEC 156		25	-	-

2.1.8 ถ้วยทดสอบ

จะต้องมีอิเล็กโทรดติดประกบมาอย่างแข็งแรง ผิวหน้าของอิเล็กโทรด ทั้งสองมีระยะห่างเท่าเทียมกันตลอดทั้งแนวแกน อิเล็กโทรดทั้งสองก็อยู่ในระนาบเดียวกันอิเล็กโทรดต้องห่างจากส่วนใดๆของถ้วยทดสอบไม่น้อยกว่า 13 mm (1/2 in.) ผลรวมของกระแสรั่วไหล และกระแสชอร์ตของถ้วยทดสอบที่มีน้ำมันอย่างฉาบเรียบอยู่ต้องน้อยกว่า $200 \mu A$ ที่ 20 kV 60 Hz ถ้วยทดสอบต้องทำมาจากวัสดุที่มีค่าคงทนของฉนวนสูง และไม่มีความเสียหายถ้าสัมผัสกับของเหลวที่นำมาใส่ หรือจากการล้าง ต้องไม่ดูดซึมความชื้นหรือน้ำยาล้างทำความสะอาด หรือ ของเหลวที่นำมาทดสอบ ความสูงของถ้วยทดสอบประมาณ 33 mm (1.25 in.) จากขอบสุดของอิเล็กโทรด ถ้วยทดสอบควรออกแบบมาให้สามารถถอดอิเล็กโทรดได้ง่ายเพื่อประโยชน์ในการล้างทำความสะอาด การขัดผิวและการปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตามตารางที่ 2.2

จะต้องมีอิเล็กโทรดติดประกบมาอย่างแข็งแรง ผิวหน้าของอิเล็กโทรด ทั้งสองมีระยะห่างเท่าเทียมกันตลอดทั้งแนวแกน อิเล็กโทรดทั้งสองก็อยู่ในระนาบเดียวกันอิเล็กโทรดต้องห่างจากส่วนใดๆของถ้วยทดสอบไม่น้อยกว่า 13 mm (1/2 in.) ผลรวมของกระแสรั่วไหล และกระแสชอร์ตของถ้วยทดสอบที่มีน้ำมันอย่างฉาบเรียบอยู่ต้องน้อยกว่า $200 \mu A$ ที่ 20 kV 60 Hz ถ้วยทดสอบต้องทำมาจากวัสดุที่มีค่าคงทนของฉนวนสูง และไม่มีความเสียหายถ้าสัมผัสกับของเหลวที่นำมาใส่ หรือจากการล้าง ต้องไม่ดูดซึมความชื้นหรือน้ำยาล้างทำความสะอาด หรือ ของเหลวที่นำมาทดสอบ ความสูงของถ้วยทดสอบประมาณ 33 mm (1.25 in.) จากขอบสุดของอิเล็กโทรด ถ้วยทดสอบควรออกแบบมาให้สามารถถอดอิเล็กโทรดได้ง่ายเพื่อประโยชน์ในการล้างทำความสะอาด การขัดผิวและการปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขนาดของถ้วยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156

มาตรฐานการทดสอบ	ระยะห่างจากผิวถ้วยทดสอบ (mm)	ระยะห่างขอบของอิเล็กโทรด (mm)
ASTM D877	≥ 13	33
ASTM D1816	≥ 13	35
IEC 156	≥ 12	40

2.1.9 การปรับระยะและการรักษาอิเล็กโทรด และถ้วยทดสอบ

1. ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตามมาตรฐาน ASTM D877 และ มาตรฐาน IEC 156 ระหว่างอิเล็กโทรดขณะทดสอบต้องได้ 2.5 mm (0.100 in.) ซึ่งทำได้โดยใช้มาตรฐานเครื่องมือวัด (Standard pound gage) ขนาด 2.5±0.01 mm (0.100±0.005 in.) หรือใช้แท่งเหล็กแบบที่เรียกว่า “GO” และ “NO-GO” Gate ที่มีความหนา 2.49 และ 2.51 mm (0.0995 in. และ 0.1005 in.) ตามลำดับทุกครั้งที่ ชัด เช็ด และ ล้างอิเล็กโทรด รวมทั้งการเริ่มต้นทดสอบของแต่ละวัน ควรตรวจระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเสมอ

2. ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตามมาตรฐาน ASTM D1816 ระหว่างอิเล็กโทรดขณะทดสอบต้องได้ 1 mm (0.040 in.) หรือ 2 mm (0.080 in.) ซึ่งทำได้โดยใช้มาตรฐานเครื่องมือวัด (Standard pound gage) ขนาด 2±0.03 mm (0.100±0.005 in.) หรือใช้แท่งเหล็กแบบที่เรียกว่า “GO” และ “NO-GO” Gate ที่มีความหนา 1 และ 2 mm (0.004 in. และ 0.008 in.) ตามลำดับทุกครั้งที่ ชัด เช็ด และ ล้างอิเล็กโทรดรวมทั้งการเริ่มต้นทดสอบของแต่ละวัน ควรตรวจระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเสมอ ซึ่งระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 3 มาตรฐานแสดงตามตารางที่ 2.3

3. การล้างทำความสะอาด การล้างทำความสะอาดของอิเล็กโทรดสามารถทำได้โดยเช็ดด้วยกระดาษทิชชูที่สะอาด แห้ง และ ไม่ติดขน หรือ เช็ดด้วยผ้าแห้งขาม้วส์ที่แห้งสะอาด ระวังอย่าให้นิ้วมือไปแตะต้องกับอิเล็กโทรดและระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด แม้กระทั่งกระดาษทิชชูหรือผ้าขาม้วส์ด้านที่มือจับอยู่ หลังจากได้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดดีแล้ว เท้าน้ำมันชนิดทำละลาย (Standard solvent) ก็ได้ใช้น้ำยาทำละลาย (solvent) ที่มีจุดเดือดต่ำ ๆ ไม่ควรใช้ เพราะการระเหยเป็นไอได้เร็ว เป็นผลให้เกิดความเย็นขึ้นมาในถ้วยทดสอบ ทำให้ความชื้นที่มีอยู่สามารถควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำได้ ถ้าจะให้ดีควรครอบถ้วยทดสอบไว้ก่อนความชื้นสักหน่อยก่อน สิ่งที่ต้องระวังคือ อย่าให้มีการแตะต้องอิเล็กโทรดและภายในถ้วยทดสอบหลังจากการล้างและอบก่อนการทดสอบควรใช้น้ำมันที่สะอาดชนิดเดียวกับที่จะทดสอบ กรอกใส่ถ้วยทดสอบแล้วเอียงพลิกถ้วยไปมาเป็นการล้างครั้งสุดท้ายอีกครั้งหนึ่ง เสร็จแล้วเอาน้ำมันชนิดเดียวกับที่ล้างครั้งสุดท้ายนี้มาทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรคความถี่ของฉนวน

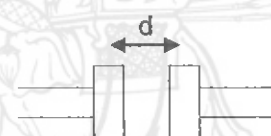
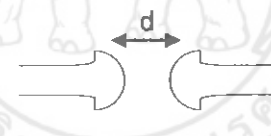
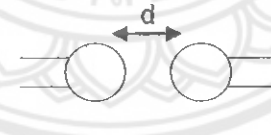
ถ้าได้ค่าสูงพอสมควรก็แสดงว่าด้วยทดสอบนี้สามารถนำไปใช้อื่น ๆ ได้จริง ถ้าหากได้ค่าต่ำกว่าก็ต้องล้างทำความสะอาด ด้วยทดสอบใหม่และทดสอบซ้ำอีกที่

4. การใช้ประจำวัน ก่อนที่จะทำการทดสอบในแต่ละวันจะต้องตรวจดูอิเล็กโทรดว่าสกปรกหรือสึกกร่อนไปบ้างหรือไม่อาจจะต้องขัดบ้าง หากเกิดการสึกกร่อน ผงถ่านและสิ่งสกปรกทั้งหลายต้องเช็ดออกให้หมด ตั้งระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดใหม่แล้วล้างทำความสะอาดตามแบบข้อ

2.

5. การเก็บด้วยทดสอบ สำหรับการใช้งานแบบทดสอบเพื่อเป็นเกณฑ์ตัดสิน (Reference test) ต้องเก็บไว้ในน้ำมันที่สะอาด แห่ง ใหม่ ชนิดเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบและปิดภาชนะที่เก็บให้สนิท

ตารางที่ 2.3 ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156

มาตรฐานการทดสอบ	สัญลักษณ์ของอิเล็กโทรด	ระยะห่างของ Gap (mm)
ASTM D877		2.5±0.01
ASTM D1816		1±0.03 2±0.03
IEC 156		2.5±0.05

2.1.10 ตัวอย่างทดสอบ

1. ตัวอย่างของเหลวที่นำมาทดสอบต้องดำเนินการตามวิธีการ ASTM D923 ตัวอย่างต้องบรรจุในขวดสะอาด แห่ง และ ผนึกปิดไว้สนิท พร้อมทั้งป้องกันไม่ให้ถูกกับแสงสว่างด้วย ก่อนที่จะนำตัวอย่างไปตรวจสอบต้องไปตรวจดูว่ามีสิ่งสกปรก คราบน้ำมัน ผงโลหะหรือสิ่งแปลกปลอมใดๆ หรือไม่ ถ้ามองเห็นว่ามีหยดน้ำแข็งอยู่ที่ไม่ต้องนำไปทดสอบ รายงานได้เลยว่าตัวอย่างไม่สมบูรณ์พอ (หมายเหตุ: ในการเก็บตัวอย่างถ้าต้องการทดสอบเพื่อเป็นเกณฑ์ตัดสินควรเก็บตัวอย่างมา 2 ลิตร แต่ถ้าทดสอบประจำควรเก็บมา 1 ลิตร)

2. ตัวอย่างของเหลวที่นำมาทดสอบต้องดำเนินการตามวิธีการ ASTM D923 ค่าแรงดันเบรก ความชื้นของฉนวนของของเหลวจะลดลงไปยังถ้าหากมีสิ่งเจือปนเข้าไปปะปนผสมอยู่ในของเหลว เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาอย่างนี้ ก็ขอแนะนำกรรมวิธีในการใส่ของเหลวเข้าด้วยทดสอบ ภาชนะที่บรรจุ ของเหลวที่นำมาทดสอบนั้นให้หมุนกลับไปกลับมาซ้ำ ๆ ก่อนที่จะเทของเหลวลงด้วยทดสอบ ห้าม ความของเหลวแรงเพราะอาจจะทำให้อากาศเข้าไปผสมในของเหลวได้ เทของเหลวทดสอบลงไปใน ด้วยทดสอบเล็กน้อยเพื่อการล้างและเคลือบและก็เททิ้งไป เสร็จแล้วก็เอาของเหลวตัวอย่างที่จะมา ทดสอบเทลงไปในด้วยทดสอบอย่างซ้ำ ๆ เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศและไอน้ำในอากาศเข้ามา ผสมเติมไปจนกระทั่งได้ในระดับของเหลวสูงกว่าในอิเล็กโทรด ขอบบนสุดประมาณไม่ต่ำกว่า 20 mm (0.8 in.) เสร็จแล้วทิ้งไว้ให้นิ่งอย่างน้อย 2 นาที เพื่อเปิดโอกาสให้ฟองอากาศได้หนีออกไปได้ แต่ไม่ ควรนานกว่า 3 นาที ก่อนการทดสอบ (หมายเหตุ วิธีนี้ อาจใช้ไม่ได้ ถ้าหากว่าของเหลวที่จะมาทดสอบ มีความหนืด 60-100 sus ที่ 100°C (212°F) ถ้าหากจะทดสอบกับของเหลวที่มีความหนืดสูงๆ อย่างนี้ ควรปล่อยให้เย็นลงจนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งต้องไม่ต่ำกว่า 20°C (68°F) ภาชนะที่ บรรจุของเหลวตัวอย่างจะไม่หมุนวนแต่จะใช้วิธีพลิกกลับไปกลับมาอย่างน้อย 30 นาที ก่อนที่จะเท ใส่เครื่องทดสอบ

2.1.11 อุณหภูมิสำหรับการทดสอบ

อุณหภูมิของตัวอย่างที่จะมาทดสอบ ควรเท่าไรเท่ากับอุณหภูมิห้องซึ่งก็ต้องไม่ต่ำกว่า 20°C การทดสอบที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องจะทำให้ได้ค่าไม่แน่นอน และทำให้ได้ผลออกมาไม่ถูกต้อง

2.1.12 อัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า

1. มาตรฐาน ASTM D877 กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากศูนย์ และค่อย ๆ เพิ่มไปใน อัตรา 3 kV/s \pm 20% จนกระทั่งเกิดเบรกความชื้นซึ่งแสดงได้จากการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันและ บันทึกลำดับไว้ มีบางช่วงขณะหากเกิดคายประจุ (Discharge) บ้างซึ่งไม่เป็นผลกระทบกระเทือนการ ทำงานของอุปกรณ์ตัดวงจร

2. มาตรฐาน ASTM D1816 กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากศูนย์ และค่อย ๆ เพิ่มไปใน อัตรา 1/2 kV/s \pm 20% จนกระทั่งเกิดเบรกความชื้นซึ่งแสดงได้จากการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันและ บันทึกลำดับไว้ มีบางช่วงขณะหากเกิดคายประจุ (Discharge) บ้างซึ่งไม่เป็นผลกระทบกระเทือนการ ทำงานของอุปกรณ์ตัดวงจร

3. มาตรฐาน IEC156 กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากศูนย์ และค่อย ๆ เพิ่มไปในอัตรา 2 kV/s \pm 20% จนกระทั่งเกิดเบรกความชื้นซึ่งแสดงได้จากการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันและบันทึกค่า นั้นไว้ มีบางช่วงขณะหากเกิดคายประจุ (Discharge) บ้างซึ่งไม่เป็นผลกระทบกระเทือนการทำงาน ของอุปกรณ์ตัดวงจร ซึ่งอัตราการเพิ่มแรงดันจนกระทั่งเบรกความชื้นทั้ง 3 มาตรฐานแสดงตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 อัตราแรงดันที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเบรคความถี่ตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC156

มาตรฐานการทดสอบ	อัตราแรงดันที่เพิ่มขึ้น
ASTM D877	3 kV/s \pm 20%
ASTM D877	0.5 kV/s \pm 20%
IEC 156	2 kV/s \pm 20%

2.1.13 การทดสอบค่าแรงดันเบรคความถี่ของน้ำมันหม้อแปลง

การทดสอบค่าแรงดันเบรคความถี่สามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีตรวจรับน้ำมันห้อง Main tank และ กรณีบำรุงรักษาน้ำมันห้อง Main tank ดังตารางที่ 2.5 และ ตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 กรณีตรวจรับน้ำมันห้อง Main tank

มาตรฐานทดสอบ	ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (mm)	ค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้ (kV)		
		ระดับแรงดัน HV ของหม้อแปลง (kV)		
		≤ 69	> 69 ถึง ≤ 288	> 288
ASTM D877	2.5	30	35	ใช้ ASTM D1816 ในการทดสอบ
ASTM D1816	1	20	25	30
IEC 156	2.5	ยังไม่สามารถระบุค่าได้*		

* ค่าแรงดันเบรคความถี่ของอิเล็กโทรดทรงกลมสามารถดูที่ภาคผนวก ค

ตารางที่ 2.6 กรณีบำรุงรักษาน้ำมันห้อง Main tank

มาตรฐานทดสอบ	ระยะห่าง ระหว่าง อิเล็กโทรด (mm)	ค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้ (kV)		
		ระดับแรงดัน HV ของหม้อแปลง (kV)		
		≤69	> 69 ถึง ≤288	>288
ASTM D877	2.5	26	30	ใช้ ASTM D1816 ในการทดสอบ
ASTM D1816	1	20	20	25
IEC 156	2.5	ยังไม่สามารถระบุค่าได้*		

* ค่าแรงดันเบรกความถี่ของอิเล็กโทรดทรงกลมสามารถดูที่ภาคผนวก ก

2.1.14 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ

1. การทดสอบเป็นเกณฑ์ตัดสิน เป็นการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกความถี่ของฉนวนของเหลวของใหม่เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ตัดสิน ทำการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกความถี่ต่อ 5 ตัวอย่างของเหลวในถ้วยทดสอบ โดยแต่ละตัวอย่างให้เบรกความถี่ได้เพียง 1 ครั้ง ค่าเฉลี่ยของทั้ง 5 ครั้งนี้จะถูกต้องตามหลักเกณฑ์ทางสถิติศาสตร์หรือไม่ก็ให้คำนวณตามข้อ 3. ถ้าถูกต้องตามหลักเกณฑ์ก็รายงานหาค่าเฉลี่ยที่ได้ และถ้าหากเกินเกณฑ์ไปก็ให้ทดสอบใหม่อีก 5 ครั้งใน 5 ถ้วยทดสอบเสร็จแล้วหาค่าเฉลี่ยเบรกความถี่ทั้ง 10 ครั้งเป็นรายงาน

2. การทดสอบเป็นประจำ ทำการทดสอบโดยหาค่าแรงดันเบรกความถี่ 5 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่างของเหลวในถ้วยทดสอบ ซึ่งให้พักพอ 1 นาที (คิดระหว่างเบรกความถี่ต่อเบรกความถี่) ค่าเฉลี่ยของทั้ง 5 ครั้งนี้คือค่าแรงดันเบรกความถี่ของฉนวนของเหลวนั้นจะถูกต้องตามหลักเกณฑ์ทางสถิติศาสตร์

3. หากเกินเกณฑ์ไปให้ทั้งตัวอย่างเดิมไป แล้วใช้ตัวอย่างใหม่ถ้วยทดสอบ (ตัวอย่างมาจากแหล่งเดียวกัน) หากค่าเบรกความถี่เดียวกัน 5 ครั้งเสร็จแล้วหาค่าเฉลี่ยจาก แรงดันเบรกความถี่ทั้ง 10 ครั้งเป็นรายงาน

4. หลักเกณฑ์การตัดสินค่าเฉลี่ยทางสถิติศาสตร์ หาค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐานของเบรกความถี่ 5 ครั้ง ดังต่อไปนี้

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.1)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \left[\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2 \right]} \quad (2.2)$$

เมื่อ	\bar{X}	คือ ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ n ครั้ง (V)
	X_i	คือ ค่าเบรกดาวน์ในแต่ละครั้ง (V)
	S	คือ ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	n	คือ จำนวนครั้งของการทดสอบ

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

ยังมีอีกวิธีหนึ่ง ในการคิดโดยให้เลือกใช้ได้ โดยเอาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่สูงที่สุดลบจากค่าที่ต่ำที่สุด จาก 5 ครั้ง แล้วคูณผลลบนี้ด้วย 3 จะได้ผลลัพธ์ค่าหนึ่งซึ่งเอาไปเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ค่าถัดจากค่าที่ต่ำที่สุด ถ้าผลลัพธ์มากกว่าค่าถัดจากค่าที่ต่ำที่สุดแสดงว่าค่าเฉลี่ยที่ยอมรับได้จาก 3 ครั้งแรกนั้นเกินหลักเกณฑ์ไป

ตามมาตรฐาน IEC 156 การทดสอบการเบรกดาวน์จะทำ 6 ครั้ง จากตัวอย่างของน้ำมัน ซึ่ง จะทำการบันทึกค่าทุก ๆ 2 นาที หลังจากเกิดการเบรกดาวน์แต่ละครั้ง แล้วทำการตรวจสอบดูว่าไม่มี ฟองแก๊สแล้วภายในระยะระหว่างระหว่างอิเล็กโทรด เราจะทำการหาค่าเฉลี่ยของการทดสอบการเบรกดาวน์ 6 ครั้งเหมือนสมการที่ (2.1) และ (2.2) ถ้าหากว่าอัตราส่วนของ S/\bar{x} ไม่เกิน 0.95 ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจำนวนครั้งที่ทดสอบและอัตราส่วน S/\bar{x} แสดงตามตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 จำนวนครั้งที่ทดสอบและอัตราส่วน S/\bar{x} ที่ไม่ควรเกินตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156

	ASTM D877	ASTM D1816	IEC 156
จำนวนครั้งที่ทดสอบ	5	n	6
อัตราส่วน S/\bar{x} ที่ไม่ควรเกิน	0.1	0.1	0.95

2.1.15 การจัดทำรายงาน

การจัดทำรายงานการทดสอบให้ทำและระบุสิ่งต่างๆ ดังนี้

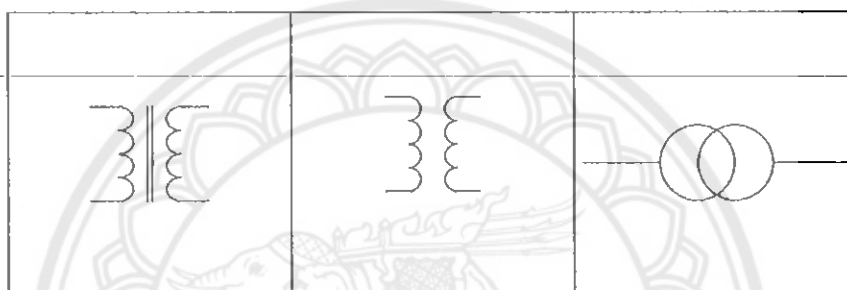
1. ASTM Code number ที่ใช้ทดสอบ เช่น ASTM D877
2. เป็นการทดสอบเพื่อเป็นเกณฑ์ตัดสิน
3. อุณหภูมิของของเหลวที่ทดสอบและอุณหภูมิห้อง
4. ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในแต่ละครั้ง และค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าซึ่งคิดตามวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง

5. การทดสอบเป็นเกณฑ์ตัดสินจาก 5 ครั้งใน 3 ตัวอย่างและค่าไม่เกินเกณฑ์ทางคณิตศาสตร์

6. บันทึกผล และวิเคราะห์ผลการทดสอบ

2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

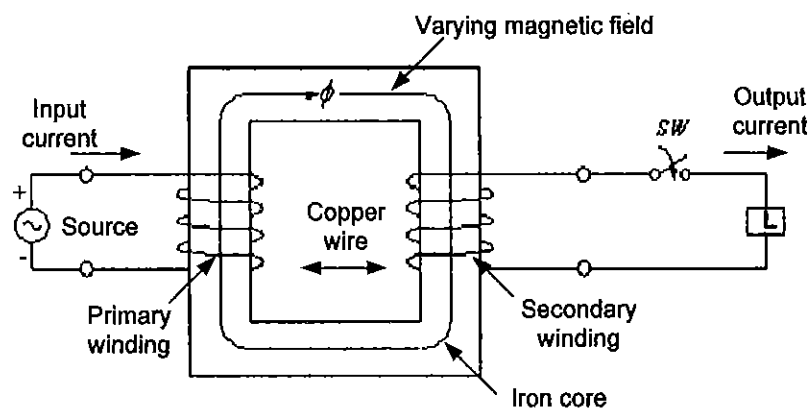
หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) เป็นเครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C. machine) ที่กำหนดให้มีภารกิจหลักในการแปลงแรงดันไฟฟ้าจากระดับของแรงดันไฟฟ้าใด ๆ ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าในระดับที่ต้องการสามารถเขียนแทนสัญลักษณ์ได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

2.2.1 ลักษณะโครงสร้าง

หม้อแปลงไฟฟ้ามีลักษณะโครงสร้างสำคัญที่ใช้ในการคำนวณประกอบด้วยแกนเหล็กและขดลวดทองแดง 2 ชุด คือขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) กับขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) ที่พันบนแกนเหล็กเดียวกัน ขดลวดทั้งสองชุดนี้ทางวงจรแม่เหล็กแยกอิสระต่อกัน ทั้งยังไม่มีวงจรไฟฟ้าต่อกันดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวด 2 ชุดและแกนเหล็ก

2.2.2 ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นลวดทองแดงอาบน้ำมันที่พันรอบแกนเหล็กทั้ง 2 ชุด ซึ่งพันไว้ด้วยกระดาษฉนวนที่มีความหนาแน่นทางกลและไฟฟ้าได้ดี ทางกรคำนวณมักจะให้ขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) อยู่ทางด้านซ้ายและขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) อยู่ทางด้านขวา เพื่อให้สะดวก รวดเร็วและง่ายต่อการพิจารณาค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้า แต่การพันหม้อแปลงไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ใช้ ขดลวดแต่ละขดมีหน้าที่ดังนี้

- ขดลวดปฐมภูมิ เป็นขดลวดรับพลังงานไฟฟ้าเข้ามา (Input) นิยมเขียนค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับห้อยท้ายด้วยเลข 1

U_1 คือ แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (V)

E_1 คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ (V)

I_1 คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า (A)

N_1 คือ จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิ (รอบ)

- ขดลวดทุติยภูมิ เป็นขดลวดจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกไปใช้งาน (Output) ค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับนิยมนิยมเขียนห้อยท้ายด้วยเลข 2 ดังนี้

U_2 คือ แรงดันไฟฟ้าจ่ายโหลด (V)

E_2 คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทุติยภูมิ (V)

I_2 คือ กระแสจ่ายโหลด (A)

N_2 คือ จำนวนรอบขดลวดด้านทุติยภูมิ (รอบ)

2.2.3 การออกแบบขดลวดแรงต่ำและแรงสูง

หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก พิกัดน้อย ๆ จนถึง 50 kVA ที่ขดลวดมีการระบายความร้อนโดยอาศัยการแทรกซึมของน้ำมันหม้อแปลงจะกำหนดความหนาแน่นของกระแสในขดลวดอยู่ในช่วง 1.1-2.3 A/mm² ขดลวดแรงต่ำและแรงสูงจะกำหนดความหนาแน่นอยู่ที่ 2.3 A/mm² ซึ่งจะสอดคล้องกับขนาดของลวดที่มีขายในเชิงการค้า ขดลวดที่โตกว่านี้แม้จะให้ความหนาแน่นของกระแสที่ต่ำกว่า แต่จำนวนชั้นการพันของขดลวดจะเพิ่มขึ้นอาจทำให้เปอร์เซ็นต์แรงดันล้นวงจรสูงเกินไปขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดแรงต่ำและแรงสูงหาได้จากสมการดังนี้

$$A_1 = \frac{I_1}{J_1} \quad (2.3)$$

โดย A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (mm²)

I_1 คือ กระแสที่ป้อนเข้าที่พิกัด (A)

J_1 คือ ความหนาแน่นกระแส (A/mm^2)
จำนวนรอบขดลวดสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$N_1 = \frac{V_1}{E/N} \quad (2.4)$$

โดย N_1 คือ จำนวนรอบขดลวดแรงต่ำ (รอบ)

V_1 คือ แรงดันป้อนเข้า (V)

E/N คือ Volt/Turn (V/T)

น้ำหนักทองแดงของขดลวดสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$W = N \times A_1 \times I_{av} \times D \quad (2.5)$$

โดย W คือ น้ำหนักของขดลวด (kg)

N คือ จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ (รอบ)

A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด (mm^2)

D คือ ความหนาแน่นของทองแดง

I_{av} คือ ความยาวรอบเฉลี่ย (mm)

ความต้านทานของขดลวดสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$R = \rho \frac{L}{A_1} \quad (2.6)$$

โดย R คือ ความต้านทานของขดลวด (Ω)

ρ คือ สภาพความต้านทานของทองแดง ($\Omega \cdot m$)

L คือ ความยาวของขดลวด (mm)

A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด (mm^2)

กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวดแรงต่ำ ($P_{CU.LV}$) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$P_{CU.LV} = I_1^2 R \quad (2.7)$$

- โดย $P_{CU, LV}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดแรงต่ำ (W)
 I_1 คือ กระแสป้อนเข้า (A)
 R คือ ความต้านทานขดลวด (Ω)

2.2.4 การออกแบบแกนเหล็ก

แกนเหล็กเป็นโครงสร้างหลักของหม้อแปลง ทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก จะประกอบขึ้นกับแผ่นเหล็กบาง ซึ่งแต่ละแผ่นจะฉาบด้วยสารที่เป็นฉนวนไฟฟ้านำมาอัดซ้อนกัน เรียกว่า แกนเหล็กลามิเนต (Laminated sheet steel) เพื่อลดการสูญเสียในแกนเหล็ก อันเนื่องจากกระแสไหลวนในเนื้อแกนเหล็ก ซึ่งแกนเหล็กนี้ได้มีการผสมซิลิคอนประมาณ 3-5% การผสมซิลิคอนเข้าไป เพื่อให้ความต้านทานของแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้นเพื่อลดเพื่อลดกระแสไหลวนและเพิ่มค่า μ ของแผ่นเหล็ก และวงรอบฮิสเตอร์ซิสตอลง นั่นคือลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก และลดกระแสสร้างแม่เหล็ก

เนื่องจากรูปคลื่นของแรงดันทดสอบต้องใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากที่สุด ดังนั้นค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก (B_m) จะต้องอยู่ในย่านเชิงเส้นค่า B_m ของเหล็กชนิด M-4 เข้าใกล้ย่านอิ่มตัวประมาณ 1.6 Wb/m^2 ในการออกแบบจึงเลือกค่า (B_m) เท่ากับ 1.3 Wb/m^2 ซึ่งพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.8)

$$E = 4.44 fNB_m A_m F_s \quad (2.8)$$

$$A_m = \frac{E}{4.44 fNB_m F_s} \quad (2.9)$$

- โดย E คือ ค่า RMS ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด
 N คือ จำนวนรอบของการพันขดลวด (รอบ)
 f คือ ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ (Hz)
 B_m คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Wb/m^2 หรือ Tesla)
 A_m คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก (m^2)
 F_s คือ Stacking factor ในที่นี้ใช้ค่า 0.97

เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก

$$Q = B_m A_m F_s \quad (2.10)$$

การออกแบบหน้าตัดของแกนเหล็กทำเป็นหลายชั้น คือ รูปสี่เหลี่ยมอัดภายในวงกลม เพื่อสามารถใช้พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่าพื้นที่หน้าตัดขวางที่เป็นสี่เหลี่ยม และเหตุผลทาง

กายภาพในการพันขดลวดให้มีลักษณะเป็นทรงกลมได้ง่ายขึ้น ลดการเสียดสีของขดลวดกับแกนเหล็ก และเมื่อขนาดใช้งานจะเกิดแรงระหว่างขดลวดก็จะไม่ทำให้ขดลวดเสียรูป การออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กแบบหลายชั้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพการใช้พื้นที่สูงสุด การออกแบบแกนเหล็กต้องคำนึงถึงขนาดของค่าแฟกเตอร์พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กในวงกลมความกว้างของแผ่นเหล็กที่สามารถตัดได้ในเชิงของการผลิต จะให้ค่าแฟกเตอร์พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กในวงกลม (F_c)

หาค่า F_c จากสมการได้ดังนี้

$$\frac{3.14}{4 \cdot D^2} = \frac{A_m}{F_c} \quad (2.11)$$

โดย F_c คือ พื้นที่ตัดแกนเหล็กในวงกลม

A_m คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก (m^2)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม

โดยที่ความยาวรอบเฉลี่ยของแกนเหล็กหาจากความยาวแกนกลางของแกนเหล็กหาจากสมการดังนี้

$$l_{fe} = 2(A+B) + 2(C+B) \quad (2.12)$$

โดย l_{fe} คือ ความยาวรอบเฉลี่ยของแกนเหล็ก

A คือ ความยาวของแกนเหล็กด้านใน

B คือ ระยะห่างจากขอบตัวถึงถึงจุดศูนย์กลาง

C คือ ความกว้างของแกนเหล็กด้านใน

ปริมาตรแกนเหล็กหาได้จากสมการดังนี้

$$V_c = A_m F_s l_{fe} \quad (2.13)$$

โดย A_m คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก (m^2)

F_s คือ Stacking factor (0.97)

l_{fe} คือ ความยาวรอบเฉลี่ยของแกนเหล็ก

น้ำหนักแกนเหล็กคิดจากความหนาแน่น 7.65 g/cm^3 สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$W_c = \frac{(V_c \cdot D)}{1000} \quad (2.14)$$

โดยที่ V_c คือ ปริมาณแกนเหล็กหลังถูกตัด
 D คือ ความหนาแน่นของแกนเหล็ก

กำลังที่สูญเสียในแกนเหล็กหาได้จากกราฟผู้ผลิตเหล็กซิลิกอนกำหนดให้ได้ในที่นี้จากกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อน้ำหนักแกนเหล็กที่ 1.3 Wb/m^2 มีค่าเท่ากับ 0.6 W/kg ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (P_c)

$$P_c = 0.6 \cdot W_c \quad (2.15)$$

โดยที่ W_c คือ น้ำหนักของแกนเหล็กคิดจากความหนาแน่น

Exciting Volt-Ampere ในแกนเหล็กที่ 1.3 Wb/m^2 มีค่าเท่ากับ 0.6 VA/kg ดังนั้นสามารถหากระแสป้อนเข้าขณะไม่มีโหลดได้ดังสมการนี้

$$I_\phi = \frac{PVA}{V_{ip}} \quad (2.16)$$

โดยที่ PVA คือ Exciting Volt-Ampere

V_{ip} คือ แรงดันด้าน input

2.2.5 การถ่ายเทความร้อน (Heat Dissipation)

ในกรณีของหม้อแปลงความร้อนจะเกิดกระแสที่ไหลในตัวนำไฟฟ้าที่มีค่า ความต้านทานของขดลวด เส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลในสารเฟอร์โรแมกเนติก รวมทั้งเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลในตัวถังและ ฉาปิดของหม้อแปลง ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงสูงขึ้นจากอุณหภูมิของสารตัวกลางรอบข้าง โดยกรณีทั่วไปจะเป็นอากาศโดยความร้อนนี้จะถูกถ่ายเทออก 3 ทาง คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และ การแผ่รังสีความร้อน

2.2.6 การนำความร้อน

การนำความร้อนจะมีลักษณะคล้ายการนำไฟฟ้า โดยการนำความร้อนจะเกิดระหว่าง 2 พื้นที่ผิวที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิผ่านสารตัวกลางคั่นอยู่ และโมเลกุลของสารตัวกลางจะถ่ายเทความร้อนให้แก่โมเลกุลที่อยู่ติดกัน โดยที่โมเลกุลไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเป็นไปตามสมการที่ (2.17)

$$Q_{\text{cond}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{pl}{A}} = \frac{\Delta T_1}{\frac{pl}{A}} \quad (2.17)$$

โดยที่ Q_{cond}	คือ กำลังความร้อนที่ถ่ายเทผ่านสารตัวกลาง (W)
ΔT_1	คือ ผลต่างของอุณหภูมิของสองพื้นผิว ($^{\circ}\text{C}$)
P	คือ สภาพต้านทานทางความร้อน ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$)
L	คือ ความยาวของสารตัวกลาง (m)
A	คือ พื้นที่หน้าตัดของสารตัวกลาง (m^2)

เมื่อกำหนดอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดแรงสูงเทียบกับน้ำมัน ได้จะเป็นไปตามสมการคือ

$$\Delta T_1 = \frac{Q_{\text{cond}} \times l}{\sigma \times A} \quad (2.18)$$

โดยที่ σ คือ สภาพนำความร้อนของกระดาษฉนวนจุ่มน้ำมัน

2.2.7 การพาความร้อน

การพาความร้อนเกิดจากอนุภาคของก๊าซหรือของเหลวที่ใกล้วัตถุร้อนและรับความร้อนจากวัตถุอื่น อนุภาคนั้นจะร้อนขึ้นและเคลื่อนเข้าไปแทนที่อนุภาคที่เย็นกว่า จากกระบวนการนี้จะทำให้ความหนาแน่นของของไหลมีการเปลี่ยนแปลง

การพาความร้อนแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติ และการพาความร้อนด้วยแรงขับเคลื่อน (Artificial convection) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

การพาความร้อนแบบธรรมชาติ เป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนมากขึ้นกับหลายตัวแปรด้วยกันอันได้แก่

1. ความหนาแน่นของกำลังงานที่ใช้
2. ความแตกต่างของพื้นที่ผิวระบายความร้อนกับสารตัวกลางระบายความร้อน
3. ความสูง ทิศทาง สภาพพื้นผิวระบายความร้อน
4. สภาพต้านทานความร้อน ความหนืด การขยายตัวของสารตัวกลางระบายความร้อน

การคำนวณการพาความร้อนจะขึ้นกับผลต่างของอุณหภูมิวัตถุที่สนใจกับอุณหภูมิของตัวกลางที่แวดล้อมอาจทำได้โดยจากสมการที่ (2.18)

$$Q_{\text{conv}} = K_c (T_1 - T_2)^n \text{ W/m}^2 \quad (2.19)$$

- โดยที่ K_c คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับขนาดและสภาพพื้นผิวของวัตถุร้อน
- N คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับขนาดและสภาพพื้นผิวของวัตถุร้อนมีค่าระหว่าง 1-1.25
- Q_{conv} คือ ค่าการพาความร้อนของตัวกลางต่อ 1 หน่วยพื้นที่ผิวของวัตถุ (W/m^2)

2.2.8 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำออกจากวัตถุร้อน ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและลักษณะเฉพาะตัวของพื้นผิวอัน ได้แก่ สี และความขรุขระของพื้นผิว ซึ่งมีความซับซ้อนมากในการคำนวณ

การคำนวณแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ (%Z) พิจารณาแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์จากสมการที่ (3.20)–(3.22) รายละเอียดของสมการดูได้จากเอกสารอ้างอิง

$$e_z = \sqrt{e_r^2 + e_x^2} \quad (3.20)$$

$$e_r = \frac{P_T}{S_N} \times 100 \quad (3.21)$$

$$e_x = \frac{0.42 \times \pi \times S_N \times \left(\frac{d_m + D_m}{2} \right) \times \left(HVLV + \frac{RB_{LV} + RB_{HV}}{3} \right) \times \frac{f}{50} \times K_a}{K_g \times \left(\frac{U_{ph}}{N} \right)^2 \times AL_{app} \times 10} \quad (3.22)$$

- โดย e_z คือ impedance (%)
- e_r คือ Resistance (%)
- e_x คือ Reactance (%)
- P_T คือ Total Load Losses; ($P_T = 0.91$ kW)
- S_N คือ Rating; ($S_N = 6$ kVA)
- d_m คือ Equivalent mean diameter of low voltage winding;
($d_m = 148.64$ mm)
- D_m คือ Equivalent mean diameter of high voltage winding; ($D_m = 265$ mm)
- $HVLV$ คือ Distance between high and low voltage winding;
($HVLV = 13.55$ mm)

RB_{LV} คือ Radial build of low voltage winding; ($RB_{LV} = 7.9$ mm)

RB_{HV} คือ Radial build of high voltage winding; ($RB_{HV} = 77.5$ mm)

F คือ Frequency ; ($F = 50$ Hz)

U_{ph} คือ Voltage per phase; ($U_{ph} = 220$ V)

N คือ Number of turn per phase; ($N = 68$ รอบ)

K_a คือ Regowski factor = $1 - \frac{RB_{LV} + RB_{HV} + HVLV}{\pi \cdot AL_{app}}$

: ($K_a = 0.87$)

K_g คือ Number of wound legs (When three phase $K_g = 3$); ($K_g = 1$)

U_{phLV} คือ Phase voltage in low voltage winding; ($U_{phLV} = 220$ V)

AL_{app} คือ Apparent axial length of low voltage winding

$$= \frac{AL_{LV}}{1 - (RB_{LV} + RB_{HV} + HVLV)}; (AL_{app} \text{ มีค่า } 247.058)$$

AL_{LV} คือ Axial length of low voltage winding; ($AL_{LV} = 210$ mm)

ดังนั้น $\%Z = 2.75$ (ต่อหม้อแปลง 1 ตัว)

2.2.9 การคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc})

จากสมการกระแสลัดวงจร

$$I_{sc} = \frac{I_{HV}}{\%Z} \times 100 \quad (2.23)$$

โดย I_{sc} คือ กระแสลัดวงจร (A)

I_{HV} คือ กระแสไฟฟ้าทางด้านแรงสูง (A)

$\%Z$ คือ แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์

2.2.10 กำลังไฟฟ้าลัดวงจร (S_{sc})

จากสมการกำลังไฟฟ้าลัดวงจร

$$S_{sc} = \frac{S_{HV}}{\%Z} \times 100 \quad (2.24)$$

โดย S_{sc} คือ กำลังไฟฟ้าวงจร (A)
 S_{HV} คือ กำลังไฟฟ้าทางด้านแรงสูง (A)
 $\%Z$ คือ แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์

2.2.11 สมรรถนะของหม้อแปลงไฟฟ้า

ด้วยเหตุที่หม้อแปลงไฟฟ้าต้องรับพลังงานไฟฟ้าด้านเข้า (Input) ในระดับของแรงดัน (V_1) และกระแส (I_1) แล้วจ่ายพลังงานไฟฟ้าทางขดลวดด้านออก (Output) ในระดับของแรงดันไฟฟ้า (V_2) และกระแสจ่ายโหลด (I_2) ถ้าหากไม่คิดเวลาที่จะได้กำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) มีหน่วยเป็น VA หรือ kVA ดังนั้นกำลังไฟฟ้าปรากฏทั้งด้านเข้าและด้านออกเท่ากันดังแสดงในสมการที่ (2.24)

$$S = V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (2.25)$$

ดังนั้น สมรรถนะของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงหมายถึงความสามารถในการจ่ายโหลดทั้งด้านเข้าและด้านออก ที่เป็นผลคูณระหว่างแรงดันกับกระแส หรือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power) มีหน่วยเป็น VA หรือ kVA นั่นเอง และเนื่องจากกำลังไฟฟ้าปรากฏนี้เป็นค่าคงที่ของหม้อแปลงไฟฟ้าใด ๆ ที่ไม่ได้แปรผันไปตามโหลด ด้วยเหตุนี้ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงกำหนดเป็น VA หรือ kVA เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 500 VA, 1000 VA (หรือ 1 kVA), 22 kVA, 115 kVA ฯลฯ จะไม่กำหนดขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าเป็น วัตต์ (Watt) เพราะว่าการกำลังปรากฏมีค่าไม่คงที่ จะแปรผันไปตามค่าองค์ประกอบกำลัง (Power factor) ของโหลด

2.2.12 การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานขณะไม่ต่อกับโหลด กับหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานขณะต่ออยู่กับโหลด ทั้งสองลักษณะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้านี้จะให้ผลต่างที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์ต่อเนื่องกันดังนี้

2.2.13 หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานขณะไม่ต่อกับโหลด

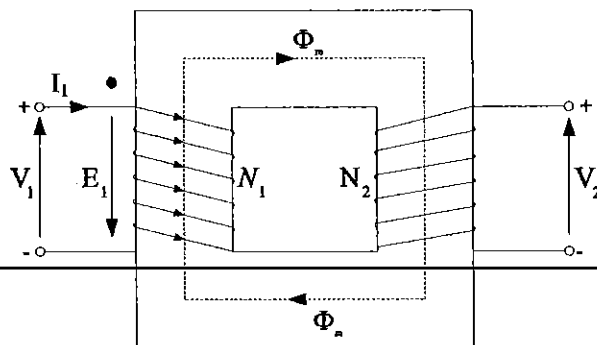
ในที่นี้หมายถึง ลักษณะงานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่อขดลวดปฐมภูมิ V_1 ส่วนขดลวดทุติยภูมิให้เปิดวงจรไว้ ทำให้ขณะนี้มีกระแสไหลผ่านเฉพาะภายในขดลวดปฐมภูมิเพียงขดเดียวเท่านั้น หม้อแปลงไฟฟ้าในลักษณะงานเช่นนี้เรียกว่า การทำงานภายใต้เงื่อนไขเปิดวงจร (Open circuit condition) ดังรูปที่ 2.3 หรือเขียนด้วยวงจรเทียบเท่าหม้อแปลงไฟฟ้าดังรูปที่ 2.4

1573 656 0

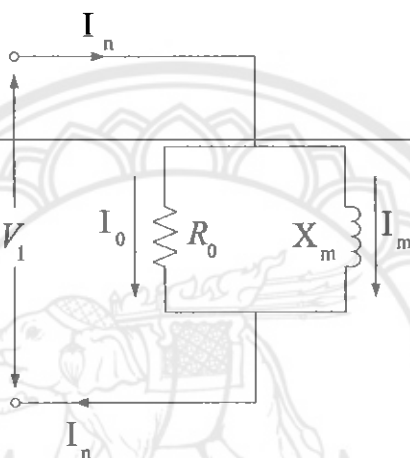
น/อ.

ป/ส 23 ก

2552



รูปที่ 2.3 หม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่ต่อกับโหลด $E_1 = V_1$ และ $E_2 = V_2$

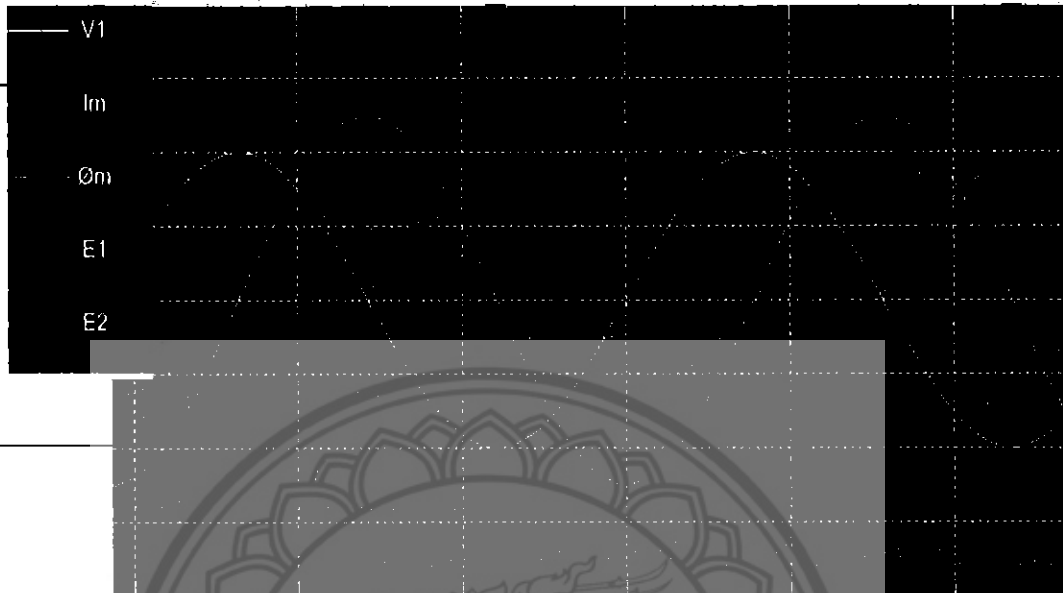


รูปที่ 2.4 วงจรเทียบเท่าของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่ต่อ โหลด $I_1 = I_n = I_0 + I_m$

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

1. กระแสส่วนที่ใช้ไปเพื่อไปสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก Φ_m ให้ไหลในแกนเหล็ก กระแสส่วนนี้เรียกว่า "Magnetizing current" เขียนด้วยสัญลักษณ์ I_m เนื่องจาก I_m ให้กำเนิด Φ_m ดังนั้น I_m จึงซ้อกับ (Inphase) กับ Φ_m และตามหลัง (Lag) แรงดันไฟฟ้า V_1 อยู่เป็นมุม 90° กระแส I_m ซ้อกับกับ Φ_m และตามหลังแรงดันไฟฟ้า V_1 อยู่เป็นมุม 90° ด้วยเหตุที่เส้นแรงแม่เหล็ก Φ_m เป็นเส้นแรงแม่เหล็กรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal flux) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ไฟฟ้าของระบบไฟกระแสสลับที่ต่อเข้ากับแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ V_1 ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 และ E_2 ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น ในขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิในขนาดที่เท่ากัน และมีทิศทางตรงกันข้ามกับ แรงดันไฟฟ้า V_1 และ V_2 ตามกฎของเลนซ์ (Lenz's law) ตามที่ได้กล่าวไว้ในเบื้องต้นตามลำดับ E_1 และ E_2 ที่ถูกเหนี่ยวนำด้วย Φ_m นี้ จะตามหลัง I_m และ Φ_m อยู่ 90° ไฟฟ้าและตามหลัง V_1 อยู่ 180° (E_1 และ E_2 จะมีมุมเฟสต่างกัน 180°

กับ V_1) ตามรูปคลื่นไฟฟ้ารูปที่ 2.8 I_m , Φ_m ตามหลัง V_1 อยู่ 90° และนำหน้า E_1, E_2 อยู่ 90° ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าเคลื่อนไฟฟ้า E_1, E_2 จะมีมุมเฟสต่างกับกับ V_1 อยู่ 180°



รูปที่ 2.5 รูปคลื่นไฟฟ้าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_m และ Φ_m กับ V_1 และ E_1, E_2

2. กระแสส่วนที่ใช้ไปเพื่อการสูญเสียบนแกนเหล็ก อันเนื่องมาจากความต้านทานของแกนเหล็ก ซึ่งได้แก่ ฮีสเทอรีซิส (hysteresis) และ กระแสไหลวน (eddy current losses) กระแสส่วนนี้เรียกว่า ความสูญเสียภายในแกนเหล็ก (core loss current) เขียนแทนด้วย I_0 หรือ I_{h+c} และกระแส I_0 นี้จะซ้อนทับกับ V_1 และนำหน้า I_m อยู่ 90° และมีค่าน้อยกว่า I_m มาก ๆ ($I_0 \ll I_m$) I_0 หรือ I_{h+c} จะซ้อนทับกับ V_1 และนำหน้า I_m อยู่ 90° ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ากระแสไม่มีโหลด I_0 ประกอบด้วยกระแส I_0 ที่ใช้ไปเพื่อการสูญเสียบนแกนเหล็กโดยเฉพาะกับกระแส I_m ที่ใช้ไปเพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก Φ_m ให้ไหลในแกนเหล็ก

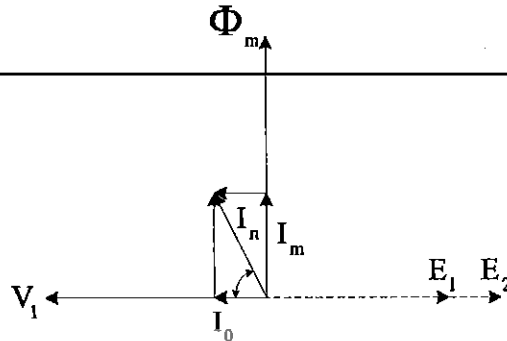
• เวกเตอร์ไดอะแกรมค่าต่าง ๆ ที่สัมพันธ์เกี่ยวข้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดนอกจากจะแสดงด้วยรูปคลื่นไฟฟ้าตามรูปที่ 2.5 แล้วยังนิยมแสดงให้เห็นจริงได้ด้วยเวกเตอร์ไดอะแกรมตามรูปที่ 2.6 ที่ประกอบด้วย

• แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 และ E_2 ที่มีทิศทางตรงกันข้ามในลักษณะต่อต้านกับแรงดันไฟฟ้าเมน V_1 หรือ E_1, E_2 จะมีมุมเฟสต่างกับ 180° กับ V_1

• กระแส I_m ที่ซ้อนทับกับ Φ_m และตามหลังแรงดันไฟฟ้าค้ำปรวม V_1 อยู่ 90° หรือนำหน้า 90°

• กระแส I_0 ที่ซ้อนทับกับ V_1 และนำหน้า I_m อยู่ 90°

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



รูปที่ 2.6 เวกเตอร์ไออะแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด

เมื่อ	V_1	คือ แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิแรงเคลื่อนไฟฟ้า (V)
	I_m	คือ กระแสส่วนที่ใช้ไปเพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (A)
	I_0	คือ กระแสส่วนที่ใช้ไปเพื่อการสูญเสียบนแกนเหล็ก (A)
	I_n	คือ กระแสที่ไม่มีโหลด (A)
	θ_n	คือ มุมระหว่างเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด (องศาไฟฟ้า)

ค่าต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด คำนวณได้จากวงจรเทียบเท่าหม้อแปลงไฟฟ้า รูปที่ 2.7 และเวกเตอร์ไออะแกรมรูปที่ 2.6 ตามสมการต่อไปนี้

1. กระแสไม่มีโหลดคำนวณได้จากสมการที่ (2.26) และ (2.27) ตามลำดับ

$$I_0 = I_n \cos \theta_n \quad (2.26)$$

$$I_m = I_n \sin \theta_n \quad (2.27)$$

ผลรวมของกระแสทางเวกเตอร์ระหว่างสมการที่ (2.26) และ (2.27) จะได้กระแสตามสมการที่ (2.28)

$$I_n = \sqrt{I_0^2 + I_m^2} \quad (2.28)$$

เวกเตอร์ไออะแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดตามรูปที่ 2.6 สามารถเขียนในรูปเวกเตอร์ตามสมการที่ (2.28)

$$I_n = -I_o - jI_m \quad (2.29)$$

2. มุมระหว่างเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด สามารถพิจารณาจากเวกเตอร์ไดอะแกรมรูปที่ 2.6 จะได้มุมระหว่างเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดได้ ตามสมการที่ (2.29), (2.30) และ (2.31) ตามลำดับ

$$\theta_n = \tan^{-1} \frac{I_m}{I_o} \quad (2.30)$$

$$\theta_n = \cos^{-1} \frac{I_o}{I_n} \quad (2.31)$$

$$\theta_n = \sin^{-1} \frac{I_m}{I_n} \quad (2.32)$$

ค่า $\cos \theta_n$ ของหม้อแปลงไฟฟ้าคำนวณได้ตามสมการที่ (2.33)

$$\cos \theta_n = \frac{I_o}{I_n} = \frac{I_o}{\sqrt{I_o^2 + I_m^2}} \quad (2.33)$$

3. กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก เป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ไปเพื่อการสูญเสียในแกนเหล็กเนื่องจากฮิสเทอรีซิส และ กระแสไหลวน (ความต้านทานของแกนเหล็ก) เป็นกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ทางด้านของโหลดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดนั่นเอง สามารถคำนวณได้จากเวกเตอร์แผนภาพรูปที่ 2.4 และวงจรเทียบเท่าหม้อแปลงไฟฟ้ารูปที่ 2.6 ตามสมการต่อไปนี้

$$P_o = V_1 I_o \quad (2.34)$$

$$P_o = V_1 I_n \cos \theta_n \quad (2.35)$$

$$P_o = I_o^2 R_o \quad (2.36)$$

$$P_o = \frac{V_1^2}{R_o} \quad (2.37)$$

เมื่อ P_o คือ กำลังไฟรับเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด (No load power - input) หรือกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้า (W)
 $\cos \theta_n$ คือ องค์ประกอบกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด
 R_o คือ ความต้านทานของแกนเหล็ก (Ω)

4. ความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของแกนเหล็ก สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_o = \frac{V_1}{I_o} \tag{2.38}$$

$$X_m = \frac{V_1}{I_m} \tag{2.39}$$

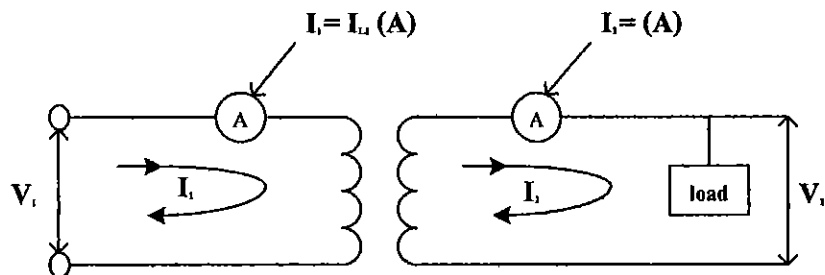
$$Z_n = \frac{V_1}{I_n} \tag{2.40}$$

$$\cos \theta_n = \frac{Z_n}{R_o} \tag{2.41}$$

เมื่อ X_m คือ รีแอกแตนซ์ของแกนเหล็ก (Ω)
 Z_n คือ อิมพีแดนซ์ของแกนเหล็ก (Ω)

2.2.14 หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานขณะต่ออยู่กับโหลด

เมื่อต่อขดลวดปฐมภูมิเข้ากับระบบไฟกระแสสลับแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ V_1 และขดลวดทุติยภูมิต่อเข้ากับโหลด แรงดันไฟฟ้าโหลด V_2 ขณะหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานจ่ายโหลดด้วยกระแสโหลด I_2 ทางด้าน I_1



รูปที่ 2.7 การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะต่ออยู่กับโหลด (Load condition)

ขณะที่ขดลวดทุติยภูมิจ่ายกระแสไหล I_2 ออกไปขดลวดปฐมภูมิจะดึงกระแสไหล I_{L1} จากระบบไฟเข้ามาในอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าตามสมการที่ (2.22) จะได้สมการที่ (2.41) และ (2.42) ตามลำดับ

$$A = \frac{V_1}{I_1} = \frac{I_2}{I_{L1}} \quad (2.42)$$

$$I_{L1} = \frac{I_2}{A} \quad (2.43)$$

เมื่อ I_{L1} คือ กระแสไหลในขดลวดปฐมภูมิ (A)

2.3 ความเครียดสนามไฟฟ้า

ในกรณีที่มีอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ที่บริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด เช่น อิเล็กโทรดทรงดอกเห็ด หรือ สิ่งที่มีปลายแหลม เป็นต้น เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรดค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยจะเรียงตามลักษณะอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด ไปอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ตามรูปที่ 2.8



- อิเล็กโทรดทรงดอกเห็ด
- อิเล็กโทรดทรงกลม
- อิเล็กโทรดทรงกระบอก

รูปที่ 2.8 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบกับของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

2.3.1 ความเครียดของสนามไฟฟ้าวิกฤติ

$$E_{cr} = 48.77 \sqrt{\frac{\sigma}{R\epsilon_1}} \quad (2.44)$$

เมื่อ	E_{cr}	คือ ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าวิกฤติ (kV/cm)
	σ	คือ ความตึงผิวของฉนวนเหลว ($\sigma = 43$ dyne/cm)
	ϵ_1	คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของฉนวนเหลว ($\epsilon_1 = 2$)
	R	คือ รัศมีหยดน้ำที่เจือปน

2.3.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองก๊าซในฉนวนน้ำมันเหลว

$$E_g = \frac{3\epsilon_1 E_0}{2\epsilon_1 + 1} \quad (2.45)$$

เมื่อ	E_g	คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองก๊าซ
	E_0	คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนเหลวเมื่อไม่มีฟองก๊าซ
	ϵ_1	คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) ของฉนวนเหลว ($\epsilon_1 = 2$)

2.4 ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

เป็นอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าโดยใช้มอเตอร์เป็นตัวหมุนหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ และใช้เฟืองโซ่เป็นตัวหดรอบความเร็ว ซึ่งการคำนวณความเร็วรอบเฟืองของมอเตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.46) ดังนี้

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.46)$$

เมื่อ	n_1	คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ (รอบต่อนาที)
	n_2	คือ ความเร็วรอบของหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ (รอบต่อนาที)
	N_1	คือ จำนวนฟันเฟืองที่มอเตอร์
	N_2	คือ จำนวนฟันเฟืองที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้

บทที่ 3

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

โครงการในส่วนนี้จะมีอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่

1. หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 kV 6 kVA
2. ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า
3. วงจรควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า
4. ถ้วยทดสอบ

อุปกรณ์แต่ละชิ้นจะทำงานสัมพันธ์กันคือ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดปรับแรงดันไฟฟ้า แล้วกวดสวิตช์เริ่มทำงานแรงดันไฟฟ้าขาออกจากชุดปรับแรงดันไฟฟ้าจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นแล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาเข้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงไฟฟ้าจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นด้วย แรงดันไฟฟ้าส่วนนี้จะถูกส่งไปยังอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ในถ้วยทดสอบจนทำให้อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์เกิดการเบรคดาวน์ อุปกรณ์ดังกล่าวทั้งหมดที่ จากนั้นอุปกรณ์ทุกอย่างจะกลับสถานะตัวเองเป็นแบบเริ่มต้นอีกครั้ง เพื่อเตรียมพร้อมที่จะทำการทดสอบในครั้งต่อไป

3.1 หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 kV 6 kVA

หม้อแปลงทดสอบแบบขึ้นบันไดขนาดพิกัด 50 kV 6 kVA มีองค์ประกอบที่สำคัญคือแกนเหล็ก ขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงสูง ขดลวดต่อควม ตัวถัง และ บุชชิ่ง

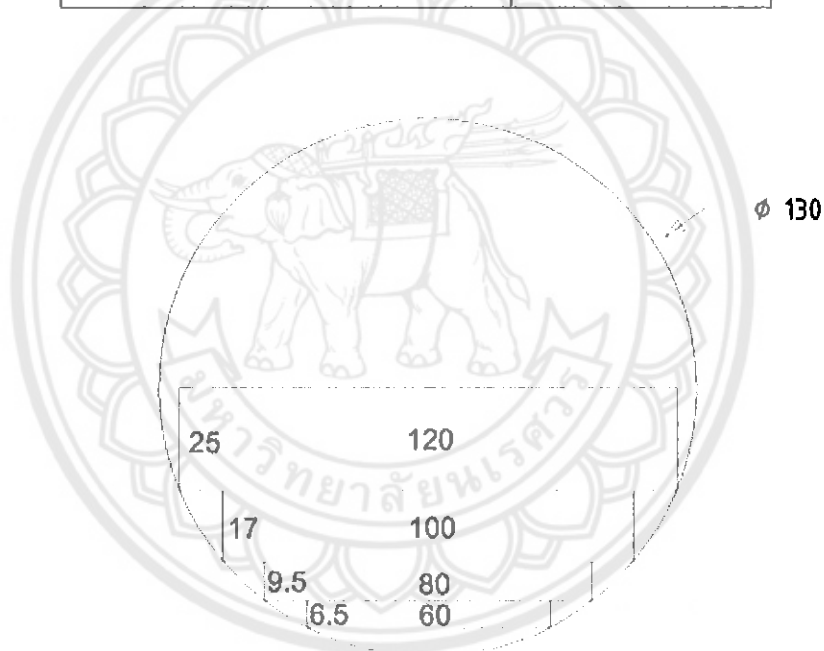
3.1.1 แกนเหล็ก

หม้อแปลงทดสอบแบบขึ้นบันไดขนาดพิกัด 50 kV 6 kVA คุณสมบัติดังตารางที่ 3.1 เนื่องจากการทดสอบต้องการรูปคลื่นของแรงดันใกล้เคียงกับรูปคลื่น ไซน์มากที่สุด ดังนั้นค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก (B_m) จะต้องอยู่ในย่านเชิงเส้นที่มีค่าอิ่มตัวของแกนเหล็กชนิด M 4 มีค่าเท่ากับ 1.3 Wb/m^2 ซึ่งใช้พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.8) และ (2.9)

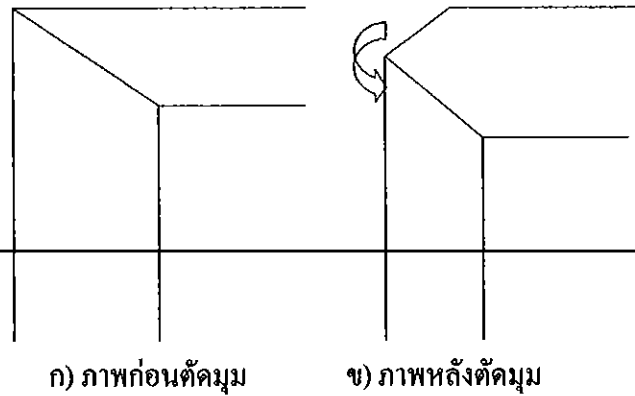
แกนเหล็กที่ใช้เป็นแบบคอร์ มีความหนาของแกนขนาด 0.27 mm พื้นที่ภาคตัดขวางเป็นแบบวงกลม 7 ชั้น บรรจุอยู่ในวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 130 mm ดังรูปที่ 3.1 และซึ่งจะตัดแกนเหล็กให้เป็นมุมฉาก ดังรูปที่ 3.2 เพื่อแก้ปัญหาเส้นแรงแม่เหล็กจะกับทิศทางการไหลเป็นผลให้ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกระแสของแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น ช่วยทำให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กสะดวกขึ้น ลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กและลดค่ากระแสของแม่เหล็ก

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของหม้อแปลงทดสอบ

รายละเอียดของหม้อแปลง	ค่าที่กำหนด
กำลังไฟฟ้า S_n (KVA)	6
แรงดันป้อนเข้า(แรงดันต่ำ) U_1 (V)	220
แรงดันจ่ายออก(แรงดันสูง) U_2 (kV)	50
กระแสป้อนเข้า I_1 (A)	27.27
กระแสป้อนออก I_2 (A)	0.12
จำนวนเฟส	1
ความถี่ (Hz)	50
โครงสร้างของตัวถังหม้อแปลง กว้าง×ยาว×สูง (cm)	43×59×65



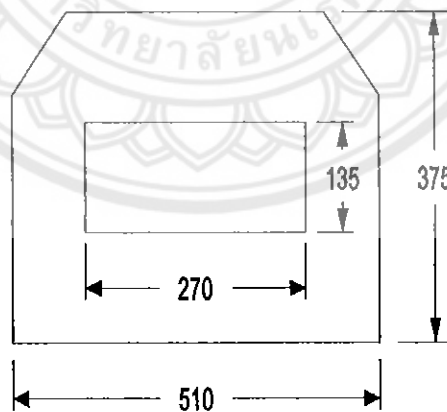
รูปที่ 3.1 แกนเหล็กแบบวงกลม 7 ชั้น บรรจุอยู่ในวงกลม



ก) ภาพก่อนตัดมุม ข) ภาพหลังตัดมุม

รูปที่ 3.2 ภาพก่อนและหลังตัดมุมแกนเหล็ก

แกนเหล็กที่จะใช้จะมีความกว้าง 430 mm ยาว 590 mm สูง 600 mm เนื่องจากวางแกนเหล็กซ้อนกันเพื่อให้สามารถรองรับแรงทางกลที่เกิดขึ้นจากการวางซ้อนกัน โดยที่ความสูงของแกนเหล็กที่ใช้จะขึ้นอยู่กับความหนาของขดลวดจากการคำนวณรัศมีวงนอกสุดของขดลวดจะมีค่าเท่ากับ 290 mm ในการผลิตอาจจะมีฝุ่นละอองต่าง ๆ เข้าไปปะปนอยู่กับน้ำมันทำให้ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนในน้ำมันลดลง ดังนั้นระยะห่างระหว่างแกนเหล็กกับขดลวดควรจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 23.6 mm นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงการเกิดโคโรนาน้อยที่สุด เพราะต้องการยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลง อีกทั้งในเชิงการผลิตจะมีขีดจำกัดในการตัดแผ่นเหล็ก ได้เป็นเลขที่ลงตัว จึงได้เลือกระยะไว้ประมาณ 6-7 cm ดังในรูปที่ 3.3 ดังนั้นจึงได้ความสูงของแกนเหล็กมีค่า 375 mm



รูปที่ 3.3 ขนาดของแกนเหล็ก

ลักษณะของแกนเหล็กเป็นแบบคอร์ (Core type transformer) ซึ่งมีลักษณะการพันแรงต่ำขดลวดลวดเป็นแบบพันล้อมแกนเหล็ก และเนื่องจากแกนเหล็กของหม้อแปลงจะถูกต่อลงดิน ดังนั้นเพื่อให้่ายต่อกันฉนวนจะทำการพันขดลวดแรงต่ำและพันขดลวดต่อควบไว้ด้านในและพันขดลวด

แรงสูงที่ขดลวดแรงต่ำทั้ง 2 ชุด ส่วนขดลวดต่อควมจะส่งกำลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าไปยังหม้อแปลง
ตัวบนไปยังหม้อแปลงตัวบนดังรูปที่ 3.4 และสามารถสรุปลักษณะของแกนเหล็กได้ดังตารางที่ 3.2



ก) ภาพก่อนประกอบแรงสูง

ข) ภาพหลังประกอบแรงสูง

รูปที่ 3.4 ลักษณะการพันขดลวดล้อมแกนเหล็ก

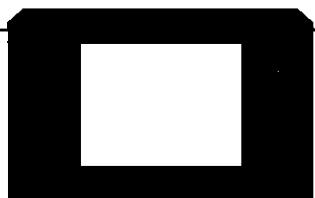
ตารางที่ 3.2 สรุปลักษณะแกนเหล็ก M-4

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (T)	1.3
ความหนาแน่นของแผ่นเหล็ก (mm)	0.27
การวางของแผ่นเหล็ก	1ทับ1
พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กตามรูปทรงเรขาคณิต (mm^2)	11,700
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแกนเหล็ก (mm)	130.00
พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กจริง (mm^2)	11,700
ความกว้างของแกนเหล็ก (mm)	270.00
ความสูงของแกนเหล็ก (mm)	135.00
ปริมาตรของแกนเหล็ก (cm^3)	11,916.45
น้ำหนักของแกนเหล็ก (kg)	88.88
ความสูญเสียในแกนเหล็ก (W)	53.32
กระแสป้อนเข้าขณะไม่มีโหลด (A)	0.242

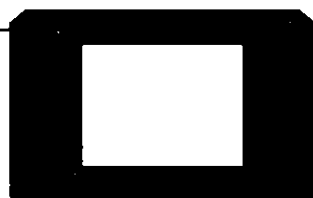
3.1.2 การจัดวางแผ่นเหล็ก

การจัดวางแผ่นเหล็กจะเป็นการจัดวางแบบทีละ 2 แผ่นดังรูปที่ 3.5 เนื่องจากการจัดวางแผ่นเหล็กทีละหลาย ๆ แผ่นสลับกัน ทำให้มีช่องอากาศกว้างมากขึ้น ส่งผลให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กไม่สะดวก เส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนจะวิ่งข้ามช่องอากาศและบางส่วนจะวิ่งไปยังแผ่นเหล็กด้านข้าง

เนื่องจากสภาพซึมซับได้ของแผ่นเหล็กมีค่าสูงกว่าอากาศมาก ทำให้แผ่นเหล็กบางส่วนที่มีเส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านมากกว่า ส่งผลให้แกนเหล็กมีการสูญเสียกำลังมากขึ้น ส่วนการจัดวางแกนเหล็กแบบที่แผ่นจะมีความลำบากมาก



ก) ภาพการจัดวางแกนเหล็กชั้นที่ 1



ข) ภาพการจัดวางแกนเหล็กชั้นที่ 2



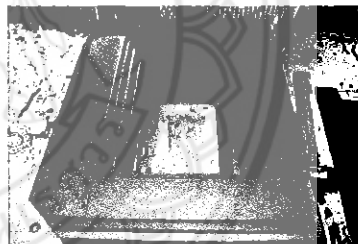
ค) ภาพการจัดวางแกนเหล็กชั้นที่ 3



ง) ภาพการจัดวางแกนเหล็กชั้นที่ 4



จ) ภาพการจัดวางแกนเหล็กชั้นที่ 5

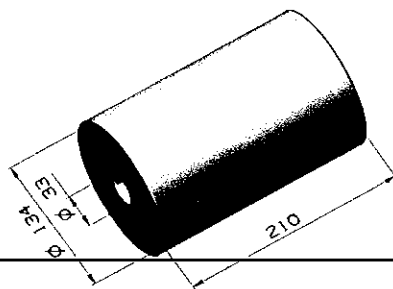


ฉ) ภาพการจัดวางแกนเหล็กเสร็จสมบูรณ์

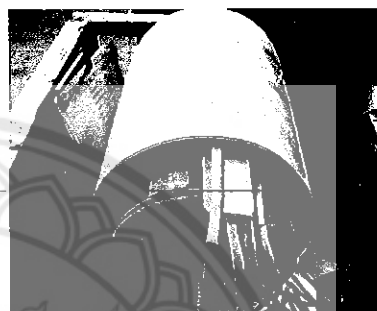
รูปที่ 3.5 การจัดวางแกนเหล็ก

3.1.3 ขดลวดแรงต่ำ

การพันขดลวดแรงต่ำเริ่มจากการเตรียมปลอก ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 134 mm ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางในด้านตรงกันข้ามให้มีขนาดเท่ากับ 135 mm เพื่อความสะดวกในการนำขดลวดออกจากแบบคอยล์ จากนั้นทำการพันขดลวดตามแบบ โดยเริ่มจากการใช้กระดาษอัดหนา 0.13 mm โดยใช้เพียง 1 แผ่น/ชั้น จึงทำการพันแรงต่ำโดยใช้ลวดอายน้ำยาขนาด 2.6×2 เส้น (หมายเลข 12) ทำการพัน 2 ชั้น ๆ ละ 34 รอบ จำนวน 68 รอบดังรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 ซึ่งสามารถสรุปลักษณะของขดลวดแรงต่ำได้ดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.6 ปลอกขดลวดแรงต่ำ



ก) ภาพพันขดลวดแรงต่ำเริ่มต้น

ข) ภาพพันขดลวดแรงต่ำเสร็จสมบูรณ์

รูปที่ 3.7 การพันขดลวดแรงต่ำ

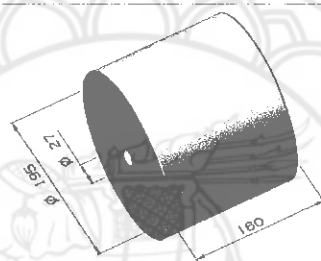
ตารางที่ 3.3 สรุปลักษณะของขดลวดแรงต่ำ

ชนิดของวัสดุ	ลวดทองแดง
ขนาดของตัวนำ (mm ²)	φ 2.6×2
ฉนวนห่อหุ้มเส้นลวด (PVF)	Insulated Enamelled
จำนวนรอบ (รอบ)	68
จำนวนขดลวด (ขด)	2
จำนวนชั้น (ชั้น)	2
จำนวนรอบ/ชั้น	34
รัศมีด้านในของขดลวด (mm)	67.5
รัศมีด้านนอกของขดลวด (mm)	81.14
ความกว้างของขดลวด (mm)	210
น้ำหนักของขดลวด (kg)	3.34
กำลังสูญเสียในขดลวด (W)	34.20

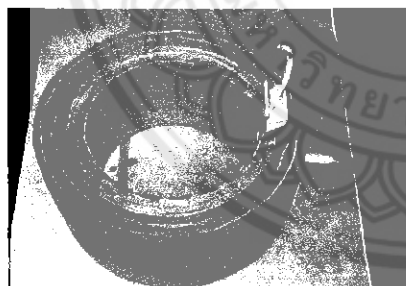
3.1.4 ขดลวดแรงสูง

การพันขดลวดแรงสูงจะเป็นการพันที่แยกกับขดลวดแรงต่ำ ดังนั้นจึงเริ่มจากการเตรียมปลอก เช่นเดียวกับขดลวดแรงต่ำโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 195 mm เพื่อสามารถสวมเข้ากับขดลวดแรงต่ำได้สะดวก โดยก่อนจะเริ่มพันขดลวดแรงสูงจะต้องเตรียม ปลอกกระดาษแรงสูง 0.5×15.9 จำนวน 4 แผ่น, กระดาษร่อนน้ำมัน 3.2×15.9 จำนวน 18 แผ่น, กระดาษระหว่างชั้น 0.13×15.9 จำนวน 40 แผ่น (กระดาษหั่วท้าย 0.5×30 , 0.5×25 , 0.5×20 จำนวน 20 แผ่น)

ต่อจากนั้นจึงทำการพันขดลวดแรงสูงโดยการพันจะแบ่งออกทั้งหมด 61 ชั้น โดยในแต่ละชั้นจะใส่กระดาษ 0.13 mm จำนวน 2.5 แผ่น ซึ่งในแต่ละชั้นของการพันขดลวดแรงสูงแสดงดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 และสามารถสรุปลักษณะของขดลวดแรงสูงได้ดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.8 ปลอกขดลวดแรงสูง



ก) ภาพพันขดลวดแรงสูงเริ่มต้น



ข) ภาพพันขดลวดแรงสูงเสร็จสมบูรณ์

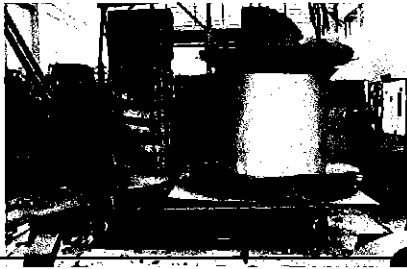
รูปที่ 3.9 ภาพการพันขดลวดแรงสูง

ตารางที่ 3.4 สรุปลักษณะของขดลวดแรงสูง

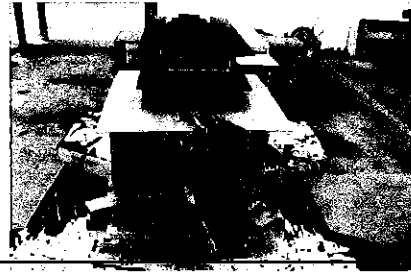
ชนิดของวัสดุ	ลวดทองแดง
ขนาดของตัวนำ (mm ²)	0.37
ฉนวนห่อหุ้มเส้นลวด (PVF)	Insulated Enamelled
จำนวนรอบ (รอบ)	15454
จำนวนขดลวด (ขด)	15454
จำนวนชั้น (ชั้น)	61
จำนวนรอบ/ชั้น	234
ความหนาของฉนวนระหว่างชั้น (mm)	0.13×2
รัศมีด้านในของขดลวด (mm)	97.5
รัศมีด้านนอกของขดลวด (mm)	167.5
ความกว้างของขดลวด (mm)	160
น้ำหนักของขดลวด (kg)	13.73
กำลังสูญเสียในขดลวด (W)	26.60

3.1.5 การประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็ก

ในการประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็กจะใช้วิธีการถอดแกนเหล็กด้านบนออกแล้วจึงทำการสวมขดลวดแรงต่ำก่อนและสวมขดลวดแรงสูงตามมาเข้ากับแกนเหล็กหลังจากนั้นจึงทำการใส่หัวเหล็กเข้าที่เดิม ใส่เนื้อและสลักเกลียวให้แน่น โดยใช้ลิ้มที่ทำจากกระดาษอัดเป็นตัวบังคับให้ขดลวดอยู่ตรงกึ่งกลางของแกนเหล็กด้านบน (Top Yoke) ลักษณะของการประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็กจะแสดงดังรูปที่ 3.10



ก) ภาพประกอบขดลวดแรงต่ำเริ่มต้น



ข) ภาพประกอบขดลวดแรงสูงเสร็จด้านข้าง



ค) ภาพประกอบขดลวดแรงต่ำเริ่มต้น

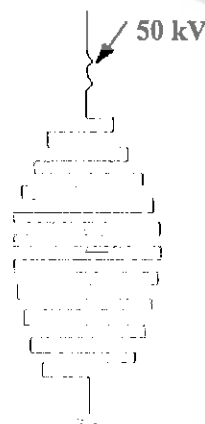


ง) ภาพประกอบขดลวดแรงสูงเสร็จด้านหน้า

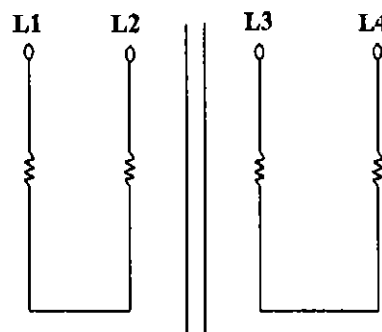
รูปที่ 3.10 การประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็ก

3.1.6 การต่อสาย

จะทำการต่อสายออกทางฝาด้านบนของตัวถังหม้อแปลง โดยขั้วต่อสายจะแบ่งออกทั้งหมด 3 ขั้ว คือ ปลายสายของขดลวดแรงต่ำ 4 เส้น, สายกราวด์ 2 เส้นและปลายสายของขดลวดแรงสูงอีก 1 เส้น ขั้วสายทั้งหมดนี้จะใช้น็อตทองเหลืองนี้ยึดติดกับแผ่นแบคคาไลที่ตัดเป็นสี่เหลี่ยมยึดติดอยู่กับฝาดังส่วนลักษณะการต่อสายจะแสดงดังรูปที่ 3.11, 3.12 และ 3.13 ซึ่งได้แสดงค่าการต่อสายขดลวดแรงสูงตามตารางที่ 3.5

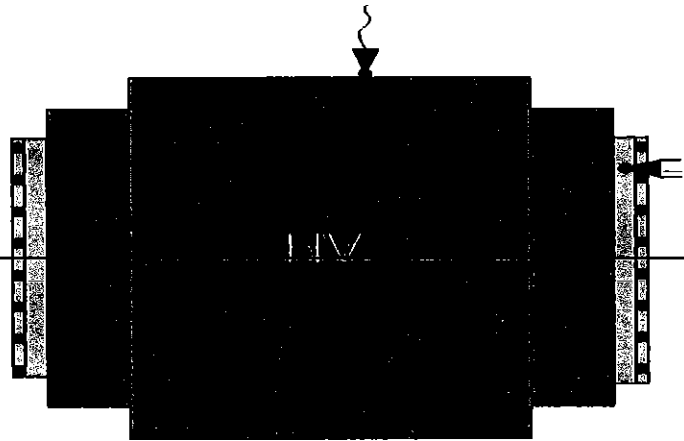


ก) แบบการพันขดลวด



ข) ต่อสาย

รูปที่ 3.11 แบบการพันขดลวดและต่อสาย



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งของดินและปลายลวดแรงสูงและแรงต่ำ



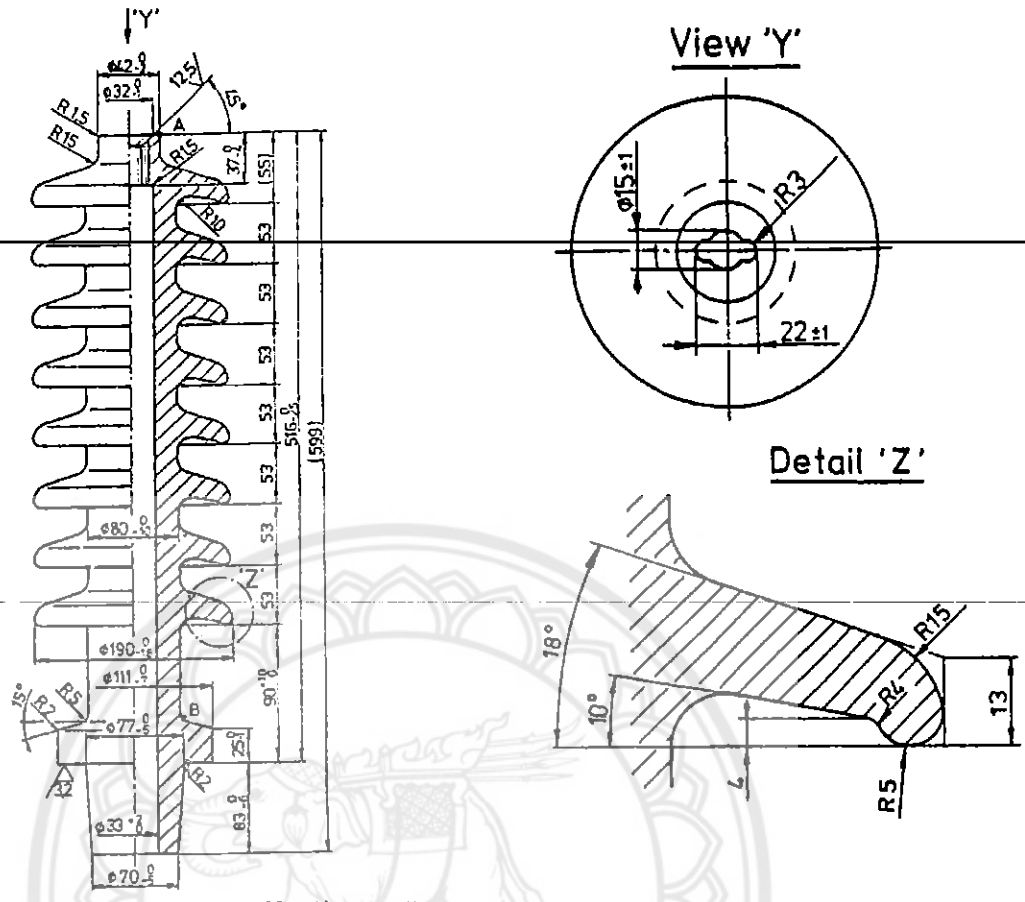
รูปที่ 3.13 แบบการพันขดลวดและต่อสาย

ตารางที่ 3.5 การแสดงค่าที่ได้จากการต่อสายของขดลวดแรงสูง

LV	HV
L1 - L2 = 220 V	H1 = 50 kV
L3 - L4 = 220 V	
หมายเหตุ; X3 - X4 ขดลวดต่อควบ	

3.1.7 บุชชิง

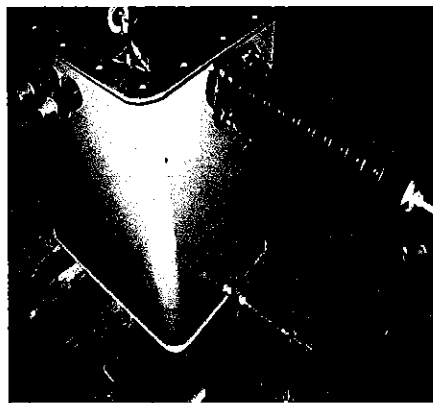
หม้อแปลงที่นำมาทดสอบได้ใช้ บุชชิงขนาด 11 ชั้นซึ่งสามารถทนแรงดันได้ 150 kV จากภาคผนวก ข ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 บุชชิง

3.1.8 วิธีการเติมน้ำมัน

หม้อแปลงทดสอบที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการดูดน้ำมันเข้าทางวาล์วล่าง น้ำมันที่ใช้บรรจุ น้ำมันหม้อแปลงที่ดูดเข้าไปต้องทว่ม ขดลวดและให้ระดับน้ำมันต่ำกว่าระดับฝาบน ประมาณ 1 cm ซึ่งเป็นช่วงสูญญากาศมีไว้สำหรับให้น้ำมันขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน โดยหม้อแปลงทดสอบจะมีความจุของน้ำมันอยู่ที่ประมาณ 80 ลิตรดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ตัวถังหม้อแปลง

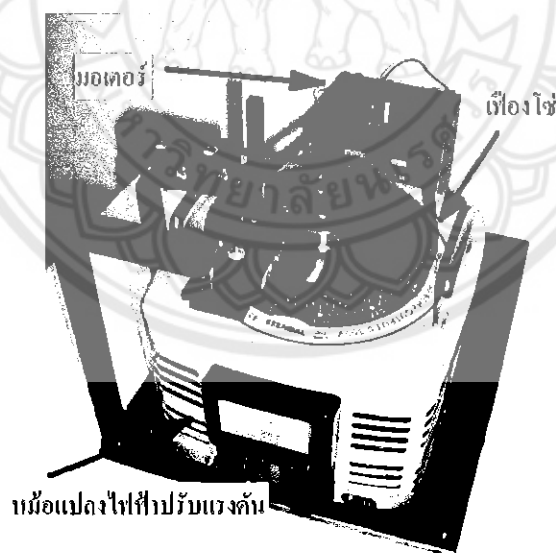
3.2 การสร้างชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

3.2.1 ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

ตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156 ต้องการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้น 3 kV/s \pm 20 %, 1/2 kV/s \pm 20% และ 2 kV/s \pm 20% จึงเลือกออกแบบใช้อุปกรณ์คือ หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เป็นอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้มอเตอร์เป็นตัวหมุนหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้มอเตอร์ที่เลือกใช้เป็นมอเตอร์เกียร์ มีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 24 V ความเร็วรอบ 8 รอบต่อนาที และหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้มีแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 230 V แรงดันไฟฟ้าขาออก 300 V มีพิกัดกำลัง 1 kVA

3.2.2 เฟืองทดรอบ

ความเร็วของหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ที่มาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156 ที่ต้องการคือ 2.163 รอบต่อนาที 0.36 รอบต่อนาที และ 1.442 รอบต่อนาที จึงใช้มอเตอร์เกียร์ที่มีความเร็วรอบ 8 รอบต่อนาที โดยที่ทั้ง 3 มาตรฐานใช้เฟืองที่มอเตอร์ให้ มีจำนวนฟันเป็น 12 ซึ่งมาตรฐาน ASTM D877 ใช้เฟืองที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ให้ มีจำนวนฟันเป็น 44 ซึ่ง มาตรฐาน ASTM D1816 ใช้เฟืองที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ให้ มีจำนวนฟันเป็น 266 ซึ่ง และ มาตรฐาน IEC 156 ใช้เฟืองที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ให้ มีจำนวนฟันเป็น 66 ซึ่งชุดปรับแรงดันไฟฟ้าและชุดเฟืองโซ่ที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 3.16



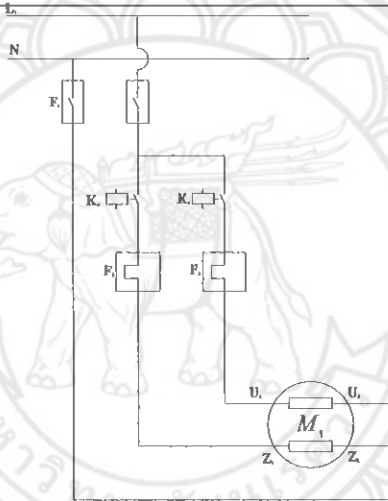
รูปที่ 3.16 ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

3.3 วงจรควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

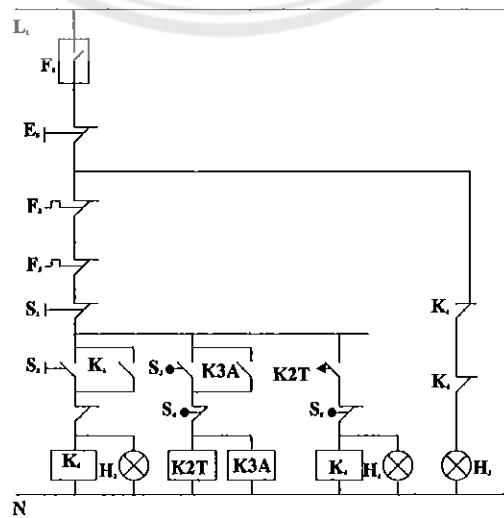
วงจรควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้ามีอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.17, 3.18 และ 3.19 และมีตารางแสดงสัญลักษณ์ดังตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.17 ตู้ควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.18 วงจรกำลังที่ใช้ในการควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.19 วงจรควบคุมที่ใช้ในการควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

ตารางที่ 3.6 สัญลักษณ์และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

สัญลักษณ์	อุปกรณ์
F1	Circuit breaker
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

การทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. เมื่อจ่ายไฟให้กลับวงจร มอเตอร์จะยังไม่ทำงาน H3 จะติด
2. เมื่อกด S2 จะทำให้คอนแทคเตอร์ K1 ทำงาน คอนแทคเตอร์เปิดของ K1 ในแถว 2 จะต่อวงจรอินเทอร์ล็อกให้วงจรแถว 1 มอเตอร์จะหมุนทำให้ชุดปรับแรงดันไฟฟ้าหมุนคอนแทคปิดเปิดของ K1 ในแถว 7 จะเปิดวงจร H3 จะดับและ H1 จะติด แรงดันไฟฟ้าจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเกิดการเบรคควาน์ แต่มอเตอร์ก็ยังคงหมุนต่อไป
3. มอเตอร์นั้นจะหมุนไปจนถึงแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ปรับค่าได้ได้ที่กำหนดไว้ซึ่งมีค่าประมาณ 230 VAC เฟืองโซ่ที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้จะไปแตะ S3 ทำให้ K2T

ทำงานเริ่มนับเวลาและ K3A ทำงาน คอนแทกปกติเปิดของ K3A ในแถวที่ 4 จะต่อวงจรอินเตอร์ล็อกให้วงจรแถว 3 และคอนแทกปกติปิดของ K3A ในแถว 3 จะเปิดวงจร คอนแทกเตอร์ K1 จึงหยุดทำงาน

4. เมื่อ K2T นับเวลาจนถึงเวลาทำงานที่ตั้งไว้คือ 1 วินาที คอนแทกปกติเปิดของ K2T ในแถว 5 จะต่อวงจรในแถว 5 ทำให้คอนแทกเตอร์ K4 ทำงาน มอเตอร์จะหมุนกลับทางไปยังจุดเริ่มต้นหมุนหรือจุดที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ให้มีค่าเป็น 0 นั่นเองและ H2 จะติด

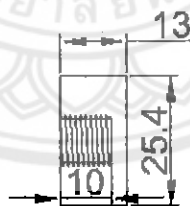
5. มอเตอร์จะหมุนกลับทางไปยังจุดเริ่มต้น ทำให้เฟืองวอล์กที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้จะไปแตะ S4 และ S5 ทำให้ K2T, K3A และ K4 หยุดทำงาน คอนแทกปกติปิดของ K1 และ K4 ในแถว 7 จะปิดทำให้ H3 ติด มอเตอร์จะหยุดทำงานและเตรียมพร้อมที่จะเริ่มทำงานในครั้งต่อไป

3.4 ชุดถ้วยทดสอบ

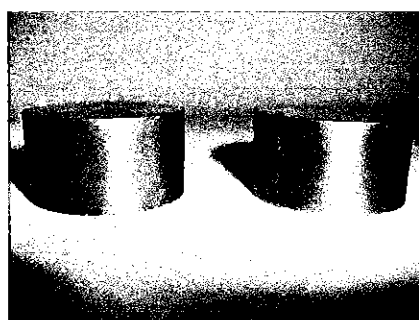
ชุดถ้วยทดสอบจะประกอบไปด้วยอิเล็กโทรด และถ้วยทดสอบ ซึ่งการออกแบบจะออกแบบให้สอดคล้องกับมาตรฐานที่อ้างอิงนั่นคือ มาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156

3.4.1 การออกแบบอิเล็กโทรด

ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM D877 อิเล็กโทรดจะต้องทำด้วยทองเหลืองผิวมันเรียบ ลักษณะแบบจานกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm (1 in) ความหนาอย่างน้อย 3 mm (1/8 in) มุมของขอบอิเล็กโทรด เป็นเหลี่ยมตัดฉาก จึงออกแบบให้อิเล็กโทรดมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 25 mm และมีความหนา 13 mm ดังรูปที่ 3.21 และ 3.22

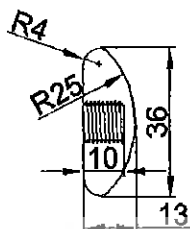


รูปที่ 3.20 แบบอิเล็กโทรดทรงกระบอก

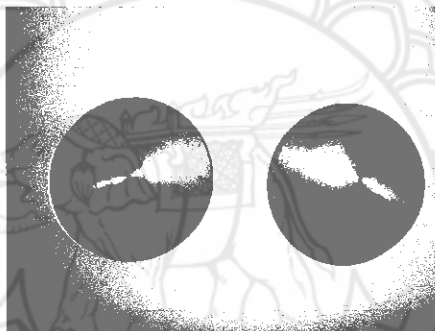


รูปที่ 3.21 อิเล็กโทรดทรงกระบอก

ตามมาตรฐาน ASTM D1816 อิเล็กโทรดต้องทำด้วยทองเหลืองผิวมันเรียบ ลักษณะแบบทรงดอกเห็ดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 mm (1.417 in.) รัศมีส่วนโค้งที่ผิวหน้าเท่ากับ 25 mm (0.984 in.) รัศมีส่วนโค้งที่ขอบเท่ากับ 4 mm (0.157 in.) ความหนาของหัวดอกเห็ด 13 mm (0.512 in.) มีลักษณะดังรูปที่ 3.23 และ 3.24

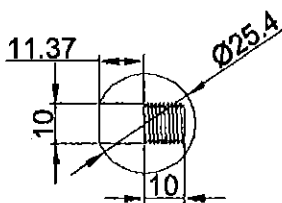


รูปที่ 3.22 แบบอิเล็กโทรดทรงดอกเห็ด

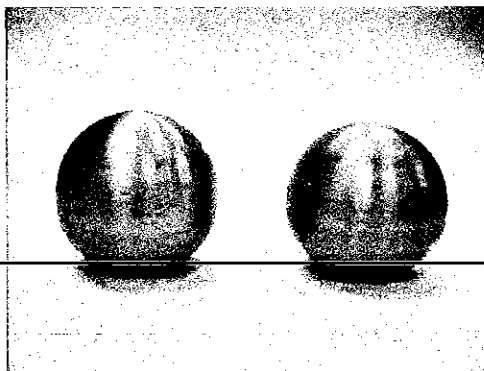


รูปที่ 3.23 อิเล็กโทรดทรงดอกเห็ด

ตามมาตรฐาน IEC 156 อิเล็กโทรดต้องทำด้วยทองเหลืองผิวมันเรียบลักษณะแบบทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm (1 in) มีลักษณะดังรูปที่ 3.25 และ 3.26



รูปที่ 3.24 แบบอิเล็กโทรดทรงกลม

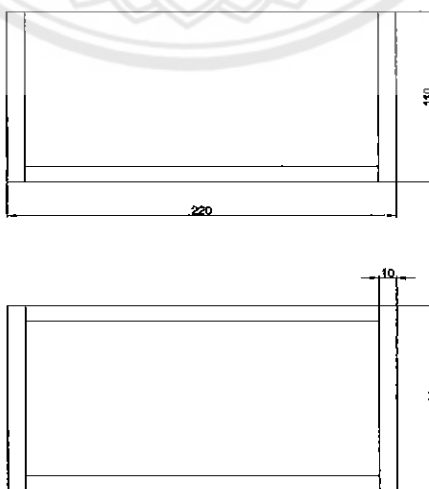


รูปที่ 3.25 อิเล็กโทรดทรงกลม

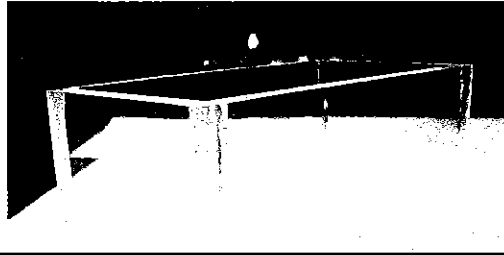
3.4.2 การออกแบบถ้วยทดสอบ

ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM D877 ถ้วยทดสอบต้องทำจากวัสดุทดสอบที่มีค่าความคงทนจนวนสูง อิเล็กโทรดต้องห่างจากส่วนใด ๆ ของถ้วยทดสอบไม่น้อยกว่า 13 mm (1/2 in) ความสูงของถ้วยทดสอบประมาณ 33 mm (1.25 in) จากขอบบนสุดของอิเล็กโทรด การออกแบบจะแบ่งถ้วยทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งสามารถถอดแยกจากกันได้เพื่อสะดวกในการทดสอบและทำความสะอาด ประกอบด้วย

1. ถ้วยทดสอบ ใช้อะคริลิกเป็นวัสดุในการทำเนื่องจากอะคริลิกขนาด 24 in³ สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงถึง 2.2 MVA ดังนั้นที่แรงดันไฟฟ้า 50 kV จะต้องออกแบบให้อะคริลิกมีขนาดอย่างน้อยที่สุดคือ $(50000 \times 24) / 2200000 = 0.5454 \text{ in}^3$ โครงงานนี้จึงออกแบบให้ถ้วยทดสอบมีขนาดมีความหนา 10 mm และมีความยาว 220 mm ความกว้าง 110 mm ความสูง 120 mm เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM D877 ดังรูปที่ 3.26 และ 3.27

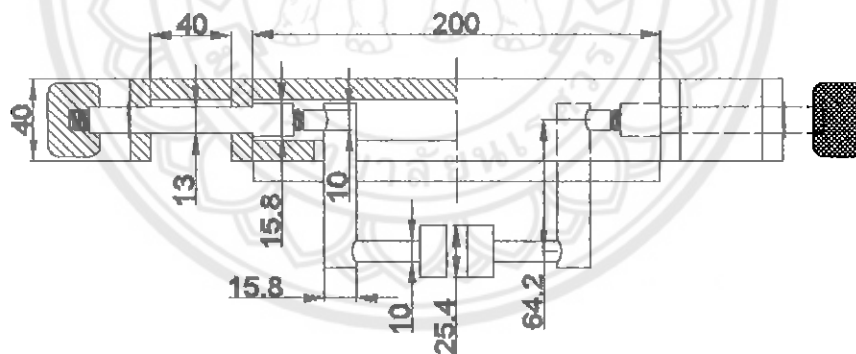


รูปที่ 3.26 แบบถ้วยทดสอบตามขนาดที่ออกแบบ

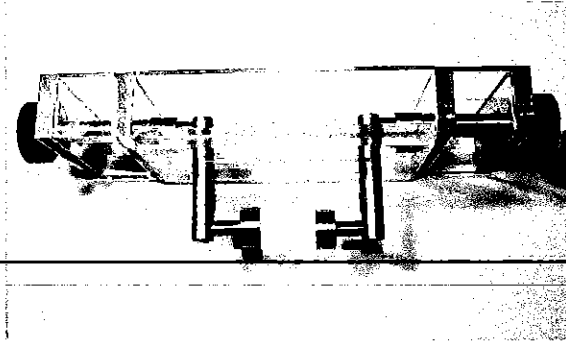


รูปที่ 3.27 ถ้วยทดสอบตามขนาดที่ออกแบบ

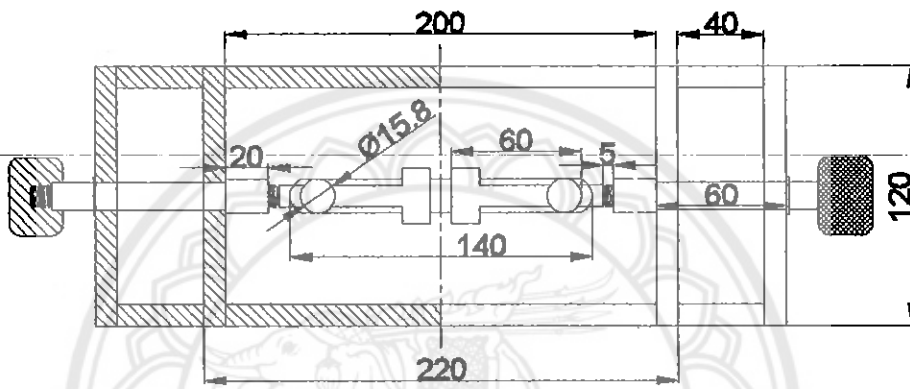
2. ฝาปิดถ้วยทดสอบ ใช้อะคริลิกเป็นวัสดุในการทำเช่นกัน ในส่วนนี้จะยึดติดกับแท่งตัวนำแท่งทองแดงและอิเล็กโทรดเพื่อต้องการให้อะคริลิกเป็นฉนวนให้กับตัวนำทองแดงโดยออกแบบให้มีความหนา відจากผิวตัวนำทองแดง 10 mm จึงได้ขนาดฝาปิดถ้วยทดสอบ อิเล็กโทรดนั้นสามารถถอดออกจากตัวนำทองแดง เพื่อความสะดวกในการทำความสะอาดหรือต้องการเปลี่ยนอิเล็กโทรดเมื่อเกิดการชำรุด ฝาปิดถ้วยทดสอบต้องออกแบบให้สอดคล้องกับตัวถ้วยทดสอบเพื่อความต้องการให้ตัวฝาปิดถ้วยทดสอบสนิทพอดีกับตัวถ้วยทดสอบดังรูปที่ 3.28-3.32



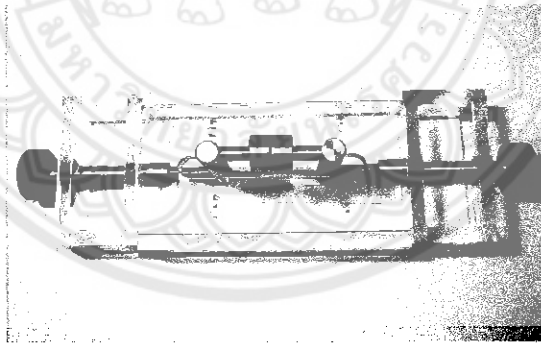
รูปที่ 3.28 แบบฝาปิดถ้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านหน้า



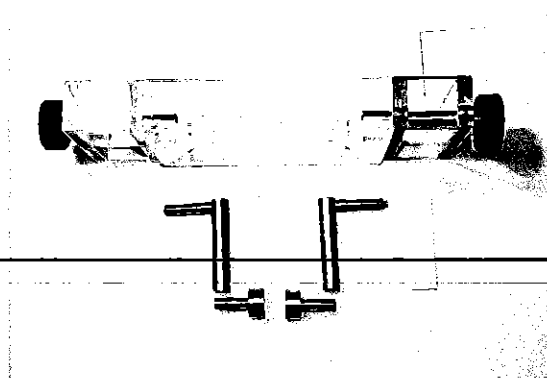
รูปที่ 3.29 ฝาปิดด้วยทดสอบที่มองจากด้านหน้า



รูปที่ 3.30 แบบฝาปิดด้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านบน



รูปที่ 3.31 ฝาปิดด้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านล่าง



รูปที่ 3.32 ฝาปิดด้วยทดสอบและอิเล็กทรอนิกส์ที่ถอดออกจากแห่งตัวนำทองแดง



บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบความเป็นฉนวนของอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ได้ รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดสอบความเป็นฉนวนของอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 3 แบบ และชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

4.1 การทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

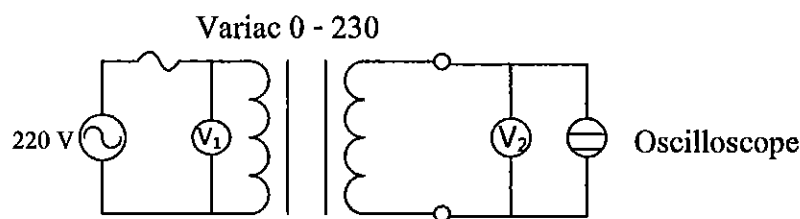
เป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาว่า ชุดปรับแรงดันไฟฟ้าสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156 หรือไม่ โดยมาตรฐานได้กล่าวไว้ว่าให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากศูนย์ และค่อยๆเพิ่มไปในอัตรา $3\text{kV/s} \pm 20\%$, $0.5\text{kV/s} \pm 20\%$ และ $2\text{kV/s} \pm 20\%$

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้

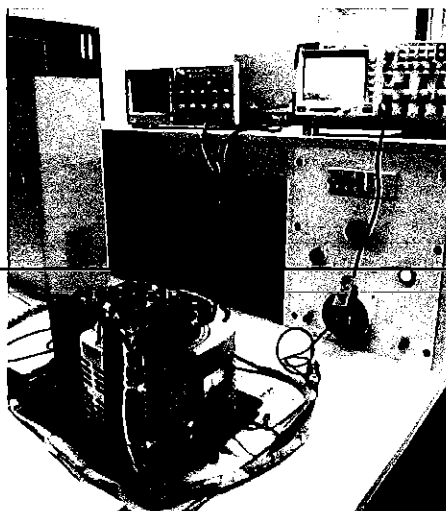
1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 230 V 1 ชุด
2. ออสซิลโลสโคป 1 ตัว
3. โวลต์มิเตอร์ 1 ตัว
4. ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า 1 ชุด

4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดปรับแรงดันไฟฟ้า และใช้ออสซิลโลสโคปวัดแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดปรับแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.18 และ 4.19
2. กดปุ่มเริ่มทำงานของชุดปรับแรงดันไฟฟ้าให้ชุดปรับแรงดันไฟฟ้าเริ่มทำงาน
3. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคปครั้งละ 3 นาที โดยจับเวลาตั้งแต่ชุดปรับแรงดันไฟฟ้าเริ่มทำงาน



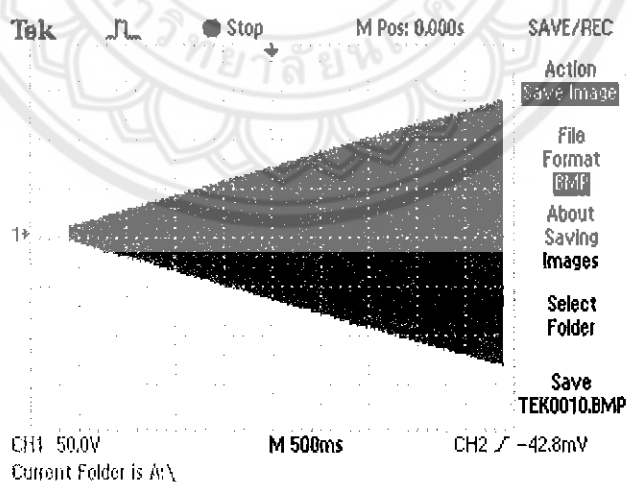
รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 การทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

4.1.3 ผลการทดสอบ

ทำการทดสอบโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า แล้วจับเวลาการอ่านผลในแต่ละครั้งทุกวินาที โดยเริ่มนับเวลาเมื่อกดสวิทช์เริ่มทำงานของวงจรควบคุมชุดปรับแรงดันไฟฟ้า แล้วอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของชุดปรับแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลา ได้ผลการทดสอบตามความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงดันไฟฟ้าขาออกชุดปรับแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 4.3 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงดันไฟฟ้าขาออกชุดปรับแรงดันไฟฟ้าดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้จากการทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า ทดสอบชุดปรับแรงดันด้วย Oscilloscope

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

เวลา (s)	แรงดันไฟฟ้าขาออก (V)
0	10
1	40
2	70
3	100
4	130
4.5	140

4.1.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้าผลที่ได้จากออสซิลโลสโคปดังรูปที่ 4.3 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงดันไฟฟ้าขาออกจึงทำให้ทราบค่าอัตราการเพิ่มแรงดันต่อเวลาจากตารางที่ 4.1 ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{หาอัตราการเพิ่มแรงดันต่อวินาที} & ; (140-10)/4.5 = 28.889 \text{ V/s} \\ \text{หาต้านแรงสูง} & ; (28.889 \times 50,000)/230 = 6.280 \text{ kV/s} \\ \text{หาเป็นค่า RMS} & ; 6.280/\sqrt{2} = 4.441 \text{ kV/s} \end{aligned}$$

จากการทดสอบชุดปรับแรงดันไฟฟ้าเป็นของมาตรฐาน ASTM D877 ที่ใช้ในการทดสอบมีรอบการหมุนที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เท่ากับ 3.2 รอบต่อนาที ดังนั้นจึงต้องการจำนวนรอบการหมุนที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ที่ 1 kV/s โดยที่ 4.441 kV/s ใช้รอบการหมุนที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เท่ากับ 3.2 รอบต่อนาที ถ้าเป็น 1 kV/s จะใช้รอบการหมุนที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เท่ากับ 0.721 รอบต่อนาที ดังนั้นจึงต้องการทราบความเร็วรอบของหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ในแต่ละมาตรฐาน และมอเตอร์ที่ใช้มีความเร็วรอบของมอเตอร์ 8 รอบต่อนาที ซึ่งจะใช้ในการคำนวณหาจำนวนฟันเฟืองที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ต่อจำนวนฟันเฟืองที่มอเตอร์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.46)

• มาตรฐาน ASTM D877 กำหนดอัตราการเพิ่มแรงดันอยู่ที่ 3 kV/s ก็จะได้จำนวนรอบการหมุนที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เท่ากับ $0.721 \times 3 = 2.163$ รอบต่อนาที

$$\text{จะได้} \quad ; \quad \frac{N_2}{N_1} = \frac{8}{2.163}$$

$$; \quad \frac{N_2}{N_1} = 3.699$$

เพื่อลดต้นทุนจึงใช้ฟันเฟืองที่มอเตอร์ที่มีอยู่แล้วคือ 12 ซี่ และจากการคำนวณจึงเลือกจำนวนฟันเฟืองที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เท่ากับ 44 ซี่

$$\text{จะได้} \quad ; \quad \frac{N_2}{N_1} = \frac{44}{12} = 3.667$$

โดยมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ต้องการเท่ากับ $[(3.699-3.667)/3.699] \times 100 = 0.865\%$ ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับ 0.865% ซึ่งเป็นค่าที่มาตรฐาน ASTM D877 ยอมรับได้

• มาตรฐาน ASTM D1816 กำหนดอัตราการเพิ่มแรงดันอยู่ที่ 0.5 kV/s ก็จะได้จำนวนรอบการหมุนที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เท่ากับ $0.721 \times 0.5 = 0.361$ รอบต่อนาที

$$\text{จะได้} \quad ; \quad \frac{N_2}{N_1} = \frac{8}{0.361}$$

$$; \quad \frac{N_2}{N_1} = 22.161$$

เพื่อลดต้นทุนจึงใช้ฟันเฟืองที่มอเตอร์ที่มีอยู่แล้วคือ 12 ซี่ และจากการคำนวณจึงเลือกจำนวนฟันเฟืองที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เท่ากับ 266 ซี่

$$\text{จะได้} \quad ; \quad \frac{N_2}{N_1} = \frac{266}{12} = 22.167$$

โดยมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ต้องการเท่ากับ $[(22.167-22.161)/22.161] \times 100 = 0.027\%$ ดังนั้นความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับ 0.027% ซึ่งเป็นค่าที่มาตรฐาน ASTM D1816 ยอมรับได้

• มาตรฐาน IEC 156 กำหนดอัตราการเพิ่มแรงดันอยู่ที่ 2 kV/s ก็จะได้จำนวนรอบการหมุนที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เท่ากับ $0.721 \times 2 = 1.442$ รอบต่อนาที

$$\text{จะได้} \quad ; \quad \frac{N_2}{N_1} = \frac{8}{1.442}$$

$$; \quad \frac{N_2}{N_1} = 5.548$$

เพื่อลดต้นทุนจึงใช้ฟืนเพียงที่มอเตอร์ที่มีอยู่แล้วคือ 12 ซี และจากการคำนวณจึงเลือกจำนวนฟืนเพียงที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เท่ากับ 66 ซี เพื่อลดต้นทุนจึงใช้ฟืนเพียงที่มอเตอร์ที่มีอยู่แล้วคือ 12 ซี และจากการคำนวณจึงเลือกจำนวนฟืนเพียงที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เท่ากับ 66 ซี

$$\text{จะได้} \quad ; \quad \frac{N_2}{N_1} = \frac{66}{12} = 5.5$$

โดยมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ต้องการเท่ากับ $[(5.548-5.5)/5.548] \times 100 = 0.865\%$ ดังนั้นความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับ 0.865% ซึ่งเป็นค่าที่มาตรฐาน IEC 156 ยอมรับได้ ซึ่งสามารถสรุปผลการคำนวณชุดปรับแรงดันที่ได้จากการทดสอบดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการคำนวณชุดปรับแรงดันที่ได้จากการทดสอบ

มาตรฐาน	อัตราการเพิ่มแรงดันตามมาตรฐาน (kV/s)	รอบการหมุนที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ (รอบ/นาที)	อัตราส่วนฟืนเพียงที่ต้องการ	ฟืนเพียงที่หม้อแปลงปรับแรงดัน (ซี)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
ASTM D877	3	2.163	3.699	44	0.865
ASTM D1816	0.5	0.361	22.161	266	0.027
IEC 156	2	1.442	5.548	66	0.865

4.2 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว

เป็นการทดสอบเพื่อเป็นเกณฑ์ตัดสิน โดยใช้มาตรฐานทั้งหมด 3 มาตรฐานคือ มาตรฐาน ANSI/ASTMD877 Standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating liquids using disk electrodes, มาตรฐาน ANSI/ASTMD1816 Standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating oils using of Petroleum origin using VDE electrodes และมาตรฐาน IEC156 International electrotechnical commission โดยมีน้ำมัน 2 ชนิดที่ใช้ในการทดสอบ คือ น้ำมันบริสุทธ์ และ น้ำมันปนน้ำ

4.2.1 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877

เป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาว่า การหาแรงดันเบรคความถี่ของฉนวนเหลว อิเล็กโทรด จะต้องทำด้วยทองเหลืองผิวมันเรียบลักษณะแบบจานกลม เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM/ASTM D877 หรือไม่

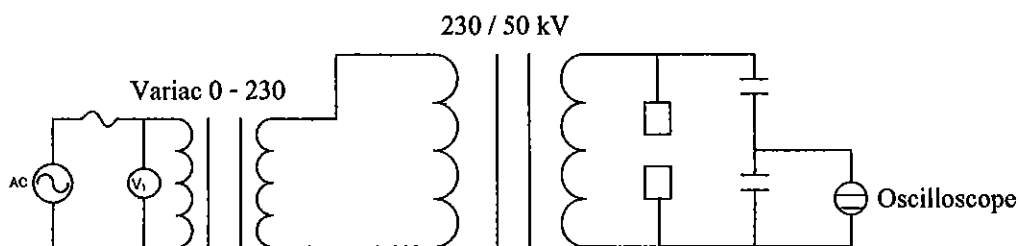
โดยมาตรฐานได้กล่าวไว้ว่า ให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจาก ศูนย์และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นไปในอัตรา $3\text{ kV/s} \pm 20\%$ ในความถี่ที่ย่าน 50 Hz ในการทดสอบ

4.2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้

1. เทอร์โมมิเตอร์ 1 อัน
2. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 230 V 1 ชุด
3. ออสซิลโลสโคป 1 ตัว
4. โวลต์มิเตอร์ 1 ตัว
5. ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า 1 ชุด
6. น้ำมันบริสุทธ์
7. น้ำมันปนน้ำ
8. อิเล็กโทรดทรงกระบอก
9. ตัวเก็บประจุขนาด $140\text{ kV } 1200\text{ pF}$

4.2.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

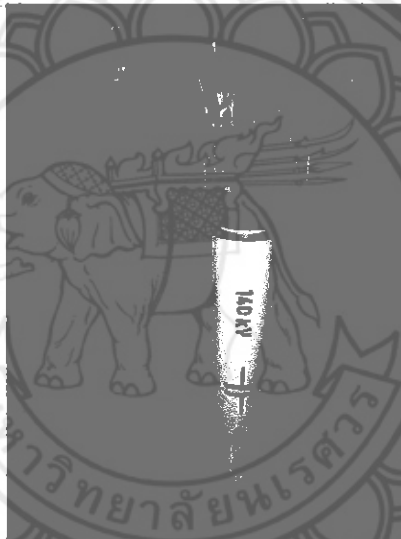
1. วัดอุณหภูมิของน้ำมันบริสุทธ์ และ น้ำมันปนน้ำ ที่นำมาทดสอบและบันทึกค่า
2. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดปรับแรงดันไฟฟ้า และใช้โวลต์มิเตอร์ และ ออสซิลโลสโคป วัดแรงดันของชุดปรับแรงดันไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.4, 4.5, 4.6 และ 4.7
3. กดปุ่มเริ่มทำงานของชุดปรับแรงดันไฟฟ้า
4. ทำการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าให้เป็น 3 kV/s ในการทดสอบแต่ละครั้ง
5. บันทึกค่าแรงดันที่เกิดเบรคความถี่



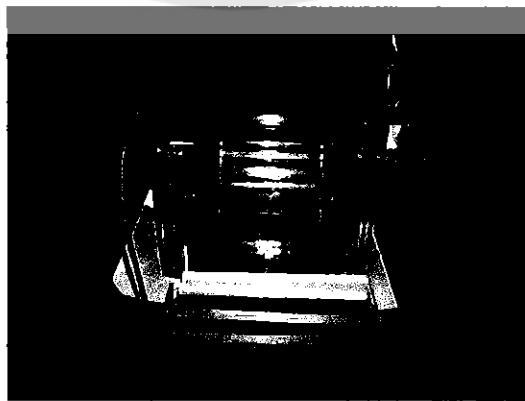
รูปที่ 4.4 วงจรการทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877



รูปที่ 4.5 อุปกรณ์การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877



รูปที่ 4.6 ตัวเก็บประจุ ขนาด 140 kV 1200 pF



รูปที่ 4.7 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877

4.2.1.3 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบ 2 ตัวอย่างน้ำมัน ทดสอบเบรกคาวน้อย่างละ 5 ครั้งพบว่า

- ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกคาวนของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์จากสมการที่ (2.1)

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{14.03+16.59+15.94+19.18+18.15}{5} \\ &= 16.778 \text{ kV}\end{aligned}$$

และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดันเบรกคาวนของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์จากสมการที่ (2.2)

$$\begin{aligned}S &= \sqrt{\frac{1}{(5-1)}[1423.44 - 1407.51]} \\ &= 1.99\end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราส่วนของ S/\bar{x} ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์คือ $1.99/16.778 = 0.1990$ จากตารางที่ 2.7 ซึ่งอัตราส่วนของ S/\bar{x} เกิน 0.1 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของ แรงดันไฟฟ้าเบรกคาวนทั้ง 5 ครั้งที่ทดสอบมาได้เกินหลักเกณฑ์ไป โดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ $((0.199-0.1)/0.1) \times 100 = 99 \%$ ดังตารางที่ 4.3 และแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกคาวนดังรูปที่ 4.8

- ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกคาวนของฉนวนเหนือน้ำมันปนน้ำจากสมการที่ (2.1)

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{6.934 + 3.993 + 7.528 + 7.399 + 7.717}{5} \\ &= 6.714 \text{ kV}\end{aligned}$$

และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดันเบรกคาวนของฉนวนเหนือน้ำมันผสมน้ำจากสมการที่ (2.2)

$$\begin{aligned}S &= \sqrt{\frac{1}{(5-1)}[234.996 - 225.389]} \\ &= 1.549\end{aligned}$$

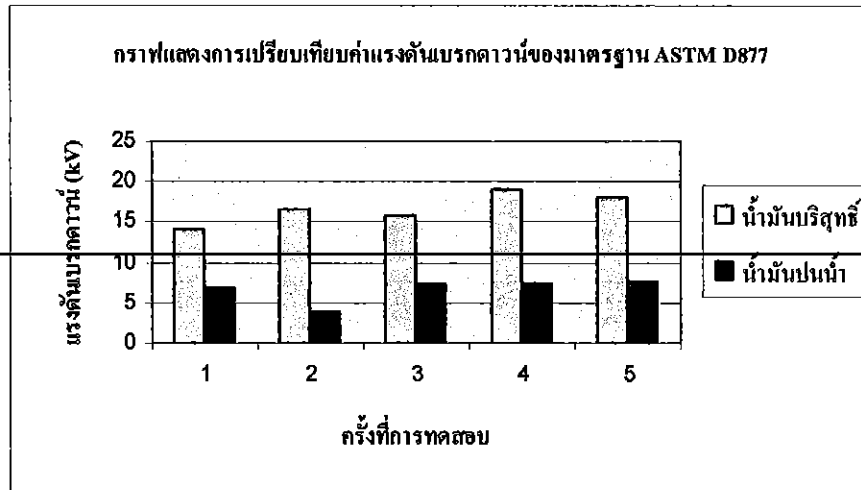
ดังนั้นอัตราส่วนของ S/\bar{x} ของฉนวนเหลวน้ำมันปนน้ำ $1.549/6.714 = 0.23$ จากตารางที่ 2.7 ซึ่งอัตราส่วนของ S/\bar{x} เกิน 0.1 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ทั้ง 5 ครั้งทดสอบมาได้เกินหลักเกณฑ์ไป โดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ $((0.23-0.1)/0.1) \times 100 = 130\%$ ดังตารางที่ 4.4 และแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ดังรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.3 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวน้ำมันบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน ASTM D877 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5 ± 0.01 mm

ลำดับการทดสอบ	อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (Hz)	อัตราการเพิ่มแรงดัน (kV/s)	การเกิดเบรกดาวน์		แรงดันเบรกดาวน์ (kV)
				มี	ไม่มี	
1	31	50	3	✓		14.03
2	31	50	3	✓		16.59
3	31	50	3	✓		15.94
4	31	50	3	✓		19.18
5	31	50	3	✓		18.15
ค่าเฉลี่ย						16.78

ตารางที่ 4.4 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวน้ำมันปนน้ำตามมาตรฐาน ASTM D877 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5 ± 0.01 mm

ลำดับการทดสอบ	อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (Hz)	อัตราการเพิ่มแรงดัน (kV/s)	การเกิดเบรกดาวน์		แรงดันเบรกดาวน์ (kV)
				มี	ไม่มี	
1	31	50	3	✓		6.93
2	31	50	3	✓		3.99
3	31	50	3	✓		7.53
4	31	50	3	✓		7.40
5	31	50	3	✓		7.71
ค่าเฉลี่ย						6.71



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกความถี่ของมาตรฐาน ASTM D877

4.2.1.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากกรณีผลการทดสอบไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877 สามารถวิเคราะห์ได้ว่า อาจเกิดจาก

1. จากการเกิดเบรกความถี่แต่ละครั้งจะทำให้ผิวของอิเล็กโทรดเสียหาย เกิดเขม่าเกาะที่หัวอิเล็กโทรด และยังพบรอยขรุขระที่ผิวของอิเล็กโทรด นอกจากนั้นความเป็นฉนวนของฉนวนเหลวบริสุทธิ์ที่มีค่าลดลง เนื่องจากมีก๊าซออกซิเจนปนอยู่ทำให้ค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวน้ำมันบริสุทธิ์น้อยกว่า 1 MV/cm จากภาคผนวกที่ จ ซึ่งส่งผลให้ค่าแรงดันเบรกความถี่ต่ำลง

2. ในกรณีแรงดันเบรกความถี่ของฉนวนเหลวน้ำมันปนน้ำ ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันเบรกความถี่อาจเกิดเนื่องจากความไม่คงรูปของหยดน้ำในน้ำมัน โดยหยดน้ำนี้มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ϵ_2 จมอยู่ในฉนวนน้ำมันซึ่งมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ϵ_1 อยู่ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอผลของสนามไฟฟ้าจึงทำให้หยดน้ำยึดตัวออกแนวตามแรงสนามไฟฟ้า

ซึ่งในกรณีนี้หยดน้ำเป็นเป็นฉนวนที่นำไฟฟ้าได้ คือ $\epsilon_2/\epsilon_1 \rightarrow \infty$ จึงสามารถหาความเครียดของสนามไฟฟ้าวิกฤติที่ทำให้หยดน้ำถูกกลืนเสียสภาพจากสมการที่ (2.44) มีค่าเท่ากับ

$$E_{cr} = 48.77 \sqrt{\frac{43}{(0.5 \times 2)}} = 319.80 \text{ kV/cm}$$

ซึ่งต่ำกว่าค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวน้ำมันบริสุทธิ์เชิงการค้าที่มีค่า 1000 kV/cm จากภาคผนวก ง

ดังนั้นจากผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวน้ำมันผสมน้ำ หยดน้ำกลมที่มีรัศมีขนาดประมาณ 0.5 cm อาจเป็นสาเหตุของความคลาดเคลื่อนของแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวน้ำมันผสมน้ำ ให้มีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำลง

3. การเกิดฟองก๊าซอยู่ที่ผิวของอิเล็กโทรด ฟองก๊าซนั้นจะขยายตัวขึ้นในแนวสนามไฟฟ้า เพื่อลดพลังงานศักย์ที่เกิดขึ้น สามารถหาค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าของฟองก๊าซได้จากสมการที่ (2.45)

โดยคิดในฉนวนเหลวน้ำมันบริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ

$$E_g = \frac{(3 \times 2 \times 0.67)}{(2 \times 2) + 1} = 0.805 \text{ kV/cm}$$

และคิดในฉนวนเหลวน้ำมันปนน้ำ มีค่าเท่ากับ

$$E_g = \frac{(3 \times 2 \times 0.268)}{(2 \times 2) + 1} = 0.321 \text{ kV/cm}$$

ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของฉนวนเหลวน้ำมันหม้อแปลง จากภาคผนวก ฉ จะเกิดดีสชาร์จผ่านฟองก๊าซ ทำให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลของฉนวนเหลวนำไปสู่ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ต่ำลง

4.2.2 การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1816

เป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาว่า การหาแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว อิเล็กโทรดจะต้องทำด้วยทองเหลืองผิวมันเรียบลักษณะแบบทรงคอกเห็ด เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1816 หรือไม่ โดยมาตรฐานได้กล่าวไว้ว่า ให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากศูนย์และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นไปในอัตรา 0.5 kV/s \pm 20% ใน การทดสอบวิธีนี้จะใช้อุณหภูมิห้องอ้างอิงที่ 20–30°C

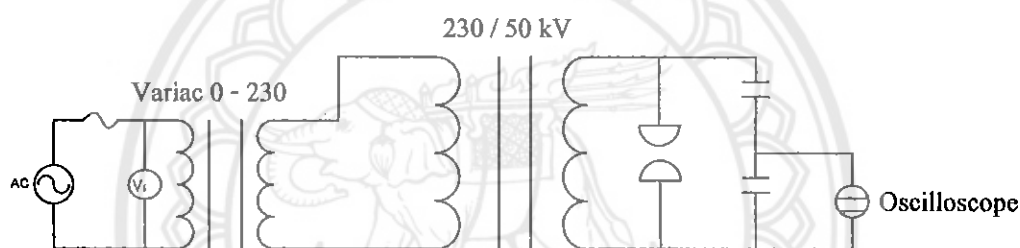
4.2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้

1. เทอร์โมมิเตอร์ 1 อัน
2. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 230 V 1 ชุด
3. ออสซิลโลสโคป 1 ตัว
4. โวลต์มิเตอร์ 1 ตัว
5. ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า 1 ชุด
6. น้ำมันบริสุทธิ์

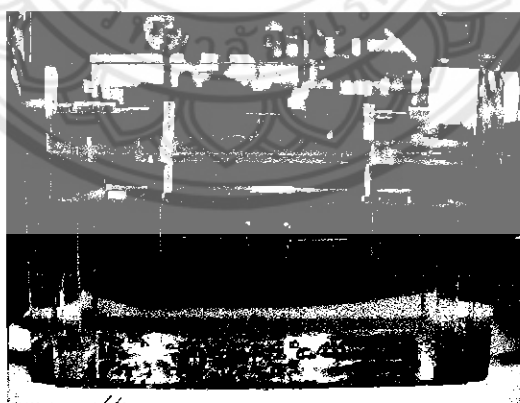
7. น้ำมันปนน้ำ
8. อิเล็กโทรดทรงคอกเห็ด
9. ตัวเก็บประจุขนาด 140 kV 1200 pF

4.2.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. วัดอุณหภูมิของน้ำมันบริสุทธิ์ และ น้ำมันปนน้ำ ที่นำมาทดสอบและบันทึกค่า
2. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดปรับแรงดันไฟฟ้า และใช้โวลต์มิเตอร์ และ ออสซิลโลสโคปวัดแรงดันของชุดปรับแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10
3. กดปุ่มเริ่มทำงานของชุดปรับแรงดันไฟฟ้า
4. ทำการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าให้เป็น 0.5 kV/s ในการทดสอบแต่ละครั้ง
5. บันทึกค่าแรงดันที่เกิดเบรกดาวนซ์ขึ้น



รูปที่ 4.9 วงจรการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1816



รูปที่ 4.10 การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1816

4.2.2.3 ผลการทดสอบ

- จากการทดสอบ 2 ตัวอย่างน้ำมัน ทดสอบเบรกดาวนซ์อย่างละ 5 ครั้งพบว่า
- ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวนซ์ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์จากสมการที่ (2.1)

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{7.771+11.35+9.47+11.33+10.46}{5} \\ &= 10.076 \text{ kV}\end{aligned}$$

และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดันเบรกดาว์ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธีจากสมการ
ที่ (2.2)

$$\begin{aligned}S &= \sqrt{\frac{1}{(5-1)}[516.672-507.629]} \\ &= 1.548\end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราส่วนของ S/\bar{x} ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธี $1.548/10.076 = 0.154$ จากตาราง
ที่ 2.7 ซึ่งอัตราส่วนของ S/\bar{x} เกิน 0.1 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของ แรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์ทั้ง 5 ครั้ง
ทดสอบมาได้เกินหลักเกณฑ์ไป โดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ $((0.154-0.1)/0.1) \times 100 = 54\%$ ดัง
ตารางที่ 4.5 และแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาว์ดังรูปที่ 4.11

- ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาว์ของฉนวนเหนือน้ำมันผสมน้ำจากสมการที่ (2.1)

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{10.57+9.282+8.526+10.6+12.11}{5} \\ &= 10.2176 \text{ kV}\end{aligned}$$

และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดันเบรกดาว์ของฉนวนเหนือน้ำมันปนน้ำจากสมการที่
(2.2)

$$\begin{aligned}S &= \sqrt{\frac{1}{(5-1)}[529.585-521.996]} \\ &= 1.377\end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราส่วนของ S/\bar{x} ของฉนวนเหนือน้ำมันปนน้ำ คือ $1.377/10.2176 = 0.135$ จาก
ตารางที่ 2.7 ซึ่งอัตราส่วนของ S/\bar{x} เกิน 0.1 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของ แรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์ทั้ง 5 ครั้ง

ทดสอบมาได้เกินหลักเกณฑ์ไป โดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ $((0.135-0.1)/0.1) \times 100 = 35\%$ ดังตารางที่ 4.6 และแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกคาวน์ดังรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.5 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกคาวน์ของฉนวนเหลวน้ำมันบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน

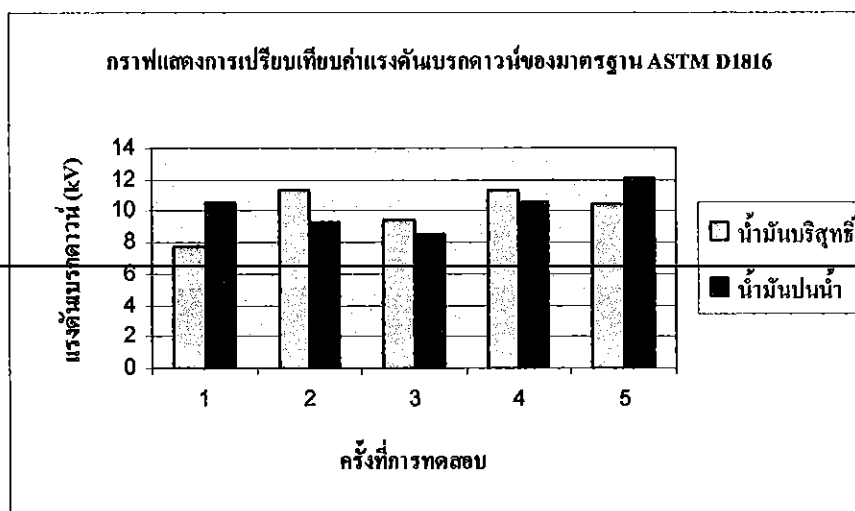
ASTM D1816 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 ± 0.03 mm

ลำดับการทดสอบ	อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (Hz)	อัตราการเพิ่มแรงดัน (kV/s)	การเกิดเบรกคาวน์		แรงดันเบรกคาวน์ (kV)
				มี	ไม่มี	
1	31	50	0.5	✓		7.77
2	31	50	0.5	✓		11.35
3	31	50	0.5	✓		9.47
4	31	50	0.5	✓		11.33
5	31	50	0.5	✓		10.46
ค่าเฉลี่ย						10.07

ตารางที่ 4.6 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกคาวน์ของฉนวนเหลวน้ำมันปนน้ำตามมาตรฐาน

ASTM D1816 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 ± 0.03 mm

ลำดับการทดสอบ	อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (Hz)	อัตราการเพิ่มแรงดัน (kV/s)	การเกิดเบรกคาวน์		แรงดันเบรกคาวน์ (kV)
				มี	ไม่มี	
1	31	50	0.5	✓		10.57
2	31	50	0.5	✓		9.28
3	31	50	0.5	✓		8.53
4	31	50	0.5	✓		10.60
5	31	50	0.5	✓		12.11
ค่าเฉลี่ย						10.22



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกควาน์ของมาตรฐาน ASTM D1816

4.2.2.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากกรณีผลการทดสอบไม่เป็นตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D1816 สามารถวิเคราะห์ได้ว่า อาจเกิดจาก

1. จากการเกิดเบรกควาน์แต่ละครั้งจะทำให้ผิวของอิเล็กโทรดเสียหาย เกิดเขม่าเกาะที่หัวอิเล็กโทรด และยังพบรอยขรุขระที่ผิวของอิเล็กโทรด เช่นเดียวกับกรณีหัวข้อที่ 4.2.1.4
2. ในกรณีแรงดันเบรกควาน์ของฉนวนเหลวน้ำมันปนน้ำ ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันเบรกควาน์อาจเกิดเนื่องจากความไม่คงรูปของหยดน้ำในน้ำมัน ที่อยู่ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ ผลของสนามไฟฟ้าจึงทำให้หยดน้ำยัดตัวออกแนวตามแรงสนามไฟฟ้า ดังนั้นหยดน้ำกลมที่มีรัศมีขนาดประมาณ 0.5 cm อาจเป็นสาเหตุของความคลาดเคลื่อนของแรงดันเบรกควาน์ของฉนวนเหลว น้ำมันผสมน้ำ ทำให้มีค่าแรงดันเบรกควาน์ต่ำลง เช่นกรณีเดียวกับหัวข้อที่ 4.2.1.4
3. เกิดจากแรงสั่นสะเทือนขณะทำการทดสอบ ส่งผลทำให้ความคลาดเคลื่อนระยะห่างของอิเล็กโทรดของฉนวนเหลว น้ำมันปนน้ำ ที่มีค่ามากกว่า 2 ± 0.03 mm ซึ่งทำให้ค่าแรงดันเบรกควาน์ในฉนวนเหลว น้ำมันผสมน้ำมีค่ามากกว่าความเป็นจริง

4.2.3 การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156

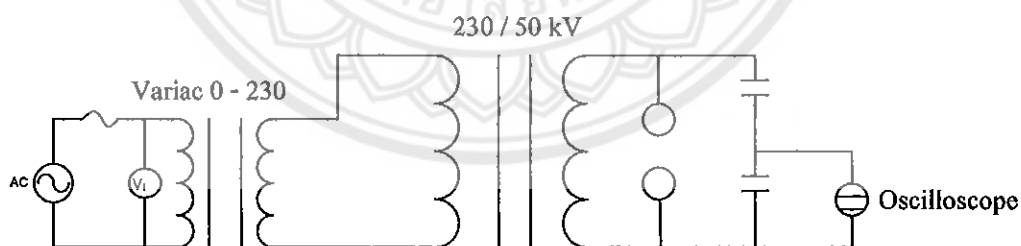
เป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาว่า การหาแรงดันเบรกควาน์ของฉนวนเหลว อิเล็กโทรด จะต้องทำด้วยทองเหลืองผิวมันเรียบลักษณะแบบทรงกลม เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 156 หรือไม่ โดยมาตรฐานได้กล่าวไว้ว่า ให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากศูนย์และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นไปในอัตรา $2 \text{ kV/s} \pm 20\%$ ในการทดสอบวิธีนี้ควรให้เท่ากับอุณหภูมิห้อง ซึ่งไม่ต่ำกว่า 20°C และในการทดสอบ อุณหภูมิของเหลวและอุณหภูมิรอบข้าง จะต้องไม่แตกต่างกันเกินกว่า 5°C

4.2.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้

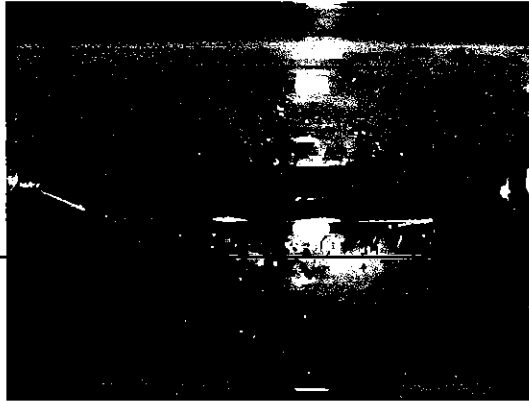
1. เทอร์โมมิเตอร์ 1 อัน
 2. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 230 V 1 ชุด
 3. ออสซิลโลสโคป 1 ตัว
-
4. โวลต์มิเตอร์ 1 ตัว
 5. ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า 1ชุด
 6. น้ำมันบริสุทธ์
 7. น้ำมันปนน้ำ
 8. อิเล็กโทรดทรงกลม
 9. ตัวเก็บประจุขนาด 140 kV 1200 pF
-

4.2.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. วัดอุณหภูมิของน้ำมันบริสุทธ์ และ น้ำมันปนน้ำ ที่นำมาทดสอบและบันทึกค่า
2. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดปรับแรงดันไฟฟ้า และใช้โวลต์มิเตอร์ และ ออสซิลโลสโคปวัดแรงดันของชุดปรับแรงดันไฟฟ้างดรูปที่ 4.12 และ 4.13
3. กดปุ่มเริ่มทำงานของชุดปรับแรงดันไฟฟ้า
4. ทำการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าให้เป็น 2 kV/s ในการทดสอบแต่ละครั้ง
5. บันทึกค่าแรงดันที่เกิดเบรกดาวน์



รูปที่ 4.12 วงจรการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156



รูปที่ 4.13 การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156

4.2.3.3 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบ 2 ตัวอย่างน้ำมัน ทดสอบเบรกดาวน้อย่างละ 6 ครั้งพบว่า

- ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวนของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์จากสมการที่ (2.1)

$$\bar{X} = \frac{14.32 + 17.10 + 11.76 + 13.16 + 17.67 + 8.742}{6}$$

$$= 13.792 \text{ kV}$$

ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดันเบรกดาวนของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์จากสมการที่

(2.2)

$$S = \sqrt{\frac{1}{(6-1)} [1197.60 - 1141.316]}$$

$$= 3.355$$

ดังนั้นอัตราส่วนของ S/\bar{x} ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์ คือ $3.355/13.792 = 0.243$ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ IEC 156 ซึ่งผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.7 และแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนดังรูปที่ 4.14

- ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวนของฉนวนเหนือน้ำมันผสมน้ำจากสมการที่ (2.1)

$$\bar{X} = \frac{10.52 + 8.175 + 16 + 20.66 + 15.89 + 11.53}{6}$$

$$= 13.796 \text{ kV}$$

และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดันเบรกคาว์นของฉนวนเหนือน้ำมันผสมน้ำจากสมการ
ที่ (2.2)

$$S = \sqrt{\frac{1}{(6-1)} [1245.770 - 1141.978]}$$

$$= 4.557$$

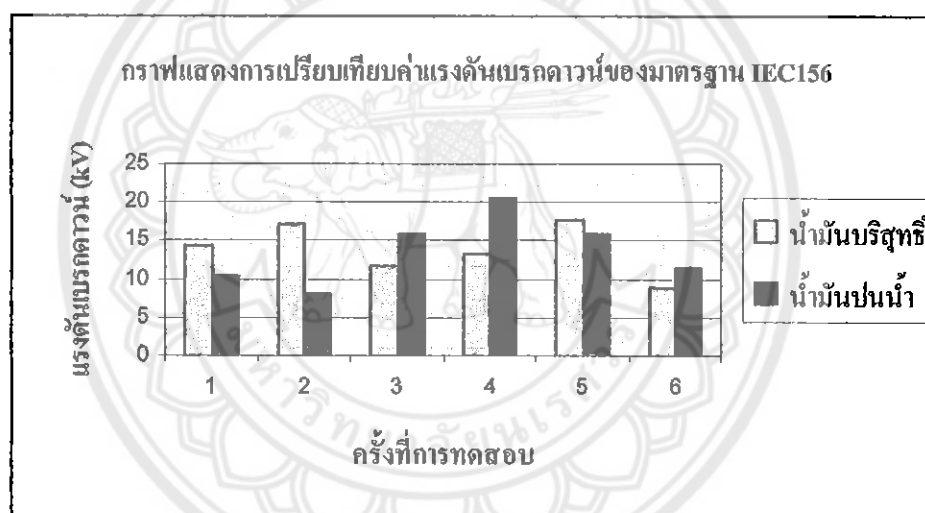
ดังนั้นอัตราส่วนของ S/\bar{x} ของฉนวนเหนือน้ำมันผสมน้ำ คือ $4.557/13.796 = 0.33$ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ IEC 156 ซึ่งผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.8 และแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกคาว์นดังรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.7 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกคาว์นของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน IEC 156 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5 ± 0.05 mm

ลำดับการทดสอบ	อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (Hz)	อัตราการเพิ่มแรงดัน (kV/s)	การเกิดเบรกคาว์น		แรงดันเบรกคาว์น (kV)
				มี	ไม่มี	
1	31	50	2	✓		14.32
2	31	50	2	✓		17.10
3	31	50	2	✓		11.76
4	31	50	2	✓		13.16
5	31	50	2	✓		17.67
6	31	50	2	✓		8.74
ค่าเฉลี่ย						13.792

ตารางที่ 4.8 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกควาน์ของฉนวนเหนือน้ำมันปนน้ำตามมาตรฐาน IEC 156 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5 ± 0.05 mm

ลำดับการทดสอบ	อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (Hz)	อัตราการเพิ่มแรงดัน (kV/s)	การเกิดเบรกควาน์		แรงดันเบรกควาน์ (kV)
				มี	ไม่มี	
1	31	50	2	✓		10.52
2	31	50	2	✓		8.18
3	31	50	2	✓		16.00
4	31	50	2	✓		20.66
5	31	50	2	✓		15.89
6	31	50	2	✓		11.53
ค่าเฉลี่ย						13.796



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกควาน์ของมาตรฐาน IEC 156

4.2.3.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156 ไม่สามารถวิเคราะห์ให้อยู่ในมาตรฐานได้นั้น เกิดเนื่องจาก

1. อุณหภูมิของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์ที่ทำการทดสอบมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน IEC 156
2. การทดสอบเบรกควาน์แต่ละครั้ง ไม่ได้ทำการหยุดพักการทดสอบอย่างน้อยครั้งละ 2 นาที

จึงส่งผลทำให้ค่าการทดสอบแรงดันเบรกควาน์ของมาตรฐาน IEC 156 มีค่าที่ต่ำกว่าความจริง และแรงสั่นสะเทือนขณะทำการทดสอบ ส่งผลทำให้ความคลาดเคลื่อนระยะห่างของอิเล็กโทรด

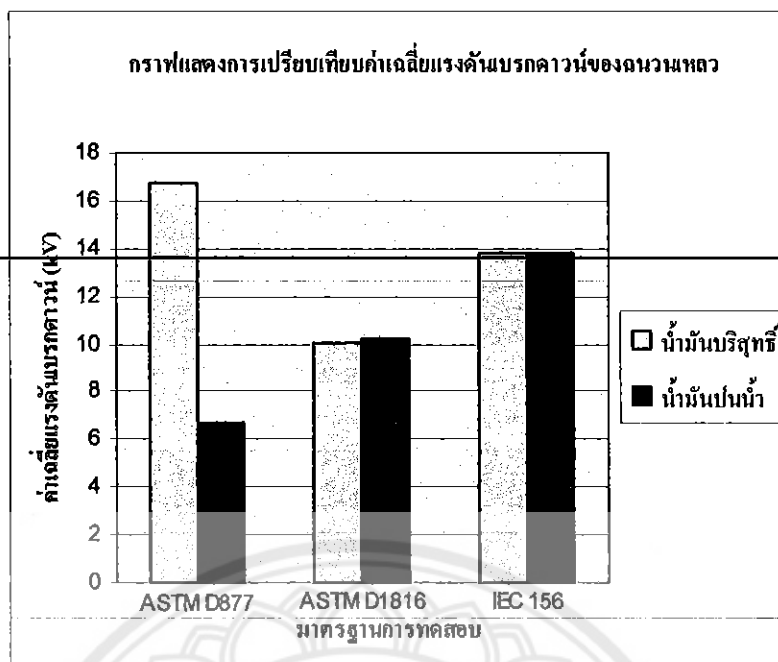
ของฉนวนเหนือน้ำมันป่นน้ำ ที่มีค่ามากกว่า 2.5 ± 0.05 mm จึงทำให้ค่าแรงดันเบรคความถี่เฉลี่ยของฉนวนเหนือน้ำมันป่นน้ำมีค่าที่สูงขึ้นใกล้เคียงกับค่าแรงดันเบรคความถี่ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์

4.3 สรุปผลการวิเคราะห์

จากการทดสอบทั้ง 3 มาตรฐานซึ่งมีค่าแตกต่างกันออกไป สามารถสรุปผลการทดสอบโดยแยกเป็นแต่ละกรณีที่เปรียบเทียบค่าแรงดันเบรคความถี่เฉลี่ยของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์และน้ำมันป่นน้ำ พร้อมทั้งสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.9 ตารางสรุปผลการทดสอบทั้ง 3 มาตรฐาน

มาตรฐานการทดสอบ		น้ำมันบริสุทธิ์	น้ำมันป่นน้ำ	สรุปผลการวิเคราะห์
ASTM D877	\bar{X} (kV)	16.778	6.714	มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน
	S	1.99	1.549	
	S/\bar{X}	0.199	0.23	
	ความคลาดเคลื่อน	99%	130%	
ASTM D1816	\bar{X} (kV)	10.076	10.217	มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน
	S	1.548	1.377	
	S/\bar{X}	0.154	0.135	
	ความคลาดเคลื่อน	54%	35%	
IEC 156	\bar{X} (kV)	13.792	13.796	มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน
	S	3.355	4.557	
	S/\bar{X}	0.243	0.33	
	ความคลาดเคลื่อน	-	-	



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกควาน์ของฉนวนเหลว

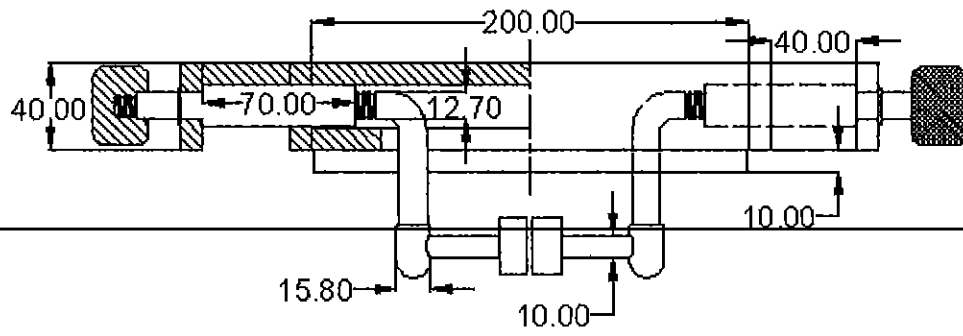
4.4 การทดสอบชุดด้วยทดสอบ

เป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาว่า ชุดด้วยทดสอบสามารถใช้ทดสอบปรับระยะห่างของ อิเล็กโทรดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156 หรือไม่

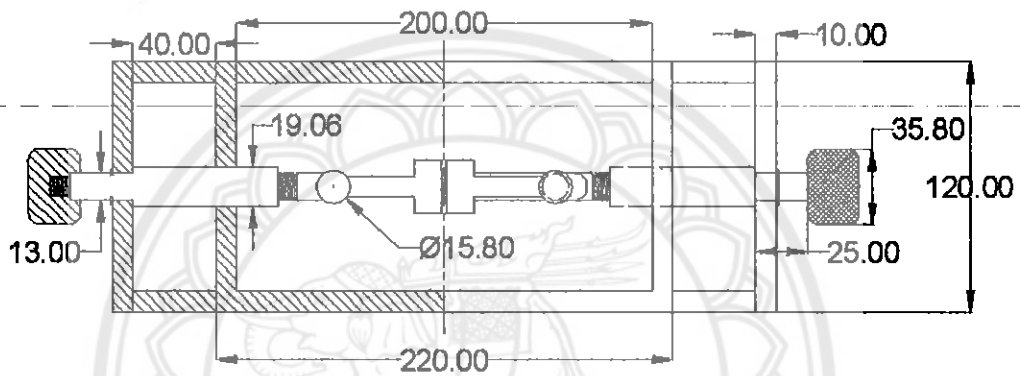
4.4.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่า สามารถใช้ปรับระยะห่างของอิเล็กโทรดได้ทั้ง 3 มาตรฐาน แต่ยัง ทำการออกแบบได้ไม่ดีพอ พบการแกว่งตัวได้ขณะทำการปรับระยะห่างของอิเล็กโทรด เมื่อนำไป ทดสอบหาค่าเบรกควาน์ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งส่งผลทำ ให้ค่าแรงดันเบรกควาน์มีค่าความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงออกแบบชุดด้วยทดสอบ ลักษณะที่สำคัญ 2 จุดดังต่อไปนี้

1. ชุดเกลียวปรับระยะ ทำการเพิ่มขนาดเพื่อเพิ่มความมั่นคง ไม่เกิดการขยับตัวในการ ทดสอบ จะทำให้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเกิดการคลาดเคลื่อน
2. ลวดจุดต่อของแท่งตัวนำ เปลี่ยนจากจุดต่อของแท่งตัวนำด้านบนเป็นการตัดโค้ง เพื่อที่จะลดความคลาดเคลื่อนระหว่างการเจาะและการทำเกลียวดังรูปที่ 4.16 และ 4.17



รูปที่ 4.16 แบบที่แก้ไขชุดด้วยทดสอบที่มองจากด้านหน้า



รูปที่ 4.17 แบบที่แก้ไขชุดด้วยทดสอบที่มองจากด้านล่าง

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและปัญหา

5.1 สรุปผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการทดสอบและปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นโครงการนี้ซึ่งได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ชุดปรับแรงดัน, การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกคาว์นของฉนวนเหลว และ ชุดถ้วยทดสอบ

5.1.1 ชุดปรับแรงดันไฟฟ้า

จากผลการทดสอบพบว่า ชุดปรับแรงดันไฟฟ้าสามารถใช้งานได้เฉพาะมาตรฐาน ASTM D877 ต้องทำการเปลี่ยนเฟืองทศรอบที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เป็นเฟือง 44 ซี่ โดยมีความคลาดเคลื่อนเป็น 0.865% ซึ่งถือเป็นค่าที่ยอมรับได้

ส่วนการทดสอบมาตรฐาน ASTM D1816 ต้องทำการเปลี่ยนเฟืองทศรอบที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เป็นเฟือง 266 ซี่ จึงจะสามารถใช้งานในการปรับแรงดันตามมาตรฐานได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนเป็น 0.027% ซึ่งถือเป็นค่าที่ยอมรับได้

และการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156 ต้องทำการเปลี่ยนเฟืองทศรอบที่หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้เป็นเฟือง 66 ซี่ จึงจะสามารถใช้งานในการปรับแรงดันตามมาตรฐานได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนเป็น 0.865% ซึ่งถือเป็นค่าที่ยอมรับได้

5.1.2 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกคาว์นของฉนวนเหลว

1. การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D877

จากการทดสอบเบรกคาว์นของฉนวนเหลวน้ำมันบริสุทธิ์และฉนวนเหลวน้ำมันผสมน้ำของมาตรฐาน ASTM D877 พบว่าเกินหลักเกณฑ์มาตรฐานโดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 99% และ 130% โดยสาเหตุความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากปัจจัยดังนี้

1) เกิดจากการเบรกคาว์นแต่ละครั้งทำให้ผิวของอิเล็กโทรดเสียหาย เกิดเขม่าเกาะที่หัวอิเล็กโทรด และยังเกิดรอยขรุขระที่ผิวของอิเล็กโทรด

2) เกิดจากความไม่คงรูปของหยดน้ำในน้ำมัน อยู่ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ ผลของสนามไฟฟ้าจึงทำให้หยดน้ำยึดตัวออกแนวตามแรงสนามไฟฟ้า ทำให้ความเครียดของสนามไฟฟ้าวิกฤติที่ทำให้หยดน้ำถูกกลมเสียสภาพมีค่าเท่ากับ 319.80 kV/cm ซึ่งต่ำกว่าค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวน้ำมันบริสุทธิ์เชิงการค้าที่มีค่า 1000 kV/cm จากภาคผนวก ง

3) ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรด โดยฟองก๊าซนั้นจะขยายตัวยึดในแนวสนามไฟฟ้า เพื่อลดพลังงานศักย์ที่เกิดขึ้น ในฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์ และ ฉนวนเหนือน้ำมันปนน้ำ มีค่าเท่ากับ 0.805 kV/cm และ 0.321 kV/cm ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของฉนวนเหนือน้ำมันหม้อแปลง จากภาคผนวก จ

2. การทดสอบมาตรฐาน ASTM D1816

จากการทดสอบเบรกดาว์ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์และฉนวนเหนือน้ำมันผสมน้ำของมาตรฐาน ASTM D1816 พบว่าเกินหลักเกณฑ์มาตรฐานโดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 54%, และ 35% โดยสาเหตุความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากปัจจัยดังนี้

1) เกิดจากการเบรกดาว์แต่ละครั้งทำให้ผิวของอิเล็กโทรดเสียหาย เช่นเดียวกับกรณีข้อที่ 1 ของการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D877

2) เกิดจากความไม่คงรูปของหยดน้ำในน้ำมัน อยู่ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ เช่นเดียวกับกรณีข้อที่ 2 ของมาตรฐาน ASTM D877

3) เกิดจากแรงสั่นสะเทือนขณะทำการทดสอบ ส่งผลทำให้ความคลาดเคลื่อนระยะห่างของอิเล็กโทรดของฉนวนเหนือน้ำมันปนน้ำที่มีค่ามากกว่า 2 ± 0.03 mm ทำให้ค่าแรงดันเบรกดาว์ของฉนวนเหนือน้ำมันปนน้ำมีค่ามากกว่าความเป็นจริง

3. การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156

จากผลการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156 ไม่สามารถวิเคราะห์ให้อยู่ในมาตรฐานได้นั้น เกิดเนื่องมาจาก

- 1) อุณหภูมิของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์ที่ทำการทดสอบมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน IEC 156
- 2) การทดสอบแรงดันเบรกดาว์แต่ละครั้ง ไม่ได้ทำการหยุดพักการทดสอบอย่างน้อยครั้งละ 2 นาที

5.1.3 ชุดถ้วยทดสอบ

จากผลการทดสอบสามารถใช้ปรับระยะห่างของอิเล็กโทรดได้ทั้ง 3 มาตรฐาน แต่ยังไม่สามารถปรับระยะห่างของอิเล็กโทรดได้ไม่ดีพอ พบการแกว่งตัวได้ขณะทำการปรับระยะห่างของอิเล็กโทรด ซึ่งส่งผลทำให้ค่าแรงดันเบรกดาว์มีค่าความคลาดเคลื่อน จึงได้ทำการปรับปรุงออกแบบชุดถ้วยทดสอบโดยการแก้ไข ชุดเกลียวปรับระยะ และ ถัดจุดต่อของแท่งตัวนำ

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางการแก้ไข

1. ปัญหา: อิเล็กโทรดไม่ได้ตามมาตรฐานที่ตั้งไว้ อย่าง เช่น มาตรฐาน ASTM D1816 อิเล็กโทรดเป็นทรงดอกเห็ด ความหนาไม่ได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ รอยต่อระหว่างส่วนโค้งของขอบ

กับผิวหน้าไม่เรียบ โข่งและมีรูเล็กๆที่ผิวหน้าอิเล็กทรอนิกส์ และ มาตรฐาน IEC 156 อิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะเร็วไม่ได้ขนาดตามที่ออกแบบไว้

แนวการแก้ไข : ต้องหาสถานที่กลึงที่มี เครื่องกลึง CNC ระบบ 3 มิติ ซึ่งมีความแม่นยำสูงในการกลึง เพื่อป้องกันความผิดพลาดอีกครั้ง

2. ปัญหา : การเกิดแรงดันเบรกควานในแต่ละครั้งทำให้ผิวของอิเล็กทรอนิกส์เกิดความเสียหาย ค่าของแรงดันเบรกควานจึงมีความคลาดเคลื่อนสูง

แนวการแก้ไข : ต้องใช้อิเล็กทรอนิกส์สวิตซ์ทำหน้าที่เบี่ยงเบนพลังงานดิสชาร์จไม่ให้ผ่านอิเล็กทรอนิกส์ และ ให้ใช้ช่วงเวลาที่สั้นที่สุดคือ $< 1 \mu s$ เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นให้น้อยที่สุด [4]

3. ปัญหา : ชุดหัวทดสอบอิเล็กทรอนิกส์สามารถแกว่งตัวได้ขณะทำการปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากการสร้างที่ไม่ได้มาตรฐาน เครื่องมือที่ใช้ไม่ละเอียดพอ

แนวการแก้ไข : ออกแบบชุดหัวทดสอบอิเล็กทรอนิกส์ และ ฝาด้วยทดสอบให้รองรับกับค่าผิดพลาดในการสร้าง เช่น เพิ่มขนาดชุดเกลียวปรับตั้งระยะ ลดจุดต่อต่างๆของแท่งตัวนำให้น้อยลง และขั้นตอนในการสร้างต้องมีการวัดขนาดเสมอพร้อมกันใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดสูง

4. ปัญหา : ผลการทดสอบแรงดันเบรกควานเบรกควานของจนวนน้ำมันบริสุทธิ์และน้ำมันปนน้ำ พบค่าความคลาดเคลื่อนที่สูง

แนวการแก้ไข : เปลี่ยนจนวนน้ำมันที่ทำการทดสอบแล้วทิ้งไป โดยใช้จนวนน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ แล้วจึงทำการทดสอบใหม่อีกครั้งหนึ่ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศรีสุดา ไชยทองสูง. พงเทพ ปลอดภัย. “การปรับปรุงเครื่องทดสอบความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน” วิทยานิพนธ์ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2543.
- [2] อรรถชัย พงศ์ถาวรสวัสดิ์. “ชุดสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงกระแสสลับ 1 เฟส ชนิดปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 6-15 KV และปรับความถี่ได้ 5-60 Hz กระแส 1.5 mA” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2550.
- [3] ศ.ดร.วิทย์ อึ้งภากรณ์. รศ.ชาญ ถนัดงาน. การออกแบบเครื่องจักรกล. กรุงเทพมหานคร : บริษัทซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน). 2550.
- [4] ดร.ลำรวบ สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. คณะวิศวกรรมศาสตร์ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2528.
- [5] สัมพันธ์ ภูเจริญ. อธิศักดิ์ บุญวงศ์. “เครื่องทดสอบไดอิเล็กทริกโวลต์เตจของฉนวนน้ำมันหม้อแบบอัตโนมัติโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์” วิทยานิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2538.
- [6] ผศ.อำนาจ ทองผาสุก. ผศ.วิทยา ประยงค์พันธ์. การควบคุมมอเตอร์. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [7] จักรกฤษ สิงห์บำรุง. พูลศักดิ์ สาหร่ายสุวรรณ. “เครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. มหาวิทยาลัยนเรศวร
- [8] IEEE Transformers Committee. “IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment” IEEE. IEEE Std C57.106TM -2006. June 2007. pp.13.
- [9] IEC. “Insulating Liquid - Determination of the breakdown voltage at power frequency Test method” IEC156. Second edition. 1995. pp. 5-20.

ภาคผนวก ก

ตารางขนาดหมายเลขของขดลวด

CONVERSION TABLE FOR ENGLISH STANDARD WIRE GAUGE		
S.W.G	Diameter	Area
No	mm.	Sq.mm.
12	2.6	5.31
13	2.3	4.15
13.5	2.1	3.63
14	2	3.14
14.5	1.9	2.84
15	1.8	2.54
16	1.6	2.01
17	1.4	1.54
17.5	1.3	1.33
18	1.2	1.13
18.5	1.1	0.95
19	1	0.79
20	0.9	0.65
20.5	0.85	0.57
21	0.8	0.5
22	0.7	0.41
23	0.6	0.29

ภาคผนวก ข

รายละเอียดของमुखเชิง

Material: Porcelain complying with C 100 series of HD 426.3 S1 or equivalent material.
 Colour: Brown (other colours are allowed by special agreement).
 Surface: Glazed except machined surfaces, ground surface and surfaces marked by - - - - - (other kind of surface for inner hole and lower extremity by special agreement).

All dimensions in mm.
 Unless otherwise stated in the drawing tolerances according to HD 329 S1.

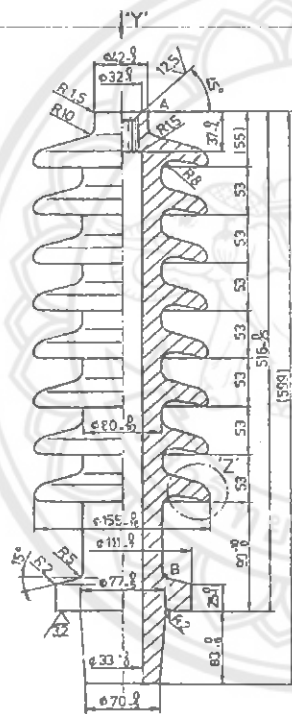


Figure A.4 — Insulator (item No. 1), type 4
 Calculated nominal creepage distance AB of represented Insulator 035 mm.

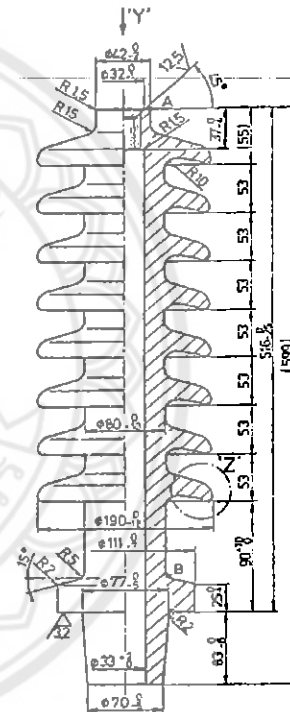
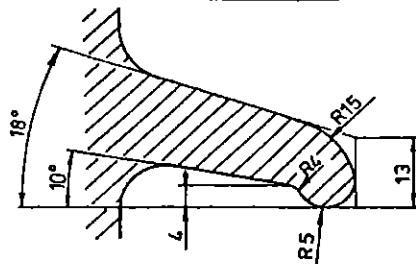
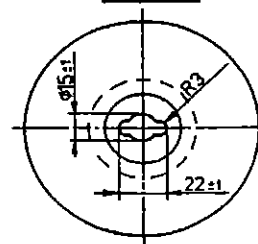


Figure A.5 — Insulator (item No. 1), type 5
 Calculated nominal creepage distance All of represented insulator 1 165 mm.

Detail 'Z'



View 'Y'



ภาคผนวก ก

ตารางทดสอบแรงคั้นเบรกคาวาน์ของอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม

ระยะห่าง ระหว่าง อิเล็กทรอนิกส์ (cm)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม (cm)											
	2	5	6.5	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
0.05	2.8											
0.10	4.7											
0.15	6.4											
0.20	8.0	8.0										
0.25	9.6	9.6										
0.30	11.2	11.2										
0.40	14.4	14.3	14.2									
0.50	17.4	17.4	17.2	16.8	16.8	16.8						
0.60	20.4	20.4	20.2	19.9	19.9	19.9						
0.70	23.2	23.4	23.2	23.0	23.0	23.0						
0.80	25.8	26.3	26.2	26.0	26.0	26.0						
0.90	28.3	29.2	29.1	28.9	28.9	28.9						
1.0	30.7	32.0	31.9	31.7	31.7	31.7	31.7					
1.2	(35.1)	37.6	37.5	37.4	37.4	37.4	37.4					
1.4	(38.5)	42.9	42.9	42.9	42.9	42.9	42.9					

ตารางทดสอบแรงค้ำเบรกดาวนซ์ของอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม (ต่อ)

ระยะห่าง ระหว่าง อิเล็กทรอนิกส์	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม (cm)												
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200	
(cm)													
1.5	(40.0)	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5						
1.6		48.1	48.1	48.1	48.1	48.1	48.1						
1.8		53.0	53.0	53.5	53.5	53.5	53.5						
2.0		57.5	58.5	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0				
2.2		61.5	63.0	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5				
2.4		65.5	67.5	69.5	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0				
2.6		(69.0)	72.0	74.5	75.0	75.5	75.5	75.5	75.5				
2.8		(72.5)	76.0	79.5	80.0	80.5	81.0	81.0	81.0				
3.0		(75.5)	79.5	84.0	85.0	85.5	86.0	86.0	86.0	86.0			
3.5		(82.5)	(87.5)	95.0	97.0	98.0	99.0	99.0	99.0	99.0			
4.0		(88.5)	(95.0)	105	108	110	112	112	112	112			
4.5			(101)	115	119	122	125	125	125	125			
5.0			(107)	123	129	133	137	138	138	138	138		
5.5				(131)	138	143	149	151	151	151	151		
6.0				(138)	146	152	161	164	164	164	164		

ภาคผนวก ง

กลไกการเบรกดาวนของฉนวนเหลวเชิงการก้ำ

แม้ว่าจะได้มีการทดลองค้นคว้าวิจัยกันเป็นจำนวนมากเพื่ออธิบายการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลวแต่ก็ยังไม่มียุทธวิธีใดที่สามารถอธิบายกระบวนการเกิดเบรกดาวนได้แจ่มชัดเหมือนอย่างในฉนวนก๊าซ ทั้งนี้ เนื่องจากความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่าง ๆ หลายประการ เช่น ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ของฉนวนเหลว ชนิดและปริมาณสิ่งเจือปนของแข็งและก๊าซ ตลอดจนสภาพของอิเล็กโทรดจึงมีหลายยุทธวิธีและแนวความคิดที่อธิบายกลไกเบรกดาวนของฉนวนเหลว ซึ่งอาจแยกออกเป็น 2 แนวยุทธวิธีด้วยกัน คือ ยุทธวิธีสมมุติพิจารณาว่าฉนวนเหลวเป็นเนื้อเดียวกันตลอด และอธิบายการเกิดเบรกดาวนในลักษณะเดียวกันกับกลไกเบรกดาวนในก๊าซตามที่กล่าวมาแล้ว โดยอาศัยการเกิดอะวาลานซ์จากไอออนในเซชันเนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า การอธิบายโดยใช้ยุทธวิธีนี้ไม่คำนึงถึงผลของสิ่งเจือปน จึงสามารถอธิบายได้ในขอบเขตจำกัด ส่วนอีกยุทธวิธีหนึ่งอธิบายการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลวเนื่องมาจากสิ่งเจือปน เนื่องจากฟองก๊าซ แต่ยุทธวิธีนี้ก็คำนึงถึงแต่ผลของสิ่งแปลกปลอม โดยลืมนำว่าฉนวนเหลวเองก็เกิดเบรกดาวนได้เหมือนกัน สรุปแล้วก็คือยังไม่มียุทธวิธีใดที่ยุทธวิธีหนึ่งที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ได้ทุกกรณี อย่างไรก็ตาม การเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลวอาจเนื่องมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. โพรงและฟองก๊าซซึ่งมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าฉนวนเหลวจะเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลว
2. สิ่งเจือปนของแข็งเป็นต้นเหตุทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนของเหลวเพิ่มขึ้นเฉพาะแห่ง นำไปสู่การเกิดเบรกดาวนส่วนรวม โดยค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวน้ำมันบริสุทธิ์ที่มีค่า 1000 kV/cm

ภาคผนวก จ

ตารางความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวบริสุทธิ์

ชนิดของฉนวนเหลว	ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (MV/cm)
Hexane	1.1 – 1.3
Decane	1.8
Benzene	1.1
Transformer oil	1.0
Silicone	1.0 – 1.2
Liquid oxygen	1.4
Liquid Hydrogen	>1
Liquid Nitrogen	1.66 – 1.88
Liquid Helium	0.7
Liquid Argon	1.1 – 1.42

ภาคผนวก ฉ

ตารางคุณสมบัติของฉนวนหลายบางชนิดที่นิยมใช้เป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้า

คุณสมบัติ	ชนิดของฉนวนหลาย		
	น้ำมันหม้อแปลง	กลอรีเนท	ฟลูออรีเนท
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm^3)	0.9	1.4	1.8
จุดติดไฟ ($^{\circ}\text{C}$)	130 - 180	-	-
สภาพนำความร้อน ($\text{mW/cm } ^{\circ}\text{C}$)	1.6	1	1
ความต้านทานจำเพาะ (ohm-cm) ที่ 85°C	100×10^{12}	100×10^{12}	10×10^{12}
แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียที่ 80°C 50 Hz	10×10^{-4}	6×10^{-4}	6×10^{-4}
ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต (kV/cm)	10 - 25		
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (50 Hz)	2 - 2.5		
ความชื้นที่ยอมให้มีได้สูงสุด (ppm)	50		
การขยายตัว ($20-100^{\circ}\text{C}$)	$7 \times 10^{-4} ^{\circ}\text{C}$		
ผลแตกตัวขององค์ประกอบเมื่อเกิดอาร์ค ไฟฟ้า	ไฮโดรเจน อะเซททีลีน	กรดไฮโดร คลอริก	กรดไฮโดร ฟลูออริก

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายป๋องจพร พูลสุข

ภูมิลำเนา 12/4 ถนนพรพิบูลย์อุทิศ ต.อุทัยใหม่ อ.เมือง
จ.อุทัยธานี

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอุทัยวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

นเรศวร

Email: sanood13@hotmail.com



ชื่อ นายพลากร รอทอง

ภูมิลำเนา 39 หมู่ 3 ต.หนองหลุม อ.วชิรบุรี จ.พิจิตร

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

นเรศวร

Email: p_korn_r@hotmail.com



ชื่อ นายเกรียงไกร อยู่สุภาพ

ภูมิลำเนา 125/1 ต.ท่าจี่ว อ.บรพตพิสัย จ.นครสวรรค์

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบรพตพิสัยพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: fristkonwan@hotmail.com

