



การสร้างชุดทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนน้ำมัน  
CONSTRUCTION A TESTING SET FOR BREAKDOWN-VOLTAGE TEST  
OF INSULATING OIL

นายวิญญู บุญชู รหัส 47364088

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 19 ส.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 15753788
เลขเรียกหนังสือ..... 1/5
มหาวิทยาลัยนเรศวร 8569 17

2552

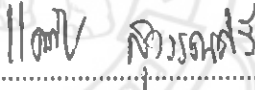
ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ปีการศึกษา 2552




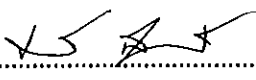
## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การสร้างชุดทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรคความถี่ของฉนวนน้ำมัน  
ผู้ดำเนินโครงการ นายวิญญู บุญชู รหัส 47364088  
ที่ปรึกษาโครงการ ดร. แคทรียา สุวรรณศรี  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
ปีการศึกษา 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

  
..... ที่ปรึกษาโครงการ  
(ดร. แคทรียา สุวรรณศรี)

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

  
..... กรรมการ  
(ดร. ธนพงศ์ สุวรรณศรี)

ชื่อหัวข้อโครงการ การสร้างชุดทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกควาน์ของฉนวนน้ำมัน  
ผู้ดำเนินโครงการ นายวิญญู บุญชู รหัส 47364088  
ที่ปรึกษาโครงการ ดร. แศรียา สุวรรณศรี  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
ปีการศึกษา 2552

.....

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการสร้างชุดทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกควาน์ของฉนวนน้ำมัน ซึ่งมีวัตถุประสงค์ตั้งนี้สร้างชุดทดสอบและทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน ASTM D877-87, ASTM D1816 และ IEC 156

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ทั้ง 3 มาตรฐานสำหรับน้ำมันหม้อแปลงแบบไม่มีชุดควาน และแบบมีชุดควานพบว่า ค่าแรงดันเบรกควาน์ไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบ เหตุผลสำคัญคือ 1) น้ำมันหม้อแปลงที่นำมาทดสอบไม่สามารถควบคุมสภาพความชื้นและการปนเปื้อนได้ 2) ความคลาดเคลื่อนในการปรับระยะแกปและความไม่ได้ระนาบของแกป 3) การเบรกควาน์ทำให้ผิวของอิเล็กโทรดเสียหาย โดยเกิดรอยขรุขระที่ผิวของอิเล็กโทรดทำให้ความเครียดของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 4) การเบรกควาน์ทำให้มีเขม่าเกาะที่หัวอิเล็กโทรดทำให้แรงดันเบรกควาน์แต่ละครั้งไม่สม่ำเสมอ

สำหรับชุดควานน้ำมันนั้นสามารถปรับปรุงค่าสนามไฟฟ้าให้มีค่าสม่ำเสมอมากขึ้น ทำให้แรงดันเบรกควาน์แต่ละครั้งมีค่าใกล้เคียงกัน

**Project title** Construction a Testing Set for Breakdown-Voltage Test of Insulating Oil  
**Name** Mr. Winyu Boonchu ID. 47364088  
**Project advisor** Mrs. Cattareeya Suwanasri, D.Eng.  
**Major** Electrical Engineering  
**Department** Electrical and Computer Engineering  
**Academic year** 2008

.....

### Abstract

This project is a construction of a breakdown-voltages set test of insulating oil by aiming at creating the test set and testing the insulation of an oil transformer to standardis ASTM D877-87, ASTM D1816 and IEC 156.

The results and the analysis of three standards for both the transformer without a magnetic stirrer and the transformer with a magnetic stirrer show that breakdown-voltages are unsatisfied the standards. The significant reasons are 1) the oil transformer which was tested could not control humidity and contamination; 2) the deviation in setting gap range and the problems of unsuitable gap plane; 3) breakdown caused electrode's surface was damaged resulting to skin-corrosion and increasing of electric field stress; 4) breakdown produced soot around the electrodes which the breakdown voltages was not constant.

The magnetic stirrer could develop magnetic field to be more constant causing each the breakdown-voltage had close values.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก ดร. แคทรียา สุวรรณศรี และ ดร. ธนพงศ์ สุวรรณศรี ที่ให้ความช่วยเหลือ สละเวลารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และให้ความกรุณาในการตรวจทานปริญาานิพนธ์ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงและขอระลึกถึงความกรุณาของท่านไว้ตลอดไป

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์ ที่ให้คำชี้แนะและคำปรึกษาเพิ่มเติมอันเป็นประโยชน์ในการแก้ไขปรับปรุงโครงการนี้

นอกจากนี้ยังต้องขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ให้ยืมสถานที่, อุปกรณ์และเครื่องมือวัดมาใช้งาน ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

เหนือสิ่งอื่นใด คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ผู้มอบความรักความเมตตา สติปัญญา รวมทั้งเป็นผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างตั้งแต่วัยเยาว์จวบจนถึงปัจจุบัน คอยเป็นกำลังใจทำให้ได้รับความสำเร็จอย่างทุกวันนี้

นายวิญญู บุญชู

# สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของ โครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการ.....	1
1.3 แนวทางการทำโครงการ.....	1
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 งบประมาณที่ใช้.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและมาตรฐานการทดสอบ.....	4
2.1 สนามไฟฟ้า.....	4
2.1.1 สนามไฟฟ้าคืออะไร.....	4
2.1.2 ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า.....	5
2.1.3 ความเครียดสนามไฟฟ้า E (electric field stress).....	6
2.1.4 ศักย์ไฟฟ้า (electric potential).....	7
2.1.5 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า (electric field configuration).....	9
2.1.5.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (I).....	9
2.1.5.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (II).....	11
2.1.5.3 ผลของลักษณะสนามไฟฟ้าต่อการเกิดเบรกดาวน์.....	13
2.1.5.4 ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า (dielectric strength).....	14
2.1.5.5 แฟกเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อความคงทนของฉนวน.....	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 การฉนวน.....	16
2.2.1 คุณสมบัติของฉนวน.....	16
2.2.2 ชนิดวัสดุฉนวน.....	16
2.2.2.1 ฉนวนแข็ง.....	16
2.2.2.2 ฉนวนเหลว.....	17
2.2.2.3 ฉนวนก๊าซ.....	17
2.2.2.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวกับก๊าซ.....	17
2.2.2.5 การเสียดสภาพการฉนวน.....	18
2.3 การเกิดเบรกดาวน์.....	18
2.3.1 กลไกเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวเชิงการค้ำ.....	18
2.3.1.1 เบรกดาวน์เนื่องจาก โพรงและฟองก๊าซ (cavitation breakdown).....	19
2.3.1.2 เบรกดาวน์เนื่องจากสิ่งเจือปนของแข็ง.....	21
2.3.2 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวบริสุทธิ์.....	22
2.3.3 ระยะเวลาที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์.....	23
2.3.4 รูปคลื่นแรงดันมีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์.....	24
2.4 การสร้างแรงดันสูงกระแสสลับความถี่ต่ำ.....	25
2.4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	25
2.4.2 หม้อแปลงไฟฟ้า.....	25
2.4.3 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	27
2.4.4 หม้อแปลงทดสอบ.....	27
2.4.4.1 ขนาดแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ.....	28
2.4.4.2 กระแสกำหนดของหม้อแปลงทดสอบ.....	28
2.4.4.3 ขนาดกำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ.....	29
2.4.4.4 กำลังและแรงดันไฟฟ้าลัดวงจร (short circuit power and short circuit voltage).....	31
2.4.4.5 กำลังไฟฟ้าป้อนให้หม้อแปลงทดสอบ.....	33
2.4.4.6 โครงสร้างและฉนวนหม้อแปลงทดสอบ.....	34
2.4.4.7 การต่อขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงทดสอบ.....	36

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.4.8 หม้อแปลงต่อแบบขั้วบันได.....	38
2.4.4.9 แรงดันกระจายของขดลวด.....	40
2.4.5 วงจรรีไซเคิลแรงดันสูง.....	41
2.5 เทคนิคการวัดแรงดันสูง.....	43
2.5.1 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน.....	44
2.5.2 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันแบบกระแสลับ.....	45
2.5.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง CI.....	46
2.6 มาตรฐานการทดสอบ.....	50
2.6.1 มาตรฐาน ANSI/ASTM D877.....	50
2.6.2 มาตรฐาน ANSI/ASTM D1816.....	50
2.6.3 มาตรฐาน IEC 156.....	51
2.6.4 คุณสมบัติของการทดสอบ.....	51
2.6.5 เครื่องมือที่ใช้.....	51
2.6.6 ถ้วยทดสอบ.....	53
2.6.7 การปรับระยะและการรักษาอิเล็กทรอนิกส์ โทรค และถ้วยทดสอบ.....	54
2.6.8 ตัวอย่างทดสอบ.....	55
2.6.9 อุณหภูมิสำหรับการทดสอบ.....	56
2.6.10 อัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า.....	56
2.6.11 การทดสอบค่าแรงดันเบรกคาว์ของน้ำมันหม้อแปลง.....	57
2.6.12 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ.....	58
2.6.13 การจัดทำรายงาน.....	59
บทที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	60
3.1 หม้อแปลงทดสอบ.....	60
3.2 ตัวปรับแรงดันไฟฟ้า.....	61
3.3 ชุดถ้วยทดสอบและอิเล็กทรอนิกส์ โทรค.....	62
3.3.1 การออกแบบถ้วยทดสอบ.....	62
3.3.2 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ โทรค.....	64



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 ชุดควมน้ำมัน.....	66
3.4.1 หม้อแปลง.....	68
3.4.2 บริดจ์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Bridge).....	68
3.4.3 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ DC.....	69
3.4.4 มอเตอร์เกียร์ 24 V DC.....	69
3.4.5 แคปซูลแม่เหล็ก.....	70
3.4.6 การทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้.....	70
3.5 โวลต์เตจดีไวเดอร์.....	70
<b>บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ.....</b>	<b>72</b>
4.1 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877.....	72
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้.....	72
4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	73
4.1.3 ผลการทดสอบ.....	74
4.1.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	76
4.2 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D1816.....	76
4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้.....	76
4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	77
4.2.3 ผลการทดสอบ.....	78
4.2.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	80
4.3 การทดสอบตามมาตรฐาน IEC156.....	80
4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้.....	80
4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	81
4.3.3 ผลการทดสอบ.....	82
4.3.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	84
4.4 สรุปผลการวิเคราะห์.....	84
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและปัญหา.....</b>	<b>87</b>

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 สรุปผลการทดสอบและปัญหา.....	87
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....	87
5.3 แนวทางการแก้ไข.....	88
เอกสารอ้างอิง.....	89
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	90



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของวัสดุฉนวนขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ.....	15
2.2 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวบริสุทธิ์.....	23
2.3 กระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบความคงทนแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำ.....	29
2.4 ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า.....	30
2.5 ตัวอย่างค่าที่กำหนดและกระแสลัดวงจรของหม้อแปลงทดสอบ.....	33
2.6 ขนาดของอิเล็กโทรดตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156.....	53
2.7 ขนาดของถ้วยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156.....	54
2.8 ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156.....	55
2.9 อัตราแรงดันที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเบรกดาวน์ตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC156.....	57
2.10 กรณีตรวจรับน้ำมันห้อง Main tank.....	57
2.11 กรณีบำรุงรักษาน้ำมันห้อง Main tank.....	57
2.12 จำนวนครั้งที่ทดสอบและอัตราส่วน ที่ไม่ควรเกินตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156.....	59
4.1 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันที่มีการปนเปื้อนตามมาตรฐาน ASTM D877 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5 mm.....	74
4.2 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันที่มีการปนเปื้อนตามมาตรฐาน ASTMD1816 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 mm.....	78
4.3 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันที่มีการปนเปื้อนตามมาตรฐาน IEC156 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5.....	82
4.4 การทดสอบค่าแรงดันเบรกดาวน์กรณีบำรุงรักษาน้ำมันเปรียบเทียบกับค่าที่ทดสอบ.....	85
4.5 ตารางสรุปผลการทดสอบทั้ง 3 มาตรฐาน.....	85

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าและความหนาแน่น.....	5
2.2 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน.....	9
2.3 การเปรียบเทียบที่ทำให้เกิดแรงดันเบรคควาน์ใน ไดอิเล็กตริกตามลักษณะทางไฟฟ้า.....	10
2.4 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า.....	11
2.5 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ.....	12
2.6 หยดลูกกลมเหลวเจือปน ในฉนวนเหลวชนิดโคโน.....	20
2.7 เส้นกราฟแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	24
2.8 ส่วนประกอบหม้อแปลงไฟฟ้า.....	25
2.9 วงจรทดสอบแรงดันกระแสสลับ.....	29
2.10 วงจรสมมูลของหม้อแปลงเมื่อไม่คิดกระแสรั่วสนามแม่เหล็ก.....	31
2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรม โหลดเป็นความจุไฟฟ้า.....	31
2.12 กระแสที่ป้อนเข้าหม้อแปลงทดสอบ.....	34
2.13 หม้อแปลงทดสอบแบบฉนวนแห้ง.....	35
2.14 การฉนวนในหม้อแปลง.....	35
2.15 โครงสร้างหม้อแปลงทดสอบแกนเหล็กต่อลงดินแบบจุ่มน้ำมัน.....	36
2.16 โครงสร้างและวงจรการต่อภายในหม้อแปลงทดสอบแบบสมมาตร.....	37
2.17 ขดลวดหม้อแปลงสำหรับต่อขึ้นบันได.....	38
2.18 ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลงทดสอบแบบขึ้นบันได.....	39
2.19 ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลงแบบขึ้นบันได.....	39
2.20 ภาพถ่ายหม้อแปลงแบบขึ้นบันได 3 ชั้น.....	40
2.21 แรงดันกระจายของขดลวดหม้อแปลงในภาวะคงตัว.....	40
2.22 ลักษณะโครงสร้างของรีแอกเตอร์แรงสูง.....	41
2.23 วงจรรีโซแนนซ์อนุกรมสร้างแรงสูง.....	42
2.24 ชุดทดสอบวงจรรีโซแนนซ์ ขนาด 1050 kV.....	43
2.25 โวลต์เตจดีไวเดอร์.....	44

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 โวลต์เตจดีไวเซอร์แบบความต้านทาน.....	45
2.27 โวลต์เตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุ.....	46
2.28 ตัวเก็บประจุ.....	47
2.29 วงจรสมมูลของ โวลต์เตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุย่อยต่ออันดับ.....	48
2.30 โครงสร้างภายในตัวเก็บประจุแรงสูงของ โวลต์เตจดีไวเซอร์.....	49
3.1 วงจรทดสอบตามมาตรฐาน.....	60
3.2 หม้อแปลงขนาด 220 V/100 kV.....	61
3.3 ตัวปรับแรงดันไฟฟ้า (variac) 0-230 V.....	61
3.4 แบบถ้วยทดสอบตามขนาดที่ออกแบบ.....	62
3.5 ถ้วยทดสอบตามขนาดที่ออกแบบ.....	63
3.6 แบบฝาปิดถ้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านหน้า.....	63
3.7 ฝาปิดถ้วยทดสอบที่มองจากด้านหน้า.....	63
3.8 แบบฝาปิดถ้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านล่าง.....	64
3.9 ฝาปิดถ้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านล่าง.....	64
3.10 แบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกระบอก.....	64
3.11 อิเล็กโทรดทรงกระบอก.....	65
3.12 แบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงคอกเห็ด.....	65
3.13 อิเล็กโทรดทรงคอกเห็ด.....	65
3.14 แบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกลม.....	66
3.15 อิเล็กโทรดทรงกลมที่ใช้ในการทดลอง.....	66
3.16 บล็อกไดอะแกรมการทำงานชุดกวนน้ำมัน.....	67
3.17 ชุดกวนน้ำมัน.....	67
3.18 อุปกรณ์ภายในชุดกวนน้ำมัน.....	67
3.19 หม้อแปลง 24V.....	68
3.20 แผงวงจรเร็กกูเลเตอร์.....	68

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.21 วงจรบริดจ์.....	68
3.22 ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์.....	69
3.23 วงจรปรับความเร็วมอเตอร์DC.....	69
3.24 มอเตอร์เกียร์ 24 V DC.....	70
3.25 แคปซูลแม่เหล็ก.....	70
3.26 โวลต์เดจดีไวเซอร์ 100 kV.....	71
4.1 วงจรทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877.....	73
4.2 อุปกรณ์การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877.....	73
4.3 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877.....	73
4.4 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877แบบมีชุดกวนน้ำมัน.....	74
4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกคาวนซ์ของมาตรฐาน ASTM D877.....	75
4.6 วงจรทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D1816.....	77
4.7 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D1816.....	77
4.8 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D1816 แบบมีชุดกวนน้ำมัน.....	78
4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกคาวนซ์ของมาตรฐาน ASTM D1816.....	79
4.10 วงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC156.....	81
4.11 การทดสอบตามมาตรฐาน IEC156.....	81
4.12 การทดสอบตามมาตรฐาน IEC156 แบบมีชุดกวนน้ำมัน.....	82
4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกคาวนซ์ของมาตรฐาน IEC156.....	83
4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกคาวนซ์ของฉนวนเหลว.....	87

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันการเพิ่มจำนวนของประชากร ทำให้มีการเจริญเติบโตทางด้านอุตสาหกรรม จึงมีความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิต เพื่อให้ได้ไฟฟ้าที่เพียงพอกับความต้องการของประชากรและอุตสาหกรรม จึงทำให้มีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง โดยจะต้องมีการตรวจสอบและมีการบำรุงรักษา

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีการใช้งานอยู่ตลอดเวลา อาจจะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการเสื่อมสภาพและชำรุดได้ จึงมีการตรวจสอบและ การบำรุงรักษาเพื่อที่จะยืดอายุการใช้งานให้นานที่สุด โดยเฉพาะหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพง หากเกิดการเสียหายใดๆขึ้น จะทำให้ระบบผลิตของโรงงานต้องหยุดชะงักและอาจมีผล การทบทวนอุปกรณ์อื่นๆ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนการ ใช้งาน โดยการตรวจสอบความเป็นฉนวนตามมาตรฐานน้ำมันหม้อแปลงก่อนการใช้งานหม้อแปลง ไฟฟ้า และในปัจจุบันมีการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นจำนวนมาก ในส่วนของภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะ โรงงานขนาดใหญ่ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบความเป็นฉนวนของน้ำมัน หม้อแปลงที่ใช้งานอยู่ ในการตรวจสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงโดยวิธีการทดสอบค่า ความแข็งแรงเชิงกำลังไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง (dielectric strength of transformer oil) เมื่อมี การปนเปื้อนเกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงทำให้คุณสมบัติการเป็นฉนวนที่ลดลงหรือสูญเสีย ความเป็นฉนวน การทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองการปนเปื้อนในน้ำมันหม้อแปลงในกรณีต่างๆ เพื่อให้ทราบค่าเบรกดาวน์ในแต่ละกรณี เป็นการป้องกันความเสี่ยงต่อความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับ หม้อแปลงได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

สร้างชุดทดสอบและทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน ASTM D877-87, ASTM D1816 และ IEC 156

### 1.3 แนวทางการทำโครงการ

1. ศึกษาการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง
2. ศึกษาผลของสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันหม้อแปลง ที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์

3. ศึกษามาตรฐานการทดสอบ ASTM D877-87, ASTM D1816, IEC 156 และมาตรฐานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
4. สร้างชุดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D877-87, ASTM D1816 และ IEC 156
5. ทดสอบการเบรคความดันของฉนวนน้ำมันในหม้อแปลง
6. วิเคราะห์ผลการเบรคความดันในน้ำมันหม้อแปลง
7. รวบรวมข้อมูลเข้ารูปเล่มพร้อมทั้งชิ้นงาน เสนอแนะแนวทางพัฒนาต่อ

#### 1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

รายละเอียด	ปี 2553				
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
1. ศึกษาการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง					
2. ศึกษาผลของสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันหม้อแปลง ที่ทำให้เกิดการเบรคความดัน					
3. ศึกษามาตรฐานการทดสอบ ASTM D877-87, ASTM D1816, IEC 156 และมาตรฐานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย					
4. สร้างชุดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D877-87, ASTM D1816 และ IEC 156					
5. ทดสอบการเบรคความดันของฉนวนน้ำมันในหม้อแปลง					
6. วิเคราะห์ผลการเบรคความดันในน้ำมันหม้อแปลง					
7. รวบรวมข้อมูลเข้ารูปเล่มพร้อมทั้งชิ้นงาน เสนอแนะแนวทางพัฒนาต่อ					

#### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. นักศึกษานำความรู้ที่ได้ศึกษามาใช้ในการทดสอบสิ่งเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงที่ทำให้เกิดการเบรคความดัน
2. สามารถวิเคราะห์ผลของการเกิดเบรคความดันในน้ำมันหม้อแปลงที่มีการเจือปนในแบบต่างๆได้



## 1.6 งบประมาณที่ใช้

1. ค่าวัสดุทางไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์	2,000 บาท
2. ค่าวัสดุทางเครื่องกล และอื่นๆ	2,000 บาท
3. ค่าเดินทางเก็บข้อมูล	1,000 บาท
4. ค่าถ่ายเอกสารและเข้าเล่ม โครงการฉบับสมบูรณ์	3,000 บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (แปดพันบาทถ้วน)	8,000 บาท
หมายเหตุ: เฉลี่ยทุกรายการ	



## 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 และทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์

#### 2.1 สนามไฟฟ้า [1]

##### 2.1.1 สนามไฟฟ้าคืออะไร

ที่ใดมีไฟฟ้าที่นั่นจะมีสนามไฟฟ้า โดยรอบประจุไฟฟ้ามีอะไรสิ่งหนึ่งที่เมื่อนำเอาประจุอื่นเข้ามาในบริเวณนั้นแล้ว ทำให้เกิดแรงกระทำต่อประจุที่นำเข้ามา ลึ้นนั้นที่เกิดจากประจุเรียกว่า สนามไฟฟ้าจะมีมากหรือน้อยอาจแสดงหรือวัดในรูปของแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) ว่า ถ้ามีประจุ  $Q_1$  และ  $Q'$  มีขนาดเล็กเป็นจุด วางห่างกันเป็นระยะ  $r$  จะเกิดแรงกระทำต่อกันในแนวทิศทางเชื่อมโยงระหว่างสองประจุนั้น สมมุติว่าแรงที่เกิดจาก  $Q_1$  ซึ่งมีตำแหน่งทางเวกเตอร์เทียบกับ  $Q'$  เป็น  $\vec{r}$  แรงที่เกิดขึ้นคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$F_{Q_1 \rightarrow Q'} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q_1 Q' \vec{r}}{r^3} = \frac{Q_1 Q' \hat{r}}{4\pi\epsilon r^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\vec{r}$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งสัมพัทธ์ของประจุ  $Q'$  เทียบกับ  $Q_1$  ซึ่งมีเวกเตอร์หน่วย  $\hat{r} = \vec{r}/r$

$\epsilon$  คือ เปรอร์มิตติวิตีของตัวกลาง  $\epsilon, \epsilon_0$

$\epsilon_0$  คือ เปรอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ หรือที่ว่าง =  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m

$\epsilon_r$  คือ เปรอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (ไม่มีหน่วย)

ถ้ามีประจุ  $N$  ประจุ กระจายอยู่หลายจุด ซึ่งมีเวกเตอร์ตำแหน่งต่างกันเป็น  $\vec{r}_i$  และเวกเตอร์หน่วยเท่ากับ  $\hat{r}_i$  ( $i = 1, 2, 3 \dots N$ ) ตามตำแหน่งของ  $Q_1$  เมื่อเทียบกับ  $Q'$  แรงทั้งหมดที่กระทำต่อ  $Q_1$  จะเท่ากับผลรวมทางเวกเตอร์ของแต่ละแรง นั่นคือ

$$F_Q = \sum_{i=1}^N F_{Q_i} \rightarrow Q' = \sum_{i=1}^N \frac{Q'Q_i \vec{r}_i}{4\pi\epsilon r_i^3} = \sum_{i=1}^N \frac{Q'Q_i \hat{r}}{4\pi\epsilon r_i^2} \quad (2.2)$$

สมการที่ (2.2) แรงที่ประจุต่างๆกระทำต่อประจุ  $Q'$  ถ้าคิดเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ  $Q'$  คำนั้นเรียกว่าความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field intensity) หรือความเครียดสนามไฟฟ้า  $E$  ซึ่งเขียนค่าแรงได้ว่า  $\vec{F} = Q'\vec{E}$  ทั้ง  $\vec{F}$  และ  $\vec{E}$  เป็นเวกเตอร์ที่มีทิศทางเดียวกัน นั่นคือ

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q'} = \frac{\vec{F}}{e} = \frac{Q'Q_i \hat{r}}{4\pi\epsilon r^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $e$  คือประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์ แสดงว่าความเครียดสนามไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับเปอร์มิตติวิตี หรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก  $\epsilon$

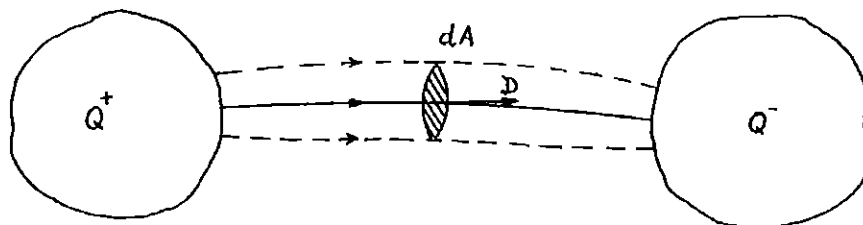
### 2.1.2 ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า $\vec{D}$

ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า  $\vec{D}$  หรือบางตำราเรียกว่าดิสเพลสเมนต์ไฟฟ้า (electric displacement) เป็นเวกเตอร์ หมายถึงจำนวนเส้นฟลักซ์  $\psi$  ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ตั้งฉากกับแนวที่คิด และโดยเหตุที่จำนวนเส้นฟลักซ์ และจำนวนคูลอมบ์ของประจุมีค่าเท่ากับ (Gauss's law) ฉะนั้นหน่วยของความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า  $D$  จึงเป็นคูลอมบ์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ตั้งฉาก คือ

$$\vec{D} = \frac{d\psi}{dA} \hat{r} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\hat{r}$  คือ เวกเตอร์หน่วย

โดยทั่วไปถือว่าเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าเริ่มต้นจากประจุบวกและไปสิ้นสุดที่ประจุลบ ฉะนั้นทิศทางของเวกเตอร์  $\vec{D}$  ณ จุดใดๆ ก็คือเส้นสัมผัสนั่นเอง ดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าและความหนาแน่น

จำนวนเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าทั้งหมดที่พื้นที่  $A$  จึงคำนวณได้

$$\psi = \oint \vec{D} \cdot d\vec{A} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\vec{D}$  คือ เวกเตอร์ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า ณ พื้นที่  $d\vec{A}$

และอาศัยกฎของเกาส์ (Gauss law) ที่กล่าวว่า จำนวนฟลักซ์ไฟฟ้าที่พุ่งออกจากปริมาตรใดๆ ที่หุ้มด้วยพื้นที่ปิดจะมีค่าเท่ากับจำนวนประจุอิสระ เป็นลูกอมบ์ นั่นคือ

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q_{f,in} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $Q_{f,in}$  คือ ประจุอิสระทั้งหมดที่อยู่ในปริมาตรหุ้มด้วยพื้นที่ปิด ประจุไฟฟ้าเป็นตัวทำให้เกิดเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า ฉะนั้นความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับความเครียดสนามไฟฟ้า

### 2.1.3 ความเครียดสนามไฟฟ้า $E$ (electric field stress)

ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว โคขกฎของลูกอมบ์จะเขียนได้ว่า

$$F = \frac{Q_1}{4\pi r^2} \frac{1}{\epsilon} Q_2 \hat{r} \quad (2.7)$$

ถ้าใช้นิยามของความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า จะเขียนได้ว่า

$$F = \frac{D}{\epsilon} Q_2 \quad (2.8)$$

จากสมการนี้ จะเห็นได้ว่า แรงกระทำบนประจุ  $Q_2$  เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแฟกเตอร์  $D/\epsilon$  ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อลูกอมบ์ (N/C) กล่าวคือ เป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ เป็นแรงในสนามไฟฟ้าหรือเรียกว่าความเครียดสนามไฟฟ้า  $E$  (electric field stress) ซึ่งนิยามด้วยความสัมพันธ์ว่า

$$F = \frac{D}{\epsilon} \quad (2.9)$$

โคขกฎของลูกอมบ์ จึงเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ว่า

$$F = QE \quad (2.10)$$

จะเห็นได้ว่า แรงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดสนามไฟฟ้า บางทีก็เรียกว่า ความเข้มสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V/mm, kV/cm, kV/m เป็นต้น ในทำนองเดียวกัน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในตัวนำไอโซโทริกเชิงเส้น เป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้า ซึ่งเขียนได้ว่า

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\vec{J}$  คือ ความหนาแน่นของกระแส เป็นเวกเตอร์ มีหน่วยเป็น A/m<sup>2</sup>

$\sigma$  คือ สภาพนำของตัวนำ มีหน่วยเป็น S/m = Siemens/meter = 1/ $\rho$

$\rho$  คือ สภาพต้านทาน เป็น  $\Omega$ -m

ความเครียดสนามไฟฟ้าถือเป็นพารามิเตอร์สำคัญต่อการฉนวนอุปกรณ์ หรือระบบไฟฟ้าแรงสูง ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ส่วนใหญ่จะเนื่องมาจากความล้มเหลวของฉนวน อันเกิดจากความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนนั่นเอง

#### 2.1.4 ศักย์ไฟฟ้า (electric potential)

ถ้าประจุ  $Q'$  อยู่ในสนามไฟฟ้า  $E$  จะเกิดแรงกระทำต่อประจุนั้นเป็น

$$\vec{F} = Q' \cdot \vec{E} \quad (2.12)$$

ฉะนั้นการเคลื่อนที่ประจุในสนามไฟฟ้าย่อมจะต้องเกิดเป็นงานขึ้นซึ่งอาจจะเป็นงานที่ทำออกไปเพื่อเคลื่อนประจุ หรือเป็นงานที่ได้มา ดังเช่น เคลื่อนประจุจากจุด A ไปยัง B งานที่ทำไปหรือได้มา คือ

$$W = Q' \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (2.13)$$

ถ้าหากนำประจุ  $Q'$  นี้เคลื่อนที่ไปในสนามไฟฟ้าสถิตจนครบรอบเป็นวงจรปิด โดยไม่ขึ้นอยู่กับเส้นทาง จะพบว่าเมื่อเคลื่อนที่ครบรอบแล้วผลลัพธ์จะ ไม่มีการทำงานหรือได้งานมา นั่นก็คือ

$$W = Q' \int \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.14)$$

งานที่ทำเพื่อเคลื่อนประจุจากจุด A ไปยัง B ถ้าติดต่อนิ่งหน่วยประจุ  $Q'$  ค่าที่ได้เรียกว่า ค่าต่างศักย์ระหว่างจุด A กับ B นั่นคือผลอินทิกรัลจาก

$$dW / Q' = -\vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (2.15)$$

จะได้

$$+ \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} = V(A) - V(B) = V_{AB} = U_{AB} \quad (2.16)$$

$V(A)$  และ  $V(B)$  ก็คือ ศักย์ไฟฟ้าที่จุด A ไปยัง B ตามลำดับ โดยวัดกับจุดอ้างอิงจุดใดจุดหนึ่งซึ่งมีศักย์เป็นศูนย์ ในกรณีที่ประจุที่จุดอนันต์เป็นจุดอ้างอิง ในทางปฏิบัติศักย์เป็นศูนย์ที่ใช้เป็นจุดอ้างอิงนั้นมักจะใช้พื้นดินเป็นจุดอ้างอิง (ground) นั่นคือ

$$V_A = - \int_A^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (2.17)$$

เนื่องจากพิจารณาเป็นสนามไฟฟ้าสถิต ( $\nabla \times \vec{E} = 0$ ) ฉะนั้น เวกเตอร์สนามไฟฟ้าอาจหาได้จากเกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้า คือ

$$\begin{aligned} \vec{E} &= -\text{grad}V = -\nabla V \\ &= -\left( \hat{x} \frac{dv}{dx} + \hat{y} \frac{dv}{dy} + \hat{z} \frac{dv}{dz} \right) \end{aligned} \quad (2.18)$$

โดยอาศัยสมการที่สี่ของแมกซ์เวลล์ ในตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวยวตลอด และไอโซโทริก (เช่น ก๊าซ ของเหลว และของแข็งบางชนิด) จะได้สมการพัวซอง (Poisson's equation) คือ

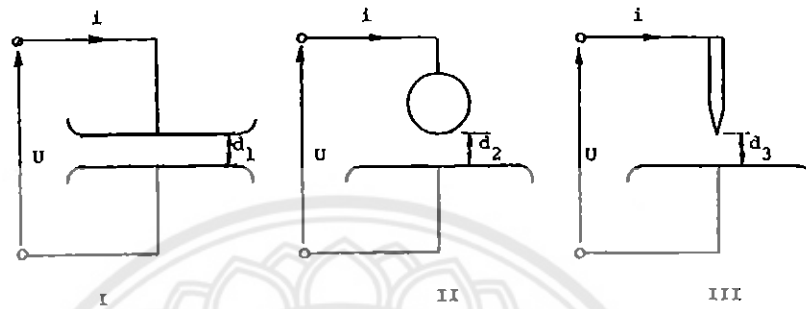
$$\begin{aligned} \nabla^2 V &= \frac{\rho}{\epsilon} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} &= -\frac{\rho}{\epsilon} \end{aligned} \quad (2.19)$$

ในกรณีที่ไม่มีประจุในปริมาตรนั้น นั่นคือ จะได้สมการลาปลาซ (Laplace's equation) เป็นต้น

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.20)$$

### 2.1.5 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า (electric field configuration)

โดยทั่วไป ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ชนิดไม่สม่ำเสมอนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และแบบไม่สม่ำเสมอสูง สนามไฟฟ้าจะเป็นแบบไหนขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโทรดดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน

I : สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field)

II : สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field)

III : สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field)

ถ้าป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.2 จะพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์จะไม่เท่ากันถึงแม้ว่าจะจัดระยะ  $d_1$ ,  $d_2$  และ  $d_3$  ให้เท่ากันก็ตาม

ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์สามารถวัดได้ง่าย ฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามิใช่ตายตัวค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติ หรือค่าโดยประมาณ มักกำหนดหรือระบุด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{max}$  ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโทรด ในขณะที่เบรกดาวน์เริ่มเกิดขึ้น ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการ

#### 2.1.5.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (I)

สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง สนามไฟฟ้าเท่ากันทุกจุด ดังเช่นในช่องระหว่างอิเล็กโทรด ระนาบ-ระนาบ ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{max} = E = \frac{U}{d} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $U$  คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด

$d$  คือ ระยะระหว่างอิเล็กโทรด

$E$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโทรด

$E_{\max}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

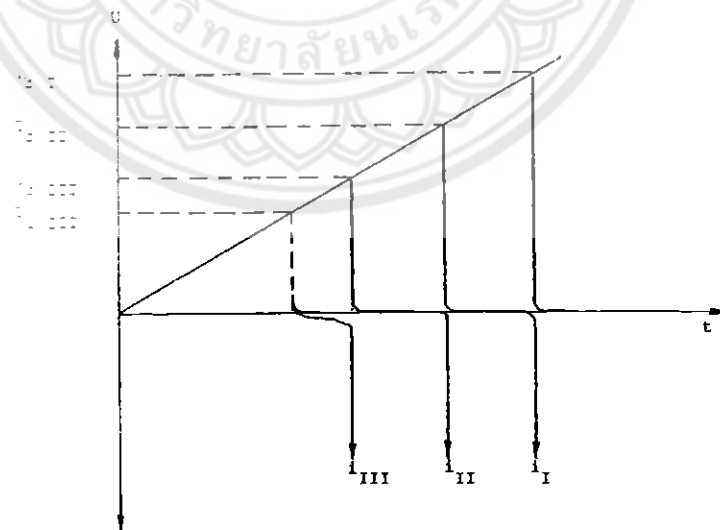
นั่นหมายความว่าเมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดเบรกดาวน์หรือสปาร์กทันที ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีที่ทันใดค่ากระแสเบรกดาวน์นี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวจ่าย และวงจรภายนอกเท่านั้น ซึ่งก่อนจะเกิดการเบรกดาวน์นั้น ค่ากระแสจะวัดไม่ได้ ดังในรูปที่ 2.3 (แบบ I) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาวน์นี้ก็คือน ค่าความคงทนทางไฟฟ้า (dielectric strength) หรือความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของการฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{U_b}{d} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $U_b$  คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

$E_b$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ ซึ่งเรียกว่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน

อย่างไรก็ตามค่า  $E_b$  นี้ ของไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ แม้แต่ความหนา  $d$  ที่ไม่เท่ากัน ค่า  $E_b$  ก็ไม่เท่ากัน ฉะนั้นในมาตรฐานที่กำหนดค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน มักจะกำหนดความหนาไดอิเล็กตริกไว้ด้วยเสมอ



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบที่ทำให้เกิดแรงดันเบรกดาวน์ใน ไดอิเล็กตริกตามลักษณะทางไฟฟ้า

I : สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field)

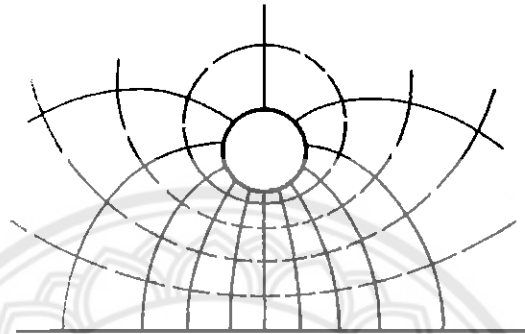
II : สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field)

III : สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field)



### 2.1.5.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (II)

สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากจะน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด ที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย ดังเช่น อิเล็กโตรดในรูปที่ 2.2 II ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าเท่า จะได้ดังในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า

————— เส้นสนามไฟฟ้า  
- - - - - เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า

ในรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  จะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $\eta^*$  คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีนิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \quad 0 < \eta^* \leq 1 \quad (2.24)$$

โดยที่  $E_{av}$  คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ  $U/d$

จึงอาจกล่าวได้ว่า  $\eta^*$  ก็คือ दरชนีแสดงให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้น มีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เอง จึงคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกควาน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (แบบ II) ได้คือ

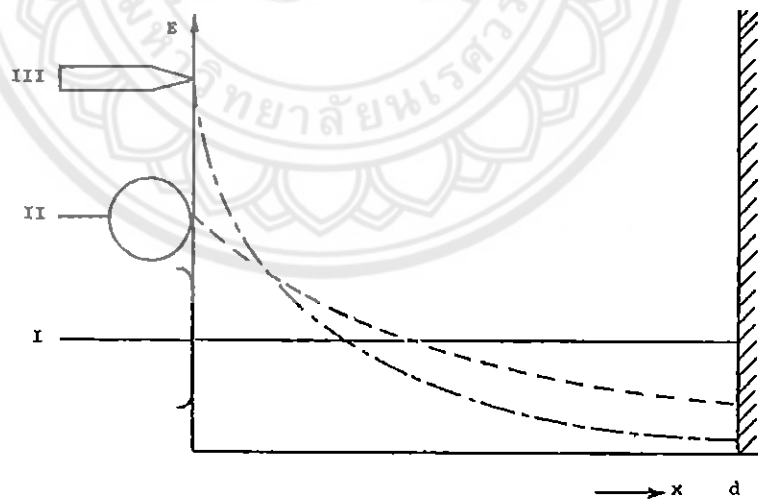
$$E_b = \frac{U_b}{d \cdot \eta^*} \quad (2.25)$$

และค่าแรงดันเบรกดาวน

$$U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.26)$$

แสดงว่า อิเล็กโตรดที่มีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าลดลง ค่าแรงดันเบรกดาวนก็จะลดลง สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนา คือ ไม่มีดีสชาร์จนำหน้า (predischARGE) เกิดก่อนเบรกดาวน ดังอิเล็กโตรดในรูป 2.2 II กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวนจะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลอยู่ระหว่างอิเล็กโตรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรกดาวนทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าความทนทาน คือ  $E_{\max} = E_b$

ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้กับผิวอิเล็กโตรด ที่มีผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลมดั่งในรูปที่ 2.2 III เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังเส้นกราฟความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบดังรูป 2.5 อิเล็กโตรดแบบ III นี้ ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตาม เบรกดาวนจะยังไม่เกิด แต่จะเกิดโคโรนา



รูปที่ 2.5 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ

บริเวณที่ผิวอิเล็กโตรดเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆที่ห่างออกไป จะมีความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงและโคโรนาไม่เกิด ฉะนั้นในระหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดดีสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ เรียกว่าดีสชาร์จบางส่วน (partial discharge = PD) ปรากฏการณ์อาจ

เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กทรอนิกส์ กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์ เรียกว่ากระแสโคโรนา หรือกระแสพรีดีสชาร์จ ดังรูป 2.3 III

การเกิดโคโรนาจะทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะคำนวณจากสมการ (2.21) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการ (2.27) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_i = \frac{U_i}{d\eta^*} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $E_i$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่โคโรนาเริ่มเกิด

$U_i$  คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage)

สมการที่ (2.27) ใช้ได้กรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโตรด (free of space charge) คือใช้สำหรับการคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้า หรือแรงดันเริ่มต้น (inception voltage, starting voltage, threshold voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในแก๊ส

#### 2.1.5.3 ผลของลักษณะสนามไฟฟ้าต่อการเกิดเบรกดาวน์

ในกรณีทีอิเล็กโตรดเป็นแบบสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย (แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า  $\eta^*$  มีค่าสูง) แรงดันเริ่มต้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องแก๊สระหว่างอิเล็กโตรด จะเป็นแบบเบรกดาวน์ โดยตรง (direct breakdown) เป็นเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นทันทีเมื่อมีเงื่อนไข โดยไม่มีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเบรกดาวน์ แต่ในกรณีทีอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (ค่าแฟกเตอร์  $\eta^*$  มีค่าต่ำ) ค่าแรงดันเบรกดาวน์  $U_b$  จะมีค่าสูงกว่าแรงดันเริ่มต้น  $U_i$  นั่นคือ เมื่อได้เงื่อนไขของแรงดันเริ่มต้นเปลี่ยนแปลง จะไม่เกิดเบรกดาวน์ หากแต่เริ่มเกิดโคโรนา ถ้าจะให้เกิดเบรกดาวน์จะต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นอีก การเกิดเบรกดาวน์แบบนี้ เรียกว่า โคโรนาเบรกดาวน์ หรือเบรกดาวน์แบบโคโรนา (corona breakdown) ค่าแรงดันเริ่มต้นอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$U_i = E_i \cdot d\eta^* \quad (2.28)$$

เมื่อ  $U_i$  คือ แรงดันเริ่มต้น

$E_i$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น  $U_i$

ในกรณีที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า  $U$ , ก็คือ  $U_0$  และ  $E$ , ก็คือ  $E_0$ , ถ้าเป็นอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง  $U_0 > U$ , ค่าแรงดันเบรคความนี้ไม่อาจจะคำนวณได้ง่าย ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้ำงว่าเป็นอย่างไร จึงหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายไม่ได้ ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ของการฉนวนที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง มักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น  $U$ , หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้น  $E$ , เป็นตัวแสดงถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า

#### 2.1.5.4 ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า (dielectric strength)

ฉนวนที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูงมี 3 ชนิด คือ ฉนวนก๊าซ ฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว ความคงทนฉนวนไฟฟ้า กำหนดด้วยสภาพการฉนวน เริ่มจากเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าอย่างฉับพลัน ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเกิดสปาร์ก หรือวาวไฟ หรือเบรคความผ่านฉนวน โดยปกติสภาพนำไฟฟ้าอย่างฉับพลันจะมีแนวแคบๆ ตามเส้นทางที่เกิดเบรคความ ถ้าฉนวนนั้นเป็นก๊าซ ฉนวนเปลี่ยนเป็นสภาพนำไฟฟ้าและคงอยู่ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันนั้นสูงพอ ที่ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านฉนวนสูงจนเป็นอาร์ค นั่นก็หมายความว่า การเสียดสภาพการฉนวนของก๊าซนั้นเป็นแบบไม่ถาวร คือ เสียดสภาพการฉนวนชั่วขณะที่มีแรงดันบ่อนอยู่ตรงกันข้ามกับการฉนวนที่เป็นของแข็ง หลังจากเกิดเบรคความแล้ว สภาพการฉนวนจะเสียไปอย่างถาวร ส่วนการฉนวนที่เป็นของเหลว การเสียดสภาพการฉนวนจะกลับคืนสู่สภาพการฉนวนดั้งเดิมหลังจากเบรคความ หรือสปาร์ก ได้ผ่านพ้นไปแล้ว ทำนองเดียวกับการฉนวนที่เป็นก๊าซ

ความคงทนต่อการฉนวนทางไฟฟ้า หมายถึงค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรคความหรือทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพ ซึ่งมีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm คือ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อความหนาแน่นของฉนวน หรือระยะห่างของอิเล็กโตรด ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ คือ เป็นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบวางขนานกัน (plate-to-plate)

ความคงทนของการฉนวนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_0$  ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการ ซึ่งพอจะเขียนเป็นกฎทั่วไปได้ว่า

$E_0 =$  ฟังก์ชัน (ลักษณะสนามไฟฟ้า, ลักษณะสมบัติของฉนวน และเวลา)

-ลักษณะสนามไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโตรด (electrode configurations)

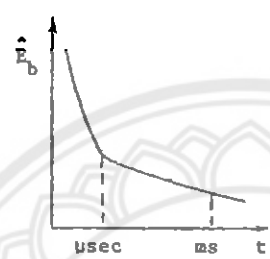
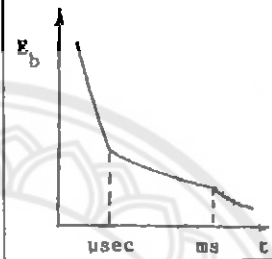
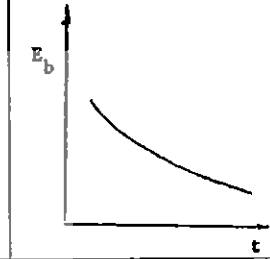
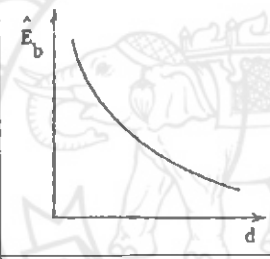
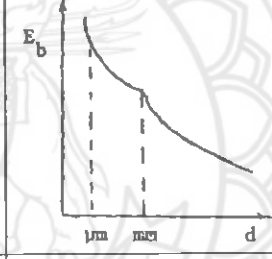
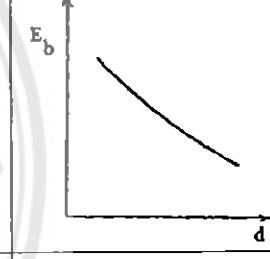
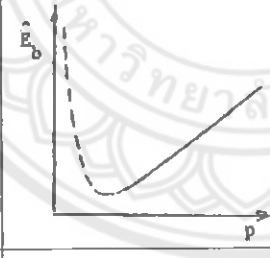
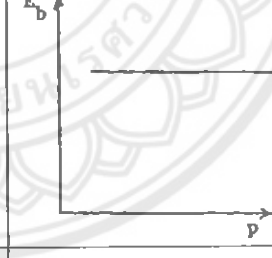
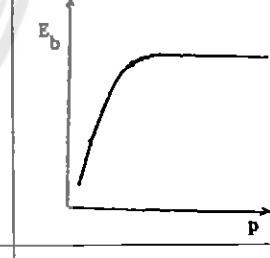
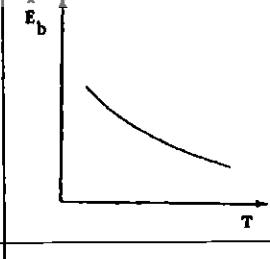
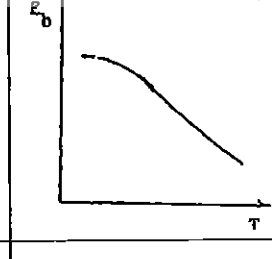
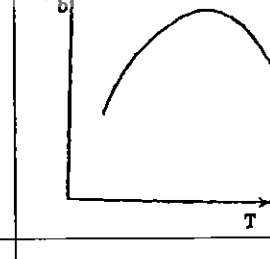
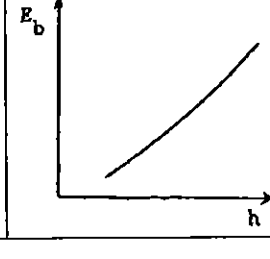
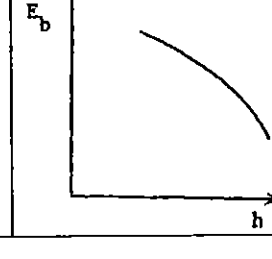
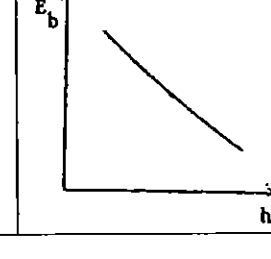
-ลักษณะสมบัติของฉนวน จะหมายถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางกล ทางความร้อน และทางเคมี

-เวลาในที่นี้หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันคงอยู่ที่ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าแก่ฉนวน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ขึ้นอยู่กับรูปแบบรูปคลื่นแรงดันนั่นเอง

### 2.1.5.5 แฟกเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อความคงทนของฉนวน

ความคงทนของฉนวนนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับความเครียดของสนามไฟฟ้าและแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าแล้ว ยังขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ ดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของวัสดุฉนวน ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ

ผลกระทบของ/ ฉนวน	ก๊าซ	ของแข็ง	ของเหลว
รูปคลื่นแรงดัน	ค่ายอด	ค่า rms.	ค่ายอดหรือ rms.
เวลา $t$ ที่ป้อน แรงดัน			
ระยะช่องห่าง $d$			
ความดันอัด $p$			
อุณหภูมิ $T$			
ความชื้น $h$			

## 2.2 การฉนวน [1]

การฉนวนหมายถึง การใช้วัสดุที่เป็นฉนวนมาคั่นระหว่างตัวนำที่มีแรงดันต่างกัน หรือระหว่างตัวนำที่มีแรงดันกับดิน และยังทำหน้าที่รับแรงทางกลช่วยระบายความร้อนการฉนวนซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบ

### 2.2.1 คุณสมบัติของฉนวน

วัสดุที่ดีจะต้องพิจารณาจากคุณสมบัติต่อไปนี้

#### 1. คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี

- มีความทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง เมื่อให้ขนาดเล็กลง ใช้วัสดุน้อย ประหยัด
- มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน
- มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัด
- มีความคงทนต่อการเกิดร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว (tracking) เพื่อป้องกันการกักร่อน หรือ

การเสื่อมสภาพฉนวน

2. คุณสมบัติทางกลของฉนวน จะต้องมีความคงทนต่อแรงดันสูง เนื่องจากในทางปฏิบัติวัสดุฉนวนนอกจากจะต้องทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้ว ยังต้องรองรับน้ำหนัก แรงกดแรงบิด หรือแรงดึง

3. คุณสมบัติทางความร้อนของฉนวน อุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อใช้งานจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งฉนวนที่ดีจะต้องทนความร้อน และจะต้องช่วยระบายความร้อนได้ดีไม่ติดไฟ มีสัมประสิทธิ์ขยายตัว ทางความร้อนต่ำ

4. มีความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น ไม่เป็นพิษแม้จะติดไฟ หรือเพลิงไหม้

5. ทนต่อสภาพแวดล้อม ณ ที่ติดตั้งใช้งาน ทนต่อน้ำมันไม่ดูดซึมความชื้นและทนต่อการแผ่รังสีในบางกรณีของการใช้งาน

### 2.2.2 ชนิดวัสดุฉนวน

การฉนวนที่ใช้ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงแบ่งตามสถานะได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. ฉนวนแข็ง
2. ฉนวนเหลว
3. ฉนวนก๊าซ

#### 2.2.2.1 ฉนวนแข็ง

ในระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า จะต้องใช้ฉนวนแข็งประกอบร่วมกับฉนวน เหลวหรือก๊าซ เพื่อทำหน้าที่ยึดและรองรับแรงทางกล ฉนวนแข็งเมื่อเกิดการเบรกดาวน์หรือเจาะผ่านแล้วจะเสถียรสภาพฉนวนโดยสมบูรณ์และระบายความร้อนได้น้อยกว่าฉนวนเหลว ถ้ามีฟองก๊าซอยู่ในเนื้อฉนวนจะเป็นต้นเหตุให้เกิดดิสชาร์จบางส่วน และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด ฉนวนแข็งที่ใช้

ทั่วไปได้แก่ กระจก กระจกอัด ยาง ไมก้า แก้ว เซรามิก พอร์เลน พลาสติก เมกะไลท์ คาสท์เรซิ่น ไฟเบอร์ โยแก้ว พีวีซี พีอี (PE) หรือครอสลิงค์ (XLPE)

คุณสมบัติที่ต้องการของฉนวนแข็ง

1. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength)
2. เปอร์มิตติวิตี
3. แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าในไดอิเล็กตริก
4. ความคงทนต่อแรงทางกล
5. ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี ความร้อน

#### 2.2.2.2 ฉนวนเหลว

จะมีน้ำหนักและความหนาแน่นมากกว่าก๊าซ มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซ ที่ความดันบรรยากาศเดียวกัน วัดความดันไม่ได้ใช้เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึมและช่วยระบายความร้อนได้ดี เมื่อเกิดการเบรกดาวน์ผ่านจะทำให้เสียสภาพความเป็นฉนวนชั่วคราว เมื่อเวลาผ่านไปก็สามารถกลับสู่สภาพการเป็นฉนวน ได้ดีอีก แต่คุณภาพอาจต่ำลง มีความไวต่อสิ่งเจือปน ตัวอย่างฉนวนเหลวที่ใช้กันก็คือ น้ำมันหม้อแปลง

คุณสมบัติที่ต้องการของฉนวนเหลว

1. ความถ่วงจำเพาะ
2. จุดติดไฟสูง คือมีโอกาสที่จะเกิดเพลิงไหม้น้อย
3. ความหนืดต่ำ หมายถึงระบายความร้อนได้ดี
4. แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่า มีค่าต่ำ

#### 2.2.2.3 ฉนวนก๊าซ

เป็นสารที่ใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อน คุณสมบัติ ก๊าซในแง่ของฉนวนก็คือ สามารถกลับสู่สภาพความเป็นฉนวนได้ดีอย่างรวดเร็วหลังจากเกิดเบรกดาวน์ หรือเสียสภาพการฉนวนชั่วคราว ตัวอย่างก๊าซที่ใช้กันมากในการเป็นฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ได้แก่ อากาศ ใช้เป็นฉนวนภายนอกของอุปกรณ์ ก๊าซในโตรเจนในอุปกรณ์ไฟฟ้า และก๊าซ SF<sub>6</sub> ใช้ในเซอร์กิตเบรกเกอร์ และระบบ GIS

#### 2.2.2.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวกับก๊าซ

เมื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวกับก๊าซในสนามไฟฟ้า จะเห็นว่ามีความแตกต่างกัน คือ

1. ความคงทน ต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ฉนวน การระบายความร้อนจึงอาจช่วยให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นได้ ส่วนกรณีของก๊าซนั้นอาจทำได้โดยเพิ่มความหนาแน่น ก็คือเพิ่มความดันก๊าซ

2. ฉนวนแข็งและฉนวนเหลวจะมีลักษณะสมบัติที่ต่างจากก๊าซอย่างเด่นชัดประการหนึ่งก็คือ อายุหรือความเก่าแก่ (ageing) ซึ่งหมายถึงเมื่อใช้งานไปนานๆ เป็นปีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะลดต่ำลง

3. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็งและฉนวนเหลว เมื่อได้รับแรงดันกระแสดตรงจะมีค่าสูงกว่าเมื่อได้รับแรงดันกระแสสลับ แม้จะคิดเทียบที่ค่าขอดีก็ตาม ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก

4. ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวคิดเป็นค่าอาร์เอ็มเอส แต่ในกรณีของก๊าซจะเกิดเบรกดาวน์ที่ค่าขอดีเสมอ

5. วัดความสามารถใช้เป็นฉนวนของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวกำหนดด้วยพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่และอุณหภูมิ

6. อายุการใช้งานของฉนวนแข็งขึ้นอยู่กับอย่างมากกับคิซซาร์จบางส่วน (PD) ซึ่งเป็นผลเพิ่มพลังสูญเสียและอุณหภูมิเพิ่ม และเป็นผลให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำลง อายุการใช้งานก็จะสั้นลงและนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้

#### 2.2.2.5 การเสีสภาพการฉนวน

ภาระหน้าที่หลักของการกันฉนวนก็คือ เป็นฉนวนทางไฟฟ้า แต่บางกรณีก็ทำหน้าที่รับแรงทางกลและทนต่อความร้อนด้วย การเสีสภาพของการฉนวน หมายถึง ฉนวนนั้นได้รับการเปลี่ยนแปลงจากสภาพการเป็นฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าไม่สามารถรับแรงดันได้ต่อไป ซึ่งการเสีสภาพเนื่องจากทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ได้ หรือเสีสภาพเนื่องจากแรงทางกลหรือความร้อน กระบวนการที่ทำให้เสีสภาพการฉนวนนั้นเกิดขึ้นได้หลายประเภท เช่น

1. การเสีสภาพฉนวนเนื่องจากผลทางไฟฟ้า
2. การเสีสภาพการฉนวนเนื่องจากแรงกล
3. การเสีสภาพการฉนวนเนื่องจากความร้อน
4. การเสีสภาพการฉนวนเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีและสภาพแวดล้อม

### 2.3 การเกิดเบรกดาวน์ [1]

#### 2.3.1 กลไกเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวเชิงการค้า

แม้ว่าได้มีทฤษฎีการค้นคว้าวิจัยเป็นจำนวนมาก เพื่ออธิบายการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว แต่ก็ยังไม่มีทฤษฎีใดที่สามารถอธิบายกระบวนการเกิดเบรกดาวน์ได้แจ่มชัดเหมือนอย่างฉนวนก๊าซ ทั้งนี้เนื่องจากความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการเช่น ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ของฉนวนเหลว ชนิดและปริมาณสิ่งเจือปนของแข็งและก๊าซ ตลอดจนสภาพอิเล็กทรอนิกส์ จึงมีหลายทฤษฎี และแนวความคิดที่อธิบายกลไกเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว ซึ่งอาจแยกออกเป็น 2 แนวทฤษฎีด้วยกัน คือ ทฤษฎีหนึ่ง สมมุติว่าฉนวนเหลวเป็น



เนื้อเดียวกันตลอด และอธิบายการเกิดเบรกดาวนในลักษณะเดียวกันกับกลไกเบรกดาวนในก๊าซ โดยอาศัยการเกิดอะวาลานซ์จากไอออนเซชัน เนื่องจากอิเล็กโตรดเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า การอธิบายทฤษฎีนี้ไม่คำนึงถึงสิ่งเจือปน จึงอธิบายได้ในขอบเขตจำกัด ส่วนอีกทฤษฎีหนึ่งอธิบายการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลวเนื่องจากสิ่งเจือปน เนื่องจากฟองก๊าซ ทฤษฎีนี้คำนึงแต่ผลของสิ่งแปลกปลอมเท่านั้น โดยลืมนำว่าฉนวนเหลวก็เกิดเบรกดาวนได้เหมือนกัน สรุปก็คือยังไม่มีทฤษฎีใดที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ได้ทุกกรณี อย่างไรก็ตามการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลวอาจเนื่องจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. โพรงและฟองก๊าซ ซึ่งมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าฉนวนเหลว จะเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลว

2. สิ่งเจือปนของแข็ง เป็นต้นเหตุให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าในของเหลวเพิ่มสูงขึ้นเฉพาะแห่ง นำไปสู่การเกิดเบรกดาวนส่วนรวม

### 2.3.1.1 เบรกดาวนเนื่องจากโพรงและฟองก๊าซ (cavitation breakdown)

ในฉนวนเหลวอาจมีฟองก๊าซเกิดขึ้นได้เนื่องจากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น มีโพรงก๊าซอยู่ที่ผิวอิเล็กโตรด หรือเนื่องจากแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างกลุ่มประจุ ซึ่งอาจมีค่ามากกว่าแรงดึงผิวที่อิเล็กโตรดหรือเกิดก๊าซจากการแตกตัวของโมเลกุลฉนวนเหลว เนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนหรือไอโรนาคิสซาร์จ ทำให้ฉนวนเหลวระเหยเป็นไอ เมื่อเกิดฟองก๊าซเกิดขึ้นก็ขยายตัวยิดในสนามไฟฟ้า เพื่อลดพลังงานศักย์ในสนามไฟฟ้า สมมติว่าปริมาตรของฟองก๊าซมีค่าคงตัวขณะยิดออก เบรกดาวนจะเกิดขึ้น เมื่อแรงดันตกคร่อมความยาวของฟองก๊าซมีค่าเท่ากับค่าต่ำสุดของเส้นโค้งพาสเชน (Paschen's curve) ของฟองก๊าซนั้น Alston ได้ให้สูตรง่ายๆ สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองก๊าซ  $E_g$  ในฉนวนเหลว ซึ่งมีค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_1$  คือ

$$E_g = \frac{3\epsilon_2 E_0}{2\epsilon_1 + 1} \quad (2.29)$$

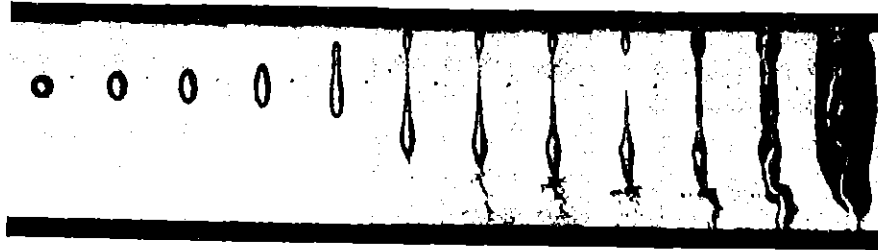
โดยที่  $E_0$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนเหลวเนื่องจากไม่มีฟองก๊าซ

เมื่อ  $E_g$  มีค่าเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของก๊าซนั้น จะเกิดคิสซาร์จผ่านฟองก๊าซ ทำให้เกิดการแตกตัวโมเลกุลของฉนวนเหลว นำไปสู่การเกิดเบรกดาวนทั้งหมด

ถ้าบนอิเล็กโตรดมีจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ฉนวนเหลวอาจเกิดเป็นไอ ณ จุดนั้น คิสซาร์จผ่านฟองไอทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้น และทำให้เกิดเบรกดาวนด้วยเช่นกัน

ในกรณีฉนวนเหลวมีสิ่งเจือปนเป็นหยดลูกกลมของเหลวชนิดอื่นปนอยู่ เช่น หยดน้ำ เบรกดาวนอาจเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่คงรูปของหยดน้ำในสนามไฟฟ้า สมมติว่าหยดน้ำลูกกลมนี้มีค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_2$  จมอยู่ในฉนวนเหลวที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_1$  อยู่ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ

คือ อยู่ระหว่างอิเล็กโตรดแผ่นระนาบขนานกัน เนื่องจากหยดลูกกลมนี้ยึดไม่ได้ ผลของสนามไฟฟ้าจะทำให้หยดลูกกลมนี้ยึดตัวออกตามแนวสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 หยดลูกกลมเหลวเจือปนในฉนวนเหลวซิลิโคน

ความเครียดสนามไฟฟ้าในหยดลูกกลมที่อัดตัวไม่ได้มีปริมาตร คำนวณได้จากสมการ

$$E_2 = \sqrt{\frac{8\pi\alpha\varepsilon_1}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \frac{\beta^{1/3}}{R} \left(2\beta - 1 - \frac{1}{\beta^2}\right)} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ความตึงผิวของฉนวนเหลว

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  คือ เปรอริมิตติวิตีของฉนวนเหลวและของหยดลูกกลมเหลวเจือปนตามลำดับ

$\beta$  คือ อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนแคบของหยดลูกกลม

$R$  คือ รัศมีของหยดเจือปน

และความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าภายในหยดลูกกลม  $E_2$  กับสนามไฟฟ้าภายในฉนวนเหลวที่ปราศจากหยดลูกกลม  $E$  อาจเขียนได้ว่า

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1 E}{\varepsilon_1 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)G} \quad (2.31)$$

$$G = \frac{1}{\beta^2 - 1} \left( \frac{\beta \cosh^{-1} \beta}{(\beta^2 - 1)^{1/2}} - 1 \right) \quad (2.32)$$

ในกรณีฟองก๊าซ สมการความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตในฉนวนเหลว คือ สมการอาจเขียนได้ว่า

$$E_{cr} = 600 \sqrt{\frac{\pi\alpha}{\varepsilon_1 R} \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} - G \right) \left( \frac{3A^3 B}{3\beta(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \right)^{1/2}} \sqrt{\cosh \theta} \quad (2.33)$$

เมื่อ

$$A = \frac{2}{\beta} - 1 - \frac{1}{\beta^2} \quad (2.34)$$

$$B = 2\varepsilon_1\beta^2 - \varepsilon_2(1 - \beta^2) \quad (2.35)$$

$G, R$  เป็นของหยดลูกกลมเหลวคั่งกล้วมาข้างต้น

$$\theta = \frac{1}{3} \cosh^{-1} \left[ \frac{p.R}{\alpha} \sqrt{\frac{27\beta^5 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^3}{2B^2}} \right] \quad (2.36)$$

### 2.3.1.2 เบรกควาน์เนื่องจากสิ่งเจือปนของแข็ง

สิ่งเจือปนของแข็งที่อาจมีอยู่ในฉนวนเหลว เป็นผงฝุ่น หรือในรูปเส้นใย ถ้าสิ่งเจือปนมีค่าเปอร์มิตติวิตีต่างไปจากค่าของฉนวนเหลว และอยู่ในสนามไฟฟ้า  $E$  จะเกิดแรงกระทำบนอนุภาคของแข็งที่มีลักษณะทรงกลมจะเป็น

$$F = \frac{1}{2} r^3 \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \text{grad} E^2 \quad (2.37)$$

เมื่อ  $r$  คือ รัศมีของอนุภาคของแข็ง

$\varepsilon_1$  คือ เปอร์มิตติวิตีของฉนวนเหลว

$\varepsilon_2$  คือ เปอร์มิตติวิตีของอนุภาคของแข็งเจือปน

ถ้า  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$  ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นเช่นนี้ แรงนี้จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ผลนี้จะเห็นได้ชัดเจนมากขึ้น ถ้าหากสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอมากขึ้น แต่ในกรณีฟองก๊าซ  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$  จะมีทิศทางของแรงกระทำในทางตรงกันข้าม คือ เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ ผลของแรงที่เกิดขึ้นจะทำให้อนุภาคของแข็งเรียงตัวต่อกันเป็นลูกโซ่เชื่อม โยงระหว่างอิเล็กโตรด ทำให้เกิดเบรกควาน์ขึ้นได้

แรงที่กระทำบนอนุภาคเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า  $\varepsilon_2$  ฉะนั้น ถ้าอนุภาคนั้นเป็นตัวนำ  $\varepsilon_2 \rightarrow \text{infinity}$  แรงกระทำบนอนุภาคจะเป็น  $F_{\text{infinity}} = r^3/2 \text{ grad } E_2$  และอนุภาคตัวนำทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉพาะที่มีค่าสูง ถ้าความเครียดสนามไฟฟ้านี้สูงกว่าค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลว ก็จะทำให้เกิดสปาร์กใกล้ๆอนุภาค เกิดฟองก๊าซขึ้น และนำไปสู่การเกิดเบรกควาน์ในฉนวนเหลวในที่สุด

ฉนวนเคลือบเชิงการค้ำมักจะมีโครงสร้างซับซ้อนและสิ่งเจือปนผสมอยู่ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหล่านี้ขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปน สิ่งเจือปนอาจเป็นผงฝุ่น เศษชิ้นของแข็งเล็กๆ ที่จะใช้ฉนวนเคลือบความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่า 100 kV/cm ต่อเนื่องกันตลอดเวลา จะใช้ฉนวนเคลือบร่วมกับฉนวนแข็งเป็นผนังกัน เพื่อไม่ให้ของแข็งเจือปนเรียงตัวต่อกัน จะช่วยให้มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูงถึง 1000 kV/cm และผลดีที่ใช้ของเคลือบร่วมกับของแข็ง ก็คือ ฉนวนเคลือบจะซึมเข้าไปแทนที่รูพรุนเป็นการขจัดฟองอากาศด้วย ความชื้นเป็นสิ่งหนึ่งที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเคลือบ โดยเฉพาะที่เป็นน้ำมันฉนวนเก่าสกปรก เช่น น้ำมันที่ดูดซึมความชื้นไว้ 0.005% จะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าน้ำมันแห้งและสะอาดถึง 30% ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ เช่น ที่อุณหภูมิ 20 °C มี  $\epsilon_r = 4.5$  จะเพิ่มขึ้นเป็น 20 ที่ อุณหภูมิ 90 °C ฉนวนเคลือบอาจจะละลายฉนวนแข็งและวัสดุที่ใช้เป็นชั้นส่วนปิดผนึก จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียที่โคอีเล็กทริกเพิ่มมากขึ้น หากเกิดคิสซาร์จบางส่วนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี อาจเป็นพิษและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ อย่างไรก็ตามสิ่งสกปรกและสิ่งเจือปนของฉนวนเคลือบนี้ อาจกรองให้สะอาดใหม่ได้ และค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น

### 2.3.2 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเคลือบวัสดุ

การศึกษาหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเคลือบ จะหาจากแรงดันคงตัวและแรงดันอิมพัลส์โดยใช้อิเล็กโตรดที่มีผิวเรียบสะอาด เป็นรูปส่วนโค้งทรงกลม ในทางปฏิบัติจะพบว่า การที่จะทำให้ผิวอิเล็กโตรดเรียบและสะอาดอยู่เสมอ นั้น ทำได้ยาก เพราะการเกิดเบรกดาวน์จะทำให้ผิวอิเล็กโตรดเสียหาย รวมทั้งฉนวนเคลือบด้วย ปัญหานี้ อาจแก้ได้ ถ้าใช้แรงดันคงตัว เช่น แรงดันกระแสตรง หรือแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ จะต้องใช้อิเล็กโตรดชนิดสวิตซ์ทำหน้าที่เบี่ยงเบนพลังงานคิสซาร์จมิให้ผ่านอิเล็กโตรด ให้ช่วงเวลาสั้นที่สุด คือ  $< 1\mu s$  เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดแก่อิเล็กโตรดให้น้อยที่สุด จำนวนครั้งที่วัดเบรกดาวน์ไม่ควรมากนัก คือ ไม่ควรให้มีเขม่าเกาะหรือเกิดรอยขรุขระที่ผิวอิเล็กโตรด ถึงจะใช้วิธีการประเมินอย่างไร ผลที่ได้ก็ยังคงจะจัดกระจายถึง 5-10%

ถ้าหากความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเคลือบด้วยแรงดันอิมพัลส์ (ช่วงเวลาของแรงดันเป็นไมโครวินาที) ผลที่ได้ก็จะยิ่งกระจายกระจายมากยิ่งขึ้น เพราะขึ้นอยู่กับเรื่องของเวลา ถ้าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ เช่นเดียวกับกรณีการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ และยังขึ้นอยู่กับวิธีการทดลองอีกด้วย

ตัวอย่างความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเคลือบวัสดุต่างๆ ดังแสดงในตาราง ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้านี้ ใช้ได้กับของเหลวที่มีส่วนประกอบของก๊าซเจือปนน้อยกว่าชนิดจำกัด ถ้ามีก๊าซเจือปนมากพอ จะทำให้ค่าความคงทนลดน้อยลง โดยเฉพาะมีก๊าซออกซิเจนปนอยู่

### 2.3.3 ระยะแกปมีผลต่อแรงดันเบรกดาวน

แฟกเตอร์อีกประการหนึ่งที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลว ก็คือ ระยะแกป กระบวนการเกิดเบรกดาวนทั้งหลายที่กล่าวแล้วข้างต้นนั้น กล่าวถึงแต่เพียงความคงทนสูงสุด มิได้รวมผลของระยะแกป ค่าแรงดันเบรกดาวนในฉนวนเหลว อาจเขียนแทนด้วยสมการ 3

$$U_b = kd^n \quad (2.38)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าคงตัว

$d$  คือ ระยะแกป

$n$  คือ ค่าคงตัวปกติน้อยกว่า 1

ดังตัวอย่างผลการทดลองเบรกดาวนของน้ำมันหม้อแปลงเชิงการค้าดังนี้

ตารางที่ 2.2 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวบริสุทธิ์

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

### ตัวอย่างผลการทดลองเบรกดาว์ของน้ำมันหม้อแปลงเชิงการค้า

ระยะแกป mm	4	6	10	12
แรงดันเบรกดาว์ kV	90	140	210	250

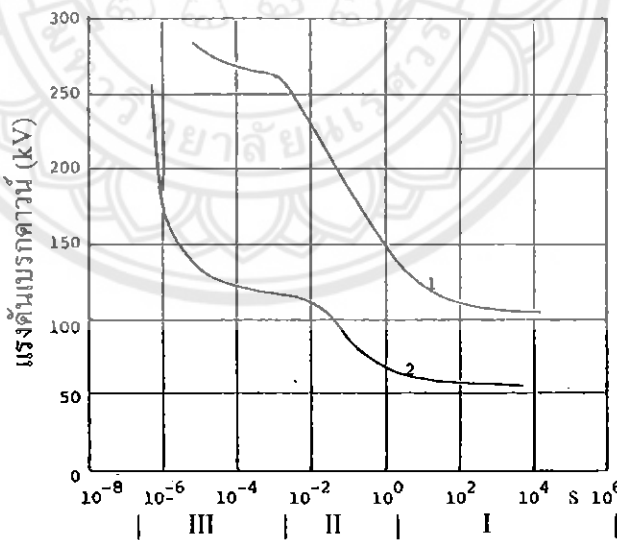
จากข้อมูลการทดลองเหล่านี้และสมการ จะได้ค่า  $k = 24.5$  และ  $n = 0.947$  จึงอาจเขียนค่าแรงดันเบรกดาว์ของน้ำมันหม้อแปลงในเชิงการค้าแต่ใหม่สะอาดได้ว่า

$$U_b = 24.5d^{0.947} \text{ kV}$$

เมื่อ  $d$  มีหน่วยเป็น mm

### 2.3.4 รูปคลื่นแรงดันมีผลต่อแรงดันเบรกดาว์

ค่าแรงดันเบรกดาว์ของฉนวนเหลวจึ้นอยู่กับรูปคลื่นแรงดันที่ป้อน และช่วงเวลาของการป้อน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวจึ้นอยู่กับความถี่คสนามไฟฟ้าที่ยังคงมีอยู่ ค่าความคงทนของฉนวนเหลวต่อแรงดันคงตัว (DC, AC) จะมีค่าต่ำกว่าค่าของแรงดันอิมพัลส์ ดังในรูป เรืองนี้อาจอธิบายด้วยหลักการของเวลาล้าช้าของการเกิดเบรกดาว์



รูปที่ 2.7 เส้นกราฟแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

- 1 : ระยะแกป 25 มม.    ย่าน    I : แรงดันเบรกดาว์ระยะยาว
- 2 : ระยะแกป 6 มม.        II : แรงดันเบรกดาว์เพิ่มขึ้น
- III : แรงดันเบรกดาว์อิมพัลส์

2.4 การสร้างแรงดันสูงกระแสสลับความถี่ต่ำ [1]

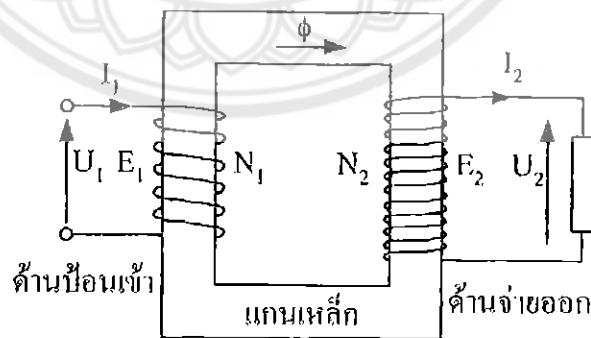
แรงดันสูงกระแสสลับความถี่ต่ำอาจได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือการแปลงแรงดันให้สูงขึ้นด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า

2.4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โยฟิงขดลวดหุ้มฉนวนลงไปในร่องแกนเหล็ก การฉนวนดังกล่าวนี้ไม่เหมาะกับการสร้างแรงดันสูงๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ขดลวดสเตเตอร์จะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงทำให้เกิดฉนวนรั่วตามผิวได้ง่าย การเพิ่มความหนาของฉนวนเพื่อความคงทนต่อแรงดันมีขีดจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียในฉนวน ฉนวนเหล่านี้ใช้ไม่ได้ ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามหลักการจะสามารถสร้างแรงดันได้สูงเพียง 30-35 kV เท่านั้น โดยทั่วไปที่โรงงานไฟฟ้าจะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกำลังไฟฟ้าที่แรงดัน 10-20 kV แล้วแปลงแรงดันที่ใช้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้สูงขึ้น โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า

2.4.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับถ่ายเทกำลังไฟฟ้าจากแรงดันระดับหนึ่งไปยังแรงดันอีกระดับหนึ่ง อาจสูงขึ้นหรือต่ำลง หรือแรงดันอาจเท่าเดิมก็ได้ เช่น หม้อแปลงขดลวดแยก (isolating transformer) หลักการทำงานของหม้อแปลงจะอาศัยการเหนี่ยวนำของขดลวด ที่อยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่วนประกอบสำคัญของหม้อแปลง ประกอบด้วย แกนเหล็ก เป็นทางเดินเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก และมีขดลวดสองชุด ชุดหนึ่งเป็นด้านป้อนแรงดันเข้า อีกชุดหนึ่งเป็นด้านจ่ายแรงดันออก พันอยู่บนแกนเหล็ก นอกจากแกนเหล็กและขดลวดแล้ว ก็มีฉนวนซึ่งถือเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทุกชนิด



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบหม้อแปลงไฟฟ้า

- $\phi$  = ฟลักซ์ไฟฟ้า  $I_1$  = กระแสด้านป้อนเข้า  $E_1$  = แรงดันเหนี่ยวนำด้านป้อนเข้า
- $N_1$  = จำนวนรอบขดลวดด้านป้อนเข้า  $E_2$  = แรงดันเหนี่ยวนำด้านจ่ายออก
- $N_2$  = จำนวนรอบขดลวดด้านจ่ายออก  $U_2$  = แรงดันที่จ่ายออก
- $U_1$  = แรงดันที่ป้อนเข้า  $I_2$  = กระแสด้านจ่ายออก

10753788  
 2/5.  
 05691  
 2552

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวด เป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law)

$$e(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.39)$$

เมื่อป้อนแรงดันแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ให้กับขดลวดทางด้านป้อนกำลังไฟฟ้าเข้า จะทำให้เกิดฟลักซ์ แม่เหล็กเป็นรูปคลื่นไซน์ด้วย

$$\phi(t) = \hat{\phi} \sin \omega t \quad (2.40)$$

ฉะนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดอีกชุดหนึ่งด้านจ่ายกำลังไฟฟ้าออกเปลี่ยนไปตามเวลา คือ

$$e(t) = -N\omega\hat{\phi} \cos \omega t \quad (2.41)$$

จะเห็นว่าแรงดันเหนี่ยวนำ  $e(t)$  จะล้าหลังเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก เป็นมุมทางไฟฟ้า  $90^\circ$  แรงดันเหนี่ยวนำค่า r.m.s คือ

$$E = \frac{2}{\sqrt{2}} \pi f N \hat{\phi} \quad (2.42)$$

$$E = 4.44 f N \hat{\phi} \quad (2.43)$$

โดยที่  $\hat{\phi} = \bar{B}A$

ถ้าความหนาแน่นเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  เป็นเกาส์ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก  $A$  เป็น  $\text{cm}^2$  ความถี่แรงดัน  $f$  เป็น Hz จะได้แรงดันเหนี่ยวนำเป็น โวลต์ ดังนี้

$$E = 4.44 f N \bar{B} A \times 10^{-8} \text{ V} \quad (2.44)$$

สมมุติว่าเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก 15 กิโลเกาส์ จะได้แรงดันเหนี่ยวนำต่อรอบของขดลวดที่ 50 Hz เป็น

$$\frac{E}{N} = \sqrt{2 \times 4.44 f \bar{B} A \times 10^{-8}} \quad (2.45)$$



$$\frac{E}{N} = 0.0474 \quad \text{A} \quad (2.46)$$

ในพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก  $1 \text{ cm}^2$  จะได้แรงดันเหนี่ยวนำต่อรอบขดลวด  $0.0471 \text{ V}$  ถ้าหม้อแปลงตัวใหญ่ใช้พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กโตขึ้น เช่น  $1 \text{ ตารางเมตร (} 10^4 \text{ cm}^2)$  จะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำต่อรอบขดลวด  $471 \text{ V}$  ด้วยเหตุนี้การฉนวนระหว่างขดลวดรอบติดกันจึงไม่ต้องสูงมากนัก

### 2.4.3 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

หม้อแปลงที่ใช้ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังแรงสูง ส่วนใหญ่จะเป็นหม้อแปลง 3 เฟส ในกรณีแรงดันระบบสูงมาก เช่น ในระบบ EHV หรือ UHV จะใช้หม้อแปลงเฟสเดียว 3 ตัว มาต่อรวมเข้าด้วยกันเป็น 3 เฟส หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังปกติแกนเหล็กจะต่อลงดิน ขดลวดแรงต่ำจะพันติดอยู่กับแกนเหล็ก ส่วนขดลวดแรงสูงจะพันอยู่รอบนอก คือ จะอยู่ห่างจากแกนเหล็กขดลวดแรงต่ำทั้งนี้เพื่อวัตถุประสงค์ในการฉนวน

การฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ที่ใช้กันส่วนมากในปัจจุบันนี้ เป็นฉนวนผสมระหว่างน้ำมันหม้อแปลงกับกระดาษอัด การฉนวนดังกล่าวมีวัตถุประสงค์หลักอยู่ 3 ประการ คือ

1. เพื่อเป็นการฉนวนทางไฟฟ้าระหว่างรอบขดลวด และระหว่างชั้นขดลวด
2. รับแรงกลจากน้ำหนัก โครงสร้าง และแรงกล ไดนามิกส์ที่เกิดจากการลัดวงจร
3. เป็นตัวระบายความร้อน

มิติของหม้อแปลงกำหนดด้วยส่วนประกอบ โครงสร้างหลัก คือ ขดลวด แกนเหล็ก และฉนวน การฉนวนคิดจากแรงดันเต็มทีของขดลวดแรงสูงคั่นจากแกนเหล็ก ขดลวดแรงต่ำ ตัวถังและปลอกฉนวนตัวนำ (bushing) ปริมาตรการฉนวนจะเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนประมาณ  $U^3$  เมื่อ  $U$  คือแรงดันของขดลวดแรงสูง

### 2.4.4 หม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบเป็นหม้อแปลงที่ใช้สร้างแรงดันสูงสำหรับทดสอบวัสดุฉนวน หรืออุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ในระบบส่งจ่ายแรงสูง เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวกับแรงสูง อุปกรณ์วัดแรงดันและกระแสที่ระดับแรงดันสูงๆ วิจัยปัญหาความเปราะเปื้อนบนลูกถ้วยฉนวน หากคุณสมบัติของลูกถ้วยที่สภาวะบรรยากาศต่างๆ วัสดุสารฉนวนบางส่วนในวัสดุฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลว และฉนวนแข็ง หรือผสมกัน แรงดันของหม้อแปลงทดสอบสามารถปรับแรงดันได้ตั้งแต่ค่าต่ำๆขึ้นไปจนถึงค่าที่ต้องการ

หม้อแปลงทดสอบมักจะเป็นเฟสเดียว มีกำลังไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แต่มีแรงดันสูง แรงดันทางด้านจ่ายออกปรับ โดยปรับแรงดันทางด้านที่ป้อนเข้า ด้วยหม้อแปลงปรับแรงดัน (regulator) หม้อแปลงทดสอบจะกำหนดด้วย

1. แรงดันที่ป้อนเข้าและแรงดันที่จ่ายออก

2. กระแสที่ป้อนเข้าและจ่ายออก
3. กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลง
4. แรงดันลัดวงจร (short circuit voltage) เมื่อเกิดวาบไฟตามผิว หรือเบรกดาวน์ที่วัสดุ

ทดสอบ

5. ระดับแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (corona inception level)
6. ความถี่ (อยู่ในย่านความถี่พลังงาน)

ลักษณะการฉนวนและโครงสร้าง โดยทั่วไปเป็นแบบกระดาษและน้ำมัน หรือก๊าซ SF<sub>6</sub> อัดความดัน ถ้าแรงดันสูงไม่มากนักก็อาจจะเป็นสารสังเคราะห์ เช่น อีพ็อกซี่ หรือ คาสท์เรซิน เป็นต้น

#### 2.4.4.1 ขนาดแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

การกำหนดแรงดันของหม้อแปลงทดสอบ ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบสูงสุดที่มีโอกาสที่จะใช้ อย่างน้อยที่สุดจะต้องสูงกว่าค่าแรงดันคงทนอยู่ได้ของวัสดุทดสอบ ที่ใช้กับระบบแรงดันที่กำหนดให้ ในกรณีที่ต้องการทดสอบให้เกิดวาบไฟตามผิว เกิดเบรกดาวน์หรือเจาะทะลุผ่าน แรงดันที่ใช้ทดสอบจะต้องสูงมากขึ้น ให้เพียงพอให้เกิดปรากฏการณ์นั้นและเมื่อคำนึงถึงประสิทธิภาพ และอายุการใช้งาน แรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบควรจะสูงกว่าแรงดันทดสอบประมาณ 10 ถึง 20%

ทางด้านแรงดันป้อนเข้าของหม้อแปลงทดสอบด้านแรงดันต่ำ ควรเลือกกำหนดตามระบบแรงดันที่มีให้ เช่น 220 หรือ 380 หรือ 500V ในกรณีที่หม้อแปลงทดสอบมีกำลังสูงๆเช่น 500kVA ขึ้นไปแรงดันป้อนเข้าอาจสูงถึง 2000 หรือ 3000V

รูปคลื่นแรงดันทดสอบกระแสลับที่เปลี่ยนไปตามเวลา  $U(t)$  อาจจะแตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ ฉะนั้นลักษณะของแรงดันทดสอบอาจอธิบายด้วยค่ายอด และค่า r.m.s ซึ่งหาได้จาก

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} \quad (2.47)$$

เมื่อ  $T$  คือ เวลาช่วงคาบของแรงดัน

รูปคลื่นแรงดันที่อาจแตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ไม่เกิน 5% ของค่ายอดรูปคลื่น

พื้นฐาน

#### 2.4.4.2 กระแสกำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

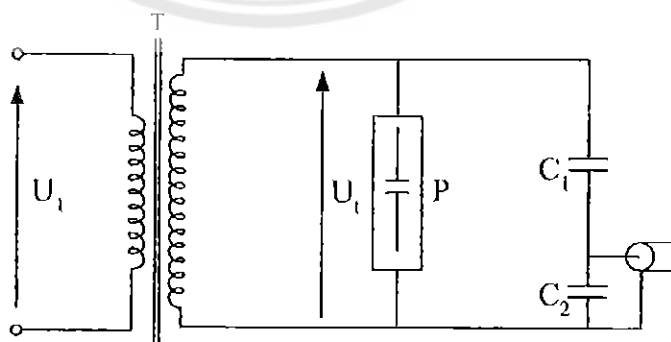
กระแสที่กำหนดหม้อแปลงทดสอบ ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ทดสอบ กล่าวคือ วัสดุทดสอบบางชนิดให้กระแสมาก บางชนิดให้กระแสน้อย ฉะนั้นหม้อแปลงทดสอบจะต้องสามารถจ่ายกระแสให้กับวัตถุทดสอบได้ ตัวอย่างกระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบดังแสดงในตารางที่

ตารางที่ 2.3 กระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบความคงทนแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำ

วัตถุทดสอบ	กระแสที่ต้องการทดสอบ
ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า (insulators) ปลอกฉนวนตัวนำ (bushing) หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับมิเตอร์ (CT,PT) เซอร์กิตเบรกเกอร์ (CB)	0.1 ถึง 0.5 A
หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ตัวเก็บประจุ (capacitor)	0.5 ถึง 1 A
เคเบิล	1 A หรือมากกว่า

2.4.4.3 ขนาดกำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุหรืออุปกรณ์ จะต้องทดสอบโดยการติดตั้งให้เหมือนหรือใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริง แรงดันควรเป็นรูปคลื่นไซน์ อุปกรณ์หรือวัสดุฉนวนทั้งหลายในด้านไฟฟ้าแรงสูง อาจถือได้ว่ามีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า คือ มีค่าเก็บประจุ ฉะนั้น โหลดหม้อแปลงทดสอบจึงเป็นแบบตัวเก็บประจุ กระแสจึงเป็นแบบเก็บประจุ (capacitive current) หากการฉนวนไม่ดีพอ ทนต่อแรงดันไม่ได้ก็จะเกิดการเบรกควาน์ สปร้าก เงาะทะเล ลัดวงจร กระแสลัดวงจรจะต้องสูงมากพอ เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นข้อบกพร่องของการฉนวนได้ชัดเจน แต่กระแสลัดวงจรจะต้องไม่สูงมากเกินไป เพราะจะทำให้เกิดการระเบิดได้ ฉะนั้น กำลังของหม้อแปลงและกำลังไฟฟ้าลัดวงจรต้องให้สอดคล้องกัน กำลังของหม้อแปลงอาจหาได้จากวงจรดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรทดสอบแรงดันกระแสสลับ

T = หม้อแปลงทดสอบ

P = วัสดุทดสอบ

$C_1, C_2$  = โวเดจดีไวเซอร์

ความจุทางไฟฟ้าหรือค่าเก็บประจุที่เป็นโหลดของหม้อแปลง ประกอบด้วยความจุทางไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ อุปกรณ์วัด และสายต่อ รวมทั้งค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ (stray capacitance) ดังในรูปที่ ๓ นั้นกำลังไฟฟ้าที่จะต้องใช้ในการทดสอบอาจคำนวณได้จากสมการ

$$S_r = \omega C U_r^2$$

$$= 2\pi f C U_r^2 \times 10^{-9} \text{ kVA} \quad (2.48)$$

โดยที่  $C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวม เป็น pF

$U_r$  คือ แรงดันทดสอบ เป็น  $kV_{rms}$

$f$  คือ ความถี่ของแรงดัน เป็น Hz

กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ ควรจะต้องมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่จะต้องป้อนให้กับ โหลด คือ ควรจะต้องคำนึงถึงเฟกเตอร์ปลอดภัย (safety factor) ด้วย เพื่อให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงทดสอบใช้ได้ยาวนานๆ ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบอาจประมาณได้จากตารางที่ 2.4

นอกจากนี้ ถ้ามีความจุไฟฟ้าอื่นที่ต่ออยู่ในวงจรทางด้านแรงสูง ก็ถือเป็นโหลดของหม้อแปลงทดสอบ ต้องนำมาคิดรวมด้วย เช่น ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว หรือคัปปลิง (coupling) ที่ใช้ในกรณีวัดคิซซาร์จบางส่วน ปกติมีค่า 1000 pF ตัวเก็บประจุของอุปกรณ์วัดแรงดัน โหลดของหม้อแปลงที่เป็นโอห้มความต้านทานก็มี เช่น การทดสอบสภาพเปราะเปื้อน (pollution test) จะมีกระแสไฟฟ้ากำลังไหลช่วงสั้น เพียง 2-3 วินาที

ตารางที่ 2.4 ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า

วัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า	ค่าความจุไฟฟ้า(pF)
-ลูกถ้วยฉนวนธรรมดา	10...00
-ปลอกฉนวนตัวนำ	150...400
-หม้อแปลงกระแส	200...600
-เคเบิลแรงสูง (ต่อความยาว 1 เมตร)	150...300
-หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 1MVA	ประมาณ 1,000
100 MVA	ประมาณ 10,000
-อุปกรณ์วัดแรงดัน (voltage divider)	50...500
-สายต่อวงจรแรงสูง (ต่อเมตร)	5...15

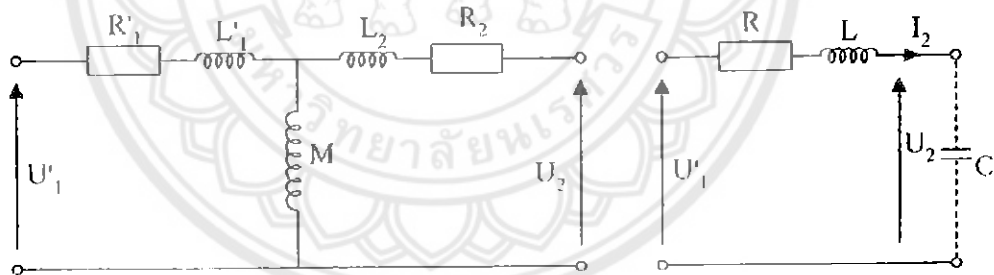
ในกรณีที่ไม่วางค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ การกำหนดขนาดกำลังของหม้อแปลงทดสอบ อาจคำนวณได้จากผลคูณของแรงดันของหม้อแปลงทดสอบ กับกระแสทดสอบสูงสุด ตามตารางที่

การกำหนดกำลังของหม้อแปลงทดสอบ นอกจากกำหนดค่าแรงดัน และกระแสสูงสุดแล้ว ยังต้องคำนึงถึงช่วงเวลาทดสอบด้วย แรงดันทดสอบกระแสสลับความถี่ต่ำ อาจะทดสอบนาน 1 นาที (withstand voltage test) หรือหลายนาที เป็นชั่วโมง หรือเป็นวันก็ได้ เช่น การทดสอบต่อเนื่องตามมาตรฐาน VDE จะทดสอบด้วยแรงดัน  $1.3 U_n$  เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เมื่อ  $U_n$  คือ แรงดันที่กำหนดตัววัสดุทดสอบ

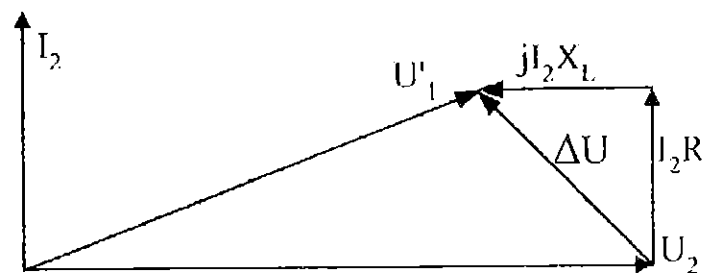
#### 2.4.4.4 กำลังและแรงดันไฟฟ้าลัดวงจร (short circuit power and short circuit voltage)

กำลังไฟฟ้าลัดวงจรของหม้อแปลงทดสอบ จะไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันทางป้อนกำลังเข้า (primary) จะขึ้นอยู่กับแรงดันลัดวงจรของหม้อแปลงทดสอบ ทำให้มีค่าต่างๆ ได้ยาก เพราะต้องลงทุนสูงในการขจัดฟลักซ์รั่ว (leakage flux) ของขดลวด อย่างไรก็ตาม แรงดันลัดวงจรไม่ควรสูงมากเกินไป ทั้งนี้เพื่อมิให้กำลังไฟฟ้าลัดวงจรสูงเกินไป และป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายจากแรงดันและการเกิดรีโซแนนซ์

แรงดันเกินของหม้อแปลงทดสอบ เมื่อโหลดเป็นความจุไฟฟ้า อาจอธิบายด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ 2.10 และ ไดอะแกรมรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของหม้อแปลงเมื่อไม่คิดกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมโหลดเป็นความจุไฟฟ้า

ในรูป ปกติ  $R \ll X_L$  ฉะนั้น  $U_1'$  และ  $U_2$  จะมีเฟสเกือบเท่ากัน

$$U_2 = \frac{U_1'}{1 - \omega^2 LC} \quad (2.49)$$

จะเห็นได้ว่า  $U_2 > U_1'$  เพราะว่า  $(1 - \omega^2 LC)$  มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าแรงดันด้านจ่ายออกจะมีค่าสูงกว่าที่คำนวณจาก  $U_1 = aU_2$  เมื่อ  $a$  คือ อัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดของหม้อแปลง (turn ratio) จัดเป็นแรงดันเกินเนื่องจากค่าความจุทางไฟฟ้าในวงจรทางด้านจ่ายกำลังออก

เมื่อเกิดวาทไฟตามคิว หรือลัดวงจรวัสดุทดสอบ แรงดันทางด้านจ่ายออกของหม้อแปลงทดสอบจะเหลือเพียงแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง คือ  $Z = R + jX_L$  จากโคอะแกรมแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์

$$\Delta U = \sqrt{(I_2 R)^2 + (I_2 X_L)^2} \quad (2.50)$$

นั่นคือ

$$\frac{\Delta U}{U_{2n}} = \frac{S_2}{S_{2n}} \varepsilon_{sc} \quad (2.51)$$

ฉะนั้นเมื่อหม้อแปลงทำงานที่โหลดเต็มที่

ค่าแรงดันลัดวงจร หรือแรงดันอิมพีแดนซ์  $\varepsilon_{sc}$  มักจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าประมาณเท่ากับ รีแอกแตนซ์ และไม่ควรมากเกิน 30% ฉะนั้นในกรณีหม้อแปลงทดสอบต่อกันแบบขั้นบันได (cascade connection) หม้อแปลงแต่ละตัวควรออกแบบให้  $\varepsilon_{sc}$  มีค่าต่ำพอ เพื่อว่าเมื่อต่อขั้นบันไดแล้ว  $\varepsilon_{sc}$  จะไม่เกิน 30% เช่น ใช้หม้อแปลง 3 ตัว แต่ละตัวจะมี  $\varepsilon_{sc}$  ประมาณ 5% ถ้าใช้หม้อแปลง 4 ตัว  $\varepsilon_{sc}$  แต่ละตัวควรมีค่าประมาณ 3.5%

การจำกัด  $\varepsilon_{sc}$  ให้ต่ำลงเป็นข้อดี เพราะหม้อแปลงจะไม่เกิดอันตรายอันเนื่องจากแรงระเบิดไดนามิกส์ เมื่อเกิดลัดวงจร

เมื่อกำหนดกระแสที่กำหนด  $I_n$  และค่าแรงดันลัดวงจร  $\varepsilon_{sc}$  ให้ จะสามารถคำนวณกระแสลัดวงจร  $I_{sc}$  ที่แรงดันที่กำหนด  $U_n$  ได้

ซึ่งจะเป็นตัวที่ชี้บอกถึงขนาดแรงระเบิดออกที่เกิดขึ้นแก่ขดลวด และกำลังไฟฟ้าที่ลัดวงจร คือ

$$S_{sc} = \frac{S_n}{\varepsilon_{sc}} \times 100 \quad (2.52)$$

เมื่อ  $S_n$  คือกำลังไฟฟ้าที่กำหนด ถ้า  $S_{sc}$  ยิ่งสูงมากขึ้น แสดงว่าหม้อแปลง ยิ่งสามารถใช้เกินกำลังได้มากขึ้น ดังตัวอย่างในตารางที่ 2-5

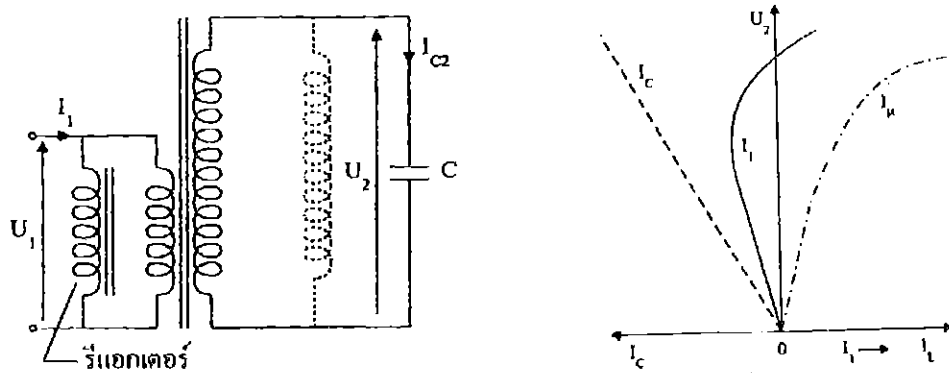
ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างค่าที่กำหนด และกระแสลัดวงจรของหม้อแปลงทดสอบเมื่อ  $\epsilon_{sc} = 25\%$

แรงดันที่กำหนด $U_n$ (kV)	กำลังที่กำหนด $S_n$ (kVA)	กระแสที่กำหนด $I_n$ (A)	กระแสลัดวงจร $I_{sc}$ (A)
1000	1000	1.0	4
500	250	0.5	2
250	500	2.0	8
100	20	0.2	0.8

#### 2.4.4.5 กำลังไฟฟ้าป้อนให้หม้อแปลงทดสอบ

การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของแรงดันทดสอบทางด้านแรงดันสูง ทำให้โดยการปรับแรงดันที่ป้อนให้กับแรงดันทดสอบ การปรับแรงดันดังกล่าวจะต้องปรับได้อย่างต่อเนื่อง คือ ไม่เป็นขั้น จึงจำเป็นต้องใช้หม้อปรับแรงดัน หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวป้อนแรงดันให้กับหม้อแปลงทดสอบ กำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงทดสอบจ่ายให้กับโหลดแบบความจุไฟฟ้า หรือความเหนี่ยวนำ เมื่อป้อนกระแสสร้างเส้นฟลักซ์แม่เหล็กเข้าไปเต็มที่ แรงดันที่จ่ายออกจากหม้อแปลงปรับแรงดันที่จะป้อนให้กับหม้อแปลงทดสอบ อาจจะมีฮาร์โมนิกปนอยู่ อาจจะเป็นผลให้แรงดันจ่ายออกของหม้อแปลงทดสอบเพี้ยนจากรูปคลื่นไซน์ ปัญหานี้อาจแก้ได้โดยใช้อุปกรณ์กรองเพื่อจัดฮาร์โมนิกมิให้เข้าไปในหม้อแปลงทดสอบ

โดยเหตุที่โหลดของหม้อแปลงทดสอบส่วนมากเป็นแบบทดสอบส่วนมากเป็นแบบความจุไฟฟ้า นั่นคือ กระแสจะนำหน้าแรงดัน ถ้าโหลดมีค่าความจุไฟฟ้าสูง จะทำให้หม้อแปลงทดสอบไม่สามารถสร้างแรงดันให้ถึงค่าที่กำหนดได้ เพราะกระแสโหลดสูงเกินค่าที่กำหนด ปัญหานี้แก้ได้โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งกินกระแสล่าหลังแรงดันเป็นตัวชดเชย คือ เป็นการแก้แฟกเตอร์กำลัง โดยการต่อรีแอคเตอร์เหนี่ยวนำขนานเข้ากับขดลวดทางป้อนเข้า หรือขนานเข้ากับขดลวดจ่ายออกของหม้อแปลงทดสอบ ถ้ามีชดเชยให้พอเหมาะ ก็จะทำให้หม้อแปลงทดสอบสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าออกได้เต็มพิกัด ที่แรงดันและกระแสที่กำหนดดังในรูป 2.12 การชดเชยด้วยรีแอคเตอร์เหนี่ยวนำด้านป้อนเข้า ซึ่งเป็นแรงดันต่ำ จะประหยัดและง่ายกว่า



รูปที่ 2.12 กระแสที่ป้อนเข้าหม้อแปลงทดสอบ

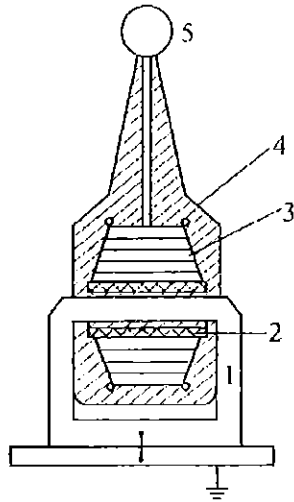
#### 2.4.4.6 โครงสร้างและฉนวนหม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบโดยทั่วไปเป็นเฟสเดียว ประกอบด้วย 2 ขด คือ ขดป้อนแรงดันเข้า (ด้านแรงดันต่ำ) และขดจ่ายแรงดันออก (ด้านแรงดันสูง) ขดลวดทั้งสองจะพันอยู่บนแกนเหล็ก ดังที่กล่าวแล้ว ปัญหาสำคัญของหม้อแปลงทดสอบที่เหนือไปจากหม้อแปลงธรรมดา คือ การฉนวนต้านแรงดันไม่เกิน 100 kV การฉนวนอาจเป็นแบบแห้ง หรือหุ้มขดลวดและแกนเหล็กด้วยสารสังเคราะห์ได้ เช่น อีพ็อกซี ดังรูปที่ 2.13 หม้อแปลงที่มีแรงดันสูงขึ้น ขดลวดแต่ละขดลวดจะจุ่มอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ที่บรรจุอยู่ในถังโลหะหรือถังฉนวน ถ้าใช้ถังเหล็กจะมีข้อดีในเรื่องการระบายความร้อน แต่ต้องใช้ปลอกฉนวนตัวนำแรงสูง นั่นคือ เหมาะสมสำหรับหม้อแปลงที่ต้องใช้กระแสทดสอบ กำลังไฟฟ้าสูงๆ ถ้าตัวถังเป็นฉนวน เช่น เบกคาไลต์ หรืออีพ็อกซีเสริมใยแก้ว ไม่ต้องใช้ปลอกฉนวนตัวนำ การระบายความร้อนได้น้อยกว่าแบบถังโลหะ แต่อาจสร้างตัวระบายความร้อน (radiator) ช่วยได้ ความร้อนดังกล่าวเกิดขึ้น เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก และในขดลวด ความร้อนนี้แผ่กระจายออกผ่านน้ำมันที่สัมผัสกับขดลวดและแกนเหล็ก ถ้าความร้อนกระจายออกไปได้ไม่สะดวก ก็จะทำให้ขดลวดและแกนเหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิโดยรอบ แต่อุณหภูมิที่ยอมรับให้เพิ่มขึ้นนี้มีขีดจำกัดด้วยวัสดุฉนวนที่ใช้ตามมาตรฐานสากล IEC และมาตรฐาน VDE ยอมรับให้อุณหภูมิมีค่าสูงต่อเนื่องกันไม่เกิน 105 °C เมื่อน้ำมันหม้อแปลง และกระดาษเป็นวัสดุฉนวน

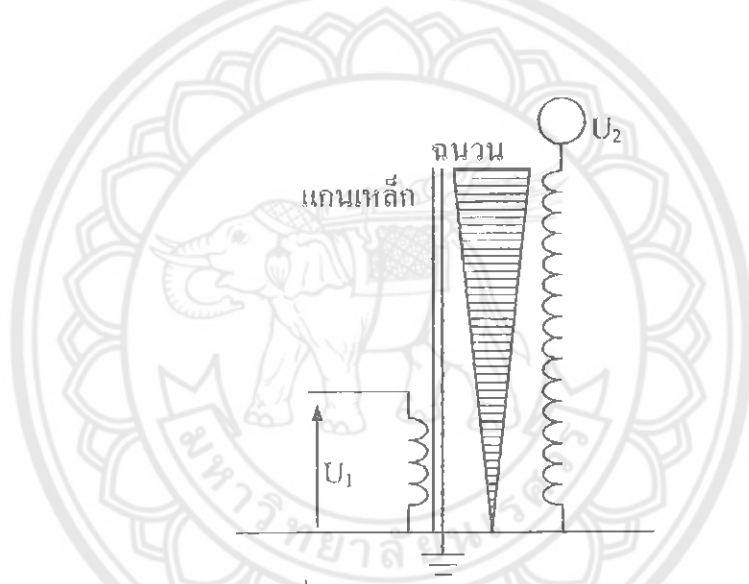
##### 1) แบบหุ้มด้วยฉนวนแข็ง

แบบนี้แกนเหล็กจะต่อลงดิน ขดลวดแรงต่ำจะพันติดกับแกนเหล็ก แรงดันของขดลวดแรงต่ำจะอยู่ระหว่าง 100 V – 2000 V ขดลวดแรงสูงจะพันทับขดลวดแรงต่ำอีกต่อหนึ่ง นั่นคือ ขดลวดแรงสูงจะอยู่ห่างแกนเหล็ก ขดลวดรอบที่มีแรงดันสูงจะอยู่ห่างแกนเหล็กหรือส่วนที่ต่อลงดินมากขึ้นการฉนวนจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันดังรูป 2.14





รูปที่ 2.13 หม้อแปลงทดสอบแบบฉนวนแห้ง



รูปที่ 2.14 การฉนวนในหม้อแปลง

- 1 : แกนเหล็ก
- 2 : ขดลวดแรงต่ำ
- 3 : ขดลวดแรงสูง
- 4 : ฉนวนแข็ง
- 5 : ปลายขั้วแรงสูง

2) แบบจุ่มน้ำมัน

หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน ขดลวด แกนเหล็ก และส่วนประกอบทั้งหมดจะจุ่มอยู่ในน้ำมัน ซึ่งบรรจุอยู่ในถังโลหะ หรือถังฉนวน ในกรณีที่ใช้ถังโลหะ จำเป็นต้องใช้ปลอกฉนวนตัวนำ นำเอาสายแรงสูงออกมาจนถึง และปลอกฉนวนตัวนำจะต้องเป็นแบบเก็บประจุ ถ้าใช้ตัวถังเป็นฉนวน จะไม่ต้องใช้ปลอกฉนวนตัวนำ ดังรูปที่ 2.15

การใช้หม้อแปลงแบบถังโลหะจะมีข้อดีในเรื่องระบายความร้อน แต่ต้องการที่ว่างมากกว่า เพราะมีปกกฉนวนตัวนำ ถ้าเป็นแบบตัวถังฉนวนไม่ต้องใช้ปกกฉนวนตัวนำ แต่การถ่ายเทความร้อนยากกว่า ฉะนั้นการออกข้อกำหนดจึงต้องพิจารณาหลักการใช้งาน

#### 2.4.4.7 การต่อขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงทดสอบ

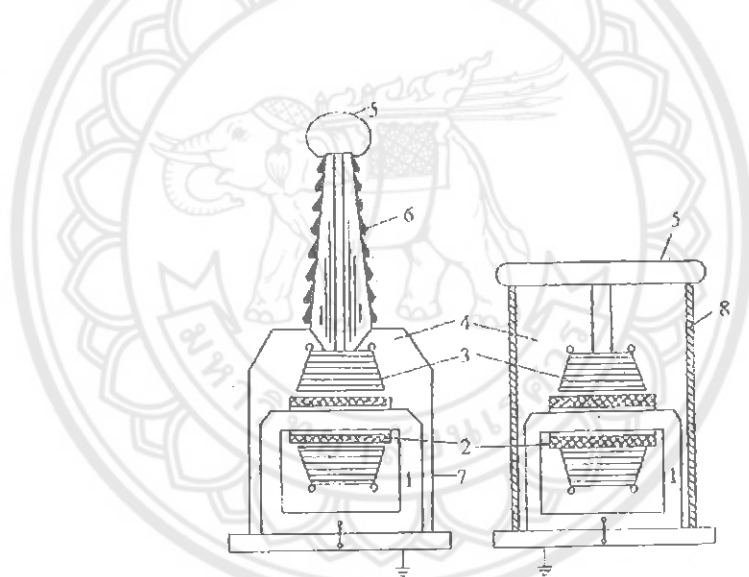
หม้อแปลงที่ใช้สร้างแรงดันสูง อาจแบ่งตามลักษณะตามขดลวดและแกนเหล็กได้เป็น 2 แบบ [4] คือ

- แบบธรรมดา

- แบบสมมาตร

##### 1) หม้อแปลงแบบธรรมดา แกนเหล็กต่อลงดิน

ในกรณีหม้อแปลงทดสอบมีแรงดันสูงที่กำหนดไม่เกิน 500 kV โดยทั่วไปจะเป็นหม้อแปลงทดสอบขดลวดแรงสูงชุดเดียวแบบธรรมดา โดยปลายข้างหนึ่งของขดลวดแรงดันสูงจะต่อลงดินร่วมกับแกนเหล็ก ดังในรูปที่ 2.15



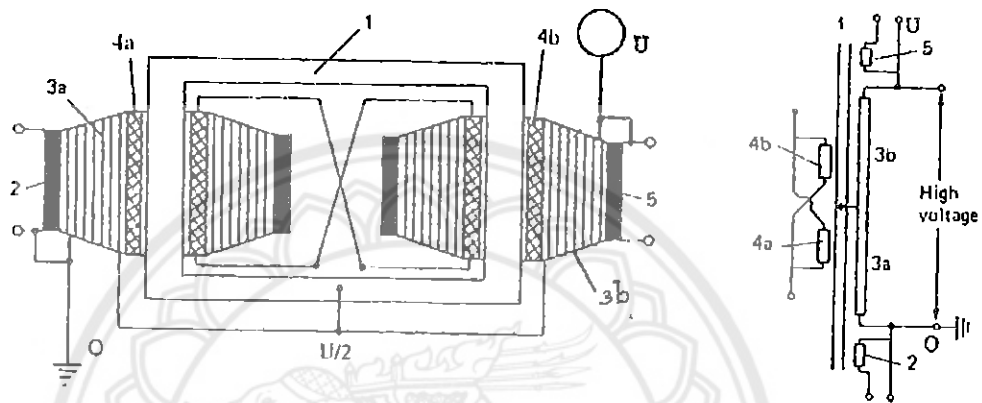
รูปที่ 2.15 โครงสร้างหม้อแปลงทดสอบ แกนเหล็กต่อลงดินแบบจุ่มน้ำมัน

- |                 |                           |
|-----------------|---------------------------|
| 1 : แกนเหล็ก    | 5 : ปลายขั้วแรงสูง        |
| 2 : ขดลวดแรงต่ำ | 6 : ปลอกตัวนำแบบเก็บประจุ |
| 3 : ขดลวดแรงสูง | 7 : ถังโลหะ               |
| 4 : ฉนวนแข็ง    | 8 : ถังฉนวน               |

##### 2) หม้อแปลงแบบสมมาตร

หม้อแปลงแบบสมมาตร มีขดลวดแบ่งออกเป็น 2 ชุดเท่าๆกัน แต่ละชุดจะมีทั้งขดลวดแรงสูงและแรงต่ำพันอยู่บนแกนเหล็กขาคือว ต่างชุดพันอยู่บนต่างขา กัน จัดวางขดลวดให้สมมาตร

กัน ขดลวดแรงสูงทั้งสองชุดจะต่อกันแบบอันดับ จุดที่ขดลวดแรงสูงต่อกันนั้นจะต่อเข้ากับแกนเหล็ก นั่นคือ แกนเหล็กจะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงสูงรวมทั้งหมด ดังรูปที่ 2.16 การทำเช่นนี้จะช่วยประหยัดการฉนวนได้มาก ถ้าเป็นแบบแช่น้ำมันในถังเหล็ก ถังเหล็กก็จะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับแกนเหล็ก จึงต้องใช้ปลอกฉนวนตัวนำ 2 อัน เพื่อนำเอาปลายสายแรงสูงออกไปทั้งสองด้าน ปลอกฉนวนตัวนำทั้งสองนี้ แต่ละอันจะต้องทนแรงดันครึ่งหนึ่งของแรงดันหม้อแปลงที่กำหนดไว้ โดยที่ถังเหล็กมีศักย์เท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันสูง ถังเหล็กจึงต้องตั้งอยู่บนฉนวนรองรับ



รูปที่ 2.16 โครงสร้างและวงจรการต่อภายในหม้อแปลงทดสอบแบบสมมาตร

1. แกนเหล็ก
2. ขดลวดแรงดันต่ำ
3. ขดลวดแรงสูง
4. ขดลวดเทอเชียรี
5. ขดลวดสร้างฟลักซ์แม่เหล็ก

หม้อแปลงทดสอบแบบสมมาตรนี้ ขดลวดป้อนแรงดันเข้าไปจะไม่อยู่ติดกับแกนเหล็ก แต่จะพันอยู่กับขดลวดแรงดันสูงอีกทีหนึ่ง หนึ่งเพื่อให้เส้นฟลักซ์แม่เหล็กรั่ว (leakage flux) มีน้อยลง และให้  $\epsilon_{sc}$  แรงดันวิกฤตจรมีค่าต่ำ จึงใช้ขดลวดเทอเชียรี (tertiary winding) พันไว้บนขาทั้งสองข้างของแกนเหล็กและยังทำให้เส้นฟลักซ์แม่เหล็กในแกนทั้งสองด้านสมดุลกันด้วย โดยที่ทั้งสองด้านเหมือนกัน ฉะนั้นจะป้อนแรงดันเข้าทางใดก็ได้ เมื่อป้อนเข้าทางใด ปลายขดลวดแรงสูงด้านนั้นก็จะต่อลงดิน ส่วนอีกด้านหนึ่งจะเป็นแรงสูง การต่อหม้อแปลงแบบสมมาตร ทำให้หม้อแปลงสามารถสร้างแรงดันได้เป็นสองเท่า ที่ปลายแรงดันสูงนี้มีขดลวดสร้างฟลักซ์แม่เหล็ก (exciting winding) จะมีศักย์ไฟฟ้าเต็มเท่ากับแรงดันสูง มีไว้เพื่อจะใช้เป็นขดลวดป้อนแรงดันต่อให้กับหม้อแปลงตัวต่อไป ในกรณีเป็นการต่อแบบขั้นบันได

หม้อแปลงแบบสมมาตร อาจจะเป็นแบบที่ใช้ถังเหล็กหรือถังฉนวน ขึ้นอยู่กับงานที่ใช้ การต่อแบบสมมาตรด้วยขดลวดสองชั้นนี้ ทำให้สามารถสร้างแรงดันได้สูงถึง 800 kV ข้อสังเกต

แรงดันวาทตามไฟควิแห้ง  $U_b$  ของปลอกฉนวนตัวนำ ควรต่ำกว่าแรงดันทนอยู่ได้  $U_w$  (withstand voltage) ของขดลวด นั้นคือ

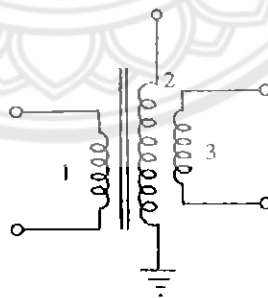
$$U_b = (1.2 \dots 1.3) U_s \quad (2.53)$$

$$U_w = (1.1 \dots 1.2) 1.3 U_s \quad (2.54)$$

เมื่อ  $U_s$  คือ แรงดันใช้งานของระบบ

#### 2.4.4.8 หม้อแปลงต่อแบบขั้นบันได

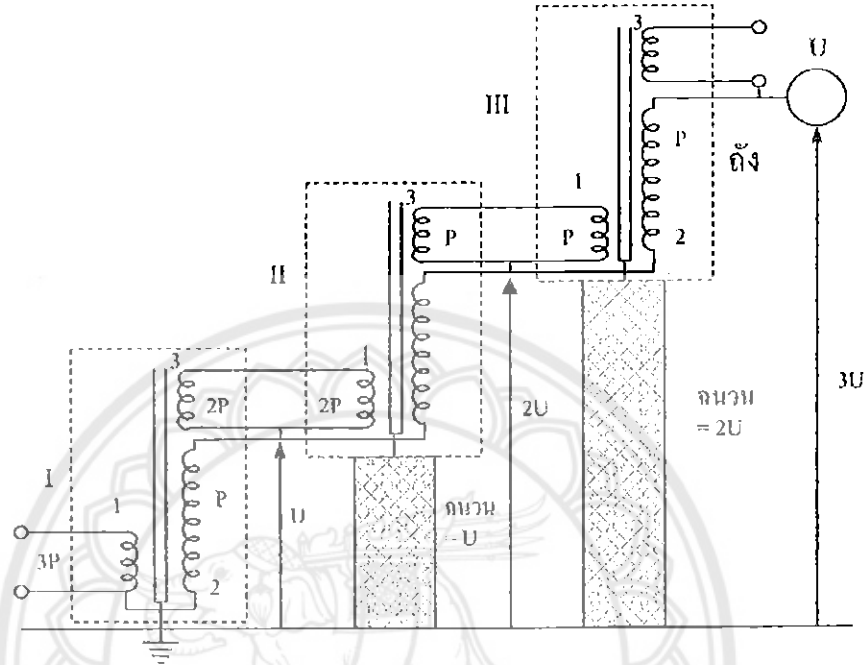
ในกรณีที่ต้องการแรงดันสูงกว่า 500 – 600 kV ขึ้นไป มักจะใช้หม้อแปลงหลายๆตัวมาต่อเสริมกัน เรียกว่า ต่อแบบขั้นบันได การต่อแบบขั้นบันไดจะต้องใช้หม้อแปลงแบบที่มีขดลวด 3 ขด ดังรูป 2.17 ประกอบด้วยขดลวดแรงต่ำ หรือขดลวดสร้างฟลักซ์แม่เหล็ก ขดลวดแรงสูงและขดลวดคาบเกี่ยว (coupling winding) ซึ่งทำหน้าที่ป้อนแรงดันให้กับขดลวดสร้างเส้นฟลักซ์แม่เหล็กตัวถัดไป โดยขดลวดนี้จะต่ออยู่กับปลายขดลวดแรงสูงของตัวก่อน ดังรูปที่ 2.17 ปัญหาการต่อแบบขั้นบันไดก็คือ ขดลวดสร้างเส้นฟลักซ์แม่เหล็กของหม้อแปลงตัวแรก จะต้องจ่ายกระแสให้กับหม้อแปลงตัวต่อไปด้วย ฉะนั้นถ้ามีการต่อขั้นบันไดหลายๆขั้น หม้อแปลงตัวแรกก็จำเป็นต้องมีกำลังใหญ่กว่าตัวที่มาต่อเพิ่มขึ้นต่อไป ถ้าใช้หม้อแปลงที่มีกำลังเท่ากันมาต่อขั้นบันได กำลังไฟฟ้าจ่ายออกที่แรงดันสูงกำหนดจะน้อยกว่าผลรวมกำลังของแต่ละตัว นั่นคือ หม้อแปลงสามารถจ่ายกระแสได้น้อยกว่าที่กำหนด เช่น หม้อแปลงทดสอบ 400 kV 400 kVA 1 A 3 ตัวมาต่อขั้นบันได จะได้แรงดันรวมที่กำหนด 1200 kV แต่จะเหลือกำลังเพียง 900 kVA และกระแส 0.75 A เป็นต้น



รูปที่ 2.17 ขดลวดหม้อแปลงสำหรับต่อขั้นบันได

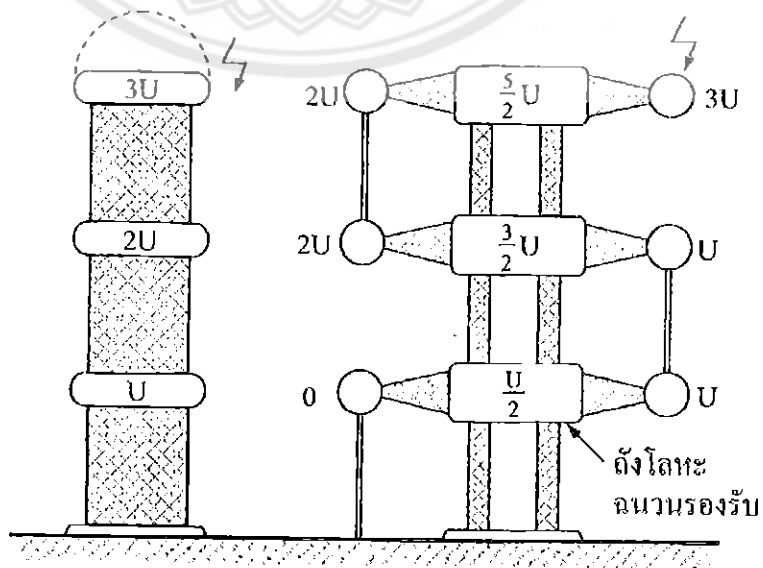
- 1 : ขดลวดแรงต่ำ หรือ ขดลวดสร้างฟลักซ์แม่เหล็ก (low voltage or exciting)
- 2 : ขดลวดแรงสูง (high voltage winding)
- 3 : ขดลวดคาบเกี่ยว (coupling winding)

การฉนวนหม้อแปลงเมื่อต่อชั้นบันได 3 ชั้น ดังรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงตัวที่ 2 ซึ่งได้รับแรงดันสร้างเส้นฟลักซ์แม่เหล็กผ่านทางขดลวดต่อคาบเกี่ยวนั้น มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับแรงสูงของตัวแรก ฉะนั้นหม้อแปลงตัวที่ 2 นี้จะต้องได้รับการฉนวน หรือตั้งอยู่บนฉนวนรองรับเท่ากับแรงดันสูงของตัวแรก ดังในรูปที่ 2.18

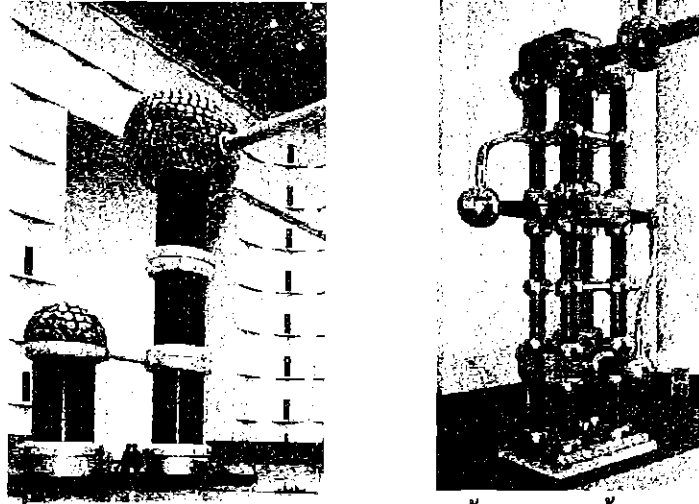


รูปที่ 2.18 ไคอะแกรมการต่อหม้อแปลงทดสอบแบบชั้นบันได

ในกรณีที่เป็นแบบตั้งฉนวนจะใช้วิธีวางซ้อนกันโดยตรง ดังรูปที่ 2.19 ถ้าเป็นแบบสมมาตรวางซ้อนกัน แต่ต้องกันหรือรองรับด้วยเสาฉนวน ดังรูปที่ 2.19 และภาพถ่ายในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 ไคอะแกรมการต่อหม้อแปลงแบบชั้นบันได



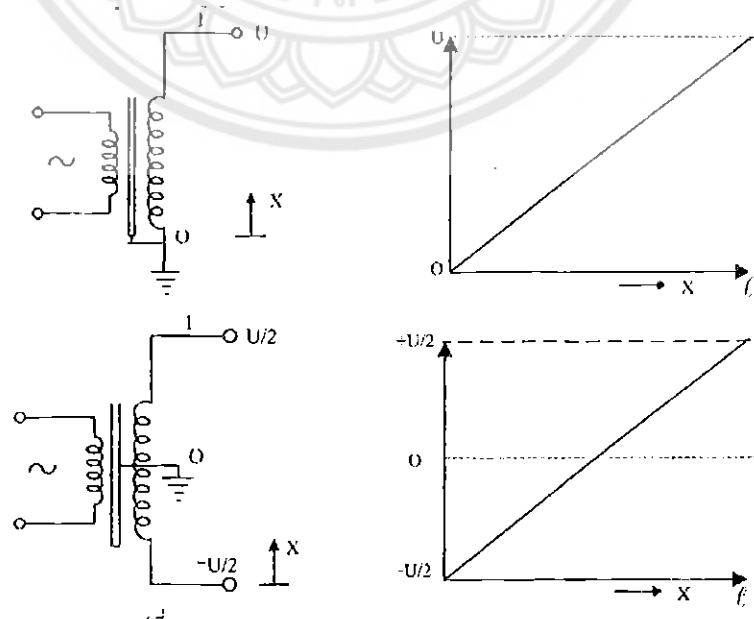
รูปที่ 2.20 ภาพถ่ายหม้อแปลงแบบชั้นบันได 3 ชั้น

ข้อดีของการต่อแบบชั้นบันได คือ การฉนวนของหม้อแปลงทดสอบแต่ละตัวจะประหยัดกว่าหม้อแปลงแต่ละตัวเคลื่อนย้ายสะดวก ถ้ามี 3 ตัวเหมือนกัน สามารถต่อเป็น 3 เฟสได้ นำมาต่อกันแบบขนานกันได้ ซึ่งจะทำให้กระแสสูงขึ้น

ข้อเสียของการต่อแบบชั้นบันได คือ สเตรย์ฟลักซ์สูง ค่าแรงดันลัดวงจรจะมีค่าสูงขึ้น จะมากกว่า 3 เท่าของผลรวมแต่ละตัว

#### 2.4.4.9 แรงดันกระจายของขดลวด

หม้อแปลงในภาวะคงตัว (steady state) แรงดันบนขดลวดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของขดลวด ดังในรูปที่ 2.21



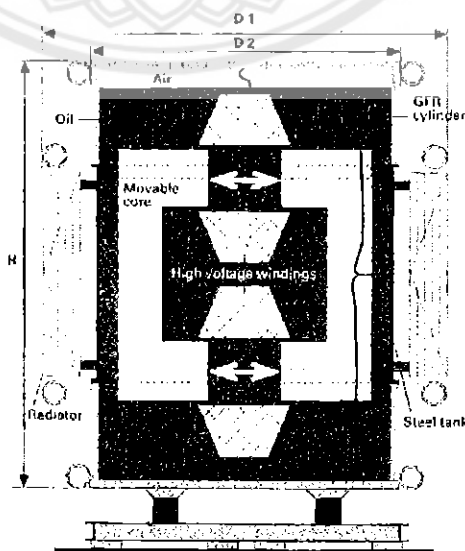
รูปที่ 2.21 แรงดันกระจายของขดลวดหม้อแปลงในภาวะคงตัว

ในภาวะทรานเซียนต์หรือแรงดันอิมพัลส์ การกระจายของแรงดันบนขดลวดหม้อแปลง จะไม่สม่ำเสมอตามแนวความยาวขดลวด เนื่องจากผลของค่าเก็บประจุไฟฟ้าสแตตริคของขดลวด จะทำให้การฉนวนของขดลวดรอบต้นทาง หรือใกล้ขั้วแรงสูงมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่ารอบที่อยู่ห่างขั้วแรงสูงออกไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันอิมพัลส์ที่มีความชันสูง อันเนื่องมาจากคลื่นจร (traveling wave) จากฟ้าผ่า หรือ เกิดคลื่นตัด (chopped wave) จากการทดสอบ ซึ่งเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาคำนึงถึงในการออกแบบจัดวางขดลวด

ในกรณีหม้อแปลงทดสอบปกติจะไม่มีโอกาสได้รับแรงดันอิมพัลส์จากคลื่นจรฟ้าผ่า หรือจากแรงดันเสิร์จสวิตซ์ แต่อาจจะเกิดขึ้นได้ในกรณีทดสอบแรงดันผสมระหว่างแรงดัน กระแสสลับ ซ้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์ หรือ ทดสอบการเกิดเบรคความถี่ในก๊าซ การออกแบบฉนวน หม้อแปลงทดสอบต้องทำให้ดีเป็นพิเศษ

#### 2.4.5 วงจรรีโซแนนซ์สร้างแรงดันสูง

การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกติฟ ในกรณีที่วัสดุทดสอบเป็นประเภทที่มีค่าเก็บประจุไฟฟ้า สูงด้วยตัวรีแอกเตอร์เหนี่ยวนำดังกล่าวข้างต้น อาจนำมาใช้ในการสร้างแรงดันสูงเป็นแรงดัน ทดสอบ โดยอาศัยหลักการของวงจรอนุกรมรีโซแนนซ์ ที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุของวัสดุหรือ อุปกรณ์ทดสอบ เช่น สายเคเบิลที่มีความยาวมาก หรือตัวเก็บประจุแรงสูง จะต่อกับอนุกรมความ เหนี่ยวนำที่สามารถปรับค่าได้ เพื่อให้เกิดวงจรรีโซแนนซ์ที่มีความถี่พลังงานที่ป้อน เช่น 50 Hz การ เปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำของตัวรีแอกเตอร์ในช่วงกว้างนี้ อาจจะปรับได้ถึง 20 เท่า โดยการปรับช่อง แกนเหล็กของรีแอกเตอร์ ดังในรูปที่ 2.22 ซึ่งช่วยสามารถจูนวงจร ที่มีค่าเก็บประจุของวัสดุ ทดสอบขนาดต่างๆแปรได้ในช่วงกว้าง (ซึ่งรวมถึง โวลเตจดีไวเตอร์ และค่าเก็บประจุสแตตริคของ วงจรทดสอบ)



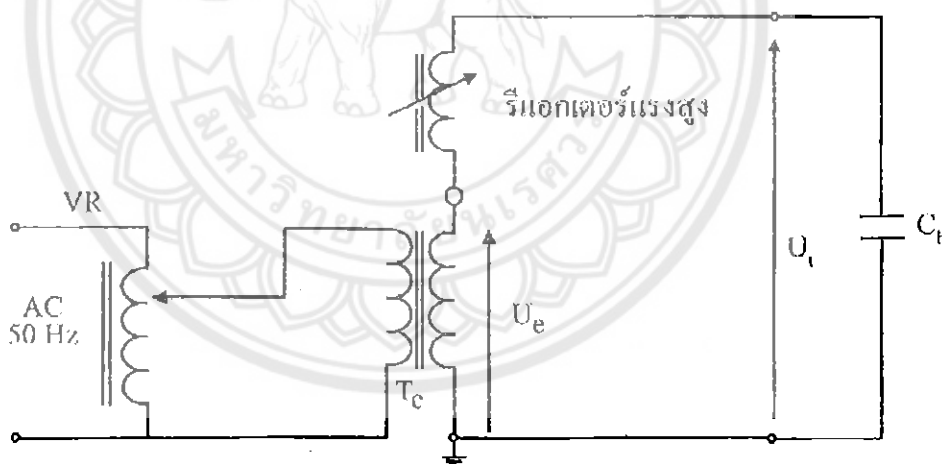
รูปที่ 2.22 ลักษณะ โครงสร้างของรีแอกเตอร์แรงสูง

กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรรีโซแนนซ์ จะได้จากหม้อแปลงทดสอบแรงสูง โดยต่อป้อนให้กับวงจร ดังรูปที่ 2.23 กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าต้องการเพียงค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรเท่านั้น โดยประมาณ 5% ของค่ากำลังไฟฟ้าในวงจรทดสอบ หม้อแปลงตัวง่ายจะกำหนดพิกัดด้วยค่ากระแสของกระแสของตัวรีแอกเตอร์เหนี่ยวนำ

ในการทดสอบ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวรีแอกเตอร์เหนี่ยวนำจะตั้งไว้ให้เหมาะ หรือจูนกับเก็บประจุของโหลด เพื่อให้ได้วงจรรีโซแนนซ์ที่ความถี่กำลังไฟฟ้าที่ป้อน คุณภาพของวงจรรีโซแนนซ์ อธิบายด้วยค่าแฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor)  $Q$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าวัดต่อกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ หรืออัตราส่วนของแรงดันสูงจ่ายออก ต่อแรงดันป้อน ดังรูปที่ 2.23 นั่นคือ

$$Q = \frac{P_i}{P_e} = \frac{U_i}{U_e} \quad (2.55)$$

ถ้าวัสดุทดสอบเป็นประเภทที่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำ เช่น GIS ค่า  $Q$  จะมีค่าในช่วง 50-100 ในกรณีของการทดสอบเคเบิลตัวอย่าง เป็นการทดสอบเฉพาะแบบ ซึ่งใช้หัวสายเคเบิล ค่า  $Q$  อาจต่ำลงมาถึง 10 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของสายเคเบิล



รูปที่ 2.23 วงจรรีโซแนนซ์อนุกรมสร้างแรงสูง

VR : ตัวปรับแรงดันป้อน,  $T_c$  : หม้อแปลงตัวง่าย,  $C_b$  : ค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบ

ข้อดีของการใช้วงจรรีโซแนนซ์สร้างแรงดันสูงทดสอบมีหลายประการคือ

1. ในทางปฏิบัติวงจรรีโซแนนซ์สามารถสร้างแรงดันสูงได้ 20-50 เท่าของแรงดันที่ป้อน
2. กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรทดสอบมีค่าต่ำเท่ากับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรทดสอบ



3. ถ้าเกิดควาไฟฟ้าตามผิว หรือเบรกคาวานที่วัสดุทดสอบ แรงดันสูงจะยุบตัวทันที และแยกออกไปจากวงจรรีโซแนนซ์ ค่ากระแสแลคคิวจจะจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของรีแอคเตอร์เหนี่ยวนำด้านแรงสูง ซึ่งปกติจะน้อยกว่า 2% ของค่ากระแสพิคก[7]

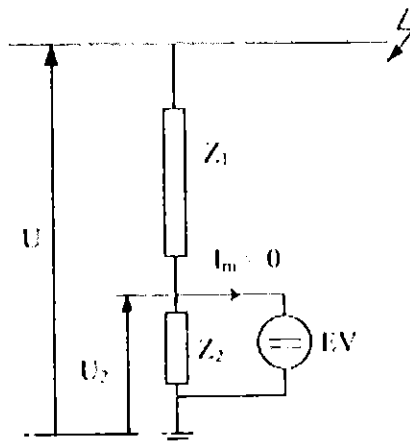
4. รีแอคเตอร์แรงสูงอาจต่อขนานหรือต่ออนุกรมกันได้ง่ายๆ จำนวนรีแอคเตอร์ต่ออนุกรมกันได้ไม่มีปัญหาในเรื่องอิมพีแดนซ์ต่อชั้นบันได แรงดันก็จะสามารถควบคุมอิมพีแดนซ์ของรีแอคเตอร์ของแต่ละตัวได้ ตัวอย่างการต่ออนุกรมรีโซแนนซ์ โดยวางซ้อนกันดังรูป 2.24 แสดงชุดทดสอบแรงสูงวงจรรีโซแนนซ์ขนาด 1050 kV



รูปที่ 2.24 ชุดทดสอบวงจรรีโซแนนซ์ ขนาด 1050 kV

## 2.5 เทคนิคการวัดแรงดันสูง

โวลเตจดิไวเดอร์เป็นอุปกรณ์วัดแรงดัน ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงๆ ออกเป็นส่วนแรงดันต่ำพอที่จะใช้โวลต์มิเตอร์ หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำๆ วัดได้ โดยใช้อิมพีแดนซ์แรงสูง  $Z_1$  ต่อเข้ากับแรงดันที่จะวัด แล้วแบ่งเอาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แต่เพียงส่วนน้อยออกมาวัด ฉะนั้นโวลเตจดิไวเดอร์จึงแบ่งออกเป็นภาคแรงสูง  $Z_1$  และภาคแรงต่ำ  $Z_2$  ปลายข้างหนึ่งของภาคแรงสูงที่จะวัด ส่วนอีกข้างหนึ่งจะต่ออยู่กับปลายหนึ่งของภาคแรงต่ำ ซึ่งอีกข้างหนึ่งของภาคแรงต่ำจะต่อกับดิน ตรงรอยต่อระหว่างภาคแรงสูงกับภาคแรงต่ำนี้เอง จะเป็นจุดที่ต่อ ออกมาเข้าเครื่องวัดแรงต่ำ โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องมือวัดแรงต่ำนี้เองที่จะต่อเข้ากับดิไวเดอร์นี้ จะต้องเป็นเครื่องวัดที่ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยที่สุด ก็จะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเข้าสูงมากๆ เช่น โวลต์มิเตอร์แบบไฟฟ้าสถิต EV คือ อิมพีแดนซ์เครื่องวัดจะต้องไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนอิมพีแดนซ์ของดิไวเดอร์ รูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 โวลต์เตจดีไวเคอร์

โดย  $U$  คือ แรงดันสูงที่ต้องการวัด

$U_2$  คือ แรงดันคร่อมอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ

เมื่อวัด  $U_2$  ด้วยเครื่องวัดแรงต่ำได้แล้ว จึงคำนวณค่าแรงดันสูงที่ต้องการวัดได้คือ

$$U = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} U_2 \tag{2.56}$$

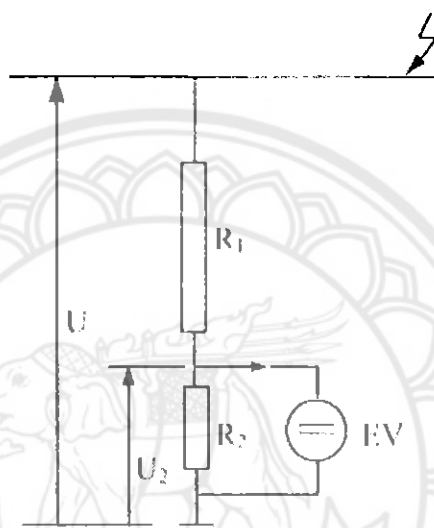
การวัดแรงดันสูงด้วยโวลต์เตจดีไวเคอร์ ความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์เนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะหมดไป เมื่ออิมพีแดนซ์  $Z_1$  และ  $Z_2$  เป็นวัสดุหรือสารประเภทเดียวกัน ความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไป เมื่อความถี่เปลี่ยน ความเที่ยงตรงของเครื่องวัด ปัญหาที่ทำให้ผลของการวัดผิดพลาดอีกประการหนึ่ง ก็คือ องค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้น เช่น ผลกระทบจากความร้อน อิมพีแดนซ์ที่ใช้ทำโวลต์เตจดีไวเคอร์อาจเป็นความต้านทาน หรือตัวเก็บประจุก็ได้ แบบความต้านทานมักใช้วัดแรงดันสูงกระแสดตรง การวัดแรงดันกระแสสลับจะวัดด้วยโวลต์เตจดีไวเคอร์แบบตัวเก็บประจุ

### 2.5.1 โวลต์เตจดีไวเคอร์แบบความต้านทาน

โวลต์เตจดีไวเคอร์แบบความต้านทานประกอบด้วยความต้านทานแรงสูง  $R_1$  และความต้านทานแรงต่ำ  $R_2$  ดังในรูปที่ ความต้านทานที่ใช้จะเป็นทำนองเดียวกับความต้านทานที่ใช้ต่ออันดับกับแอมมิเตอร์วัดแรงดันสูงดังกล่าวแล้ว คือ จะต้องคำนึงถึงขีดจำกัดของกระแสที่ไหลผ่าน  $R_1, R_2$  ( $I \leq 1 \text{ mA}$ ) ค่าเก็บประจุสเตรย์ และการจนวน เป็นต้น สารที่ใช้ทำเป็นความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ควรเป็นสารชนิดเดียวกัน ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเนื่องจากอุณหภูมิ นั่นคือแรงดันที่ได้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความต้านทานทั้งสอง คือ

$$U = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_2 \quad (2.57)$$

ความถูกต้องก็จะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของค่าความต้านทาน และขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของเครื่องวัดแรงดันคร่อมความต้านทานภาคแรงต่ำ  $R_2$  ซึ่งจะต้องเป็นโวลต์มิเตอร์ หรือเครื่องวัดที่มีอิมพีแดนซ์ทางเข้าสูง เช่น โวลต์มิเตอร์แบบไฟฟ้าสถิต EV หรือโวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.26 โวลต์เตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน

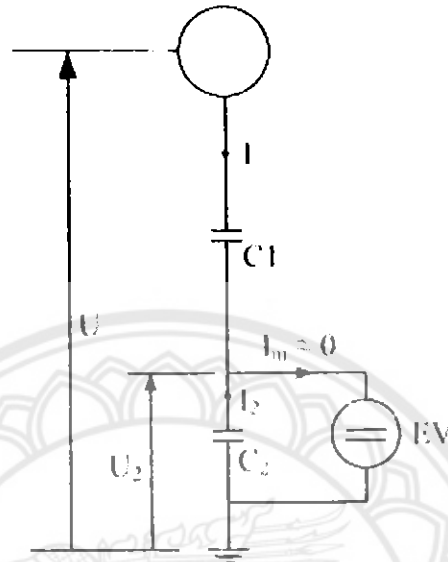
ปัญหาสำคัญที่ควรให้ความสนใจประการหนึ่ง คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวเนื่องจากแรงสูง ฉะนั้น ฉนวนที่หุ้มด้วยความต้านทานจะต้องทนต่อแรงดันสูงได้ ในขณะเดียวกันกระแสรั่วที่ไหลตามผิว อาจทำให้การวัดผิดพลาดได้ หากความต้านทานที่ใช้วัดนั้นสูงเกินไป ฉะนั้นค่าความต้านทานจึงมีขีดจำกัดบน คือค่า  $R$  จะต้องไม่สูงมากเกินไป กระแสที่วัดจะต้องไม่ต่ำมากเกินไป ( $I \geq 0.1 \text{ mA}$ ,  $R \leq 10 \text{ M}\Omega/\text{kV}$ ) ฉะนั้นการเลือกฉนวนที่จะนำมาใช้วัดความต้านทาน หรือบรรจุกความต้านทานต้องเลือกให้เหมาะสม และอาจช่วยแก้ปัญหานี้ได้ โดยออกแบบการจัดวางความต้านทาน และการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในบริเวณล้อมรอบความต้านทาน ซึ่งอาจใช้ความต้านทานย่อมาต่ออันดับบนแท่งฉนวนในลักษณะเป็นเกลียวส่วนจุ่มในน้ำมัน หรือใช้ก๊าซอัดความดัน เช่น ก๊าซ  $\text{SF}_6$  เป็นต้น

### 2.5.2 โวลต์เตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันแบบกระแสสลับ

โวลต์เตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุแสดงในรูปที่ 2.27 ประกอบด้วยตัวเก็บประจุภาคแรงสูง  $C_1$

ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ  $C_2$

โดยหลักการแล้ว กระแสที่เข้าเครื่องวัด  $I_m$  นั้น ต้องมีค่าน้อยมากเกือบเป็นศูนย์ ( $I_m \approx 0$ ) นั่นคือกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำจะต้องเท่ากันคือ



รูปที่ 2.27 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

$$I_2 = \omega C_2 U_2 = I \quad (2.58)$$

$$I = \omega C_1 U = \frac{\omega C_1 C_2}{C_1 + C_2} U \quad (2.59)$$

ฉะนั้น 
$$U = \frac{C_1 + C_2}{C_1} U_2 \quad \text{เมื่อ } C_2 \ll C_1$$

$$U \approx \frac{C_2}{C_1} U_2$$

### 2.5.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง $C_1$

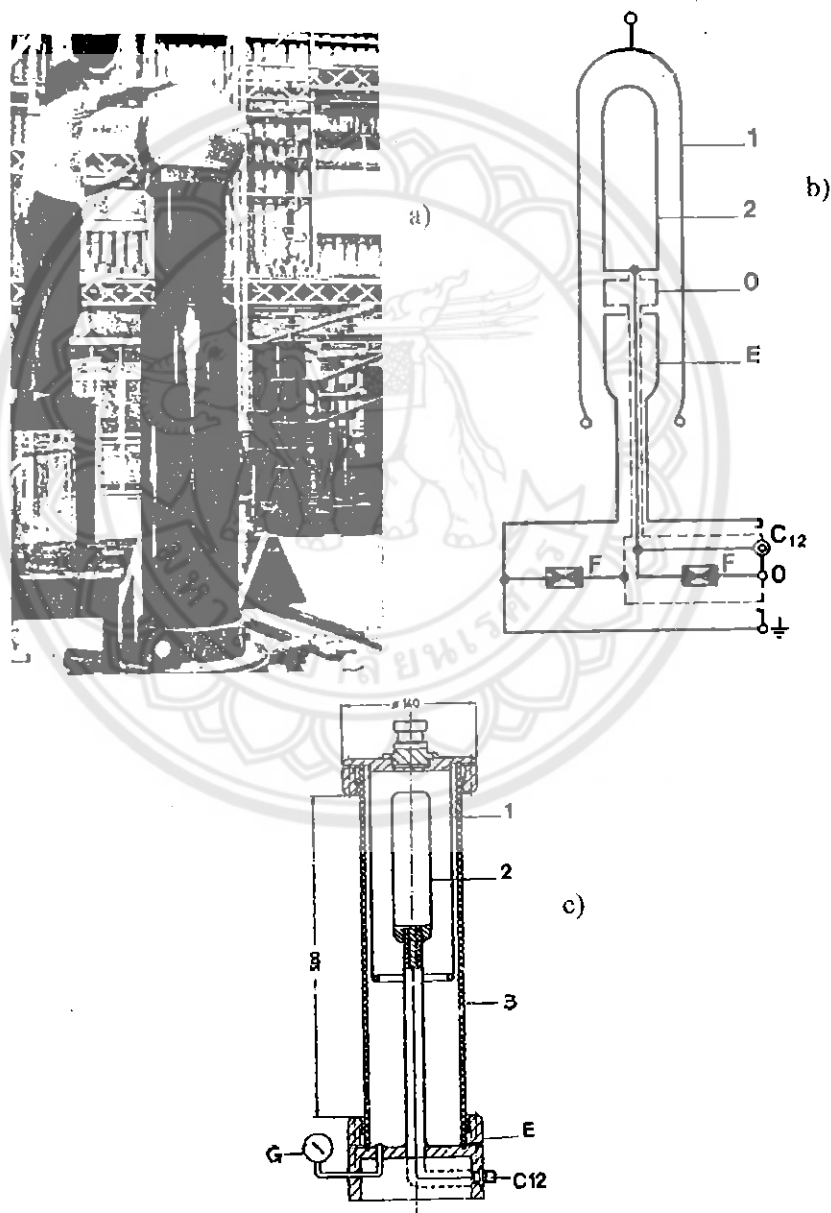
ตัวเก็บประจุแรงสูงที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไป มีใช้กันอยู่ 2 ชนิด คือ ตัวเก็บประจุก๊าซอัดความดัน และตัวเก็บประจูง่อยๆ มาต่ออันดับกัน

#### 1. ตัวเก็บประจุก๊าซอัดความดัน

ตัวเก็บประจุแรงสูงแบบก๊าซอัดความดันนี้ ได้จากสนามไฟฟ้าแบบอิล็กโตรดแบบทรงกระบอกซ้อนกัน (coaxial cylinder configuration) เพื่อให้มีขนาดเล็กๆ แต่สามารถทนแรงดันได้สูงๆ จึงจำเป็นต้องมีการฉนวนด้วยก๊าซอัดความดันให้สูงขึ้น ก๊าซที่ใช้กัน ได้แก่  $N_2$ ,  $CO_2$  ที่ความดัน 10-20 บาร์ หรือก๊าซ  $SF_6$  ที่ความดันในช่วง 1...3 บาร์ (1 บาร์ = 750 มม. ปรอท) ตัวเก็บ

ประจุประเภทนี้ โดยทั่วไปจะใช้เป็นตัวเก็บประจุมาตรฐาน (standard capacitor) เพราะเป็นตัวเก็บประจุที่ไม่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสีย หรือมีแต่น้อยมาก ใช้เป็นองค์ประกอบวงจรวัดค่าเก็บประจุ C และแฟกเตอร์กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (dielectric loss factor)  $\tan \delta$  ที่วัดด้วย Schering bridge หรือ C-tg $\delta$  bridge

ข้อดีของตัวเก็บประจุแบบกึ่งอากาศความดัน คือ มีค่าแฟกเตอร์กำลังไฟฟ้าสูญเสีย  $\tan \delta$  ต่ำ คือ  $< 10^{-5}$  และโดยที่ใช้อิเล็กโตรดแบบทรงกลมซ้อนกันร่วมเป็นภาคแรงสูง ทางด้านแรงต่ำก็ใส่แหวนชิลด์ (shielding ring) จึงทำให้ไม่มีสนามไฟฟ้ารบกวนจากภายนอกดังในรูปที่ 2.28



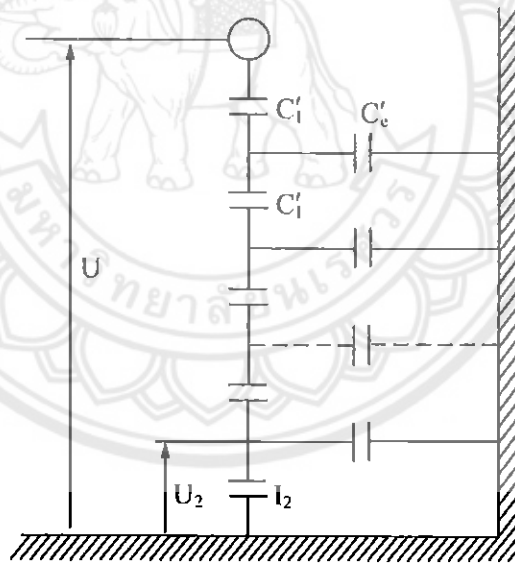
รูปที่ 2.28 ตัวเก็บประจุ

1 : อิเล็กโตรดแรงสูง (high voltage electrode) E : อิเล็กโตรดต่อดิน (ground electrode)

- 2 : อิเล็กโทรดวัดแรงดัน (measuring electrode) G : มาตรวัดความดัน (pressure gauge)  
 3 : กระบอฉนวน (insulating cylinder)  $C_{12}$  : ขั้วต่อสายเคเบิล (terminal)  
 0 : อิเล็กโทรดการ์ด (guard electrode) F : กัปกักเสิร์จ surge arrester) ที่ต่อลงดิน  
 a)+b) ตัวเก็บประจุมาตรฐานอัดก๊าซ  $\text{CO}_2$ , 18 bars 500 kV 101.373pF (Micafil)  
 c) ตัวเก็บประจุมาตรฐานอัดก๊าซ  $\text{SF}_6$ , 2.5 bars 120 kV-AC 36.8pF (MWB)

## 2. ตัวเก็บประจุย่อต่ออันดับ

ตัวเก็บประจุแรงสูงชนิดนี้ ได้จากการนำตัวเก็บประจุย่อประเภทเซรามิกส์ หรือตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม โพลีเอสเตอร์ หรือตัวเก็บประจุกระดาษชุบน้ำมันฉนวนจำนวนหลายตัวมาต่ออันดับกัน การต่อกันในลักษณะนี้ ย่อมมีสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดของตัวเก็บประจุย่อแต่ละตัวกับสิ่งหุ้มล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับส่วนที่ต่อลงดิน จึงมีค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์กับดิน ซึ่งจะตัดทิ้งไม่นำมาคิดไม่ได้ ดังในรูป แสดงถึงวงจรสมมูล ประกอบด้วยตัวเก็บประจุแรงสูงย่อยๆ  $C_i'$  กับค่าเก็บประจุสเตรย์  $C_i''$  ลงดินย่อยตามแนวความยาวของโวลต์เตจดีไวเซอร์



รูปที่ 2.29 วงจรสมมูลของโวลต์เตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุย่อต่ออันดับ

$C_i'$  คือ ตัวเก็บประจุย่อแรงสูง

$C_i''$  คือ ความจุไฟฟ้าสเตรย์

การหาค่าความจุไฟฟ้าแรงสูงรวม  $C_{res}$  จะคำนวณจากความจุไฟฟ้าย่อย  $C_i'$  โดยตรงไม่ได้ แต่อาจคำนวณได้จากกระแส  $I_2$  ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ  $C_2$  ที่มีแรงดันคร่อม  $U_2$  ความจุไฟฟ้าผลรวมหาได้จาก

$$I_2 = \omega C_{1res} U \quad (2.60)$$

ดังนั้น อัตราส่วนแรงดันต่ำต่อแรงดันสูงจะหาได้จากสมการ

$$\frac{U_2}{U} = \frac{1}{n} \left( 1 - \frac{C_e}{6C_1} \right) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left( 1 - \frac{C_e}{6C_1} \right) \quad (2.61)$$

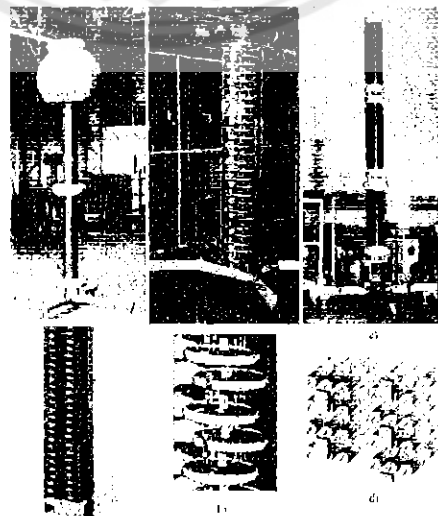
เมื่อ  $n$  คือ จำนวนตัวเก็บประจุแรงสูงต่ออันดับ และจำนวนตัวเก็บประจ่วย่อยภาคแรงต่ำเท่ากับ 1

$C_1$  คือ  $C'_1/n$  และ  $C_e$  คือ  $nC'_e$

ค่ายังผลความจุไฟฟ้าสเตรย์ลงคินรวมทั้งหมด  $C_e$  ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของดีไวเซอร์และสภาพแวดล้อมฝาผนัง อุปกรณ์อื่นและวัตถุอื่นใด การลดความผิดพลาดให้น้อยลงได้โดยทำให้ค่า  $C_e/C_1$  มีค่าน้อยลง คือทำให้ค่าความจุไฟฟ้า  $C_1$  มีค่าสูงขึ้น ให้  $C_e/6C_1 < 5\%$  ปกติค่า  $C_e$  จะมีค่าประมาณ 10 ถึง 15 pF/m ของความสูง ดังนั้น  $C_1$  ควรจะมีค่าประมาณ 30-50 pF/m ของความสูง

ค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง  $C_1$  ควรมีค่ามากพอ เพื่อขจัดปัญหาผลกระทบจากความจุไฟฟ้าสเตรย์  $C_e$  แต่อย่างไรก็ตาม  $C_1$  ก็ไม่ควรมีค่ามากเกินไป เพราะจะกลายเป็นโหลดแก่ตัวจ่ายหรือต้นกำเนิดแรงสูง (เช่น หม้อแปลงทดสอบ) ฉะนั้น ค่า  $C_1$  ควรจะมีค่าอยู่ในช่วง 100 pF ถึง 1000 pF ในทางปฏิบัติที่ใช้กัน  $C_1$  จะมีค่า ประมาณ 200-500pF

ตัวอย่างตัวเก็บประจ่วย่อยต่ออันดับชนิดกระดาษเหนียวจุ่มน้ำมัน แบบฉนวนแข็งเซรามิกส์และชนิดโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม ประกอบเป็นตัวเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเซอร์ดังตัวอย่างตัวเก็บประจุทั้ง 3 ชนิด ในรูป



รูปที่ 2.30 โครงสร้างภายในตัวเก็บประจุแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเซอร์

- a) โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 200 pF 600 kV-AC ตัวเก็บประจุแรงสูงเป็นแบบชนิดกระดาษเหนียวจุ่มน้ำมัน (oil impregnated paper, Haefely) ใช้งานที่ H.V.lab จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- b) โวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิงอนกประสงค์แบบฉนวนแข็งชนิดเซรามิกส์ 500 kV อิมพลัส 200kV-AC 250 kV-DC ประกอบด้วย  $C_1 = 5000$  pF ได้  $C_1$  รวมประมาณ 200pF
- c) โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงสำหรับวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าในระบบสายส่งแรงสูง 230 kV (EGAT) ภาคแรงสูงประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุย่อย โพลีเอสเตอร์ฟิล์มต่อกัน ได้ความจุไฟฟ้า 570 pF โดยต่อกันคั้งรูป

## 2.6 มาตรฐานการทดสอบ

### 2.6.1 มาตรฐาน ANSI/ASTM D877 [2]

ใช้การทดสอบแบบการทดสอบประจำ (routine test) ทดสอบน้ำมันของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าใช้งานไม่เกิน 230 kV และการตรวจสอบเพื่อรับน้ำมันที่ยังไม่ได้ผ่านกรรมวิธีใด ๆ มาก่อน

เป็นวิธีการหาค่า แรงดันเบรคความของฉนวนเหลว (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 มาแล้วและนำไปใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีแรงดัน ไฟฟ้าเกิน 230 kV ซึ่งถ้าเกินไปกว่านี้จะใช้วิธีการทดสอบ ASTM D1816 แทน

3. หน่วยเมตริกและหน่วย U.S.Customery สามารถเทียบเคียงกันใช้ได้

### 2.6.2 มาตรฐาน ANSI/ASTM D1816 [3]

ใช้การทดสอบแบบการทดสอบประจำ (routine test) ทดสอบน้ำมันของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าใช้งานเกิน 230 kV และการตรวจสอบเพื่อรับน้ำมันที่ยังไม่ได้ผ่านกรรมวิธีใด ๆ มาก่อน



วิธีการนี้เป็นวิธีการหาค่า แรงดันเบรกคาวนของฉนวนเหลว (Insulating liquids) วิธีการนี้เหมาะสมที่จะใช้น้ำมันปิโตรเลียม โดยทั่วไปใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนและเป็นตัวกลางระบายความร้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น สายเคเบิลหม้อแปลง และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่คล้ายคลึง ไม่ควรใช้วิธีนี้กับของเหลวที่มีความหนืดเกินกว่า 19 CST (centistroke) หรือ 100 sus (saybolt universal seconds) ที่ 40°C (140°F)

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

2. วิธีการนี้ เลือกลงใช้สำหรับทดสอบน้ำมัน ของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการเติมน้ำมันและสูญญากาศ

3. หน่วยเมตริกและหน่วยนิ้ว-ปอนด์ (inch-pound) สามารถเทียบเคียงกันใช้ได้

### 2.6.3 มาตรฐาน IEC 156 [4]

จะระบุถึงวิธีการสำหรับหาแรงดันเบรกคาวนของฉนวนเหลวที่มีความถี่ทางไฟฟ้า ส่วนของการทดสอบประกอบด้วย การระบุถึงเครื่องมือ การเพิ่มไฟฟ้ากระแสสลับ AC โดยค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ของอัตราส่วนแรงดันจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดการเบรกคาวน วิธีนี้ประยุกต์ใช้กับชนิดของของเหลวทั้งหมดที่มีความหนืดมากกว่า 350 mm<sup>2</sup>/s ที่อุณหภูมิ 40°C มันเป็นความเหมาะสมของการยอมรับในการทดสอบของ ๆ เหลวในกรณีที่ยังรับมา

ในการทดสอบ อุณหภูมิของ ๆ เหลวและอุณหภูมิรอบข้าง จะต้องไม่แตกต่างกันเกินกว่า 5°C และสำหรับอุณหภูมิที่ใช้อ้างอิงในการทดสอบของเหลวคือ 20°C ± 5°C และสำหรับอุณหภูมิที่ใช้อ้างอิงในการทดสอบของเหลวคือ 20°C ± 5°C

### 2.6.4 คุณประโยชน์ของการทดสอบ

ค่าแรงดันเบรกคาวนของฉนวนเหลวที่มีความสำคัญมาก โดยใช้เป็นการวัดค่าของความสามารถของ ของเหลวที่จะทนต่อความเครียดทางไฟฟ้าได้โดยไม่เกิดความเสียหาย และยังชี้บ่งได้ว่า ในของเหลวมีสิ่งสกปรกปะปนแอบแฝงอยู่ เช่น น้ำ ผงฝุ่น และ เส้นใยเซลลูโลส ที่มีความชื้นหรือสารตัวนำเล็ก ๆ ที่ปะปนอยู่ในของเหลวแล้วจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกคาวนของฉนวนต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการ ได้ค่าแรงดันเบรกคาวนสูง ๆ ไม่ได้หมายความว่า ไม่มีสิ่งสกปรกอยู่เลย เพราะการทดสอบแบบนี้เป็นการชี้แสดงถึงสิ่งสกปรกที่มารวมตัวกันอยู่ระหว่างอิเล็กโตรดซึ่งอาจไม่พอเพียงในการที่จะไปเป็นผลกระทบกระเทือนต่อค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าเบรกคาวนมาก

### 2.6.5 เครื่องมือที่ใช้

1. หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า ต้องใช้ในการทดสอบ ทำได้ง่ายโดยใช้หม้อแปลงยกระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งด้านขดลวดปฐมภูมิ เป็นแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สามารถปรับค่าได้ ความถี่ที่ใช้งานก็ใช้ความถี่กำลังเชิงพาณิชย์ (commercial power frequency 50/60 Hz) ซึ่งตัวหม้อแปลงไฟฟ้าและ

อุปกรณ์ควบคุมต้องมีขนาดและการออกแบบไว้อย่างดี รวมทั้งมีการทดสอบวงจรตัวอย่าง ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดต่อค่าประสิทธิภาพผล (crest factor) ของแรงดันไฟฟ้าทดสอบชนิด 60 Hz จะต้องไม่แตกต่างกันไป  $\pm 5\%$  (คิดจากรูปคลื่นครึ่งบวกของไซนูซอยด์) ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดต่อค่าประสิทธิภาพผล ตรวจสอบได้โดยการใช้ฮอสซิลโลสโคป ซึ่งต่อรวมกับ r.m.s. โวลต์มิเตอร์ ถ้าหากว่าไม่สามารถตรวจสอบ รูปสัญญาณได้โดยสะดวกก็ให้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดไม่น้อยกว่า 0.5 kVA สำหรับการทดสอบ แรงดันไฟฟ้าเบรคดาวน์โดยทั่วไปได้ หรือถ้าใช้หม้อแปลงกำลังไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังไฟฟ้ามก ๆ โคนค่ากระแสลัดวงจรมาก ๆ ในวงจรของตัวอย่างทดสอบอยู่ระหว่าง 1-10 mA/kV ของแรงดันประยุกต์ (applied voltage) การจำกัดค่ากระแสทำได้โดยใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกันข้างนอกหรือออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีค่ารีแอกแตนซ์ (reactance) ตามต้องการ

2. อุปกรณ์ตัดวงจร วงจรทางด้านขดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าต้องมีระบบป้องกัน โดยใช้อุปกรณ์ตัดวงจรอัตโนมัติ ซึ่งสามารถตัดวงจรได้ภายใน 3 ไซเคิลหรือน้อยกว่าของกระแสที่เกิดขึ้นในขณะที่แรงดันเบรคดาวน์ของของเหลวที่ทดสอบ หรือจะให้ตัดวงจรได้ภายใน 5 ไซเคิลก็ได้ ถ้ากระแสที่ลัดวงจรมีค่าไม่เกิน 0.2 A ตัวตรวจจับกระแส (sensing) ที่ไปสั่งตัดวงจรเมื่อกระแสของวงจรทดสอบอยู่ในช่วง 2-20 mA กระแสที่เกินกว่านี้หรือนานกว่านี้ในขณะที่เบรคดาวน์จะทำให้เกิดคาร์บอนไนต์ (carbonized) ในน้ำมันและทำให้ฮีลิกโรดิสก์กร่อนและมีความร้อนสูง เป็นเหตุให้สั้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษา

3. อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า กำหนดให้อัตราเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น  $3 \text{ kV/s} \pm 20\%$  การปรับแรงดันไฟฟ้าทำอย่างปลอดภัยโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ (motor driven variable ratio autotransformer) อัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าต้องสม่ำเสมอตลอดย่านแรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าของการทดสอบการใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนจะดีกว่าวิธีธรรมดา เพราะไม่ต้องยุ่งยากในการตรวจสอบ บำรุงรักษาและได้อัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่สม่ำเสมอโดยง่ายอัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสามารถคำนวณได้โดยคิดจากระยะเวลาที่ใช้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงแรงดันไฟฟ้าสุดท้าย เมื่อใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนแล้วควรตรวจสอบ และ การสอบเทียบชุดควบคุมปรับความเร็ว (calibrate speed control rheostat) ให้แน่นอนคล้อยจองกับอัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ของหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบที่ใช้

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

- ใช้โวลต์มิเตอร์ ต่อด้านปฐมภูมิ (secondary) ของส่วนแยกของหม้อแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้า (separated potential transformer) หรือ

- ใช้โวลต์มิเตอร์ ต่อด้านขดลวดตติภูมิ (tertiary winding) ของหม้อแปลงไฟฟ้า (ถ้ามี)

- ใช้โวลต์มิเตอร์ ต่อต้านแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำ (low voltage) ของหม้อแปลงไฟฟ้าถ้าหากว่าเกณฑ์ความผิดพลาดในการวัดไม่เกินกว่าที่ระบุไว้

#### 5. อิเล็กโทรด

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

2. มาตรฐาน ASTM D1816 ต้องทำด้วยทองเหลืองผิวมันเรียบ ลักษณะแบบทรงดอกเห็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 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 2.6

ตารางที่ 2.6 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	-	-

#### 2.6.6 ถ้วยทดสอบ

จะต้องมีอิเล็กโทรดติดประกบมาอย่างแข็งแรง ผิวหน้าของอิเล็กโทรด ทั้งสองมีระยะห่างเท่าเทียมกันตลอดทั้งแนวแกน อิเล็กโทรดทั้งสองก็อยู่ในระนาบเดียวกันอิเล็กโทรดต้องห่างจากส่วนใดๆของถ้วยทดสอบไม่น้อยกว่า 13 mm (1/2 in.) ผลรวมของกระแสรั่วไหล และกระแสฮาร์ดของถ้วยทดสอบที่มีน้ำมันอย่างฉาบอยู่ต้องน้อยกว่า 200  $\mu\text{A}$  ที่ 20 kV 60 Hz ถ้วยทดสอบต้องทำมาจากวัสดุที่มีค่าคงทนของฉนวนสูง และไม่มีความเสี่ยงถ้าสัมผัสกับของเหลวที่นำมาใส่ หรือจากการล้างต้องไม่ดูดซึมความชื้นหรือน้ำยาล้างทำความสะอาด หรือ ของเหลวที่นำมาทดสอบ ความสูงของถ้วยทดสอบประมาณ 33 mm (1.25 in.) จากขอบสุดของอิเล็กโทรด ถ้วยทดสอบควรออกแบบมาให้สามารถถอดอิเล็กโทรดได้ง่ายเพื่อประโยชน์ในการล้างทำความสะอาด การขัดผิว และการปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตามตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ขนาดของด้วยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156

มาตรฐานการทดสอบ	ระยะห่างจากผิว ด้วยทดสอบ(mm)	ระยะห่างขอบของ อิเล็กโตรด(mm)
ASTM D877	≥13	33
ASTM D1816	≥13	35
IEC 156	≥12	40

### 2.6.7 การปรับระยะและการรักษาอิเล็กโตรด และด้วยทดสอบ

1. ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดตามมาตรฐาน ASTM D877 และ มาตรฐาน IEC 156 ระหว่างอิเล็กโตรดขณะทดสอบต้องได้ 2.5 mm (0.100 in.) ซึ่งทำได้โดยใช้มาตรฐานเครื่องมือวัด (standard pound gage) ขนาด  $2.5 \pm 0.01$  mm ( $0.100 \pm 0.005$  in.) หรือใช้แท่งเหล็กแบบที่เรียกว่า "GO" และ "NO-GO" Gate ที่มีความหนา 2.49 และ 2.51 mm (0.0995 in. และ 0.1005 in.) ตามลำดับทุกครั้งที่ขัด เช็ด และ ถ้างอิเล็กโตรด รวมทั้งการเริ่มต้นทดสอบของแต่ละวัน ควรตรวจระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดเสมอ

2. ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดตามมาตรฐาน ASTM D1816 ระหว่างอิเล็กโตรดขณะทดสอบต้องได้ 1 mm (0.040 in.) หรือ 2 mm (0.080 in.) ซึ่งทำได้โดยใช้มาตรฐานเครื่องมือวัด (standard pound gage) ขนาด  $2 \pm 0.03$  mm ( $0.100 \pm 0.005$  in.) หรือใช้แท่งเหล็กแบบที่เรียกว่า "GO" และ "NO-GO" Gate ที่มีความหนา 1 และ 2 mm (0.004 in. และ 0.008 in.) ตามลำดับทุกครั้งที่ขัด เช็ด และ ถ้างอิเล็กโตรดรวมทั้งการเริ่มต้นทดสอบของแต่ละวัน ควรตรวจระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดเสมอ ซึ่งระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดทั้ง 3 มาตรฐานแสดงตามตารางที่ 2.8

3. การล้างทำความสะอาด การล้างทำความสะอาดของอิเล็กโตรดสามารถทำได้โดยเช็ดด้วยกระดาษทิชชูที่สะอาด แห้ง และ ไม่ติดขน หรือ เช็ดด้วยผ้าแห้งขาม้วส์ที่แห้งสะอาด ระวังอย่าให้นิ้วมือไปแตะต้องกับอิเล็กโตรดและระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด แม้กระทั่งกระดาษทิชชูหรือผ้าขาม้วส์ด้านที่มีมือจับอยู่ หลังจากได้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดดีแล้ว เทน้ำมันชนิดทำละลาย (standard solvent) ที่ได้น้ำยาทำละลาย (solvent) ที่มีจุดเดือดต่ำ ๆ ไม่ควรใช้ เพราะการระเหยเป็นไอได้เร็ว เป็นผลให้เกิดความเย็นขึ้นมาในด้วยทดสอบ ทำให้ความชื้นที่มีอยู่สามารถควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำได้ ถ้าจะให้ดีควรครอบด้วยทดสอบไว้ความชื้นสักหนอยก่อน สิ่งที่ดีควรระวังคืออย่าให้มีการแตะต้องอิเล็กโตรดและภายในด้วยทดสอบหลังจากการล้างและอบก่อนการทดสอบ ควรใช้น้ำมันที่สะอาด ชนิดเดียวกับที่จะทดสอบ กรอกใส่ด้วยทดสอบแล้วเอียงพลิกด้วยไปมาเป็นการล้างครั้งสุดท้ายอีกครั้งหนึ่ง เสร็จแล้วเอาน้ำมันชนิดเดียวกับที่ล้างครั้งสุดท้ายนี้มาทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรคความถี่ของฉนวน ถ้าได้ค่าสูงพอสมควรก็แสดงว่าด้วยทดสอบนี้สามารถนำไปใช้อื่น ๆ ได้จริง ถ้าหากได้ค่าต่ำกว่าก็ต้องล้างทำความสะอาด ด้วยทดสอบใหม่และทดสอบซ้ำอีกที

4. การใช้ประจำวัน ก่อนที่จะทำการทดสอบในแต่ละวันจะต้องตรวจคู่อิเล็กโตรดว่าสกปรกหรือสึกกร่อนไปบ้างหรือไม่อาจจะต้องขัดบ้าง หากเกิดการสึกกร่อน ผงถ่านและสิ่งสกปรกทั้งหลายต้องเช็ดออกให้หมด ตั้งระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดใหม่แล้วล้างทำความสะอาดตามแบบข้อ 2.

5. การเก็บถ้วยทดสอบ สำหรับการใช้งานแบบทดสอบเพื่อเป็นเกณฑ์ตัดสิน (reference test) ต้องเก็บไว้ในน้ำมันที่สะอาด แห่ง ใหม่ ชนิดเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบและปิดภาชนะที่เก็บให้สนิท

ตารางที่ 2.8 ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC 156

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

#### 2.6.8 ตัวอย่างทดสอบ

1. ตัวอย่างของเหลวที่นำมาทดสอบต้องดำเนินการตามวิธีการ ASTM D923 ตัวอย่างต้องบรรจุในขวดสะอาด แห่ง และ ปิดปิดไว้สนิท พร้อมทั้งป้องกันไม่ให้ถูกกับแสงสว่างด้วย ก่อนที่จะนำตัวอย่างไปตรวจสอบต้องไปตรวจดูว่ามีสิ่งสกปรก คราบน้ำมัน ผงโลหะหรือสิ่งแปลกปลอมใดๆหรือไม่ ถ้ามองเห็นว่ามีหยดน้ำแฝงอยู่ก็ไม่ต้องนำไปทดสอบ รายงานได้เลยว่าตัวอย่างไม่สมบูรณ์พอ (หมายเหตุ: ในการเก็บตัวอย่างถ้าต้องการทดสอบเพื่อเป็นเกณฑ์ตัดสินควรเก็บตัวอย่างมา 2 ลิตร แต่ถ้าทดสอบประจำควรเก็บมา 1 ลิตร)

2. ตัวอย่างของเหลวที่นำมาทดสอบต้องดำเนินการตามวิธีการ ASTM D923 ค่าแรงดันเบรกควานซ์ของฉนวนของของเหลวจะลดลงไปบ้างถ้าหากมีสิ่งเจือปนเข้าไปปะปนผสมอยู่ในของเหลว เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาอย่างนี้ ก็ขอแนะนำกรรมวิธีในการใส่ของเหลวเข้าถ้วยทดสอบ ภาชนะที่บรรจุของเหลวที่นำมาทดสอบนั้นให้หมุนกลับไปกลับมาซ้ำ ๆ ก่อนที่จะเทของเหลวลงถ้วย

ทดสอบ ห้ามกวนของเหลวแรงเพราะอาจจะทำให้อากาศเข้าไปผสมในของเหลวได้ เทของเหลวทดสอบลงไปในตัวทดสอบเล็กน้อยเพื่อการล้างและเคลือบและก็เททิ้งไป เสร็จแล้วก็เอาของเหลวตัวอย่างที่จะมาทดสอบเทลงไปในตัวทดสอบอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศและไอน้ำในอากาศเข้ามาผสมเต็มไปจนกระทั่งได้ในระดับของเหลวสูงกว่าในอิเล็กทรอนิกส์ ขอบบนสุดประมาณไม่ต่ำกว่า 20 mm (0.8 in.) เสร็จแล้วทิ้งไว้ให้นิ่งอย่างน้อย 2 นาที เพื่อเปิดโอกาสให้ฟองอากาศได้หนีออกไปได้ แต่ไม่ควรนานกว่า 3 นาที ก่อนการทดสอบ (หมายเหตุ วิธีนี้ อาจใช้ไม่ได้ ถ้าหากว่าของเหลวที่จะมาทดสอบมีความหนืด 60-100 sus ที่ 100°C (212°F) ถ้าหากจะทดสอบกับของเหลวที่มีความหนืดสูงๆ อย่างนี้ควรปล่อยให้ทิ้งไว้ให้นิ่งและเย็นลงจนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งต้องไม่ต่ำกว่า 20°C (68°F) ภาชนะที่บรรจุของเหลวตัวอย่างจะไม่หมุนกวนแต่จะใช้วิธีพลิกกลับไปกลับมาอย่างน้อย 30 นาที ก่อนที่จะเทใส่เครื่องทดสอบ

#### 2.6.9 อุณหภูมิสำหรับการทดสอบ

อุณหภูมิของตัวอย่างที่จะมาทดสอบ ควรทำให้เท่ากับอุณหภูมิห้องซึ่งก็ต้องไม่ต่ำกว่า 20°C การทดสอบที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องจะทำให้ได้ค่าไม่แน่นอน และทำให้ได้ผลออกมาไม่ถูกต้อง

#### 2.6.10 อัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า

1. มาตรฐาน ASTM D877 กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากศูนย์ และค่อย ๆ เพิ่มไปในอัตรา 3 kV/s $\pm$ 20% จนกระทั่งเกิดเบรกคาวนซึ่งแสดงได้จากการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันและบันทึกค่านั่นไว้ มีบางช่วงขณะหากเกิดคิสซาร์จ (discharge) บ้างซึ่งไม่เป็นผลกระทบกระเทือนการทำงานของอุปกรณ์ตัดวงจร

2. มาตรฐาน ASTM D1816 กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากศูนย์ และค่อย ๆ เพิ่มไปในอัตรา 1/2 kV/s  $\pm$ 20% จนกระทั่งเกิดเบรกคาวนซึ่งแสดงได้จากการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันและบันทึกค่านั่นไว้ มีบางช่วงขณะหากเกิดคิสซาร์จ (discharge) บ้างซึ่งไม่เป็นผลกระทบกระเทือนการทำงานของอุปกรณ์ตัดวงจร

3. มาตรฐาน IEC156 กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากศูนย์ และค่อย ๆ เพิ่มไปในอัตรา 2 kV/s $\pm$ 20% จนกระทั่งเกิดเบรกคาวนซึ่งแสดงได้จากการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันและบันทึกค่านั่นไว้ มีบางช่วงขณะหากเกิดคิสซาร์จ (discharge) บ้างซึ่งไม่เป็นผลกระทบกระเทือนการทำงานของอุปกรณ์ตัดวงจร ซึ่งอัตราการเพิ่มแรงดันจนกระทั่งเบรกคาวนทั้ง 3 มาตรฐานแสดงตามตารางที่

ตารางที่ 2.9 อัตราแรงดันที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเบรกควาน์ตามมาตรฐาน 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%

### 2.6.11 การทดสอบค่าแรงดันเบรกควาน์ของน้ำมันหม้อแปลง [5]

การทดสอบค่าแรงดันเบรกควาน์สามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีตรวจรับน้ำมันห้อง Main tank และ กรณีบำรุงรักษาน้ำมันห้อง main tank ดังตารางที่ 2.10 และ ตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.10 กรณีตรวจรับน้ำมันห้อง main tank

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

ตารางที่ 2.11 กรณีบำรุงรักษาน้ำมันห้อง main tank

มาตรฐานทดสอบ	ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด (mm)	ค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้ (kV)		
		ระดับแรงดัน HV ของหม้อแปลง (kV)		
		$\leq 69$	> 69 ถึง $\leq 288$	>288
ASTM D877	2.5	26	30	ใช้ ASTM D1816 ในการทดสอบ
ASTM D1816	1	20	20	25
IEC 156	2.5	ยังไม่สามารถระบุค่าได้*		

### 2.6.12 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ

1. การทดสอบเป็นเกณฑ์ตัดสิน เป็นการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกควานซ์ของฉนวนของเหลวของใหม่เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ตัดสิน ทำการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกควานซ์ต่อ 5 ตัวอย่างของเหลวในถ้วยทดสอบ โดยแต่ละตัวอย่างให้เบรกควานซ์ได้เพียง 1 ครั้ง ค่าเฉลี่ยของทั้ง 5 ครั้งนี้จะถูกต้องตามหลักเกณฑ์ทางสถิติศาสตร์หรือไม่ก็ให้คำนวณตามข้อ 3. ถ้าถูกต้องตามหลักเกณฑ์ก็รายงานหาค่าเฉลี่ยที่ได้ และถ้าหากเกินเกณฑ์ไปก็ให้ทดสอบใหม่อีก 5 ครั้งใน 5 ถ้วยทดสอบเสร็จแล้วหาค่าเฉลี่ยเบรกควานซ์ทั้ง 10 ครั้งเป็นรายงาน

2. การทดสอบเป็นประจำ ทำการทดสอบโดยหาค่าแรงดันเบรกควานซ์ 5 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่างของเหลวในถ้วยทดสอบ ซึ่งให้พักพอ 1 นาที (กักระหว่างเบรกควานซ์ต่อเบรกควานซ์) ค่าเฉลี่ยของทั้ง 5 ครั้งนี้คือค่าแรงดันเบรกควานซ์ของฉนวนของเหลวนั้นจะถูกต้องตามหลักเกณฑ์ทางสถิติศาสตร์

3. หากเกินเกณฑ์ไปให้ทั้งตัวอย่างเดิมไป แล้วใช้ตัวอย่างใหม่ด้วยทดสอบ (ตัวอย่างมาจากแหล่งเดียวกัน) หากค่าเบรกควานซ์เดียวกัน 5 ครั้งเสร็จแล้วหาค่าเฉลี่ยจาก แรงดันเบรกควานซ์ทั้ง 10 ครั้งเป็นรายงาน

4. หลักเกณฑ์การตัดสินค่าเฉลี่ยทางสถิติศาสตร์ หาค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐานของเบรกควานซ์ 5 ครั้ง ดังต่อไปนี้

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.62)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \left[ \sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2 \right]} \quad (2.63)$$

เมื่อ  $\bar{X}$  คือ ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ  $n$  ครั้ง (V)

$X_i$  คือ ค่าเบรกควานซ์ในแต่ละครั้ง (V)

$S$  คือ ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$n$  คือ จำนวนครั้งของการทดสอบ

ถ้าหากว่าอัตราส่วนของ  $S/\bar{x}$  เกิน 0.1 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของ แรงดันไฟฟ้าเบรกควานซ์จาก 5 ครั้งที่ผ่านมาได้เกินหลักเกณฑ์ไป

ยังมีอีกวิธีหนึ่ง ในการคิดโดยให้เลือกใช้ได้ โดยเอาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกควานซ์ที่สูงที่สุดลบจากค่าที่ต่ำที่สุด จาก 5 ครั้ง แล้วคูณผลลบนี้ด้วย 3 จะได้ผลลัพธ์ค่าหนึ่งซึ่งเอาไปเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกควานซ์ค่าถัดจากค่าที่ต่ำที่สุด ถ้าผลลัพธ์มากกว่าค่าถัดจากค่าที่ต่ำที่สุดแสดงว่าค่าเฉลี่ยที่มาจาก 3 ครั้งแรกนั้นเกินหลักเกณฑ์ไป



ตามมาตรฐาน IEC 156 การทดสอบการเบรกความถี่จะทำ 6 ครั้ง จากตัวอย่างของน้ำมัน ซึ่งจะทำให้การบันทึกค่าทุก ๆ 2 นาที หลังจากเกิดการเบรกความถี่แต่ละครั้ง แล้วทำการตรวจสอบดูว่าไม่มีฟองแก๊สแล้วภายในระยะเวลาห่างระหว่างอิเล็กโตรด เราจะทำการหาค่าเฉลี่ยของการทดสอบการเบรกความถี่ 6 ครั้งเหมือนสมการที่ (2.62) และ (2.63) ถ้าหากว่าอัตราส่วนของ  $S/\bar{x}$  ไม่เกิน 0.95 ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจำนวนครั้งที่ทดสอบและอัตราส่วน  $S/\bar{x}$  แสดงตามตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 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

### 2.6.13 การจัดทำรายงาน

การจัดทำรายงานการทดสอบให้ทำและระบุสิ่งต่างๆ ดังนี้

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

4. ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกความถี่ในแต่ละครั้ง และค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าซึ่งคิดตามวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง

5. การทดสอบเป็นเกณฑ์ตัดสินจาก 5 ครั้งใน 3 ตัวอย่างและค่าไม่เกินเกณฑ์ทางคณิตศาสตร์

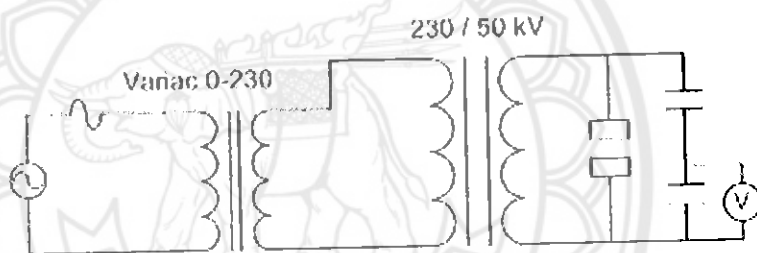
6. บันทึกผล และวิเคราะห์ผลการทดสอบ

### บทที่ 3

## อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง ตามมาตรฐาน ASTM D877, ASTM D1816 และ IEC156 มีอุปกรณ์หลักดังรูปที่ 3.1 ที่ใช้ในการทดสอบได้แก่

1. หม้อแปลงทดสอบ 220 V/100 kV
2. ตัวปรับแรงดันไฟฟ้า (variac) 0-230 V
3. ถ้วยทดสอบและอิเล็กโตรด
4. ชุดกวนน้ำมัน
5. โวลต์เตจคิไวเตอร์ 100 kV



รูปที่ 3.1 วงจรทดสอบตามมาตรฐาน

อุปกรณ์แต่ละชิ้นจะทำงานสัมพันธ์กันคือ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวปรับแรงดันไฟฟ้า (variac) แล้วกดสวิตช์เริ่มทำงานแรงดันไฟฟ้าขาออกจากชุดปรับแรงดันไฟฟ้าจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นแล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงไฟฟ้าจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นด้วย แรงดันไฟฟ้าส่วนนี้จะถูกส่งไปยังอิเล็กโตรดในถ้วยทดสอบจนทำให้อิเล็กโตรดเกิดการเบรคความถี่ จะหยุดการทำงานทันทีโดยปรับตัวปรับแรงดันลง

### 3.1 หม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบเป็นหม้อแปลงที่ใช้สร้างแรงดันสูงสำหรับวัสดุฉนวน หรืออุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ในระบบส่งจ่ายแรงสูง เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวกับแรงสูง วิจัยปัญหาความเปราะเปื้อนบนลูกถ้วยฉนวน หากคุณลักษณะของลูกถ้วยที่สภาวะบรรยากาศต่างๆ วัสดุสีขาว บางส่วนในวัสดุฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลว และฉนวนแข็ง หรือผสมกัน แรงดันของหม้อแปลงทดสอบสามารถปรับแรงดันได้ตั้งแต่ต่ำๆ ขึ้นไปจนถึงค่าที่ต้องการ หม้อแปลงทดสอบที่ใช้สามารถแปลงแรงดัน 220 V เป็น 100 kV แสดงดังรูปที่ 3.2

หม้อแปลงทดสอบมักจะเป็นเฟสเดียว มีกำลังไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แต่มีแรงดันสูง แรงดันทางด้านจ่ายออกปรับโดยปรับแรงดันทางด้านที่ป้อนเข้า หม้อแปลงทดสอบ จะกำหนดด้วย 1. แรงดันที่ป้อนเข้าและแรงดันที่จ่ายออก 2. กระแสที่ป้อนเข้าและจ่ายออก



รูปที่ 3.2 หม้อแปลงขนาด 220 V/100 kV

### 3.2 ตัวปรับแรงดันไฟฟ้า

ตัวปรับแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-230 V



รูปที่ 3.3 ตัวปรับแรงดันไฟฟ้า (variac) 0-230 V

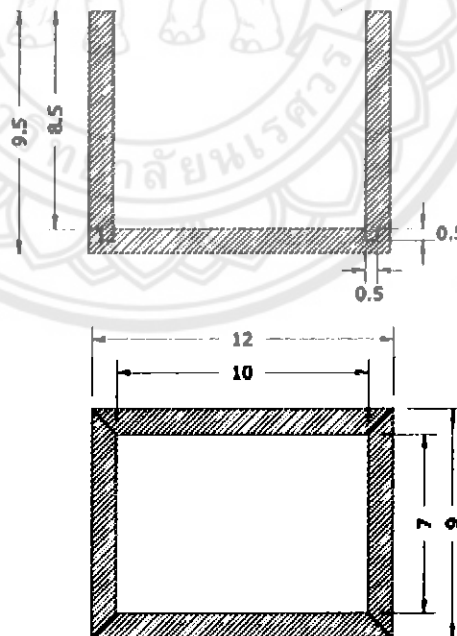
### 3.3 ชุดถ้วยทดสอบและอิเล็กโตรด

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

#### 3.3.1 การออกแบบถ้วยทดสอบ

ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM D877 ถ้วยทดสอบต้องทำจากวัสดุทดสอบที่มีค่าความคงทนจนสูง อิเล็กโตรดต้องห่างจากส่วนใด ๆ ของถ้วยทดสอบไม่น้อยกว่า 13 mm (1/2 in) ความสูงของถ้วยทดสอบประมาณ 33 mm (1.25 in) จากขอบบนสุดของอิเล็กโตรด การออกแบบจะแบ่งตัวถ้วยทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งสามารถถอดแยกจากกันได้เพื่อสะดวกในการทดสอบและทำความสะอาด ประกอบด้วย

1. ถ้วยทดสอบ ใช้อะคริลิกเป็นวัสดุในการทำเนื่องจากอะคริลิกขนาด 24 in<sup>3</sup> สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงถึง 2.2 MVA คังนั้นที่แรงดันไฟฟ้า 50 kV จะต้องออกแบบให้อะคริลิกมีขนาดอย่างน้อยที่สุดคือ  $(50000 \times 24) / 2200000 = 0.5454 \text{ in}^3$  โครงการนี้จึงออกแบบให้ถ้วยทดสอบมีขนาดมีความหนา 10 mm และมีความยาว 120 mm ความกว้าง 90 mm ความสูง 95 mm เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM D877 ดังรูปที่ 3.4 และ 3.5

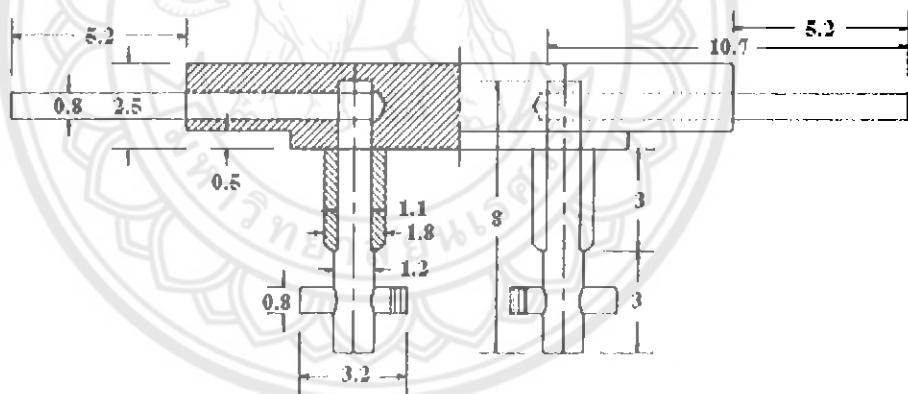


รูปที่ 3.4 แบบถ้วยทดสอบตามขนาดที่ออกแบบ

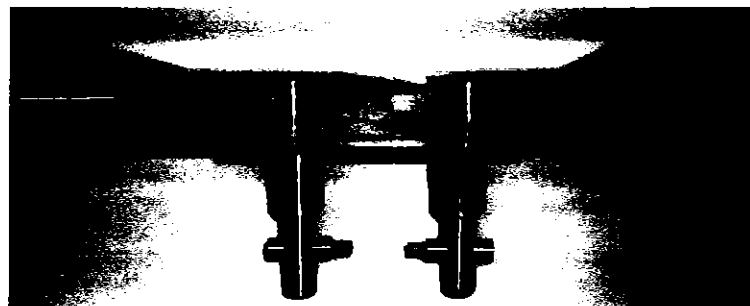


รูปที่ 3.5 ถ้วยทดสอบตามขนาดที่ออกแบบ

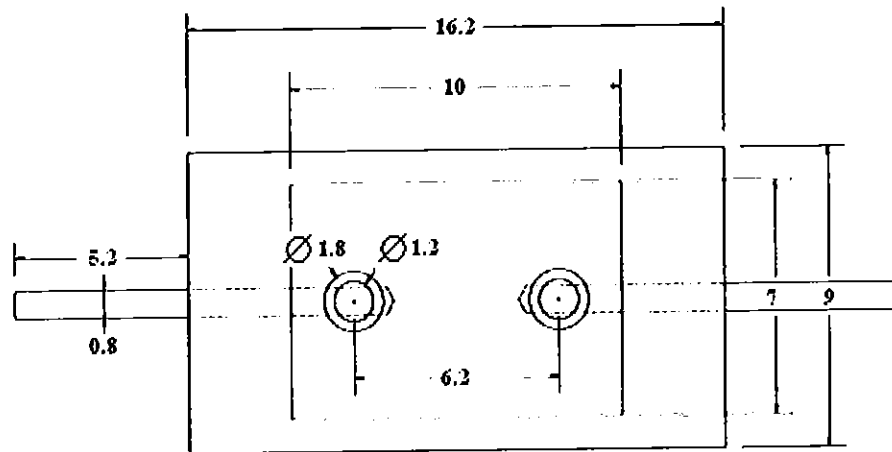
2. ฝาปิดถ้วยทดสอบ ใช้อะคริลิกเป็นวัสดุในการทำเช่นกัน ในส่วนนี้จะยึดติดกับแท่งตัวนำแท่งสแตนเลสและอิเล็กทรอนิกส์เพื่อต้องการให้อะคริลิกเป็นฉนวนให้กับตัวนำสแตนเลสโดยออกแบบให้มีความหนาวัดจากผิวตัวนำสแตนเลส 5 mm จึงได้ขนาดฝาปิดถ้วยทดสอบ อิเล็กทรอนิกส์นั้นสามารถถอดออกจากตัวนำสแตนเลส เพื่อความสะดวกในการทำความสะดวกหรือต้องการเปลี่ยนอิเล็กทรอนิกส์เมื่อเกิดการชำรุด ฝาปิดถ้วยทดสอบต้องออกแบบให้สอดคล้องกับตัวถ้วยทดสอบเพื่อความต้องการให้ตัวฝาปิดถ้วยทดสอบสนิทพอดีกับตัวถ้วยทดสอบดังรูปที่ 3.6-3.9



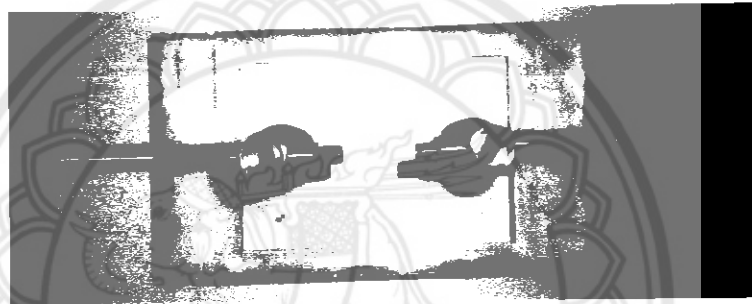
รูปที่ 3.6 แบบฝาปิดถ้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านหน้า



รูปที่ 3.7 ฝาปิดถ้วยทดสอบที่มองจากด้านหน้า



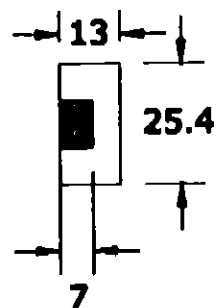
รูปที่ 3.8 แบบฝ่าปิดด้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านล่าง



รูปที่ 3.9 ฝ่าปิดด้วยทดสอบเมื่อมองจากด้านล่าง

### 3.3.2 การออกแบบอิเล็กโตรด

ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM D877 อิเล็กโตรดจะทำด้วยสแตนเลสผิวมันเรียบ ลักษณะแบบจานกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm (1 in.) ความหนาอย่างน้อย 3 mm (1/8 in) มุมของขอบอิเล็กโตรด เป็นเหลี่ยมตัดฉาก จึงออกแบบให้อิเล็กโตรดมีเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 25 mm และมีความหนา 13 mm ดังรูปที่ 3.10 และ 3.11



รูปที่ 3.10 แบบอิเล็กโตรดทรงกระบอก

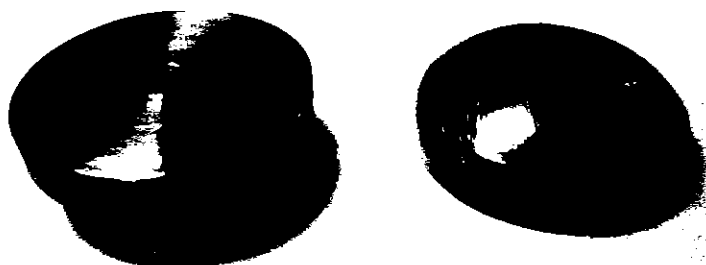


รูปที่ 3.11 อิเล็กโตรดทรงกระบอก

ตามมาตรฐาน ASTM D1816 อิเล็กโตรดต้องทำด้วยสแตนเลสผิวมันเรียบ ลักษณะแบบทรงดอกเห็ดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 mm (1.417 in.) รัศมีส่วนโค้งที่ผิวหน้าเท่ากับ 25 mm (0.984 in.) รัศมีส่วนโค้งที่ขอบเท่ากับ 4 mm (0.157 mm) ความหนาของหัวดอกเห็ด 13 mm (0.512 in.) มีลักษณะดังรูปที่ 3.12 และ 3.13

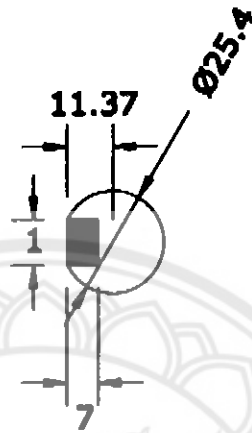


รูปที่ 3.12 แบบอิเล็กโตรดทรงดอกเห็ด



รูปที่ 3.13 อิเล็กโตรดทรงดอกเห็ด

ตามมาตรฐาน IEC 156 อิเล็กโทรลิตทำด้วยสแตนเลสผิวมันเรียบลักษณะแบบทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm (1 in.) มีลักษณะดังรูปที่ 3.14 และ 3.15 แต่เนื่องจากเกิดปัญหาในการกลึงจึงมีความจำเป็นต้องใช้อิเล็กโทรลิตทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm เล็กกว่ามาตรฐาน ICE 156



รูปที่ 3.14 แบบอิเล็กโทรลิตทรงกลม

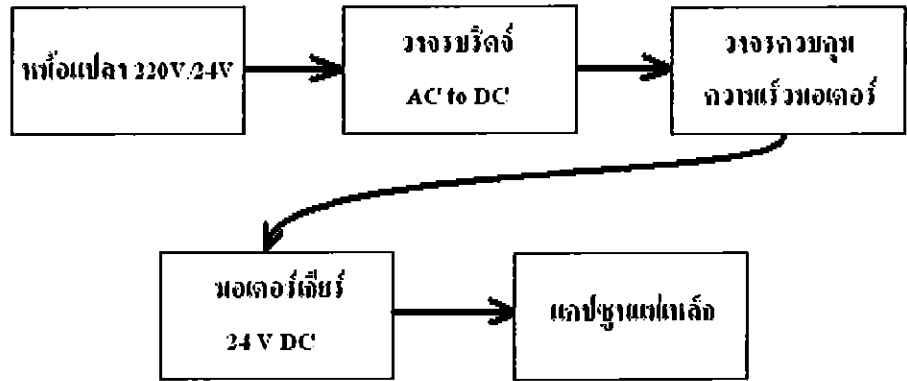


รูปที่ 3.15 อิเล็กโทรลิตทรงกลมที่ใช้ในการทดลอง

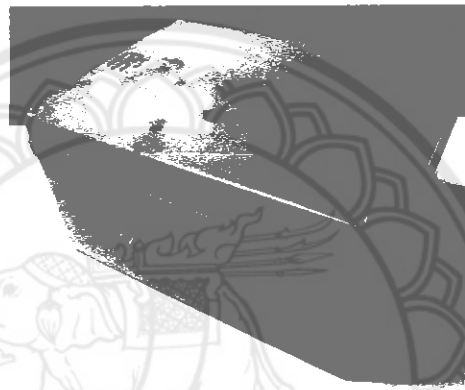
### 3.4 ชุดกวนน้ำมัน

ชุดกวนน้ำมันประกอบด้วย วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง, วงบริดจ์ไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์เกียร์ 24 V DC, หม้อแปลง 24 V และแกนชูลแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.16-3.18





รูปที่ 3.16 บล็อกไดอะแกรมการทำงานชุดกวนน้ำมัน



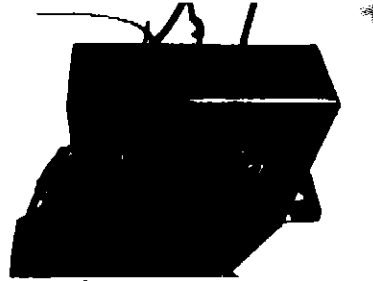
รูปที่ 3.17 ชุดกวนน้ำมัน



รูปที่ 3.18 อุปกรณ์ภายในชุดกวนน้ำมัน

### 3.4.1 หม้อแปลง 24 V

แปลงแรงดันไฟฟ้าขนาด 220 V AC เป็น 24 V AC



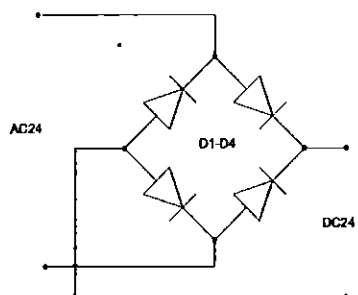
รูปที่ 3.19 หม้อแปลง 24V

### 3.4.2 บริดจ์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Bridge)

การเปลี่ยนแรงดัน 24 V AC ให้เป็น 24 V DC โดยอาศัยวงจรบริดจ์ ขนาด 0-30 V 1 A เพื่อจ่ายไฟให้กับวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ DC จากรูปที่ 3.20 เป็นชุดวงจรเร็กทูลเตอร์ เนื่องจากเรามีชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ DC เราจึงใช้เฉพาะวงจรบริดจ์ดังรูปที่ 3.21 เพื่อการแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง



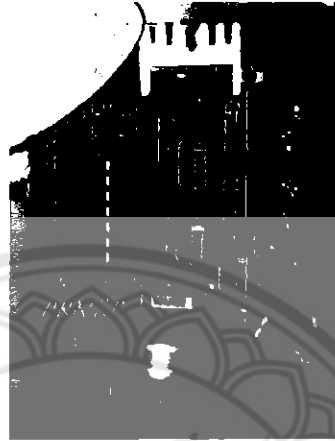
รูปที่ 3.20 แผงวงจรเร็กทูลเตอร์



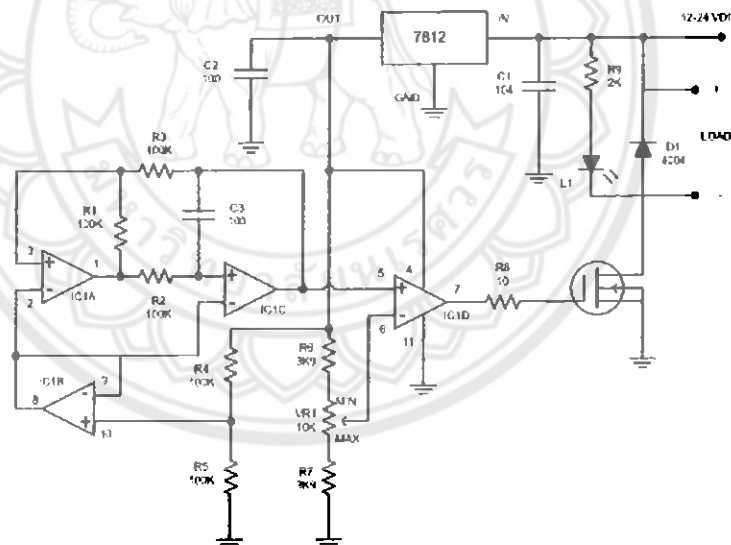
รูปที่ 3.21 วงจรบริดจ์

### 3.4.3 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ DC

วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ DC นี้ ใช้การควบคุมแบบ เปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์ (pulse width modulator) สามารถใช้งานกับแรงดันตั้งแต่ 12-24 โวลต์ ใช้งานกับโหลดได้ถึง 10 A หรือมากกว่าขึ้นอยู่กับมอเตอร์ที่ใช้ ความถี่ของพัลส์ 100 Hz ดังรูปที่ 3.22 และ 3.23



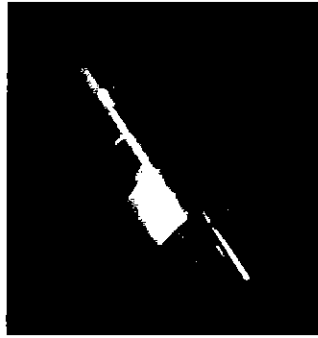
รูปที่ 3.22 ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์



รูปที่ 3.23 วงจรปรับความเร็วมอเตอร์ DC

### 3.4.4 มอเตอร์เกียร์ 24 V DC

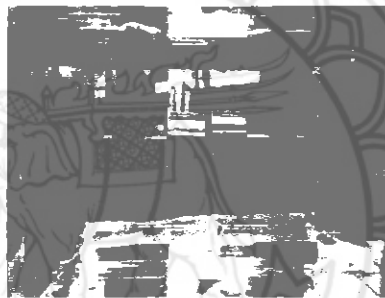
มอเตอร์เกียร์ 24 V DC ใช้สำหรับหมุนแม่เหล็ก โดยแม่เหล็กจะไปทำการเหนี่ยวนำ แลปชุดแม่เหล็กที่อยู่ในด้วยทดสอบน้ำมันหมุนตาม ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 มอเตอร์เกียร์ 24 V DC

### 3.4.5 แคลปซูลแม่เหล็ก

แคลปซูลแม่เหล็กจะหมุนภายในด้วยทดสอบน้ำมัน โดยการเหนี่ยวนำจากแม่เหล็กที่ตั้งอยู่ กับมอเตอร์เกียร์ในชุดควบน้ำมัน เพื่อทำการควบน้ำมันในด้วยทดสอบ ดังรูปที่ 3.25



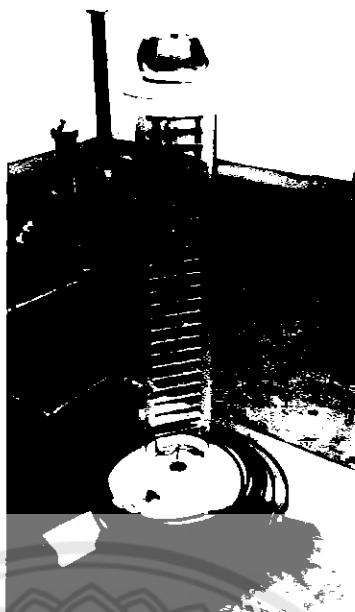
รูปที่ 3.25 แคลปซูลแม่เหล็ก

### 3.4.6 การทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. จ่ายไฟขนาด 220 V ให้หม้อแปลง แปลงไฟเป็น 24 V
2. แรงดันขนาด 24 V AC จะเข้าไปยัง วงจรบริดจ์เพื่อทำการแปลง AC to DC
3. แรงดันขนาด 24 V DC จะเข้าไปยัง ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ เพื่อทำการควบคุมความเร็วมอเตอร์ตามความเร็วที่ต้องการ
4. การปรับความเร็วการหมุนของแคลปซูลสามารถทำได้โดยปรับค่าความต้านทาน VR, 10 k $\Omega$

### 3.5 โวลต์เตจดีไวเดอร์

โวลต์เตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์วัดแรงดัน ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงๆ ออกเป็นส่วนแรงดันต่ำพอที่จะใช้โวลต์มิเตอร์ ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 โวลต์เดจดีไวเซอร์ 100 kV

สำหรับอุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกต่อเป็นวงจรดังรูปที่ 3.1 เพื่อไว้ทดสอบการเบรกคาน้ำของน้ำมัน ในการทดลองและผลการทดสอบของบทที่ 4 ต่อไป



## บทที่ 4

### การทดสอบและผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงโดยใช้อิเล็กโตรดที่สามารถปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดได้ รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดสอบความเป็นฉนวนของอิเล็กโตรดทั้ง 3 แบบ และชุดกวนน้ำมัน

การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว เป็นการทดสอบเพื่อเป็นเกณฑ์ตัดสิน โดยใช้มาตรฐานทั้งหมด 3 มาตรฐานคือ มาตรฐาน ANSI/ASTM D877 Standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating liquids using disk electrodes, มาตรฐาน ANSI/ASTM D1816 Standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating oils using of Petroleum origin using VDE electrodes และมาตรฐาน IEC156 International electro technical commission โดยมี การทดสอบ 2 แบบ คือ แบบที่ไม่มีชุดกวนน้ำมัน และแบบที่มีชุดกวนน้ำมัน

#### 4.1 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877

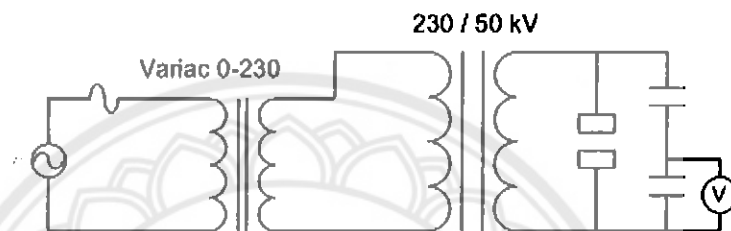
เป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาว่า การหาแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว อิเล็กโตรด จะต้องทำด้วยสแตนเลส ลักษณะแบบจานกลม เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM/ASTM D877 หรือไม่ โดยมาตรฐานได้กล่าวไว้ว่า ให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากศูนย์และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นไปในอัตรา  $3\text{kV/s} \pm 20\%$  ในความถี่ที่ย่าน 50 Hz ในการทดสอบทำการปรับแรงดันโดยมีมือในการปรับ

##### 4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 220 V 1 ชุด
2. โวลต์มิเตอร์ 1 ตัว
3. ตัวปรับแรงดันไฟฟ้า 1 ชุด
4. ชุดกวนน้ำมัน 1 ชุด
5. โวลต์เดจิติไวเคอร์ขนาด 100 kV
6. น้ำมันใช้แล้ว ระดับแรงดัน < 69 kV
7. อิเล็กโตรดทรงกระบอก
8. เทอร์โมมิเตอร์ 1 อัน
9. เครื่องวัดความชื้น 1 อัน

#### 4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. วัดอุณหภูมิของน้ำมันบริสุทธิ์ และความชื้นภายในห้อง แล้วบันทึกค่า
2. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดปรับแรงดันไฟฟ้า และใช้โวลต์มิเตอร์ วัดแรงดันของชุดปรับแรงดันไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.1
3. เริ่มทำการเพิ่มแรงดัน โดยชุดปรับแรงดันไฟฟ้า
4. บันทึกค่าแรงดันที่เกิดเบรกดาวน
5. ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 2-4 จำนวน 5 ครั้ง บันทึกผลลงในตารางที่ 4.1



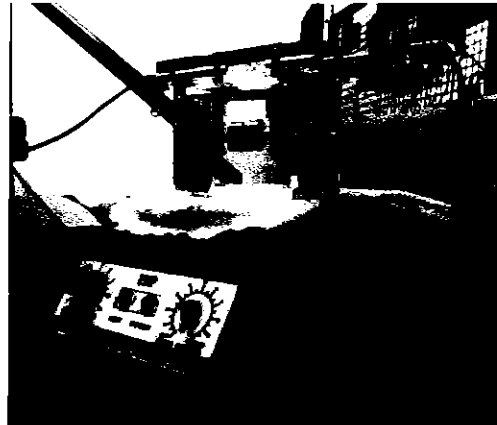
รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877



รูปที่ 4.2 อุปกรณ์การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877



รูปที่ 4.3 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877



รูปที่ 4.4 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877แบบมีชุดกวนน้ำมัน

#### 4.1.3 ผลการทดสอบ

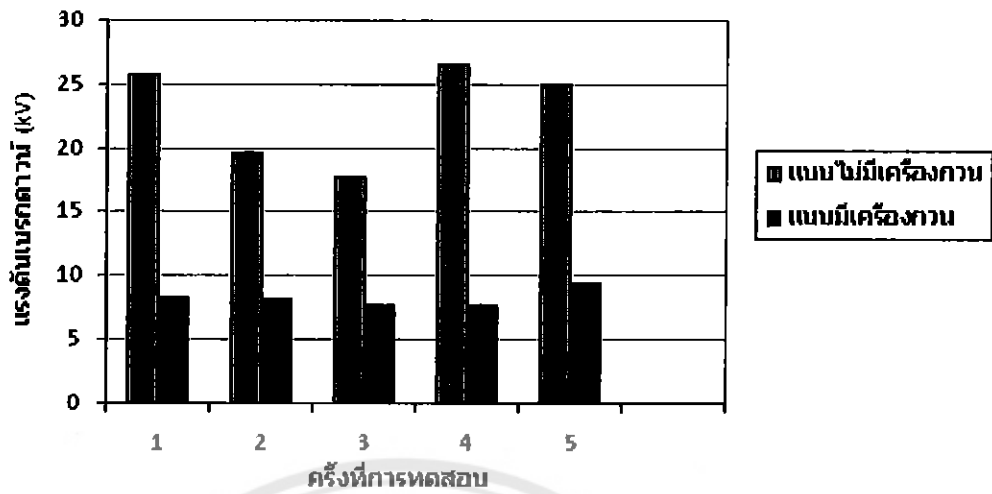
จากการทดสอบเบรคความถี่แบบ ไม่มีชุดกวนและมีชุดกวน อย่างละ 5 ครั้ง ผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยสามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรคความถี่ทั้ง 2 แบบดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.1 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความถี่ของน้ำมันที่มีการปนเปื้อนตามมาตรฐาน ASTM D877 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด 2.5 mm

ลำดับ การ ทดสอบ	อุณหภูมิห้อง (°C)	อุณหภูมิ น้ำมัน (°C)	ความชื้นภายใน ห้อง	แรงดันเบรคความถี่น้ำมันบริสุทธิ์ (kV)	
				ไม่มีเครื่องกวน	มีเครื่องกวน
1	25	25	65	25.70	8.25
2	25	25	65	19.60	8.23
3	25	25	65	17.70	7.69
4	25	25	65	26.50	7.68
5	25	25	65	25.00	9.37
ค่าเฉลี่ย				22.90	8.24



กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันของมาตรฐาน ASTM D877



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาว์ของมาตรฐาน ASTM D877

ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาว์ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์จากสมการที่ 2.62

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{25.70 + 19.60 + 17.70 + 26.50 + 25}{5} \\ &= 22.9 \text{ kV}\end{aligned}$$

และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดันเบรกดาว์ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์จากสมการที่ 2.63

$$\begin{aligned}S &= \sqrt{\frac{1}{(5-1)} [2685.19 - 2622.05]} \\ &= 3.97\end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราส่วนของ  $S/\bar{x}$  ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์คือ  $3.97/22.9 = 0.1733$  จากตารางที่ 4.1 ซึ่งอัตราส่วนของ  $S/\bar{x}$  เกิน 0.1 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของ แรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์ทั้ง 5 ครั้ง ที่ทดสอบมาได้เกินหลักเกณฑ์ไป โดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ  $((0.1733-0.1)/0.1) \times 100 = 73.3\%$  ดังตารางที่ 4.1 และแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาว์ดังรูปที่ 4.5

ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาว์ของฉนวนเหนือน้ำมันแบบมีเครื่องกวนจากสมการที่ 2.62

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{8.25 + 8.23 + 7.69 + 7.68 + 9.37}{5} \\ &= 8.244 \text{ kV}\end{aligned}$$

และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดันเบรกควาน์ของฉนวนเหลวน้ำมันบริสุทธิ์แบบมีเครื่องกวนจากสมการที่ 2.63

$$S = \sqrt{\frac{1}{(5-1)} [341.70 - 339.82]} \\ = 0.47$$

ดังนั้นอัตราส่วนของ  $S/\bar{x}$  ของฉนวนเหลวน้ำมันบริสุทธิ์ คือ  $0.47/8.24 = 0.057$  ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM D877

#### 4.1.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดสอบไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D877 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอาจเกิดจาก เปรียบเทียบกับตารางที่ 4.4 น้ำมันเป็นแบบใช้แล้วระดับแรงดัน < 69 kV

1. จากการเกิดเบรกควาน์แต่ละครั้งจะทำให้ผิวของอิเล็กโตรดเสียหาย เกิดเขม่าเกาะที่หัวอิเล็กโตรด และยังพบรอยขรุขระที่ผิวของอิเล็กโตรด นอกจากนั้นความเป็นฉนวนของฉนวนเหลวน้ำมันที่มีค่าลดลง เนื่องจากมีก๊าซออกซิเจนปนอยู่ทำให้ค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวน้ำมันบริสุทธิ์น้อยกว่า 1 MV/cm ซึ่งส่งผลให้ค่าแรงดันเบรกควาน์ต่ำลง

2. การปรับแรงดันไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1816 ที่อัตรา 3 kV/s จึงทำให้ค่าแรงดันเบรกควาน์เกิดความผิดพลาดเนื่องจากการปรับเร็วหรือช้า ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าไม่คงที่

3. น้ำมันหม้อแปลงที่นำมาทดลองอาจมีการปนเปื้อนเนื่องจากภาชนะที่บรรจุ และน้ำมันหม้อแปลงอาจจะมีการดูดซับความชื้นในระหว่างการทดลอง

4. การปรับระยะห่างของอิเล็กโตรดอาจไม่ได้ตามมาตรฐาน  $2.5 \pm 0.01$  mm

#### 4.2 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D1816

เป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาว่า การหาแรงดันเบรกควาน์ของฉนวนเหลวน้ำมัน อิเล็กโตรดจะต้องทำด้วยสแตนเลส ลักษณะแบบจานกลม เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM/ASTM D1816 หรือไม่

โดยมาตรฐานได้กล่าวไว้ว่า ให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากศูนย์และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นไปในอัตรา  $0.5 \text{ kV/s} \pm 20\%$  ในความถี่ที่ย่าน 50 Hz ในการทดสอบทำการปรับแรงดันโดยใช้มือในการปรับ

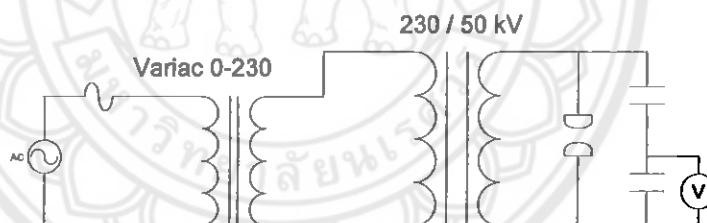
##### 4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 220 V 1 ชุด

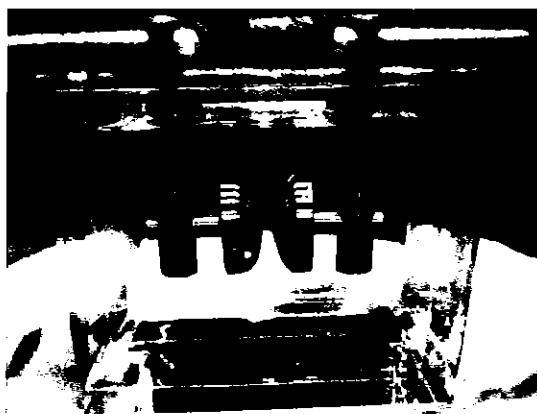
2. โวลต์มิเตอร์ 1 ตัว
3. ตัวปรับแรงดันไฟฟ้า 1 ชุด
4. ชุดกวนน้ำมัน 1 ชุด
5. โวลต์เตจดีไวเซอร์ขนาด 100 kV
6. น้ำมันใช้แล้ว ระดับแรงดัน < 69 kV
7. อิเล็กโตรดทรงคอกเหล็ก
8. เทอร์โมมิเตอร์ 1 อัน
9. เครื่องวัดความชื้น 1 อัน

#### 4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. วัดอุณหภูมิของน้ำมันบริสุทธิ์ และความชื้นภายในห้อง แล้วบันทึกค่า
2. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดปรับแรงดันไฟฟ้า และใช้โวลต์มิเตอร์ วัดแรงดันของชุดปรับแรงดันไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.6
3. เริ่มทำการเพิ่มแรงดัน โดยชุดปรับแรงดันไฟฟ้า
4. บันทึกค่าแรงดันที่เกิดเบรกดาวน์
5. ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 2-4 จำนวน 5 ครั้ง บันทึกผลลงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.6 วงจรทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D1816



รูปที่ 4.7 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D1816



รูปที่ 4.8 การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D1816 แบบมีชุดกวนน้ำมัน

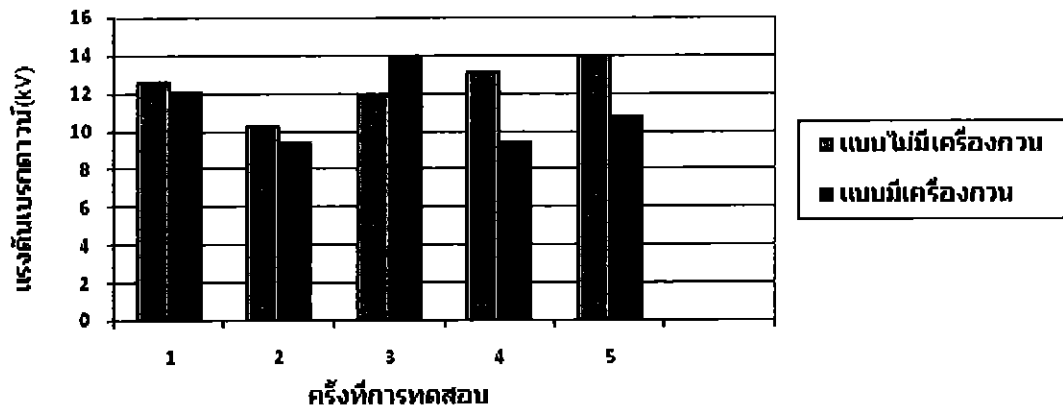
#### 4.2.3 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบเบรคความถี่แบบไม่มีชุดกวนและมีชุดกวน อย่างละ 5 ครั้ง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2 โดยสามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรคความถี่ทั้ง 2 แบบดังรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.2 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความถี่ของน้ำมันที่มีการปนเปื้อนตามมาตรฐาน ASTM D1816 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 mm

ลำดับ การ ทดสอบ	อุณหภูมิห้อง (°C)	อุณหภูมิ น้ำมัน (°C)	ความชื้นภายใน ห้อง	แรงดันเบรคความถี่น้ำมันบริสุทธิ์ (kV)	
				ไม่มีเครื่องกวน	มีเครื่องกวน
1	25	25	65	12.60	12.08
2	25	25	65	10.30	9.43
3	25	25	65	11.90	13.98
4	25	25	65	13.10	9.38
5	25	25	65	14.00	10.76
ค่าเฉลี่ย				12.38	11.13

กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันของมาตรฐาน ASTM D1816



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกความของมาตรฐาน ASTM D1816

ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกความของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์จากสมการที่ 2.62

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{12.6+10.3+11.9+13.1+14}{5} \\ &= 12.38 \text{ kV}\end{aligned}$$

และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดันเบรกความของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์จากสมการที่ 2.63

$$\begin{aligned}S &= \sqrt{\frac{1}{(5-1)} [774.07 - 766.32]} \\ &= 1.39\end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราส่วนของ  $S/\bar{x}$  ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์คือ  $1.39/12.38 = 0.1122$  จากตารางที่ 4.2 ซึ่งอัตราส่วนของ  $S/\bar{x}$  เกิน 0.1 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของ แรงดันไฟฟ้าเบรกความทั้ง 5 ครั้ง ที่ทดสอบมาได้เกินหลักเกณฑ์ไป โดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ  $((0.1122-0.1)/0.1) \times 100 = 12.3\%$  ดังตารางที่ 4.2 และแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกความดังรูปที่ 4.10

ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกความของฉนวนเหนือน้ำมันแบบมีเครื่องกวนจากสมการที่ 2.62

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{12.08+9.43+13.98+9.38+10.76}{5} \\ &= 11.13 \text{ kV}\end{aligned}$$

และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดันเบรกคาว์ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์แบบมีเครื่องกวนจากสมการที่ 2.63

$$S = \sqrt{\frac{1}{(5-1)}[634.05 - 619.38]} \\ = 1.91$$

ดังนั้นอัตราส่วนของ  $S/\bar{x}$  ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์แบบมีเครื่องกวนคือ  $1.91/11.13 = 0.1716$  จากตารางที่ 4.2 ซึ่งอัตราส่วนของ  $S/\bar{x}$  เกิน 0.1 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าเบรกคาว์ทั้ง 5 ครั้งทดสอบมาได้เกินหลักเกณฑ์ไป โดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ  $((0.1716-0.1)/0.1) \times 100 = 71.60\%$  ดังตารางที่ 4.2 และแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกคาว์ดังรูปที่ 4.10

#### 4.2.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากกรณีผลการทดสอบไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ANSI/ASTM D1816 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอาจเกิดจาก เปรียบเทียบกับตารางที่ 4.4 น้ำมันเป็นแบบใช้แล้วระดับแรงดัน < 69 kV

1. จากการเกิดเบรกคาว์แต่ละครั้งจะทำให้ผิวของอิเล็กโตรดเสียหาย เกิดเขม่าเกาะที่หัวอิเล็กโตรด และยังพบรอยขรุขระที่ผิวของอิเล็กโตรด เช่นเดียวกับกรณีหัวข้อที่ 4.1
2. การปรับระยะห่างของอิเล็กโตรดอาจไม่ได้ตามมาตรฐาน  $2 \pm 0.03$  mm
3. การปรับแรงดันไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1816 ที่อัตรา 0.5 kV/s จึงทำให้ค่าแรงดันเบรกคาว์เกิดความผิดพลาด
4. น้ำมันหม้อแปลงที่นำมาทดลองอาจมีการปนเปื้อนเนื่องจากภาชนะที่บรรจุ และน้ำมันหม้อแปลงอาจจะมีการดูดซับความชื้นในระหว่างการทดลอง

### 4.3 การทดสอบตามมาตรฐาน IEC156

เป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาว่า การหาแรงดันเบรกคาว์ของฉนวนเหนือน้ำมัน อิเล็กโตรดจะต้องทำด้วยสแตนเลส ลักษณะแบบจานกลม เป็นไปตามมาตรฐาน IEC156 หรือไม่

โดยมาตรฐานได้กล่าวไว้ว่า ให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากศูนย์และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นไปในอัตรา  $2 \text{ kV/s} \pm 20\%$  ในความถี่ที่ย่าน 50 Hz ในการทดสอบทำการปรับแรงดันโดยใช้มือในการปรับ

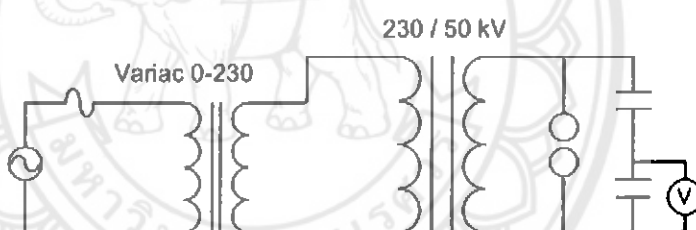
#### 4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 220 V 1 ชุด
2. โวลต์มิเตอร์ 1 ตัว

3. ตัวปรับแรงดันไฟฟ้า 1 ชุด
4. ชุดกวนน้ำมัน 1 ชุด
5. โวลต์เตจคิไวเคอร์ขนาด 100 kV
6. น้ำมันใช้แล้ว ระดับแรงดัน < 69 kV
7. อิเล็กโตรดทรงกลม
8. เทอร์โมมิเตอร์ 1 อัน
9. เครื่องวัดความชื้น 1 อัน

#### 4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. วัดคุณสมบัติของน้ำมันบริสุทธิ์ และความชื้นภายในห้อง แล้วบันทึกค่า
2. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดปรับแรงดันไฟฟ้า และใช้โวลต์มิเตอร์ วัดแรงดันของชุดปรับแรงดันไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.10
3. เริ่มทำการเพิ่มแรงดันโดยชุดปรับแรงดันไฟฟ้า
4. บันทึกค่าแรงดันที่เกิดเบรกดาวน์
5. ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 2-4 จำนวน 5 ครั้ง บันทึกผลลงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.10 วงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC156



รูปที่ 4.11 การทดสอบตามมาตรฐาน IEC156



รูปที่ 4.12 การทดสอบตามมาตรฐาน IEC156 แบบมีชุดกวนน้ำมัน

#### 4.3.3 ผลการทดสอบ

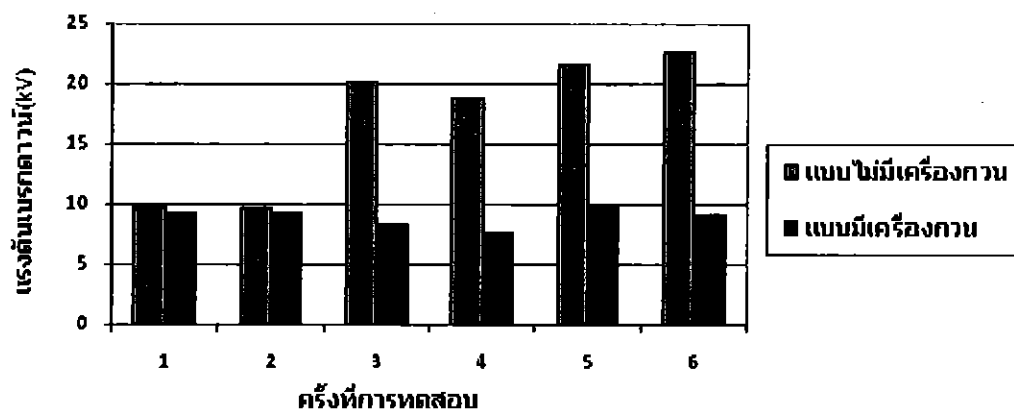
จากการทดสอบเบรกคาวน์แบบไม่มีชุดกวนและมีชุดกวน อย่างละ 6 ครั้ง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 โดยสามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกคาวน์ทั้ง 2 แบบดังรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.3 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกคาวน์ของน้ำมันที่มีการปนเปื้อนตามมาตรฐาน IEC156 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด 2.5

ลำดับ การ ทดสอบ	อุณหภูมิห้อง (°C)	อุณหภูมิ น้ำมัน (°C)	ความชื้นภายใน ห้อง	แรงดันเบรกคาวน์น้ำมันบริสุทธิ์ (kV)	
				ไม่มีเครื่องกวน	มีเครื่องกวน
1	25	25	65	9.80	9.39
2	25	25	65	9.60	9.38
3	25	25	65	20.10	8.31
4	25	25	65	18.80	7.66
5	25	25	65	21.70	9.82
6	25	25	65	22.60	9.25
ค่าเฉลี่ย				17.1	8.97



กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันของมาตรฐาน IEC156



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ของมาตรฐาน IEC156

ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์จากสมการที่ 2.62

$$\bar{X} = \frac{9.80 + 9.60 + 20.10 + 18.80 + 21.70 + 22.60}{6}$$

$$= 17.1 \text{ kV}$$

และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์จากสมการที่ 2.63

$$S = \sqrt{\frac{1}{(6-1)} [1927.3 - 1754.4]}$$

$$= 5.88$$

ดังนั้นอัตราส่วนของ  $S/\bar{x}$  ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์ คือ  $5.88/17.1 = 0.3438$  ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ IEC 156 ซึ่งผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.3 และแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ดังรูปที่ 4.13

ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหนือน้ำมันแบบมีเครื่องกวนจากสมการที่ 2.62

$$\bar{X} = \frac{9.39 + 9.38 + 8.31 + 7.66 + 9.82 + 9.25}{6}$$

$$= 8.97 \text{ kV}$$

และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดันเบรกคาว์ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์แบบมี  
เครื่องกวนจากสมการที่ 2.63

$$S = \sqrt{\frac{1}{(6-1)}[485.87 - 482.76]}$$

$$= 0.79$$

ดังนั้นอัตราส่วนของ  $S/\bar{x}$  ของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์ คือ  $0.79/8.97 = 0.09$  ซึ่งถือว่าอยู่ใน  
เกณฑ์มาตรฐานของ IEC 156 ซึ่งผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.3 และแสดงการเปรียบเทียบค่า  
แรงดันเบรกคาว์ดังรูปที่ 4.13

#### 4.3.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอาจเกิดจาก  
เปรียบเทียบกับตารางที่ 4.4 น้ำมันเป็นแบบใช้แล้วระดับแรงดัน < 69 kV

1. จากการเกิดเบรกคาว์แต่ละครั้งจะทำให้ผิวของอิเล็กโตรดเสียหาย เกิดเขม่าเกาะที่หัว  
อิเล็กโตรด และยังพบรอยขรุขระที่ผิวของอิเล็กโตรด เช่นเดียวกับกรณีหัวข้อที่ 4.1

2. ขนาดของอิเล็กโตรด ไม่ได้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 156

3. การทดสอบเบรกคาว์แต่ละครั้ง ไม่ได้ทำการหยุดพักการทดสอบอย่างน้อยครั้งละ 2  
นาที

4. การปรับระยะห่างของอิเล็กโตรดอาจไม่ได้ตามมาตรฐาน  $2.5 \pm 0.05$  mm

5. การปรับแรงดันไม่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC156 ที่อัตรา 2 kV/s จึงทำให้ค่าแรงดัน  
เบรกคาว์เกิดความผิดพลาด

6. น้ำมันหม้อแปลงที่นำมาทดลองอาจมีการปนเปื้อนเนื่องจากภาชนะที่บรรจุ และน้ำมัน  
หม้อแปลงอาจจะมีการดูดซับความชื้นในระหว่างการทดลอง

จึงส่งผลทำให้ค่าการทดสอบแรงดันเบรกคาว์ของมาตรฐาน IEC 156 มีค่าที่ต่ำกว่า  
ความจริง

#### 4.4 สรุปผลการวิเคราะห์

จากการทดสอบทั้ง 3 มาตรฐานซึ่งมีค่าแตกต่างกันออกไป สามารถสรุปผลการทดสอบ  
โดยแยกเป็นแต่ละกรณีที่เปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกคาว์เฉลี่ยของฉนวนเหนือน้ำมันบริสุทธิ์แบบ  
ไม่มีขุคววนและแบบที่มีขุคววน พร้อมทั้งสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.4-4.5 และ  
รูปที่ 4.14

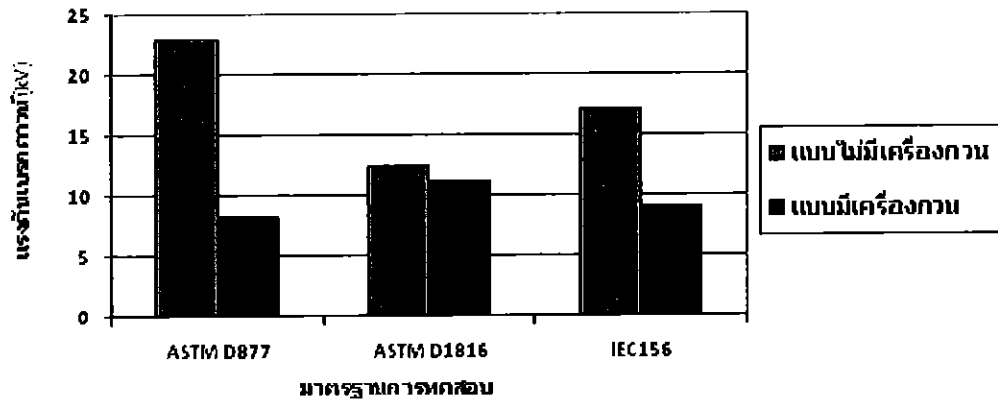
ตารางที่ 4.4 การทดสอบค่าแรงดันเบรกความถี่บำรุงรักษาน้ำมันเปรียบเทียบกับค่าที่ทดสอบ

มาตรฐานการทดสอบ	ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด (mm)	ค่าแรงดันเบรกความถี่มาตรฐาน (kV)	ค่าแรงดันเบรกความถี่ที่ทดสอบ (kV)	
			แบบไม่มีชุกกวน	แบบมีชุกกวน
ASTM D877	2.5	26	22.90	8.24
ASTM D1816	2	20	12.38	11.13
IEC156	2.5	20	17.1	8.97

ตารางที่ 4.5 ตารางสรุปผลการทดสอบทั้ง 3 มาตรฐาน

มาตรฐานการทดสอบ		แบบไม่มีชุกกวน	แบบมีชุกกวน	สรุปผลการวิเคราะห์
ASTM D877	$\bar{X}$ (kV)	22.90	8.24	แรงดันเบรกความถี่มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน
	$S$	3.97	0.47	
	$S/\bar{X}$	0.173	0.057	
	ความคลาดเคลื่อน	73%	-	
ASTM D1816	$\bar{X}$ (kV)	12.38	11.13	แรงดันเบรกความถี่มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน
	$S$	1.39	1.91	
	$S/\bar{X}$	0.112	0.172	
	ความคลาดเคลื่อน	12%	71%	
IEC 156	$\bar{X}$ (kV)	17.1	8.97	แรงดันเบรกความถี่มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน
	$S$	5.88	0.79	
	$S/\bar{X}$	0.344	0.09	
	ความคลาดเคลื่อน	-	-	

กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกควานซ์ของฉนวนเหลว



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกควานซ์ของฉนวนเหลว

ผลสรุปการทดลองแสดงให้เห็นว่า

1. แรงดันเบรกควานซ์เกินมาตรฐาน
2.  $S/\bar{X}$  มีชุดคววนส่วนใหญ่ไม่เกินค่ามาตรฐาน แสดงว่า การกวนมีผลดีต่อการกระจายโมเลกุลในน้ำมัน ความเครียดของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอขึ้น ส่งผลให้ผลการทดลองมีค่าความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น
3. จากการทดลองค่าแรงดันเบรกควานซ์ที่ได้นั้นเกินจากค่าของสนามไฟฟ้า ASTM D877 อิเล็กโตรดทรงกระบอก มีค่าสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ จึงทำให้ค่าเบรกควานซ์มีค่าสูง IEC156 อิเล็กโตรดทรงกลมสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอมากที่สุด ในอิเล็กโตรดทั้ง 3 แบบ แต่ถ้าเทียบกับ ASTM D1816 อิเล็กโตรดทรงดอกเห็ด ค่าสนามไฟฟ้าสนามสม่ำเสมอว่าทรงกลมแต่ระยะแกปนน้อยกว่า จึงทำให้ค่าเบรกควานซ์มีค่าน้อยกว่าอิเล็กโตรดทรงกลม

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดสอบและปัญหา

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการทดสอบและปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น โครงการนี้ซึ่งได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ชุดปรับแรงดันและการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกคาวน์ของฉนวนเหลว

#### 5.1 สรุปผลการทดสอบและปัญหา

แรงดันเบรกคาวน์เกินมาตรฐาน  $S/\bar{X}$  มีชุดกวนส่วนใหญ่ไม่เกินค่ามาตรฐาน แสดงว่าการกวนมีผลดีต่อการกระจายโมเลกุลในน้ำมัน ความเครียดของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอขึ้น ส่งผลให้ผลการทดลองมีค่าความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้นและจากการทดลองค่าแรงดันเบรกคาวน์ที่ได้นั้นเกินจากค่าของสนามไฟฟ้า ASTM D877 อิเล็กโตรดทรงกระบอก มีค่าสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ จึงทำให้ค่าเบรกคาวน์มีค่าสูง IEC156 อิเล็กโตรดทรงกลมสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอมากที่สุด ในอิเล็กโตรดทั้ง 3 แบบ แต่ถ้าเทียบกับ ASTM D1816 อิเล็กโตรดทรงคอกเห็ด ค่าสนามไฟฟ้าสนามสม่ำเสมอว่าทรงกลมแต่ระยะแคบน้อยกว่า จึงทำให้ค่าเบรกคาวน์มีค่าน้อยกว่าอิเล็กโตรดทรงกลม

#### 5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

1. จากการทดลองไม่สามารถปรับแรงดันได้ตามที่ต้องการ 3 kV/s จึงทำให้การทดลองอาจจะเกิดผิดพลาด เนื่องจากตัวปรับแรงดันที่ต้องใช้มือในการปรับค่าแรงดัน
2. เกิดจากการเบรกคาวน์แต่ละครั้งทำให้ผิวของอิเล็กโตรดเสียหาย เกิดเขม่าเกาะที่หัวอิเล็กโตรด และยังเกิดรอยขรุขระที่ผิวของอิเล็กโตรด
3. ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรด โดยฟองก๊าซนั้นจะขยายตัวยึดในแนวสนามไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานศักย์ที่เกิดขึ้น ในฉนวนเหลวน้ำมันบริสุทธิ์ และ ฉนวนเหลวน้ำมันปนน้ำ มีค่าเท่ากับ 0.805 kV/cm และ 0.321 kV/cm ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของฉนวนเหลวน้ำมันหม้อแปลง
4. เกิดเขม่าทำให้ค่าแรงดันเบรกคาวน์ไม่คงที่
5. การทดสอบแรงดันเบรกคาวน์แต่ละครั้ง ไม่ได้ทำการหยุดพักการทดสอบอย่างน้อยครั้งละ 2 นาที
6. ขนาดอิเล็กโตรดไม่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC156

7. เกิดจากแรงสั่นสะเทือนขณะทำการทดสอบ ส่งผลทำให้ความคลาดเคลื่อนระยะห่างของอิเล็กโตรดของฉนวนเหลวน้ำมันปนน้ำที่มีค่ามากกว่า  $2 \pm 0.03$  mm ทำให้ค่าแรงดันเบรกคาวน์ของฉนวนเหลวน้ำมันปนน้ำมีค่ามากกว่าความเป็นจริง

### 5.3 แนวทางการแก้ไข

1. ปัญหา : อิเล็กโตรดไม่ได้ตามมาตรฐานที่ตั้งไว้ เช่น มาตรฐาน ASTM D877 อิเล็กโตรดทรงกระบอก ผิวหน้าของอิเล็กโตรดไม่เรียบ มีรอยเป็นวง มาตรฐาน ASTM D1816 อิเล็กโตรดทรงกลม ผิวหน้าไม่เรียบ โคน และ มาตรฐาน IEC156 อิเล็กโตรดทรงกลม ขนาดของอิเล็กโตรดไม่ได้ตามมาตรฐาน

แนวทางการแก้ไข : ต้องหาสถานที่กลึงที่มี เครื่องกลึง CNC ระบบ 3 มิติ ซึ่งมีความแม่นยำสูงในการกลึง เพื่อป้องกันความผิดพลาดอีกครั้ง

2. ปัญหา : ผลของการทดสอบค่าแรงดันเบรกคาวน์ที่ได้ พบค่าความคลาดเคลื่อนที่สูง อาจมีสาเหตุมาจากการเก็บน้ำมันที่ใช้ทดสอบ

แนวทางการแก้ไข : ภาชนะที่ใช้บรรจุต้องไม่มีการปนเปื้อน น้ำมันที่ใช้ต้องไม่มีการสัมผัสอากาศมากเกินไปเพื่อป้องกันความชื้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ดร.ตำราย สัจจ์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. คณะวิศวกรรมศาสตร์ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2528.
- [2] ANSI/ASTM “standard test method for dielectric breakdown voltage of liquids using disk electrodes” ANSI/ASTM D877. 2007.
- [3] ANSI/ASTM “standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating oils using of petroleum origin using VDE electrodes” ANSI/ASTM D1816. 2004.
- [4] IEC. “Insulating Liquid - Determination of the breakdown voltage at power frequency Test method” IEC156. Second edition. 1995. pp. 5-20.
- [5] ปิฎจพร พูลสุข. พลากร รอทอง. เกรียงไกร อยู่สุภาพ. “การทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนซ์ของฉนวนน้ำมัน” ปรินิพนธ์นิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. มหาวิทยาลัยนเรศวร 2552.