

ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด 50 กิโลโวลต์

50kV AC CAPACITOR VOLTAGE DIVIDER

นายกิตติศักดิ์ เต็มสิริมงคล รหัส 48380339
นางสาวพนิดา อ่อนละมุด รหัส 48380355
นายวิชาญ อ้ายฝอย รหัส 48380364

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
25 พ.ค. 2553
วันที่รับ...../...../.....
เลขทะเบียน..... 1500 7884
เลขเรียกหนังสือ..... กบ 75.๗
มหาวิทยาลัยนเรศวร 2551

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

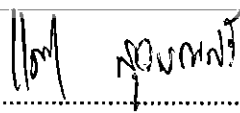
ปีการศึกษา 2551

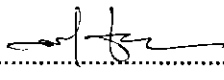


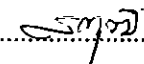
ใบรับรองโครงการวิศวกรรม

หัวข้อโครงการ	ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์
ผู้ดำเนินงานโครงการ	นายกิตติศักดิ์ เต็มสิริมงคล รหัส 48380339 นางสาวพินดา อ่อนละมุด รหัส 48380355 นายวิชาญ อ้ายฝอย รหัส 48380364
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.แคทรียา สุวรรณศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2551

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบรจรัม อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรม


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


.....กรรมการ
(ดร.นิพัทธ์ จันทรมินทร์)


.....กรรมการ
(อาจารย์สราวุฒิ วัฒนวงศ์พิทักษ์)

หัวข้อโครงการ ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด 50 กิโล

โวลต์

ผู้ดำเนินงานโครงการ นายกิตติศักดิ์ เต็มสิริมงคล รหัส 48380339

นางสาวพินิตา อ่อนละมุล รหัส 48380355

นายวิชาญ อ้ายฝอย รหัส 48380364

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.แคทรียา สุวรรณศรี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาดพิกัด 100 และ 50 กิโลโวลต์ และสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาดพิกัด 50 กิโลโวลต์ ตัวแบ่งแรงดันแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือภาคแรงสูงสร้างจากตัวเก็บประจุย่อยแรงสูงขนาดพิกัด 50 กิโลโวลต์ ซึ่งเป็นการนำตัวเก็บประจุชนิดโพลีเอสเตอร์มาต่ออันดับกันบนแผ่นอะลูมิเนียมแต่ละชั้น และส่วนที่สองคือภาคแรงต่ำซึ่งสร้างจากตัวเก็บประจุผสมกันแบบอนุกรมและแบบขนานแล้วนำมาต่อกับภาคแรงสูง การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994)

Project Title 50kV AC Capacitive Voltage Divider

Name Mr. Kittisak Tensirimongkhol ID. 48380339

Miss Panida Oonlamoon ID. 48380355

Mr. Yichan Ayfoi ID. 48380364

Project Advisor Cattareeya Suwanasri, D.Eng

Major Electrical Engineering.

Department Electrical and Computer Engineering.

Academic Year 2008

ABSTRACT

This project aims to design of a 100 and 50 kV and construction of a 50 kV AC capacitive voltage divider and to produce the 50 kV AC capacitive voltage divider. The divider consisting of two main part. The first part is the high voltage part made of a series capacitors as polyester type. They are connected on acrylic sheet of each layer. The second part is the low voltage part made of a combined series and parallel capacitors and then connected with the high voltage part. The test is referenced to IEC 60060 – 2 (1994).

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการในครั้งนี้ คณะผู้จัดทำใคร่ขอแสดงความขอบคุณต่อ ดร.แคทรียา สุวรรณศรี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางการแก้ปัญหาและข้อเสนอแนะต่างๆ ในการจัดทำโครงการนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี พร้อมกันนี้ใคร่ขอขอบคุณต่ออาจารย์ผู้ร่วมประเมินผลโครงการทั้งสองท่านด้วย ที่ประเมินผลโครงการให้ผ่านไปด้วยดี และพร้อมกันนี้ใคร่ขอขอบคุณต่ออาจารย์ สุรัช ฒ สงขลา อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ได้ให้ข้อมูลเสริมในการจัดทำโครงการในครั้งนี้ และพร้อมกันนี้ขอขอบคุณต่อผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกๆ ท่านที่ช่วยให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



ผู้จัดทำ
นายกิตติศักดิ์ เต็มสิริมงคล
นางสาวพนิดา อ่อนละมุด
นายวิชาญ อ้ายฝอย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช

บทที่ 1 บทนำ

1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2	วัตถุประสงค์.....	1
1.3	ขอบเขตของงาน.....	2
1.4	ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5	แผนการดำเนินงาน.....	3
1.6	งบประมาณที่ใช้ในการดำเนินงาน.....	4

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

2.1	การวัดแรงดันสูงกระแสสลับด้วยตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า.....	5
2.2	หลักการของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า.....	6
2.3	ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวต้านทานไฟฟ้า.....	7
2.4	ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า.....	8
2.5	การรนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยก๊าซ SF ₆	15
2.6	การรนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยอากาศ.....	20
2.7	การทดสอบเทียบมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994).....	20

บทที่ 3 การออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

3.1	คุณลักษณะสมบัติที่กำหนด.....	23
3.2	การออกแบบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าขนาดพิกัด 100 kV.....	23
3.3	การออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าขนาดพิกัด 50 kV.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การฉนวนภายในของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า.....	33
3.5 โครงสร้างภายนอกของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า.....	34
3.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า.....	39
บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล	
4.1 บทนำทั่วไป.....	41
4.2 การทดสอบกับแรงดันสูงกระแสสลับ ขนาดพิกัด 1 – 10 kV.....	41
4.3 การทดสอบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดพิกัด 180 – 220 V.....	45
บทที่ 5 บทสรุป	
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	52
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำปฏิญาณนิพนธ์.....	53
5.3 แนวทางการแก้ไขปัญหา.....	53
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	53
เอกสารอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก ก ตารางการแปลงหน่วย.....	55
ภาคผนวก ข การออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ขนาดพิกัด 100 kV.....	56
ภาคผนวก ค การทดสอบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า ขนาดพิกัด 150 kV.....	61
ภาคผนวก ง มาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994).....	62
ภาคผนวก จ สถานที่จัดซื้ออุปกรณ์.....	65
ภาคผนวก ฉ-สถานที่ทดสอบ.....	66
ประวัติผู้เขียนโครงการ.....	67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ตารางแผนการดำเนินงาน.....3
2.1	คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF ₆16
2.2	ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ.....18
3.1	พิกัดแรงดันสูงสุดของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการออกแบบสร้าง.....23
3.2	การออกแบบโครงสร้างภายในของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า.....40
3.3	การออกแบบโครงสร้างภายนอกของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า.....40
4.1	ค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง (C ₁).....42
4.2	ค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำ (C ₂)42
4.3	การทดสอบความคงทนของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า.....43
4.4	ผลการทดสอบภาคแรงสูง.....44
4.5	ตารางบันทึกผล.....50
4.6	ค่า % Error ของแรงดันภาคแรงต่ำ.....51

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ระบบวัดแรงดันสูงกระแสลับด้วยตัวแบ่งแรงดัน ไฟฟ้า.....5
2.2	องค์ประกอบตัวแบ่งแรงดัน.....6
2.3	ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวต้านทาน.....7
2.4	ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า.....9
2.5	ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบก๊าซอัดความดัน.....10
2.6	ตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูงแบบใช้ตัวเก็บประจูดออันดับกัน.....11
2.7	วงจรสมมูลของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจูดออันดับกัน.....12
2.8	ภาพสเกตช์ค่าเก็บประจุสมมูลของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุ.....13
2.9	ภาพจำลองของท่อทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบ.....14
2.10	โครงสร้างโมเลกุลของก๊าซ SF ₆16
2.11	แรงดันเบรกควานซ์ของก๊าซ SF ₆ เปรียบเทียบกับอากาศและน้ำมันหม้อแปลง.....17
2.12	วงจร Schering Bridge.....20
3.1	ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อย.....25
3.2	การจัดวางตัวเก็บประจุภาคแรงสูง.....29
3.3	วงจรการออกแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำ.....30
3.4	แผ่นไออะคลิลิก ขนาด 0.2 cm.....30
3.5	ท่อเก็บที่วางของแรง ใช้เชื่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยแต่ละตัว.....31
3.6	การต่ออนุกรมตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยภาคแรงสูง.....31
3.7	การเชื่อมต่อตัวเก็บประจูดออันดับภาคแรงสูง.....32
3.8	จุดเชื่อมต่อระหว่างภาคแรงสูงกับภาคแรงต่ำ.....32
3.9	ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า.....33
3.10	ขนาดของท่อพีวีซี.....34
3.11	ส่วนหัวของอิเล็กโตรด.....35
3.12	ส่วนท้ายของอิเล็กโตรด.....36
3.13	ตัวจับสายนำค่านแรงสูง.....37
3.14	โครงสร้างภายนอกของตัวแบ่งแรงดัน ไฟฟ้า.....38
3.15	รูปกราฟแสดงความดันก๊าซ SF ₆ ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ.....39
4.1	การทดสอบกับแรงดันสูงกระแสลับขนาดพิกัด 1 – 10 kV.....42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้น.....45
4.3	การต่อแหล่งจ่ายแรงดันเข้ากับภาคแรงสูง.....46
4.4	การต่อออสซิลอสโคปเข้ากับทางภาคแรงต่ำและภาคแรงสูง.....46
4.5	การทดสอบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาดพิกัด $180 = 220$ V.....47
4.6	ค่าแรงดันที่ออสซิลอสโคปอ่านได้เมื่อปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายเป็น 180 V.....47
4.7	ค่าแรงดันที่ออสซิลอสโคปอ่านได้เมื่อปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายเป็น 190 V.....48
4.8	ค่าแรงดันที่ออสซิลอสโคปอ่านได้เมื่อปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายเป็น 200 V.....48
4.9	ค่าแรงดันที่ออสซิลอสโคปอ่านได้เมื่อปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายเป็น 210 V.....49
4.10	ค่าแรงดันที่ออสซิลอสโคปอ่านได้เมื่อปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายเป็น 220 V.....49



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าของประเทศไทยนั้นมีการพัฒนาก้าวหน้ามาก จึงส่งผลให้บริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าต่างๆ สามารถผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าในพิกัดแรงดันสูงเพื่อจำหน่ายใช้งานภายในประเทศและส่งออกไปยังต่างประเทศ ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผลิตออกมาโดยแต่ละบริษัทนั้นจำเป็นต้องผ่านการทดสอบคุณภาพและขีดความสามารถในการใช้งานตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละครั้งนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความเที่ยงตรงสูงตามมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งแต่เดิมนั้นเครื่องมือวัดต่างๆนี้จำเป็นต้องสั่งนำเข้ามาจากต่างประเทศที่มีราคาสูงจึงส่งผลให้เกิดการสูญเสียเงินตราในประเทศมาก แต่ในปัจจุบันนี้ความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงทำให้เราสามารถออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้นมาใช้งานเองได้ เครื่องมือวัดแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สำคัญและห้องปฏิบัติการทดสอบจำเป็นต้องมีนั้นคือ โวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดแรงดันสูงและเราสามารถนำมาวัดแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ในประเทศไทยเองก็สามารถสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าเองได้ ซึ่งแสดงถึงศักยภาพของประเทศที่สามารถพัฒนาการสร้างเครื่องมือที่มีราคาแพงให้มีราคาถูกลง โดยเน้นการใช้วัสดุภายในประเทศเป็นองค์ประกอบหลัก และมีคุณภาพตามมาตรฐานอุตสาหกรรม โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาการนำเข้าอีกต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อให้ผู้ศึกษารู้จักโครงสร้างชนิดและหลักการทำงานของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

1.2.2 สามารถออกแบบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาดพิกัด 100 และ 50 kV

1.2.3 สามารถสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาดพิกัด 50 kV ตามที่ออกแบบไว้ได้

1.2.4 สามารถนำตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมาทดสอบกับแรงดันสูงกระแสสลับ เพื่อให้ได้ตามมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994)

1.2.5 เพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ความรู้ความสามารถรวมไปถึงการเสริมสร้างทักษะทั้งในเชิงวิชาการและการทำงานร่วมกับผู้อื่นให้ดียิ่งขึ้น

1.3 ขอบเขตของงาน

1.3.1 ศึกษาโครงสร้าง ชนิดของตัวเก็บประจุ และหลักการทำงานของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

1.3.2 ศึกษาการออกแบบและการสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุ

ไฟฟ้า

1.3.3 ศึกษาคุณสมบัติมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994)

1.3.4 ออกแบบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า ขนาดพิกัด 100

และ 50 kV

1.3.5 สร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า ขนาดพิกัด 50 kV

1.3.6 นำตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมาใช้ในการทดสอบกับแรงดันสูงกระแสสลับ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า โครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าและรวมไปถึงชนิดของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าว่ามีกี่ชนิด

1.4.2 ศึกษาคุณสมบัติมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994)

1.4.4 ออกแบบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า ขนาดพิกัด 100 และ 50 kV

1.4.5 สร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า ขนาดพิกัด 50 kV

1.4.6 ตรวจสอบหาข้อผิดพลาดและปรับปรุงแก้ไข

1.4.7 นำตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมาทดสอบกับแรงดันสูงกระแสสลับ ขนาดพิกัด 1–10 kV

1.4.8 นำตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมาทดสอบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดพิกัด 180 – 220 V

1.4.9 บันทึกผลและประเมินผลการทดสอบ

1.6 งบประมาณที่ใช้ในการดำเนินงาน

ค่าใช้จ่ายในการสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า ขนาดพิกัด 50kV

มีรายละเอียดดังนี้ คือ

ค่าวัสดุอุปกรณ์	2,000	บาท
ค่าถ่ายเอกสาร	500	บาท
ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	500	บาท
รวม	3,000	บาท (สามพันบาทถ้วน)

หมายเหตุ : ขออนุมัติด้วยเจดีย์ทุกรายการ

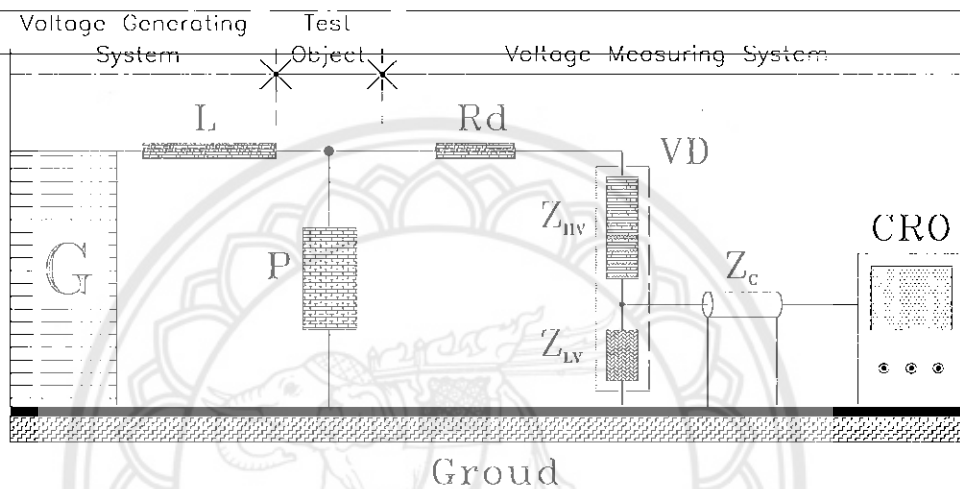


บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 การวัดแรงดันสูงกระแสสลับด้วยตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า [1]

ระบบการวัดแรงดันสูงกระแสสลับด้วยตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับด้วยตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า [5]

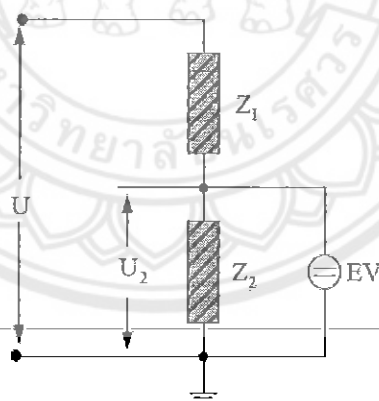
โดยที่ G	คือ แหล่งจ่ายแรงดันสูงทดสอบ (AC, DC, Impulse)
L	คือ สายตัวนำแรงสูง (High-Voltage Lead)
P	คือ วัสดุหรืออุปกรณ์ทดสอบ
Rd	คือ ความต้านทานหน่วงภายนอก (หากจำเป็น)
VD	คือ ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider)
Z_{HV}	คือ องค์กรประกอบภาคแรงสูงของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า
Z_{LV}	คือ องค์กรประกอบภาคแรงต่ำของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า
Z_C	คือ สายนำสัญญาณแรงต่ำ (Coaxial Cable)
CRO	คือ อุปกรณ์วัดด้านแรงต่ำ (Digital Oscilloscope)

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ถูกจ่ายออกมาจากแหล่งจ่ายแรงดันสูงทดสอบ (G) จะต่อเข้าสู่อุปกรณ์ทดสอบ (P) โดยใช้สายตัวนำแรงสูง (L) เป็นตัวนำในการต่อ เนื่องจากว่าแรงดันที่จ่ายเข้าสู่อุปกรณ์ทดสอบ (P) นั้นมีค่าสูงมาก จากนั้นก็ทำการต่อเข้ากับภาคแรงสูงของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า (VD) อีกทีเพื่อทำการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันภาคแรงสูงของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

(VD) กับแรงดันของอุปกรณ์ทดสอบ (P) หลังจากนั้นก็จะทำการวัดแรงดันภาคแรงต่ำของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า (VD) โดยการต่ออุปกรณ์วัดด้านแรงต่ำ (CRO) เข้ากับทางภาคแรงต่ำของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า (VD) โดยใช้สายนำสัญญาณแรงต่ำ (Z_C) เป็นตัวนำ ซึ่งอุปกรณ์วัดด้านแรงต่ำ (CRO) นั้น อาจจะเป็นโวลต์มิเตอร์หรือออสซิลอโคปก็ได้

2.2 หลักการของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์วัดแรงดันสูง ที่ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงๆ ออกเป็นส่วนแรงดันต่ำพอที่จะใช้โวลต์มิเตอร์ หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำๆ วัดได้ โดยใช้อิมพีแดนซ์แรงสูง (Z_1) ต่อเข้ากับแรงดันที่จะวัด แล้วแบ่งเอาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แต่เพียงส่วนน้อยออกมาวัด ฉะนั้นตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า จึงแบ่งออกเป็นภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ ปลายข้างหนึ่งของภาคแรงสูง นั้นจะต่อกับสายแรงสูงที่จะวัด ส่วนอีกข้างหนึ่งจะต่อกับปลายหนึ่งของภาคแรงต่ำ ส่วนอีกข้างหนึ่งของภาคแรงต่ำนั้นจะต่อกับดิน โดยที่รอยต่อระหว่างภาคแรงสูงกับภาคแรงต่ำนั้นจะเป็นจุดที่ต่อออกมาเข้าเครื่องวัดแรงต่ำ โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องมือวัดแรงต่ำ (EV) ที่จะนำมาต่อเข้ากับตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้านี้จะต้องเป็นเครื่องวัดที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด นั่นคือจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าสูงมากๆ เช่น อิเล็กทรอนิกส์โวลต์มิเตอร์ (EV) กล่าวคืออิมพีแดนซ์ของเครื่องวัดจะต้องไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนอิมพีแดนซ์ของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบตัวแบ่งแรงดัน [6]

เมื่อ

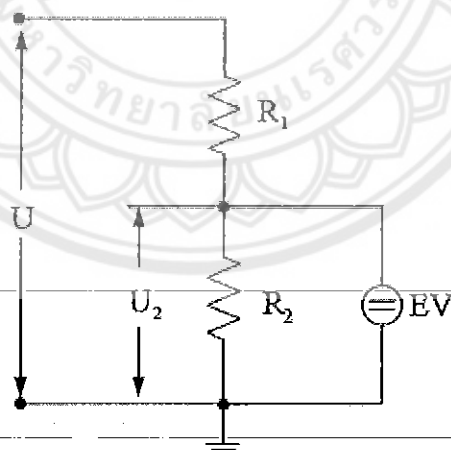
- Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง
- Z_2 คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ
- U คือ แรงดันที่ต้องการวัด
- U_2 คือ แรงดันที่แบ่งออกมาวัด ซึ่งเป็นแรงดันคร่อมภาคแรงต่ำ Z_2
- EV คือ เครื่องมือวัดที่มีอิมพีแดนซ์ทางขาเข้าสูง

เมื่อวัด U_2 ด้วยเครื่องมือวัดจึงกำหนดหาแรงดันที่ต้องการวัดได้จากสมการที่ 2.1

$$U = \left[\frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \right] \times U_2 \quad ; \quad Z_1 \gg Z_2 \quad (2.1)$$

การวัดแรงดันสูงด้วยตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์เนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะหมดไป เมื่ออิมพีแดนซ์ Z_1 และ Z_2 เป็นวัสดุหรือสารประเภทเดียวกัน [1] ความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของเครื่องวัดและอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง ปัญหาที่ทำให้ผลของการวัดผิดพลาดอีกประการหนึ่งก็คือองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้น เช่น ผลกระทบจากความร้อน อิมพีแดนซ์ที่ใช้ทำตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าอาจเป็นตัวต้านทานไฟฟ้าหรือตัวเก็บประจุไฟฟ้าก็ได้ ชนิดตัวต้านทานมักจะใช้วัดแรงดันสูงกระแสตรง และใช้วัดแรงดันกระแสสลับได้ในย่านไม่เกิน 20 ถึง 30 kV การวัดแรงดันกระแสสลับด้วยตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ามักใช้ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นเครื่องมือวัด

2.3 ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวต้านทาน [6]

ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวต้านทาน [1] ส่วนใหญ่แล้วจะนำไปใช้วัดแรงดันสูงกระแสตรง ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวต้านทานประกอบด้วย ตัวต้านทานภาคแรงสูง (R_1) และตัวต้านทาน ภาคแรงต่ำ (R_2) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3 โดยตัวต้านทานภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำนั้นต้องเป็นตัวต้านทานชนิดเดียวกัน [1] เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่า

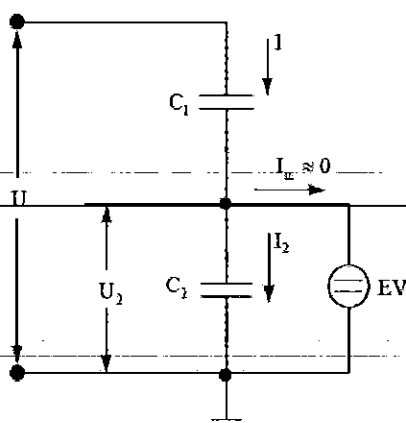
ความต้านทาน เนื่องจากผลของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง และแรงดันที่วัดได้นั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความต้านทานทั้งสอง ดังสมการที่ 2.2

$$U = \left[\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right] \times U_2 \quad ; \quad R_1 \gg R_2 \quad (2.2)$$

ความถูกต้องในการวัดนั้นจะขึ้นอยู่กับความเสถียรภาพความต้านทาน และขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของเครื่องวัดภาคแรงต่ำ และปัญหาสำคัญอีกประการหนึ่งคือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวเนื่องจากศักย์แรงสูง เพราะฉะนั้นฉนวนที่หุ้มความต้านทานนั้นจะต้องทนแรงดันสูงได้ ในขณะที่เดียวกันกระแสรั่วที่ไหลตามผิวอาจทำให้การวัดผิดพลาดได้ ถ้าหากความความต้านทานที่ใช้แรงดันสูงเกินไปดังนั้น ค่าความต้านทานจึงมีขีดจำกัดบน คือ จะต้องไม่สูงจนเกินไป เพื่อให้กระแสที่วัดมีค่าไม่ต่ำจนเกินไป ($I \geq 0.1\text{mA}, R \leq 10\text{M}\Omega/\text{kV}$) [1] ฉะนั้นการเลือกฉนวนที่จะนำมาใช้ยึดความต้านทาน เพื่อเป็นการลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวความต้านทานเนื่องจากศักย์แรงสูงและอาจช่วยแก้ปัญหานี้ได้ โดยออกแบบการจัดวางความต้านทานและการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในบริเวณที่ล้อมรอบความต้านทาน ซึ่งอาจใช้ความต้านทานย่อยมาต่ออันดับบนแท่งฉนวนในลักษณะเป็นเกลียวส่วนจุ่มในน้ำมันหรือใช้ก๊าซอัดความดัน เช่น ก๊าซ SF₆ เป็นต้น

2.4 ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า

ตัวแบ่งแรงดัน ไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า [1] นั้นส่วนใหญ่จะนำไปใช้วัดแรงดันสูง กระแสสลับ ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้านั้นจะประกอบด้วย ตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงดันต่ำกับภาคแรงดันสูงต่ออันดับกันดังแสดงในรูปที่ 2.4 ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้ารวมนั้นจะมีประมาณเท่าๆ กันกับของภาคแรงสูง ซึ่งค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูงนั้นจะต้องมีค่าไม่มากนัก เพื่อป้องกันไม่ให้เป็นโหลดแก่เครื่องกำเนิดแรงดัน ส่วนตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำนั้นจะมีค่าเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อลดทอนแรงดันสูงลงมาให้ต่ำพอที่จะใช้โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดภาคแรงต่ำมาวัดได้



รูปที่ 2.4 ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า [6]

โดยที่

C_1 คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูง

C_2 คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำ

โดยหลักการแล้วกระแสที่ไหลเข้าเครื่องวัด (I_m) นั้น ต้องมีค่าน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์ นั่นคือกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำจะต้องเท่ากันดังสมการที่ 2.3 คือ

$$I = \omega C_1 U = \frac{\omega C_1 C_2}{C_1 + C_2} \cdot U \quad (2.3)$$

และ $I_2 = \omega C_2 U_2 = I$ เมื่อ $I_m \approx 0$ (2.4)

ดังนั้นจะได้ว่า
$$U = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \times U_2 \quad (2.5)$$

เมื่อกำหนดให้ $C_2 \gg C_1$ จะได้เป็น
$$U = \frac{C_2}{C_1} \times U_2 \quad (2.6)$$

2.4.1 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงดันสูง

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงดันสูงนั้นเป็นส่วนที่รับแรงดันสูงที่วัดเกือบทั้งหมด ดังนั้นการออกแบบจึงจำเป็นต้องให้สามารถทนต่อแรงดันสูงสุดที่วัดได้ โดยความเครียดไฟฟ้าจะมีค่าต่ำอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ทำให้เกิดคิสซาร์จหรือเบรกดาวน์ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะของอิเล็กโตรดและฉนวนไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

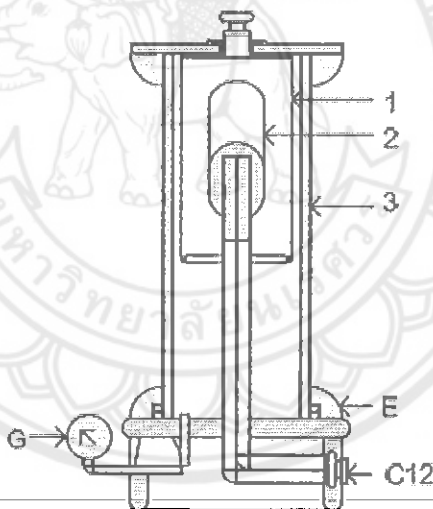
ตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงดันสูงในห้องปฏิบัติการทั่วไปมิใช่กันอยู่สองชนิด คือตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบก๊าซอัดความดันและตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยต่ออันดับ

2.4.1.1 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบก๊าซอัดความดัน (Compressed Gas Capacitor)

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูงแบบก๊าซอัดความดันนี้ ได้จากสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม (Coaxial Cylinder Configuration) เพื่อให้มีขนาดเล็กๆ แต่สามารถทนแรงดันได้สูงๆ จึงจำเป็นต้องมีการฉนวนด้วยก๊าซ ที่นิยมใช้กัน ได้แก่ N_2 , CO_2 ที่ความดัน 10-20 bar หรือก๊าซ SF_6 ที่ความดันในช่วงประมาณ 1-3 bar [1]

ข้อดีคือไม่มีผลกระทบของกะเปาะซีเมนต์หรือซีเมนต์ต่อกะเปาะซีเมนต์ภาคแรงดันสูงเพราะอิเล็กโตรดทรงกระบอกจะทำหน้าที่เป็นฉลัดป้องกัน ได้อย่างดี

ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบนี้หากวัดแรงดันสูงมากๆ จะมีข้อจำกัดด้วยมิติของ โครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงดันสูง ปัญหานี้อาจแก้ไขได้โดยใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยต่ออนุกรมกัน โดยมีตัวต้านทานไฟฟ้าหน่วง (ถ้ามีตัวต้านทานไฟฟ้าหน่วงใช้วัดแรงดันอิมพัลส์) ต่อกระจายอยู่ในภาคแรงดันสูงซึ่งเรียกว่า ตัวแบ่งแรงดัน ไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้ามีความต้านทานไฟฟ้าหน่วง



รูปที่ 2.5 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบก๊าซอัดความดัน [6]

โดยที่

- 1 คือ อิเล็กโตรดแรงสูง (High Voltage Electrodc)
- 2 คือ อิเล็กโตรดแรงดัน (Measuring Electrode)
- 3 คือ กระบอกฉนวน (Insulating Cylinder)
- E คือ อิเล็กโตรดต่อดิน (Pressure Gauge)
- G คือ มาตรวัดความดัน (Pressure Gauge)
- C_{12} คือ ขั้วต่อสายเคเบิล (Terminal)

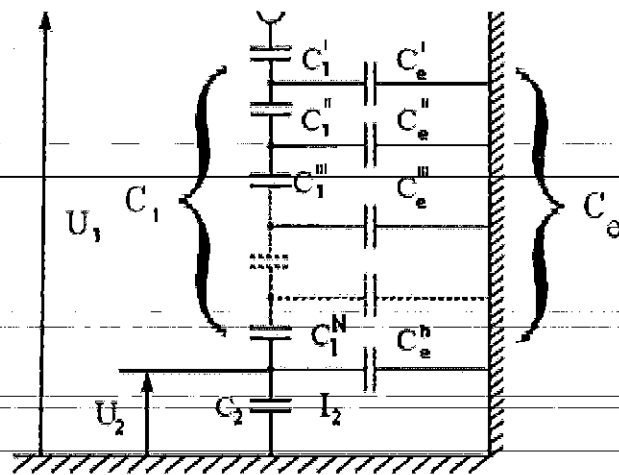
2.4.1.2 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยต่ออันดับ

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูงชนิดนี้ได้จากการนำเอาตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยประเภทเซรามิกซ์หรืออะลูมิเนียมอิเล็กโทรไลต์หรือชนิดอื่น จำนวนหลายๆ ตัวมาต่ออันดับกัน ซึ่งในการจัดทำโครงการนี้ได้เลือกเอาตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยชนิด Metallized Polyester Capacitor ชื่อ WIMA นำมาต่ออันดับกันเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูงแบบใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยต่ออันดับกัน [6]

การต่อกันในลักษณะนี้ย่อมมีสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยแต่ละตัวกับสิ่งหุ้มล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับส่วนที่ต่อลงดิน (Grounded) จึงมีความจุสเตรย์ (Stray Capacitance) ลงดินซึ่งจะตัดทิ้งไม่น่ามาคิดไม่ได้วงจรสมมูลของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบนี้แสดงดังรูปที่ 2.7 ประกอบด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยภาคแรงสูง (C_1) กับความจุสเตรย์ลงดินย่อย (C_2) ตามแนวความยาวของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ในที่นี้จะไม่คิดผลของค่าความจุสเตรย์แฝงระหว่างสายตัวนำแรงสูง ซึ่งถือว่ามีค่าน้อยมากจนสามารถละเลยได้ ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะผลของความจุสเตรย์ลงดินย่อย (C_2) ตามแนวความยาวของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าเท่านั้น



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าต่อยอดต่อกัน [6]

เมื่อ

- C_1 คือ ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูงรวม
- C_1' คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยของภาคแรงสูง
- C_2 คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าของภาคแรงต่ำ
- C_e คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าลงดินรวม
- C_e' คือ ค่าความจุสเตรย์ย่อยลงดิน

การหาค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูงรวม (C_1) จะคำนวณด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อย (C_1') โดยตรงไม่ได้ แต่อาจคำนวณได้จากกระแส I_2 ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำ (C_2) ที่มีแรงดันคร่อม ดังนั้นตัวเก็บประจุไฟฟ้าผลรวมจึงหาได้จากความสัมพันธ์สมการที่ 2.7

$$I_2 = \omega C_1 U_1 \quad (2.7)$$

ดังนั้นอัตราส่วนแรงดันสามารถหาได้จากสมการที่ 2.8

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n}{N} \left[1 - \frac{C_e}{6C_1} \right] = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left[1 - \frac{c_e}{6C_1} \right] \quad (2.8)$$

เมื่อ

n คือ จำนวนตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อย

N คือ จำนวนตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูงต่อกัน

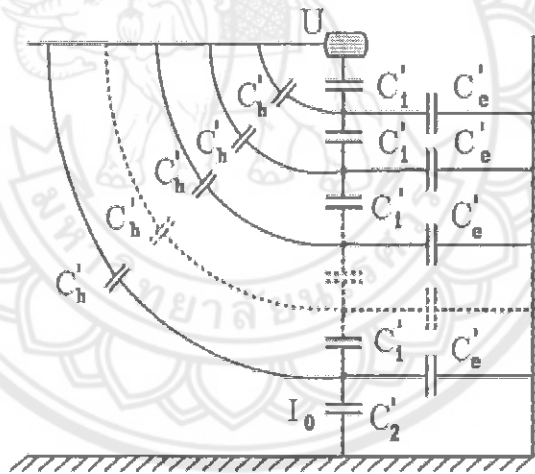
โดยที่

$$C_1 = C'_1 / N \quad (2.9)$$

$$C_e = n C'_e \quad (2.10)$$

ค่าขั้วผลของตัวเก็บประจุไฟฟ้าลงดินรวมทั้งหมด (C_e) ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างของ ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าและสภาพแวดล้อมผ่านๆ ในทางปฏิบัติสามารถลดความผิดพลาดให้น้อยลง ได้โดยทำให้ค่า C_e/C_1 มีค่าน้อยลง นั่นคือทำให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C_1) มีค่าสูงขึ้น

ในกรณีตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า ค่าความจุสเตรย์จะมีผลต่อสเกลแฟกเตอร์ของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าซึ่งตัวที่กำหนดสเกลแฟกเตอร์ของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า คือ กระแสที่ไหลไปยังภาคแรงต่ำ ภาพสเกตซ์ค่าความจุสมมูล (C'_{eq}) ของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อต่ออันดับ แสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วยค่าความจุย่อย (C'_1) ที่ต่ออนุกรมกันและมีค่าความจุสเตรย์ (C'_h) และ (C'_e) ต่ออยู่ในจำนวนที่เท่ากัน



รูปที่ 2.8 ภาพสเกตซ์ค่าความจุสมมูลของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า [6]

ในสถานะคงตัวสามารถหาค่าความจุสมมูล (Equivalent Capacitance: C'_{eq}) ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูงได้จากสมการที่ 2.11 และ 2.12

$$C'_{eq} = \frac{I_0}{\omega U_1} \quad (2.11)$$

$$C'_{eq} = C \frac{1 + \frac{C_h}{4C}}{1 + \frac{C_e}{6C} + \frac{C_h}{12C}} \quad (2.12)$$

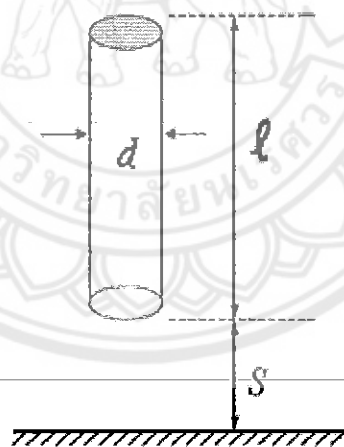
เมื่อ $C = \frac{C'}{n}; C_e = nC'_e; C_h = nC'_h; n \gg 1$

I_o คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

เนื่องจากโดยทั่วไปค่า C_h จะมีค่าน้อยกว่า C_e มาก ดังนั้น C_{eq} จึงมีค่าน้อยกว่า C เสมอและถ้าให้ $C_h = 0$ (C_h มีค่าน้อยมากๆ) จะสามารถประมาณค่า C_{eq} ได้เป็นดังสมการที่ 2.13

$$C_{eq} \approx C \left(1 - \frac{C_e}{6C} \right) \quad (2.13)$$

โดย C_e สามารถหาได้จากการคำนวณ ด้วยการสมมติให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูงเป็นที่โลหะทรงกระบอกวางอยู่บนเนื้อพื้นระนาบแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ภาพจำลองท่อทรงกระบอกวางอยู่บนเนื้อพื้นระนาบ [3]

เมื่อ

l คือ ความสูงของโลหะทรงกระบอก

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอก

s คือ ระยะห่างทรงกระบอกวางอยู่บนเนื้อพื้นระนาบ

ในทางปฏิบัติค่าความจุสเตรย์ลงดินนี้อาจประมาณได้คร่าวๆจากความสูงของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าในเทอมของ C_e/l ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณตั้งแต่ 10 ถึง 15 pF/m

$$C_e = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \left[\frac{(2l)}{d} \sqrt{\frac{(4s+l)}{(4s+3l)}} \right]} \quad (2.14)$$

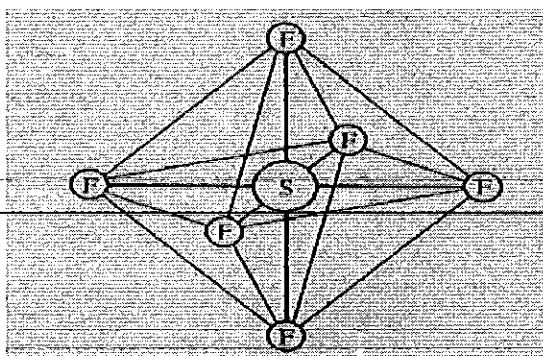
เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าความจุสเตรย์ (C_h) และ (C_e) ได้โดยตรงดังนั้น การวัดค่าความจุภาคแรงสูงควรจะวัดในตำแหน่งที่ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าใช้งานจริง สำหรับตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าหรือตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่มีตัวต้านทานไฟฟ้าหุ้ม ค่าความจุภาคแรงสูงอาจวัดได้โดยใช้ Schering Bridge หรือ Transformer Ratio-Arm Bridge โดยไม่แนะนำให้ใช้ RLC Bridge แรงต่ำเพราะสายวัดและค่าความจุสเตรย์จะถูกรวมเข้ากับการวัดด้วย ซึ่งทำให้ค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ได้คลาดเคลื่อน นอกจากนี้ค่าความจุของสายเคเบิลวัดยังมีผลต่อสเกลแฟกเตอร์ของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าซึ่งต้องนำมาพิจารณาด้วย

2.5 การฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยก๊าซ SF₆ [7]

ปัจจุบันก๊าซ SF₆ (Sulphur Hexafluoride) ได้รับความสนใจและมีบทบาทสำคัญต่อเทคโนโลยีการฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเพราะก๊าซ SF₆ มีคุณสมบัติการฉนวนทางไฟฟ้าดีเป็นเลิศ มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่ความดันค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการฉนวนด้วยก๊าซอัดชนิดอื่น ๆ มีเสถียรภาพมั่นคงต่อความร้อนและปฏิกิริยาทางเคมี ก๊าซ SF₆ ถูกนำมาใช้เป็นก๊าซฉนวน (Insulating Gas) มันจะไม่เสื่อมสภาพจากความเป็นฉนวน (Insulation) เนื่องจากการทิ้งไว้นานๆ ค่าแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) ของมันจะลดลงได้ เนื่องจากการสูญเสียความหนาแน่นของก๊าซ

2.5.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF₆

ก๊าซ SF₆ เป็นสารประกอบของโปลิอะตอมมิคโมเลกุลของกำมะถัน 1 โมเลกุลและฟลูออรีน 6 โมเลกุล ดังรูปที่ 2.10 เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีรส ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟและไม่ช่วยให้ไฟติด เป็นก๊าซที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่นและจะคงสภาพเดิมแม้ว่าจะถูกทำให้ร้อนถึง 500°C ภายในถังที่ปิดมิดชิด ปราศจากออกซิเจนและความชื้น คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF₆ อาจสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

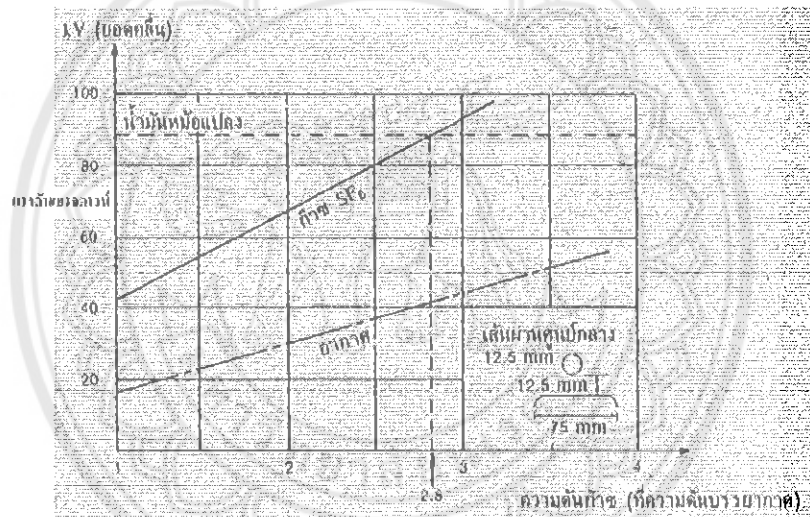
รูปที่ 2.10 โครงสร้างโมเลกุลของก๊าซ SF₆ [7]ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF₆ [7]

คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF ₆	ค่าพารามิเตอร์
น้ำหนักโมเลกุล	146.06
จุดหลอมเหลวที่ 2.26 บาร์	-50.8°C
อุณหภูมิของจุดที่ 1.0133 บาร์	-63.6°C
อุณหภูมิวิกฤต	45.55°C
ความดันวิกฤต	37.59 atm
ความหนาแน่นวิกฤต	0.74 กก.ต่อลิตร
ความหนาแน่นไอที่ 20°C 1 บาร์	6.07 กรัมต่อลิตร
ความหนาแน่นของเหลวที่ 0°C , 12.65 บาร์	1.56 กก.ต่อลิตร
ความดันไอที่ 20°C (ดูกราฟประกอบ)	20.74 atm
สภาพนำความร้อนที่ 20°C	7.1x10 ⁻⁵ Cal/Cm ² /°C/Sec
ค่าไดอิเล็กตริกคงตัวที่ 20°C	1.00191
ปริมาตรการละลายในน้ำคิดเทียบที่ C และ 1 atm	
ที่ 5°C	11.39 Cm ³ SF ₆ /kg Hzo
ที่ 20°C	6.31 Cm ³ SF ₆ /kg Hzo
ที่ 50°C	3.25 Cm ³ SF ₆ /kg Hzo
ปริมาตรการละลายในน้ำมันคิดเทียบที่ C และ 1 atm	
ที่ 5°C	0.408 Cm ³ SF ₆ /cm ³ Hzo
ที่ 20°C	0.344 Cm ³ SF ₆ /cm ³ Hzo
ที่ 50°C	0.302 Cm ³ SF ₆ /cm ³ Hzo

SF_6 จะอยู่ในสถานะก๊าซหรือไอเหลวนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน ในทางปฏิบัติแล้วย่านที่ใช้งานจะมีอุณหภูมิสูงกว่า 0°C และความดันอยู่ในช่วง 2 ถึง 7 bar ซึ่ง SF_6 จะอยู่ในสถานะก๊าซ

2.5.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF_6

ก๊าซ SF_6 มีความหนาแน่นประมาณ 5 เท่าของอากาศ ซึ่งนับว่าเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักมากที่สุด ในบรรดาก๊าซที่รู้จักกันในปัจจุบัน จึงทำให้ก๊าซ SF_6 มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซอื่นๆ ที่ใช้เป็นฉนวนกัน เช่น อากาศหรือไนโตรเจน คาร์บอน ไดออกไซด์ เป็นต้น ก๊าซ SF_6 จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความดันบรรยากาศประมาณ 2.5 เท่าของอากาศ และจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับน้ำมันหม้อแปลง เมื่อ SF_6 มีความดันอัดประมาณ 3 bar ดังเส้นกราฟเปรียบเทียบในรูปที่ 2.11



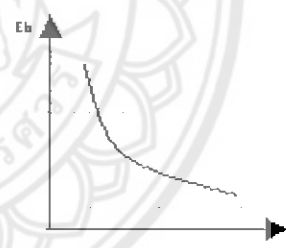
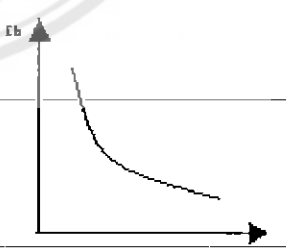
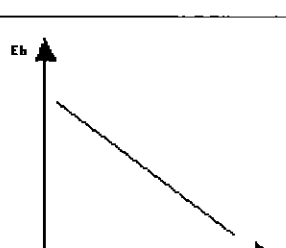
รูปที่ 2.11 แรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF_6 เปรียบเทียบกับอากาศและน้ำมันหม้อแปลง [7]

คุณสมบัติพิเศษของก๊าซ SF_6 ที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ SF_6 มีสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชัน (Ionization Coefficient) ต่ำมากเมื่อเทียบกับอากาศ ก๊าซที่มีสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันต่ำย่อมหมายถึงอัตราการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนอิสระในก๊าซนั้นต่ำ นั่นคือค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF_6 จะมีค่าสูง ทั้งนี้เพราะว่าโมเลกุลของก๊าซ SF_6 มีคุณสมบัติจับอิเล็กตรอนอิสระที่เคลื่อนที่ อยู่ในสนามไฟฟ้าได้ กล่าวคืออิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากการไอออไนเซชันจะไปเกาะอยู่บนโมเลกุลที่เป็นกลาง ทำให้โมเลกุลของก๊าซกลายเป็นไอออนลบ จึงเรียกว่า SF_6 เป็นก๊าซไฟฟ้าลบ (Electronegative Gas) ไอออนลบจะมีน้ำหนักเท่ากับไอออนบวก ซึ่งเคลื่อนที่ได้ช้า พลังงานที่ได้จากการเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดไอออไนเซชันจากการชนของไอออนลบ ได้ จึงเท่ากับว่าอัตราการเกิดหรือเพิ่มของอิเล็กตรอนอิสระถูกหน่วงหรือชะลอให้ช้าลง ระยะเวลาซึ่ง

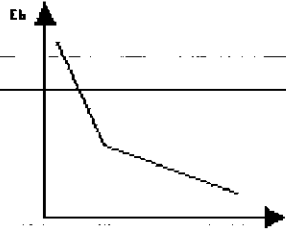
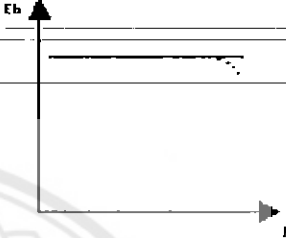
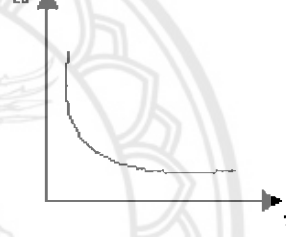
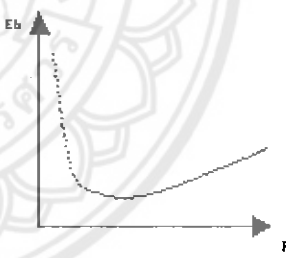
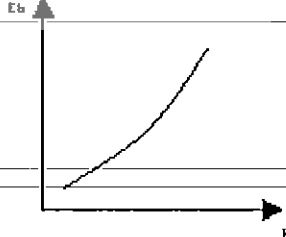
อิเล็กตรอนวิกฤติจึงเกิดได้ยาก การเกาะตัวของอิเล็กตรอนบนโมเลกุลกลายเป็นไอออนลบนี้เองที่เป็นแพกเตอร์สำคัญประการหนึ่งที่ทำให้ก๊าซ SF_6 มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง

ก๊าซ SF_6 มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเป็นสัดส่วนกับความดันก๊าซอัดซึ่งเพิ่มสูงขึ้นเร็วและระดับอาร์คได้รวดเร็วกว่าอากาศ ที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือก๊าซ SF_6 จะแตกตัวที่อุณหภูมิ $2000^{\circ}K$ มีสภาพนำไฟฟ้าและสภาพนำความร้อนที่ดี จึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมอาร์คต่ำพลังงานที่เปลี่ยนเป็นความร้อนจึงต่ำ ถ้าอาร์คที่อุณหภูมิสูงเกิดแตกตัวนี้มีค่าแคบเมื่อเทียบกับไนโตรเจน ล้อมรอบด้วยก๊าซอุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า $2000^{\circ}K$) ซึ่งมีสภาพการฉนวนสูงรอบๆ ถ้าอาร์คแต่ยังมีสภาพนำความร้อนได้ดี ฉะนั้นปริมาณความร้อนจากถ้าอาร์คจะถูกถ่ายเทออกไปได้เร็ว ทำให้สภาพของอาร์คคืนสู่สภาพการฉนวนได้เร็วหลังจากกระแสตกลงผ่านศูนย์ ครั้งแรกหลังจากหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แยกจากกันจึงเท่ากับเป็นการป้องกันการเกิดเบรกควาน์แบบเทอร์มิลมิให้เกิดขึ้นเวลาคงตัว (Time Constant) ของก๊าซ SF_6 ในการดับอาร์คเป็นไมโครวินาที ซึ่งเร็วกว่าอากาศประมาณ 100 เท่า อิเล็กตรอนจะกลับไปจับไอออน ทำให้อะตอมกลายเป็นกลาง ซัลเฟอร์และฟลูออรีนรวมตัวเป็น SF_6 และมีสภาพเป็นฉนวนตามเดิม

ตารางที่ 2.2 ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ [7]

ขึ้นอยู่กับผลกระทบของ	ก๊าซ
ระยะช่องห่าง (d)	
รัศมีความโค้งของอิเล็กโทรด (r)	
ความขรุขระของผิว (Sr)	

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

ขึ้นอยู่กับผลกระทบของ	ก๊าซ
เวลาที่บิอนแรงดัน (t)	
ความถี่ $0 < f < 1\text{kHz}$	
อุณหภูมิ (T)	
ความดัน (P)	
ความชื้น (h)	

2.6 การคำนวณอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยอากาศ [10]

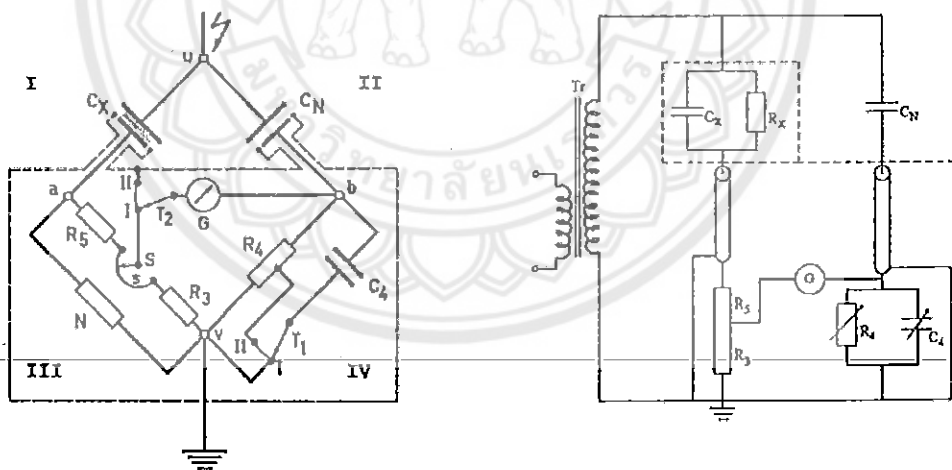
อากาศ (Atmospheric Air) เป็นฉนวนก๊าซชนิดหนึ่ง ซึ่งมีค่า $E_b = 30\text{kV/cm}$, 76cm.Hg , 0.1Mpa , 1bar ที่อุณหภูมิ 25°C แต่ไม่นิยมใช้เป็นฉนวนในไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากว่าไม่สามารถทนต่อแรงดันที่สูงๆ ได้ ส่วนใหญ่จะใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบกับก๊าซชนิดอื่นๆ

2.7 การทดสอบเทียบมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994) [4]

ในการทดสอบเทียบมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994) ได้ทำการทดสอบค่าต่างๆ เพื่อให้ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งในโครงการนี้ จะใช้ขั้นตอนการทดสอบ 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : การวัดความจุไฟฟ้า

ในการวัดค่าความจุไฟฟ้านี้ จะทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าทั้งด้านแรงสูง (C_1) และด้านแรงต่ำ (C_2) โดยใช้วงจร Schering Bridge ดังรูปที่ 2.12 เพื่อเปรียบเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ แล้วหาค่า % Error ซึ่งวิธีการวัดนั้นจะแยกกันวัด โดยให้ตัวเก็บประจุที่ต้องการวัดแทน C_x เช่น การวัดตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูง (C_1) ก็จะต้อง C_1 มาแทนที่ C_x ส่วนการวัดตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำก็ต่อในลักษณะเดียวกันกับภาคแรงสูง



รูปที่ 2.12 วงจร Schering Bridge [8]

โดยที่	C_x	คือ	ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบหรือที่ต้องการวัด
	R_x	คือ	ความต้านทานสมมูลกับกำลังสูญเสียในไดอิเล็กตริก
	C_N	คือ	ค่าตัวเก็บประจุมาตรฐาน
	R_3	คือ	ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำและปรับค่าได้

- R_4 คือ ความต้านทานไว้ความเหนียวนำ
 C_4 คือ ค่าตัวเก็บประจุปรับค่าได้
 G คือ กัลป์วานอิมเตอร์ความไวสูงสำหรับสมดุลวงจร

ขั้นตอนที่ 2 : การทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์

ในการหาสเกลแฟกเตอร์ของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า สามารถหาได้จากวิธีใดวิธีหนึ่งต่อไปนี้

1. การวัดค่าแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อมกัน
2. ใช้วงจรบริดจ์
3. คำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

สเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดจะหาได้จากค่าแรงดันที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิงหารด้วยค่าแรงดันที่อ่านได้จากระบบวัดที่ต้องการทดสอบซึ่งกำหนดให้เป็น F_i โดยที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคำนวณได้ดังนี้

$$S = \sqrt{\frac{\sum (F_i - F_m)^2}{n - 1}} \quad (2.15)$$

- เมื่อ S คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)
 F_i คือ ค่าแรงดันระบบวัดอ้างอิงหารด้วยค่าแรงดันที่ต้องการทดสอบ
 F_m คือ ค่าเฉลี่ยของ F_i

ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ได้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบไว้ดังนี้คือ จะต้องทำการทดสอบไม่น้อยกว่า n ค่า ($n \geq 10$) โดยมาตรฐานกำหนดว่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จะต้องมีค่าไม่เกิน $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ย

ขั้นตอนที่ 3 : การทดสอบความคงทนของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า (AC Withstand Voltage Test)

ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อดูว่าองค์ประกอบภาคแรงสูงที่ออกแบบสร้างสามารถทนต่อแรงดันสูงที่พิกัดกำหนดได้ และไม่เป็นสาเหตุทำให้ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าเสียหายเมื่อใช้งานที่พิกัด ซึ่งในการทดสอบจะทำการทดสอบความทนต่อแรงดันสูงกระแสสลับ ความถี่ 50 Hz ที่ระดับแรงดันทดสอบ 110% นาน 1 นาที

ขั้นตอนที่ 4 : การทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)

การทดสอบความเป็นเชิงเส้น เป็นการวัดแรงดันเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงเพื่อดูผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบว่าค่าแรงดันที่วัดมีความเป็นเชิงเส้นหรือไม่ ในการทดสอบจะทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 5 ค่าตลอดช่วงแรงดันใช้งาน ซึ่งในแต่ละค่าของแรงดันจะทำการทดสอบ 5 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับแรงดัน ซึ่งอัตราส่วนระหว่างแรงดันของระบบวัด

อ้างอิงกับแรงดันของระบบวัดที่ทำการทดสอบจะต้องมีค่าไม่เกิน $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ยระบบวัดที่ทำการทดสอบจึงถือได้ว่าเป็นเชิงเส้น

ขั้นตอนที่ 5 : การทดสอบความมีเสถียรภาพ (Stability Test)

การทดสอบความมีเสถียรภาพเป็นการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงของตัวเองแบ่งแรงดันเพื่อผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบว่ามีแรงดันผิดเพี้ยนจากระบบวัดอ้างอิงหรือไม่ ซึ่งการทดลองความมีเสถียรภาพนั้นจะยึดถือเอามาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994) เป็นเกณฑ์ในการอ้างอิง วิธีทดสอบจะต้องวัดเปรียบเทียบที่ระบบวัดอ้างอิง โดยนำค่าที่อ่านได้จากการวัดของระบบวัดที่ออกแบบสร้างขึ้นมานั้นเป็นไปตามข้อกำหนดของ IEC 60060 – 2 (1994) หรือไม่ และค่าที่ได้จากการทดสอบของเครื่องมือวัดที่ออกแบบสร้างจะต้องนำมาคูณกับสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดอ้างอิงด้วย การทดสอบนั้นจะต้องทำซ้ำๆ กัน 10 ครั้งเป็นอย่างน้อยที่สุด โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าไม่เกิน $\pm 1\%$ และค่าแรงดันที่ใช้ในการวัดเปรียบเทียบต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 20% ของพิกัดแรงดันสูงสุด ซึ่งในที่นี้ได้ทำการทดสอบระบบวัดที่แรงดัน 100% ของพิกัดแรงดันสูงสุด ทดลองซ้ำกันเป็นจำนวน 10 ครั้ง โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของระบบวัดในแต่ละครั้งมีค่าแรงดันแตกต่างจากระบบวัดที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงไม่เกินไปกว่า $\pm 3\%$ นั้นแสดงว่าโวลเตจดีไวเดอร์อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

3.1 คุณสมบัติสมบัติที่กำหนด

คุณสมบัติที่กำหนดของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการออกแบบและจะสร้างขึ้นมานั้นเป็นตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ การออกแบบและการทดสอบนั้นจะอ้างอิงตามเกณฑ์มาตรฐาน IEC 60060 - 2 (1994) [4] กำหนดขนาดตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าในการใช้วัดแรงดันชนิดต่างๆ ที่ต้องการออกแบบสร้างจะเป็นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พิกัดแรงดันสูงสุดของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการออกแบบสร้าง

รายละเอียด	ค่าพารามิเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์
1. Rated Voltage	100 kV _{rms} , 50 kV _{im}
2. Frequency	50 Hz
3. Ratio	1000:1

ลักษณะโครงสร้างของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ องค์ประกอบภาคแรงสูง และองค์ประกอบภาคแรงต่ำ โดยไฟฟ้าแรงสูงที่ต้องการวัดจะต่อกับองค์ประกอบภาคแรงสูง ซึ่งแรงดันไฟฟ้าแรงสูงจะถูกลดทอนให้มีขนาดแรงดันลดลงและจะถูกส่งผ่านไปยังภาคแรงต่ำ ในส่วนของภาคแรงต่ำนี้ก็จะมีการลดระดับแรงดันที่ส่งผ่านมาจากภาคแรงสูงให้มีขนาดพิกัดแรงดันที่ใช้ได้กับเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า เพื่อวัดค่าแรงดันด้านออกของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า เช่น ออสซิลอสโคป หรือ โวลต์มิเตอร์ เป็นต้น

3.2 การออกแบบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ขนาดพิกัด 100 kV

3.2.1 ความจุสเตรย์ต่อลงดิน

ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบสิ่งที่จะต้องพิจารณาคือ ผลค่าความจุสเตรย์ลงดิน (Stray Capacitance: C_s) เป็นลักษณะสมบัติที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ขึ้นอยู่กับมิติโครงสร้างของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า สำหรับตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูงเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยเมื่อบรรจุอยู่ในท่อพีวีซีก็สามารถถือได้ว่าเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าเดี่ยวรูปทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งค่า C_s นี้จะส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนในการวัดและเสถียรภาพของระบบวัด แต่ก็จะต้องคำนึงถึงขนาดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าด้วย ที่นำมาออกแบบจะต้องไม่มากเกินไปจน

ทำให้เกิดเป็นโหลดให้กับวงจรทดสอบ มิฉะนั้นจะทำให้การวัดเกิดความคลาดเคลื่อนได้อีกเช่นกัน โดยค่าความจุสเตรย์หาได้จากสมการที่ 3.1

$$C_e = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \left[\frac{2l}{d} \sqrt{\frac{(4s+l)}{(4s+3l)}} \right]} \quad (3.1)$$

เมื่อ

C_e คือ ค่าความจุสเตรย์ลงดิน (pF)

l คือ ความยาวของท่อพีวีซี (m)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อพีวีซี (m)

s คือ ระยะอเล็กโตรดล่างเหนือพื้นดินของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า (m)

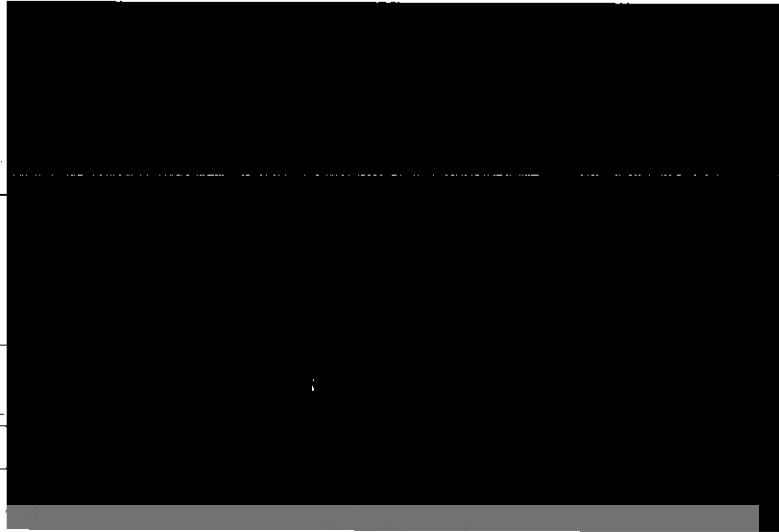
ϵ คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $8.854 \times 10^{-12} \text{C}^2 / (\text{N}\cdot\text{m}^2)$

ความยาวท่อที่ใช้ต้องสามารถทนต่อแรงดันกระแสสลับความถี่ตามผิวได้เพียงพอ ได้เทียบค่าความถี่ตามผิวกระแสสลับของจนวนท่อพีวีซี [9] ประมาณ 400 kV/m ซึ่งตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่สร้างมีค่าพิกัดแรงดันเท่ากับ 100 kV ดังนั้นระยะวางไฟตามผิวจนวนตามท่อพีวีซีต้องไม่น้อยกว่า 0.25 m แต่ในกรณีนี้ออกแบบให้ท่อพีวีซีมีขนาดความยาว 1.0 m และเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m โดยที่นี้ขนาดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อพีวีซี นั้นขึ้นอยู่กับมิติภายในที่ทำการออกแบบ ซึ่งออกแบบโดยนำตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยชนิด Metallized Polyester Capacitor ยี่ห้อ WIMA ขนาดพิกัด 470 pF , 650 V_{ac} ดังรูปที่ 3.1 นำมาต่ออนุกรมกัน ส่วนระยะอเล็กโตรดล่างเหนือพื้นดินของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.2 m และสามารถหาค่าความจุสเตรย์ลงดินตามการคำนวณ ได้ดังนี้

$$C_e = \frac{2\pi \times (8.854 \times 10^{-12}) \times (1.0)}{\ln \left[\frac{2 \times 1.0}{0.15} \sqrt{\frac{(4 \times 0.2) + 1.0}{(4 \times 0.2) + (3 \times 1.0)}} \right]} = 26.498 \text{ pF}$$

ดังนั้น จะได้ค่าความจุสเตรย์ลงดินประมาณ 26.498 pF

ปร.
๗๖๕ ๗
๒๕๖๑



รูปที่ 3.1 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อย

3.2.2 การออกแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าของภาคแรงสูง

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยที่เลือกมาใช้ในการออกแบบพิกัดของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด 100 kV นั้นใช้ค่า 470 pF พิกัดแรงดัน 650 V_{ac} ดังรูปที่ 3.1 เนื่องจากจะต้องคิดคำนึงถึงผลของกะเป๋ชิตันซ์รวมที่ต่ออันดับแล้วมีค่าไม่มากเกินไปและสามารถทนแรงดันสูง กระแสสลับที่ต้องการวัดได้ จึงได้ออกแบบให้พิกัดแรงดันเมื่อ 120% ของพิกัดแรงดันใช้งานเพื่อให้ผลการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEC60060-2 (1994) [4] ดังนั้นจะได้ค่าแรงดันในการออกแบบเป็น 120 kV และสามารถคำนวณหาจำนวนตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยได้จากสมการที่ 3.2 และหาค่ากะเป๋ชิตันซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ต่ออนุกรมกันของภาคแรงสูงได้จากสมการที่ 2.9 ได้ดังนี้

$$N = U_{120\%} / U_C \quad (3.2)$$

โดยที่	N	คือ จำนวนของตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยภาคแรงสูง
	$U_{120\%}$	คือ พิกัดแรงดันเพื่อ 120% ของพิกัดการใช้งาน
	U_C	คือ พิกัดแรงดันที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยทนได้

เมื่อแทนค่าแล้วจะได้ดังนี้

$$\text{จำนวนตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยภาคแรงสูง } N = \frac{120 \times 10^3 \text{ V}}{650 \text{ V}} = 184.615 \text{ ตัว}$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยจำนวน 184 ตัว โดยไม่นำจุดทศนิยมมาคิด

(.) ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าของภาคแรงสูงรวม $C_1 = \frac{470\text{pF}}{184} = 2.554 \text{ pF}$

3.2.3 การออกแบบอิลекโตรด

ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{\max}) ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะของขั้วอิลекโตรดของฝาปิดด้านบนและด้านล่าง รูปแบบอิลекโตรดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ คือสนามไฟฟ้าในปริมาตรระหว่างอิลекโตรดนั้นจะเท่ากันหมดทุกจุด ซึ่งจะช่วยให้ยากต่อการเกิดดิสชาร์จตามผิวขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนมีค่าสูง โดยการออกแบบอิลекโตรดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.2 cm เพื่อรับแรงทางกล ซึ่งรัศมีความโค้งของอิลекโตรดฝาปิดด้านบนและด้านล่างมีรัศมีความโค้งไม่มีเหลี่ยมและปลายแหลม โดยได้ทำขอบพิเศษที่เหมาะสมวางขนานกัน อิลекโตรดแบบของโรกอฟสกี (Rogowski Profile) เป็นอิลекโตรดที่มีขอบตามแนวเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าที่ทำให้สนามไฟฟ้านอกแผ่นมีค่าน้อยกว่าค่าสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอระหว่างภายในอิลекโตรด

รูปแบบอิลекโตรดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอหมายถึง อิลекโตรดสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่องว่างระหว่างอิลекโตรดเท่ากันดังสมการที่ 3.3

$$E = E_{\max} = \frac{U}{d} \tag{3.3}$$

อิลекโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดแตกต่างกันมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะเรขาคณิตของอิลекโตรดที่จะมีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือไม่ซึ่งจะเห็นได้จากสมการความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของอิลекโตรดดังสมการที่ 3.4

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \tag{3.4}$$

โดยที่

η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Utilization); $\eta^* = E_{ac}/E_{\max} \leq 1$

U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าระหว่างอิลекโตรด

d คือ ระยะห่างระหว่างอิลекโตรด

E_{\max} คือ ค่าเฉลี่ยสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ U/d

E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิลекโตรด

จึงอาจกล่าวได้ว่า η^* ก็คือ ครรชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใดในกรณีที่อิเล็กโตรดไม่เป็นแผ่นระนาบ จะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่มี η^* ต่ำเนื่องจากผลของรูปร่าง ขนาดและลักษณะของอิเล็กโตรดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ที่ผิวอิเล็กโตรดจะมีค่ามาก เพราะฉะนั้นการออกแบบฟาร์มิตทั้งสองด้านจึงออกแบบเป็นแบบแผ่นระนาบที่มีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่าท่อพีวีซี ซึ่งจะทำให้สนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่องระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากัน โดยแสดงดังรูปที่ 3.4

สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field) ทางภาคปฏิบัติทั่วไปใช้ $E_c = 30$ kVp/cm ฉะนั้นรัศมีของอิเล็กโตรดคำนวณได้จากสมการที่ 3.5

$$r \geq \frac{U_p}{E_{max}} = \frac{U_p}{30} \quad (3.5)$$

เมื่อ

U_p	คือ ค่ายอดแรงดันไฟฟ้า	(kVp)
r	คือ รัศมีของโถ่ทรงกลม	(cm)
E_{max}	คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด	(kVp/cm)
E_c	คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนอากาศ	(kVp/cm)

$$r \geq \frac{(100 \text{ kV}_{rms} \times \sqrt{2})}{30 \text{ kV}_p} = 4.714 \text{ cm}$$

ดังนั้น จึงออกแบบรัศมีของอิเล็กโตรดเป็น 10 cm เพื่อสามารถประกอบเข้ากับท่อพีวีซีได้

3.2.4 การคำนวณแรงดันของตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยแต่ละตัว

เนื่องจากแรงดันกระจายของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) เพราะค่าความจุสเตรย์โดยตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยตัวบนสุด มีแรงดันตกคร่อมมากที่สุด ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยตัวบนสุดจะสามารถทนแรงดันเมื่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูงนี้ใช้งานที่แรงดันพิกัดได้หรือไม่ โดยจะพิจารณาในกรณีเกิดแรงดันตกคร่อมมากที่สุด โดยที่ระยะห่างระหว่างแถวจะกำหนดด้วยค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของอากาศ 30 kV/cm

การคำนวณหาแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยตัวบนสุด สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยต่อตัว} = [100 \text{ kV} / 184] = 543.478 \text{ V}$$

$$\text{ค่าแรงดันระหว่างแถวต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อย} = 543.478 \text{ V} \times \sqrt{2} \times 16 = 12.297 \text{ kV}$$

ดังนั้น ระยะห่างระหว่างแถวของตัวเก็บประจุต้องมีค่า = $[(12.297 \times 1\text{cm}) / 30] \geq 0.41 \text{ cm}$ เป็นอย่างต่ำ และดังนั้นระยะห่างระหว่างแถวจึงกำหนดให้มีค่า 3 cm

จากการคำนวณจะเห็นได้ว่าค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยตัวบนสุดเท่ากับ 543.478 V ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ที่ได้เลือกมาใช้ในการออกแบบในครั้งนี้ และใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยภาคแรงสูงเป็นจำนวน 184 ตัว ออกแบบใช้แผ่นไอโซะกลีคเป็นจำนวน 23 ชั้น มีตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยชั้นละ 8 ตัว

3.2.5 การออกแบบและสร้างภาคแรงต่ำ

จากอัตราส่วนแรงดันที่กำหนด 1000:1 ดังนั้นจะได้แรงดันขาออกด้านแรงต่ำที่พิกัดเป็น 100 V ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสามารถใช้กับเครื่องมือวัดด้านแรงต่ำทั่วไปได้ การเลือกใช้อัตราส่วน 1000:1 เพื่อความสะดวกของผู้ใช้ในการอ่านค่าและแปลงกลับเป็นค่าจริงได้ง่าย ดังนั้นจึงคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำจากสมการที่ 3.6

$$C_2 = \left(\frac{U}{U_2} \times C_1 \right) - C_1 \quad (3.6)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการแล้ว จะได้

$$C_2 = (1000 \times 2.554 \text{ pF}) - 2.554 \text{ pF} = 2.551 \text{ nF}$$

3.3 การออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ขนาดพิกัด 50 kV

ในการออกแบบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าขนาดพิกัด 50 kV นั้น เราใช้วิธีการคิดคำนวณเกี่ยวกับการออกแบบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าขนาดพิกัด 100kV ดังที่กล่าวมา ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบองค์ประกอบภาคแรงสูง ภาคแรงต่ำ แต่จะใช้จำนวนตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยต่างกัน ซึ่งสามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้ดังนี้

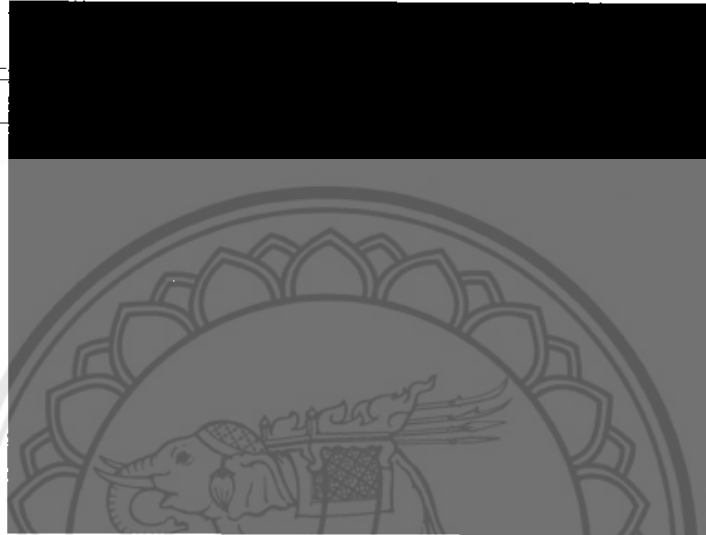
3.3.1 การออกแบบขององค์ประกอบภาคแรงสูง

การหาจำนวนตัวเก็บประจุภาคแรงสูง สามารถหาได้จากสมการ 3.2

$$N = \frac{60 \times 10^3 \text{ V}}{650 \text{ V}} = 92.308 \text{ ตัว}$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยจำนวน 92 ตัว โดยไม่นำจุดทศนิยมมาคิด

จะเห็นได้ว่าการออกแบบภาคแรงสูงของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ขนาดพิกัด 100 kV นั้น เราได้ใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยจำนวน 184 ตัว โดยแบ่งเป็น 23 ชั้น ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยชั้นละ 8 ตัว แต่ในการออกแบบภาคแรงสูงของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ขนาดพิกัด 50 kV นั้นเราจะต้องใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าจำนวน 92 ตัว โดยออกแบบเป็น 23 ชั้นเช่นกัน จะมีตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยชั้นละ 4 ตัว ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การจัดวางตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

ดังนั้น ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูงรวมมีค่า ดังนี้

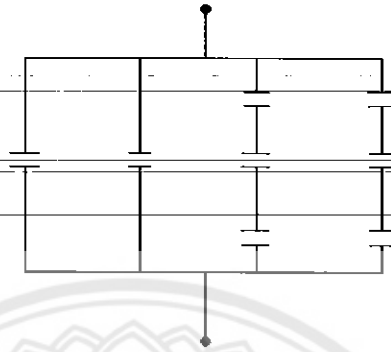
$$C_1 = \frac{470 \text{ pF}}{92} = 1.277 \text{ pF}$$

3.3.2 การออกแบบของคัปเปอภาคแรงต่ำ

การออกแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าของภาคแรงต่ำรวม ของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ขนาดพิกัด 50 kV นั้นก็สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.6 $C_2 = \left(\frac{U}{U_2} \times C_1 \right) - C_1$ เมื่อแทนค่าแล้วจะได้

$$C_2 = \left[\frac{1000}{1} \times 1.277 \text{ pF} \right] - 1.277 \text{ pF} = 1.276 \text{ nF}$$

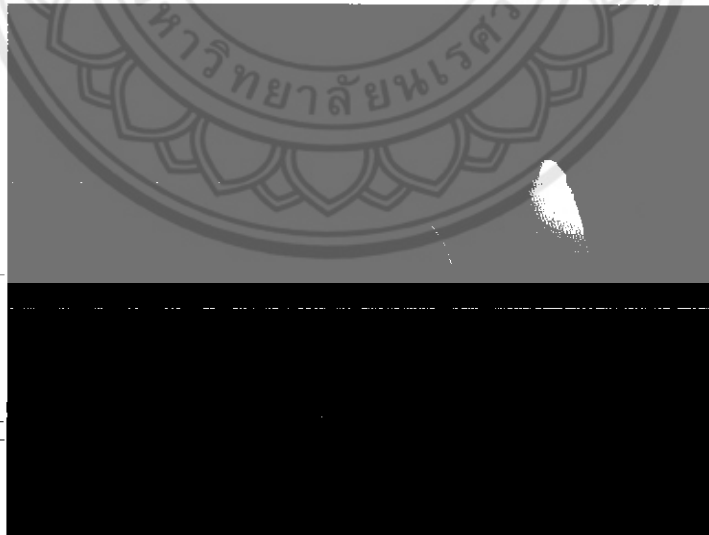
แต่ในการออกแบบจริงๆ นั้น เรานำเอาตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยมาต่อผสมกันดังรูปที่ 3.3 เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับการคำนวณมากที่สุด ซึ่งค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าของภาคแรงต่ำรวมที่ออกแบบมานั้น มีค่าเท่ากับ 1.2534 nF



รูปที่ 3.3 วงจรการออกแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำ

3.3.3 ขั้นตอนการสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ขนาดพิกัด 50 kV

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นใสอะคริลิกหนาขนาด 0.2 cm มาตัดเป็นรูปวงแหวนโดยที่ขนาดรัศมีภายนอกเท่ากับ 6.25 cm และขนาดรัศมีภายในเท่ากับ 2.1 cm จำนวน 25 แผ่น แล้วเจาะรูจำนวน 16 รู ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผ่นใสอะคริลิก หนาขนาด 0.2 cm

ขั้นตอนที่ 2 นำท่อแคปทีวทองแดงเบอร์ 17 มาตัดแล้วตัดให้ได้รูปทรงเพื่อใช้เชื่อมต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยแต่ละตัว ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ท่อแคปทีวทองแดงใช้เชื่อมต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยแต่ละตัว

ขั้นตอนที่ 3 นำตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยภาคแรงสูงมาต่ออนุกรมกัน โดยต่อชั้นละ 4 ตัว จำนวน 23 ชั้น แล้วเชื่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้า โดยการบัดกรีให้ติดกับท่อแคปทีวทองแดง ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การต่ออนุกรมตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยภาคแรงสูง

ขั้นตอนที่ 4 นำตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยภาคแรงสูงที่ต่ออนุกรมกันบนแผ่นใสอะคลิลิก จำนวน 23 แผ่น มาต่อกันโดยการบัดกรีเชื่อมแต่ละชั้น โดยให้ระยะห่างระหว่างชั้นห่างกัน 3 cm แล้วยึดแผ่นใสอะคลิลิกทั้งหมดด้วยท่อพีวีซีและแท่งใสอะคลิลิก เพื่อไม่ให้เสียรูปทรงและยังเสริมความแข็งแรงของตัวแบ่งแรงดัน ดังรูปที่ 3.7



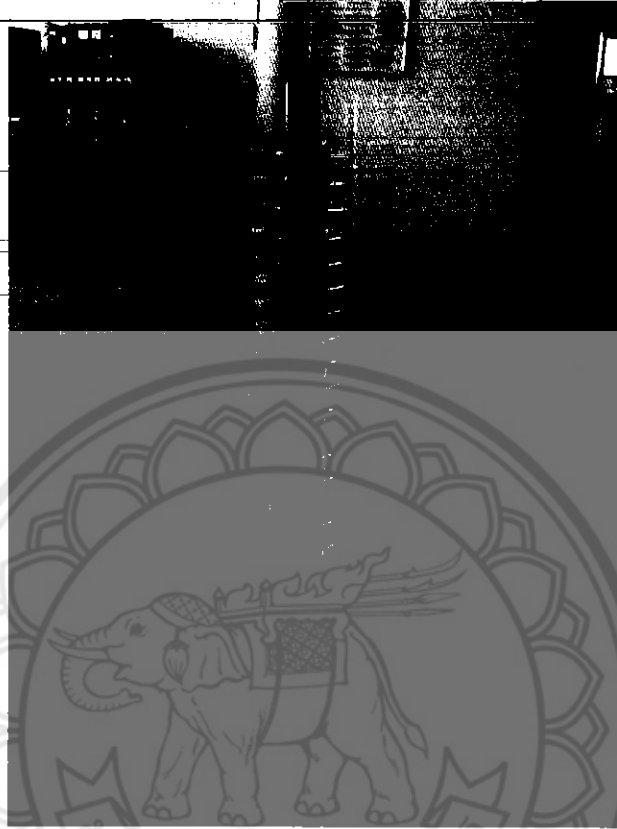
รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่อตัวเก็บประจุย่อยภาคแรงสูง

ขั้นตอนที่ 5 นำตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยภาคแรงต่ำมาเชื่อมต่อเข้ากับตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยภาคแรงสูง โดยให้ระยะห่างระหว่างภาคแรงต่ำกับฐานห่างกัน 6 cm และระยะห่างระหว่างภาคแรงต่ำกับภาคแรงสูงห่างกัน 6 cm ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 จุดเชื่อมต่อระหว่างภาคแรงสูงกับภาคแรงต่ำ

ขั้นตอนที่ 6 นำตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่สร้างได้มาใส่ลงในฐานสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นแผ่นอะคริลิก ขนาดหนา 2 cm แล้วจะได้ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบดังรูป ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

3.4 การฉนวนภายในของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

ในการทดสอบนั้นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดสูงมากๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการฉนวนภายในตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าเพื่อไม่ให้เกิดการวาวไฟขึ้น ซึ่งในการฉนวนตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าขนาดพิกัด 100 kV นั้นใช้ก๊าซ SF₆ เป็นตัวฉนวน แต่ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ขนาดพิกัด 50 kV จะใช้อากาศเป็นตัวฉนวน ซึ่งคุณสมบัติความเป็นฉนวนของอากาศนั้น มีความคงทนต่อสนามไฟฟ้า 30 kV/cm, 1 bar ที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งสามารถคำนวณว่า ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ขนาดพิกัด 50 kV ที่ใช้อากาศเป็นฉนวนนั้นทนต่อแรงดันได้หรือไม่ดังนี้

เนื่องจาก ระยะห่างระหว่างแถวของภาคแรงสูง = 3 cm

$$\text{ดังนั้น ความคงทนต่อสนามไฟฟ้า ของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้านี้} = \frac{30\text{kV}}{\text{cm}} \times 3\text{cm} = 90 \text{ kV}$$

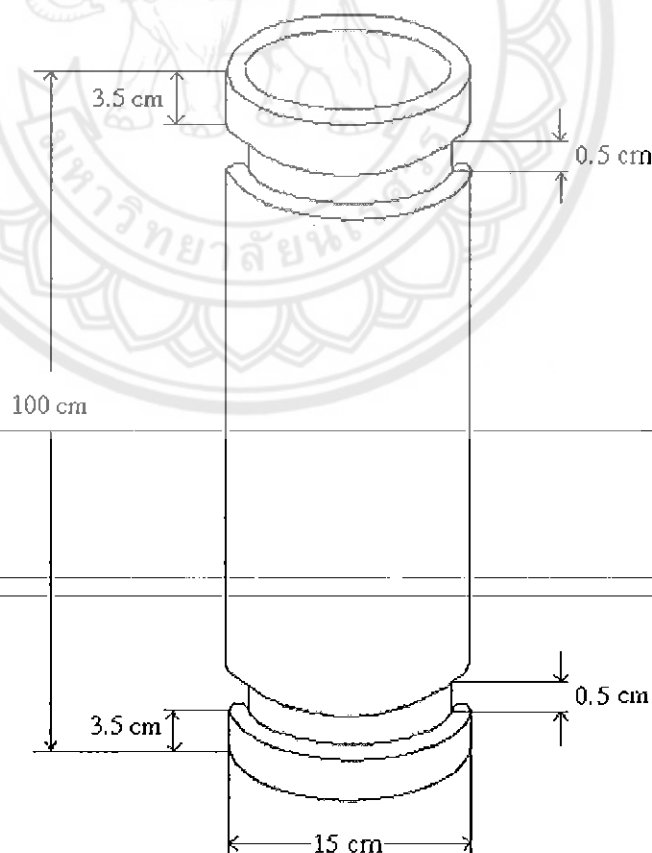
จะเห็นได้ว่า การทดสอบครั้งนี้สามารถใช้อากาศเป็นตัวฉนวนได้ เนื่องจากตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนั้น พิกัดแรงดันสูงสุดไม่เกิน 90 kV และได้นำไปทดสอบกับแรงดันสูงเพียง 1 – 10 kV เท่านั้น

3.5 โครงสร้างภายนอกของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

ในโครงการนี้จะเห็นได้ว่าผู้จัดทำได้ออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าเฉพาะโครงสร้างภายในแล้วฉนวนภายในด้วยอากาศเท่านั้น แต่ผู้จัดทำได้ทำการออกแบบโครงสร้างภายนอกด้วย โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ท่อพีวีซี หัว/ท้ายของอิเล็กโตรด และการฉนวนกั๊ซ SF₆ ซึ่งสามารถได้ดังนี้

3.5.1 การออกแบบท่อ PVC

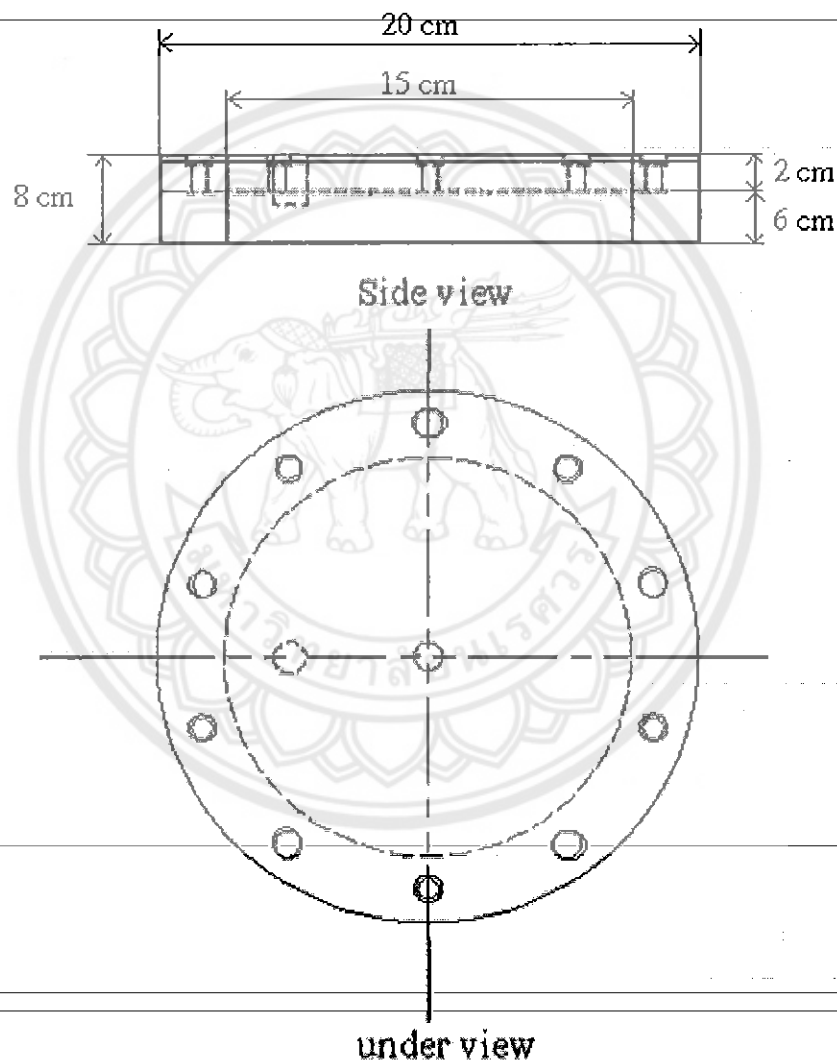
ในการออกแบบท่อพีวีซีนั้น จะใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15 cm และยาวเท่ากับ 100 cm เพื่อสามารถบรรจุโครงสร้างภายในของตัวแบ่งแรงดันที่ได้สร้างไว้ แล้วทำการเจาะร่องทางปลายของท่อพีวีซีทั้งสองด้าน โดยขนาดความกว้างแต่ละด้านเท่ากับ 0.5 cm เพื่อเป็นที่ยึดของอิเล็กโตรด ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 3.10



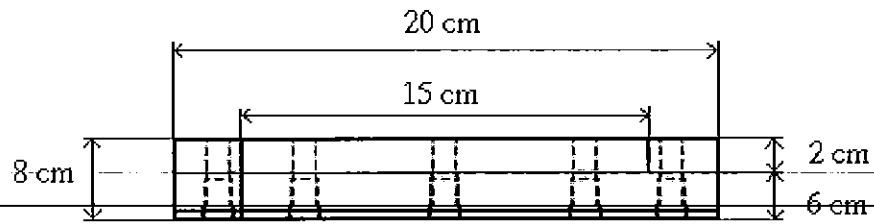
รูปที่ 3.10 ขนาดของท่อพีวีซี

3.5.2 การออกแบบหัว/ท้ายของอิเล็กทรอนิกส์

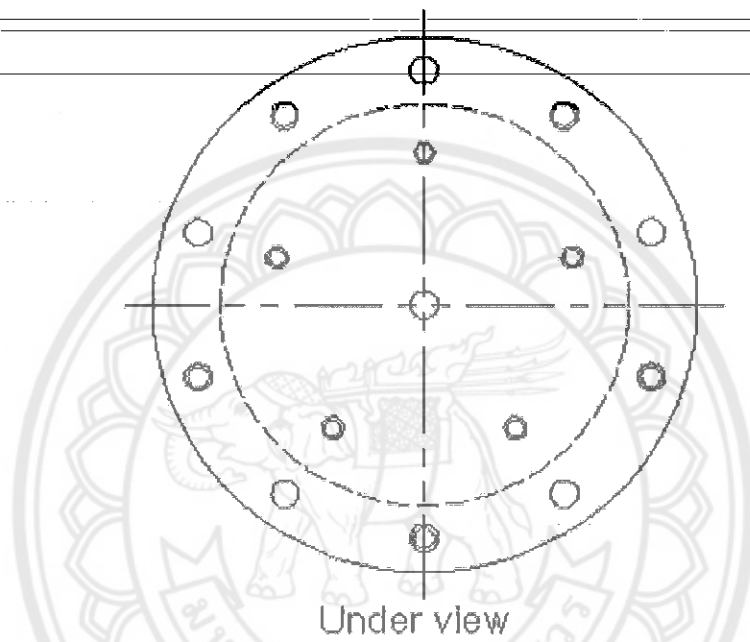
ในการออกแบบหัว/ท้ายของอิเล็กทรอนิกส์นั้นทำมาจากอะลูมิเนียม โดยสามารถอ้างอิงจากการคำนวณรัศมีของหัว/ท้ายของอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้จากสมการที่ 3.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดรัศมีที่ใช้ต้องมีขนาดอย่างน้อยเท่ากับ 4.714 cm ดังนั้นผู้จัดทำจึงออกแบบให้รัศมีหัว/ท้ายของอิเล็กทรอนิกส์มีขนาด 10 cm และความหนา มีขนาดเท่ากับ 8 cm โดยที่ส่วนที่ยึดกับท่อพีวีซีหนา 6 cm และส่วนที่เป็นฝาปิด หนา 2 cm ดังรูปที่ 3.11 และ รูปที่ 3.12 เพื่อสามารถนำมายึดกับท่อพีวีซี เนื่องจากว่าท่อพีวีซีที่ใช้นั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm



รูปที่ 3.11 ส่วนหัวของอิเล็กทรอนิกส์



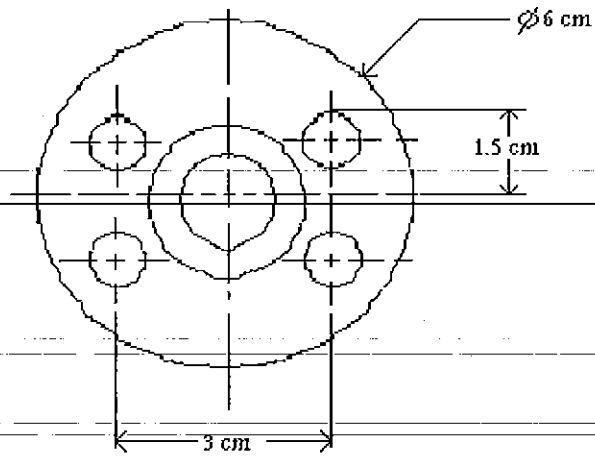
side view



Under view

รูปที่ 3.12 ส่วนท้ายของอิเล็กโตรด

จากนั้นทำการออกแบบตัวจับสายนำทางด้านแรงสูง เพื่อใช้จับสายนำในขณะที่วัด ซึ่งจะใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุ เหมือนกับอิเล็กโตรด โดยต้องทำเกลียวเพื่อยึดกับอิเล็กโตรด ซึ่งมีรูปร่างและขนาดดังรูปที่ 3.13



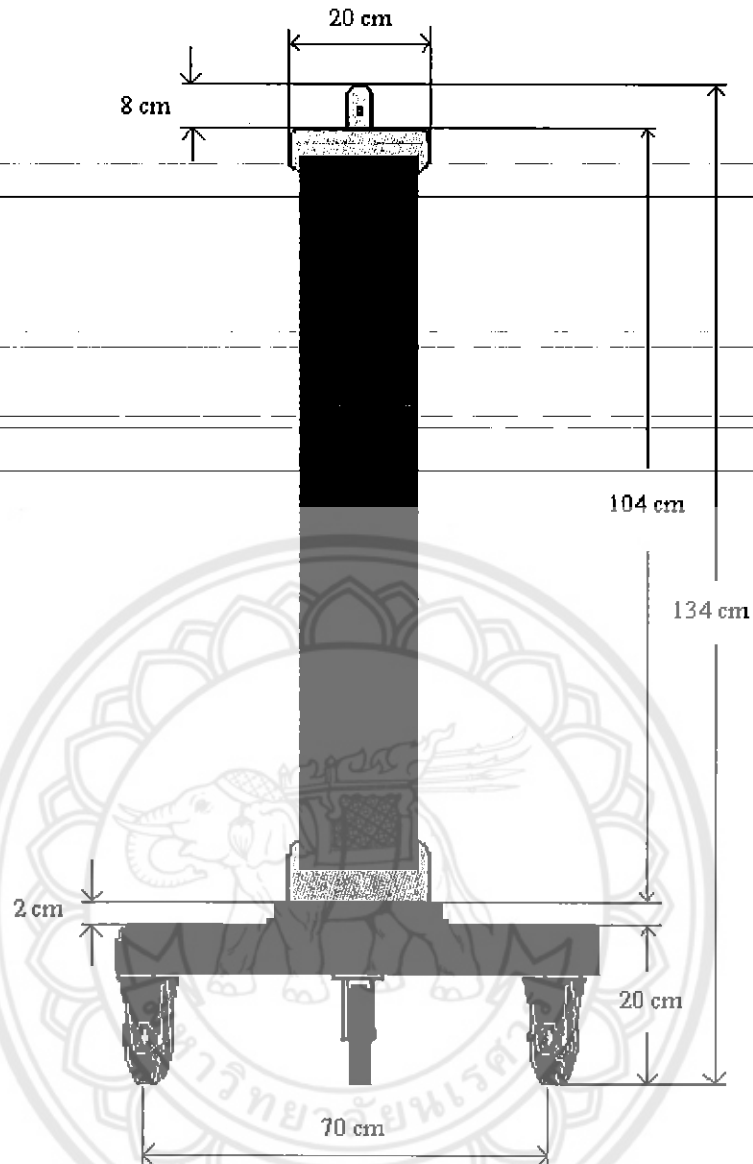
Top View



Side View

รูปที่ 3.13 ตัวจับสายนำด้านแรงสูง

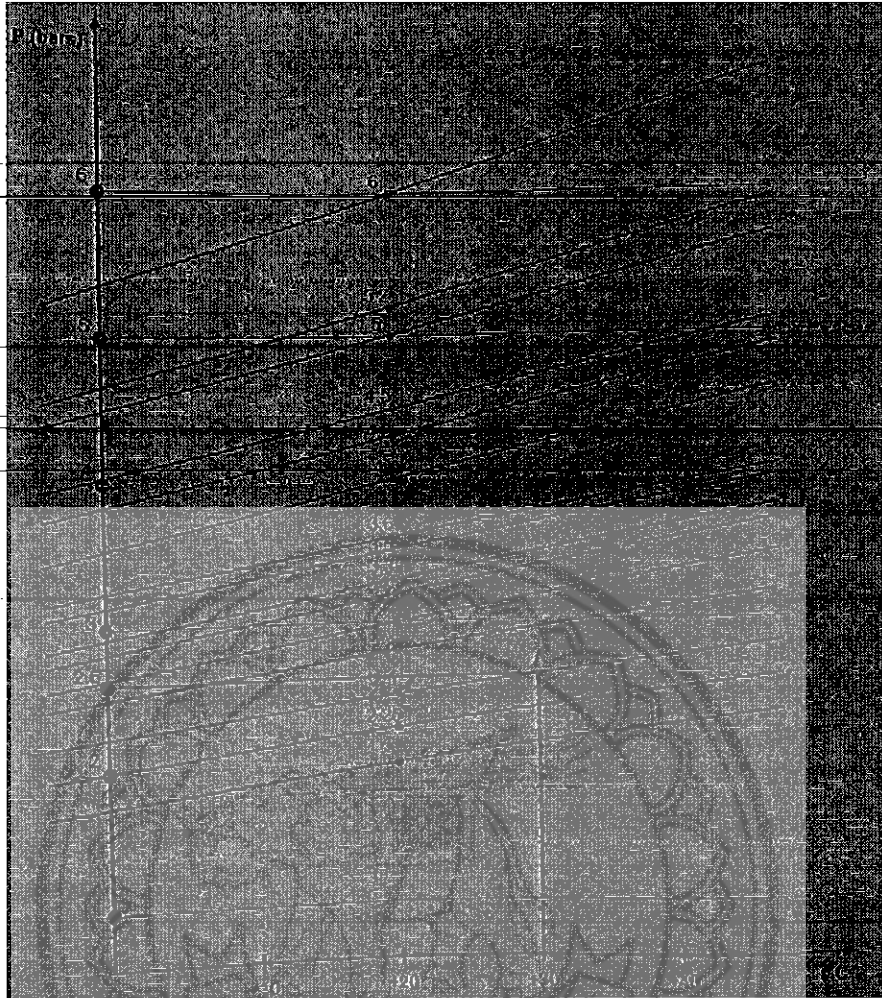
เมื่อนำหัว/ท้ายของอิเล็ก โตรดมายึดกับท่อพีวีซี แล้วต้องนำมายึดติดกับฐานล้อยึดเพื่อสะดวกต่อการเคลื่อนย้าย ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 โครงสร้างภายนอกของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

3.5.3 การอัดฉนวนก๊าซ SF₆

การอัดฉนวนก๊าซ SF₆ ในโครงการนี้ผู้จัดทำไม่สามารถระบุได้ว่าต้องอัดก๊าซ SF₆ จำนวนเท่าใด เนื่องจากในการอัดก๊าซ SF₆ นั้นต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซ SF₆ กับอุณหภูมิห้องขณะที่อัดก๊าซ ดังรูปที่ 3.15 แต่โดยส่วนใหญ่จะอัดก๊าซ SF₆ ประมาณ 1 – 3 bar



รูปที่ 3.15 รูปกราฟแสดงความดันก๊าซ SF₆ ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ

3.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

จากการออกแบบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าได้ทำการแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การออกแบบโครงสร้างภายในและการออกแบบโครงสร้างภายนอกของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถสรุปคุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 การออกแบบโครงสร้างภายในของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

รายละเอียด	ค่าพารามิเตอร์	หมายเหตุ
1. Rated Voltage	50 kV	-
2. Frequency	50 – 60 Hz	-
3. Ratio	1000 : 1	-
4. ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยภาคแรงสูง (C_1)	1.277 pF	ใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อย 92 ตัว
5. ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยภาคแรงต่ำ (C_2)	1.2534 nF	ใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อย 8 ตัว
6. ก๊าซ SF ₆	-	-

ตารางที่ 3.3 การออกแบบโครงสร้างภายนอกของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

รายละเอียด	ขนาด (cm)
1. ความสูงของท่อพีวีซี (l)	100 cm
2. เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อพีวีซี (d)	15 cm
3. รัศมีหัว/ท้ายของอิเล็กโตรด (r)	10 cm
4. ระยะห่างระหว่างพื้นดินถึงท้ายอิเล็กโตรด (s)	20 cm
5. ความกว้างของฐานล้อย	70 cm

บทที่ 4

การทดสอบและประเมินผล

4.1 บทนำทั่วไป

ในการทดสอบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า ขนาดพิกัด 50 kV นั้นเนื่องจากแรงดันที่ใช้เป็นแรงดันที่มีค่าสูงมาก เวลาออกแบบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องมีการคำนวณภายในและต้องสร้างอิเลคโตรดหัวท้ายมาเป็นฝาปิดตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าเพื่อไม่ให้เกิดการวาวไฟ ซึ่งจะต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง ดังนั้นจึงทำการทดสอบกับแรงดันที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งในโครงการนี้จะใช้แรงดันสูงกระแสสลับ ขนาดพิกัด 1 – 10 kV มาทดสอบความคงทนของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า และหาค่าความเป็นเชิงเส้นและความเป็นเสถียรภาพของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [4] ส่วนการทดสอบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดพิกัด 180 – 220 V นั้นจะทำการทดสอบเพื่อหาค่าสัดส่วนแรงดันระหว่างภาคแรงต่ำกับภาคแรงสูงว่าจะได้ผลตรงตามที่ทฤษฎีกำหนดหรือไม่

4.2 การทดสอบกับแรงดันสูงกระแสสลับ ขนาดพิกัด 1 – 10 kV

ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบความคงทนของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า และการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC60060 – 2 (1994) [4] ซึ่งอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูง หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการทดสอบ สายนำแรงสูง สายเคเบิลวัด และเครื่องมือวัดภาคแรงต่ำซึ่งเมื่อนำมาต่อกันจะได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การทดสอบกับแรงดันสูงกระแสสลับ ขนาดพิกัด 1 - 10 kV

4.2.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าของภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำนั้น เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้วัดนั้นหายากจึงทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้ ดังนั้น ผลการวัดจึงแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง (C_1)

ค่า C_1 ทางคำนวณ (pF)	ค่า C_1 ทางการวัด (pF)	ค่า % Error
1.277	N/A	N/A

ตารางที่ 4.2 ค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำ (C_2)

ค่า C_2 ทางคำนวณ (nF)	ค่า C_2 ทางการวัด (nF)	ค่า % Error
1.276	N/A	N/A

หมายเหตุ N/A คือ ไม่สามารถหาค่าได้ เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้วัดนั้นหายาก

4.2.2 การทดสอบความคงทนของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

ในการทดสอบความคงทนของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้านั้น ทดสอบเพื่อดูว่าแรงดันที่พิกัดของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าสามารถทนต่อการเกิดเบรกควาน์ในขณะที่ใช้งานได้หรือไม่ ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายและอันตรายขึ้นกับตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีข้อกำหนดมาตรฐานเพื่อทำการทดสอบ

ผลความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ระดับแรงดันทดสอบ 110% ของพิกัดแรงดันสูงสุด นาน 1 นาที โดยตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้ใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ในการทดสอบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าของโครงการนี้จะทดสอบกับแรงดันสูงกระแสสลับ ขนาดพิกัดเพียง 1–10 kV และใช้เวลาทดสอบแรงดันแต่ละช่วงเพียง 15 วินาที เนื่องจากว่าตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนั้นยังไม่ได้สร้างอิเล็กทรอนิกส์หัวท้ายมาประกอบและยังไม่ได้ฉนวนภายในด้วยก๊าซ SF₆ จึงส่งผลให้ไม่สามารถวัดค่าแรงดันสูง ขนาดพิกัด 11 – 60 kV ได้ ซึ่งถ้าหากจ่ายแรงดันเข้าไปสูงเกินไปอาจจะทำให้ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าและอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการทดสอบเสียหายได้ ผลการทดสอบความคงทนของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความคงทนของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดพิกัด 50 kV

พิกัด แรงดัน (kV)	แรงดันทดสอบ (kV)	เวลาที่ใช้ทดสอบ (s)	ผลการทดสอบ
1	1.1	15	Withstand
2	2.1	15	Withstand
3	3	15	Withstand
4	3.9	15	Withstand
5	5	15	Withstand
6	6.1	15	Withstand
7	7	15	Withstand
8	8.2	15	Withstand
9	9.2	15	Withstand
10	10.1	15	Withstand
60	N/A	60	N/A

จากผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่าตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าสามารถทนต่อแรงดันที่ทดสอบได้ แต่ไม่สามารถนำไปอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994) [4] กำหนดไว้ เนื่องจากว่าไม่สามารถทดสอบที่ระดับแรงดันทดสอบ 110% ของพิกัดแรงดันสูงสุด นาน 1 นาที ได้

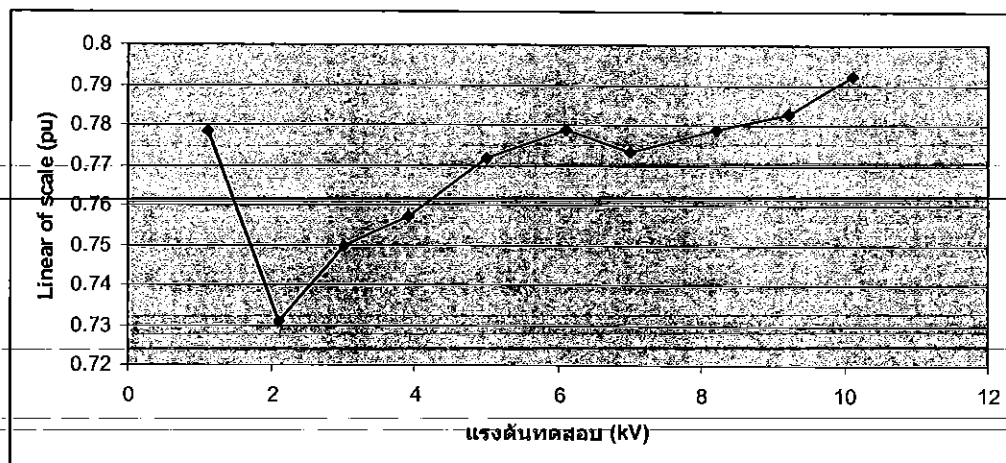
4.2.3 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น

ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเป็นการวัดแรงดันเปรียบเทียบกับระบบวัดแรงดันอ้างอิง เพื่อผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบว่าค่าแรงดันที่วัดมีความเป็นเชิงเส้นหรือไม่ ในการทดสอบ จะทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 10 ระดับ เพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับแรงดัน ซึ่งส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะต้องมีค่าไม่เกิน $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ยระบบวัดที่ทำการทดสอบจึงถือได้ว่ามีความเป็นเชิงเส้นผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบภาคแรงสูง

แรงดันทดสอบ U (kV)	แรงดันอ้างอิง U_{ref} (kV)	แรงดันใช้ทดสอบ U_c (kV)	Linear of scale U_{ref}/U_c (pu)
1	1.1	1.413	0.7784
2	2.1	2.873	0.7309
3	3.0	4.0	0.7500
4	3.9	5.15	0.7572
5	5.0	6.48	0.7716
6	6.1	7.83	0.7790
7	7.0	9.05	0.7734
8	8.2	10.53	0.7787
9	9.2	11.75	0.7829
10	10.1	12.75	0.7921
ค่าเฉลี่ย			0.7694
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.0182

จากผลการทดสอบ สามารถเขียนกราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดที่ทำการทดสอบที่ค่าต่างๆ-10 ระดับ ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้น

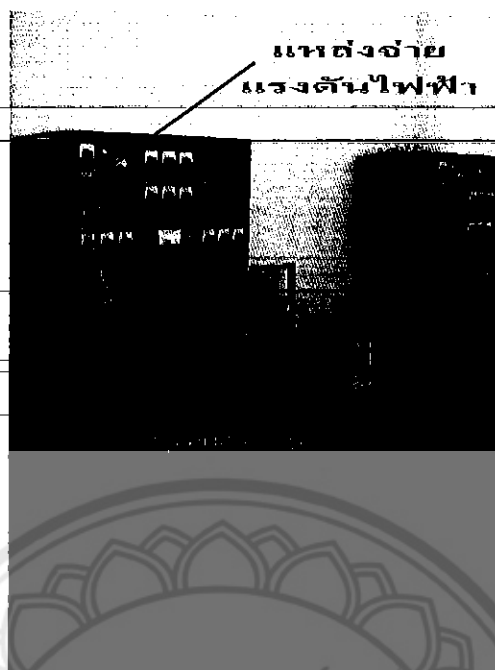
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทดสอบ (kV) กับ Linear of scale (pu) นั้นไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งถ้าหากความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นนั้น กราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในแนวขนานกับแกนของแรงดันทดสอบ (kV) และจากตารางที่ 4.4 สามารถนำผลที่ได้มาคำนวณหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อวิเคราะห์ว่าตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่สร้างมีความเป็นเชิงเส้นหรือไม่ ดังนี้

$$\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน} = 0.0182 \times \frac{100\%}{0.7694} = 2.36\%$$

จะเห็นได้ว่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 2.36% ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994) [4] ที่กำหนดไว้ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้ต้องมีค่าไม่เกิน $\pm 1\%$ สาเหตุที่ผลการทดสอบไม่เป็นเชิงเส้นนั้นเกิดจากวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้เป็นองค์ประกอบในการสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ายังไม่ได้มาตรฐานอีกทั้งยังไม่ได้นำอิเลคโตรดหัวท้ายมาประกอบเข้ากับตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าและยังไม่มีกรณวนภายในด้วยก๊าซ SF₆ ส่งผลให้ไม่สามารถวัดแรงดันสูงตามขนาดพิกัดที่กำหนดไว้จึงทำให้แรงดันอัดประจุทดสอบ (U_c) มีค่าแตกต่างกับแรงดันอัดประจุที่ใช้อ้างอิง (U_{ref}) มากเกินไป จึงส่งผลให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มีค่ามาก

4.3 การทดสอบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดพิกัด 180 – 220 V

ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสัดส่วนระหว่างภาคแรงต่ำกับภาคแรงสูง ซึ่งอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการทดสอบมี แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการทดสอบ ออสซิลอสโคปและสายไฟ โดยจะเริ่มจากการต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้ากับทางภาคแรงสูงของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การต่อแหล่งจ่ายแรงดันเข้ากับทางภาคแรงสูง

จากนั้นต่อออสซิลโลสโคปเข้ากับทางภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า เพื่อวัดเทียบแรงดัน ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การต่อออสซิลโลสโคปเข้ากับทางภาคแรงต่ำและภาคแรงสูง

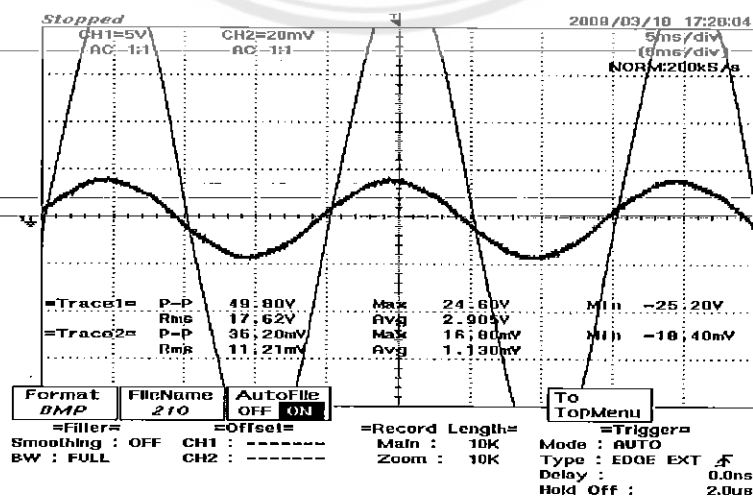
เมื่อต่ออุปกรณ์ต่างๆ เสร็จแล้ว จะได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การทดสอบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดพิกัด 180 – 220 V

แล้วทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าทางภาคแรงสูงของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าขนาดพิกัด 180 – 220 V ตามลำดับ โดยค่อยๆปรับแรงดันแรงไฟฟ้าขึ้นทีละ 10 V แล้วบันทึกผลของแรงดันไฟฟ้าจากออสซิลอโคป ซึ่งจะแสดงผลเป็นกราฟรูปคลื่นไซน์ ดังนี้

- เมื่อปรับแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไปที่ขนาดพิกัด 180 V จะได้ผลของแรงดันของภาคแรงต่ำจากออสซิลอโคปดังรูปที่ 4.6



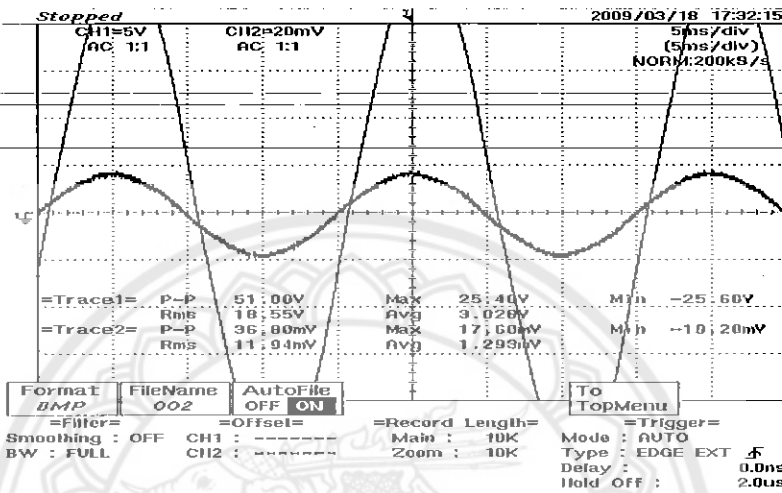
รูปที่ 4.6 ค่าแรงดันที่ออสซิลอโคปอ่านได้ เมื่อปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายเป็น 180 V

แรงดันภาคแรงสูงที่ออสซิลอสโคปอ่านได้ มีค่าเท่ากับ $17.62V_{rms} \times 10 = 176.2V_{rms}$

แรงดันภาคแรงต่ำที่ออสซิลอสโคปอ่านได้ มีค่าเท่ากับ $11.21mV_{rms} \times 10 = 112.1mV_{rms}$

- เมื่อปรับแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไปที่ขนาดพิกัด 190 V จะได้ผลของแรงดันของ

ภาคแรงต่ำจากออสซิลอสโคปดังรูปที่ 4.7



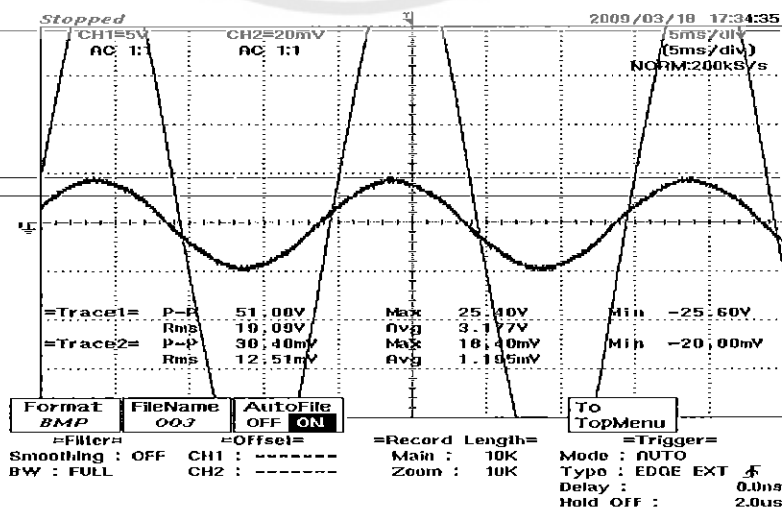
รูปที่ 4.7 ค่าแรงดันที่ออสซิลอสโคปอ่านได้ เมื่อ ปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายเป็น 190 V

แรงดันภาคแรงสูงที่ออสซิลอสโคปอ่านได้ มีค่าเท่ากับ $18.55V_{rms} \times 10 = 185.5V_{rms}$

แรงดันภาคแรงต่ำที่ออสซิลอสโคปอ่านได้ มีค่าเท่ากับ $11.94mV_{rms} \times 10 = 119.4mV_{rms}$

- เมื่อปรับแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไปที่ขนาดพิกัด 200 V จะได้ผลของแรงดันของ

ภาคแรงต่ำจากออสซิลอสโคปดังรูปที่ 4.8

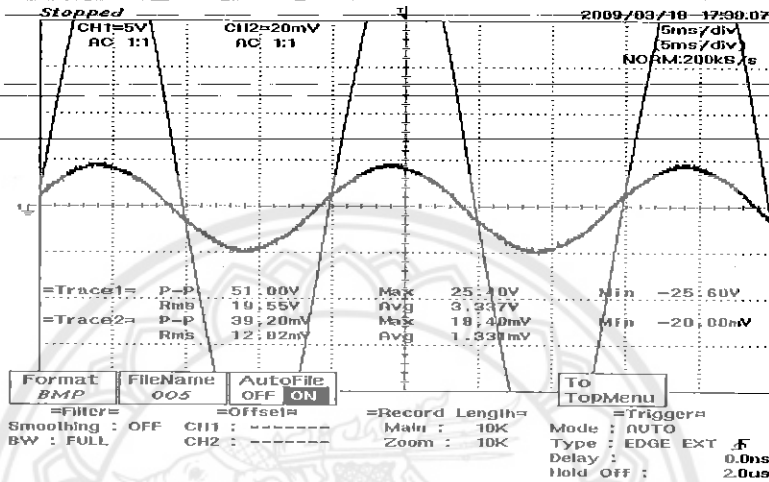


รูปที่ 4.8 ค่าแรงดันที่ออสซิลอสโคปอ่านได้ เมื่อ ปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายเป็น 200 V

แรงดันภาคแรงสูงที่ออสซิลอสโคปอ่านได้ มีค่าเท่ากับ $19.09V_{rms} \times 10 = 190.9V_{rms}$

แรงดันภาคแรงต่ำที่ออสซิลอสโคปอ่านได้ มีค่าเท่ากับ $12.51mV_{rms} \times 10 = 125.1mV$

- เมื่อปรับแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไปที่ขนาดพิกัด 210 V จะได้ผลของแรงดันของภาคแรงต่ำจากออสซิลอสโคปดังรูปที่ 4.9

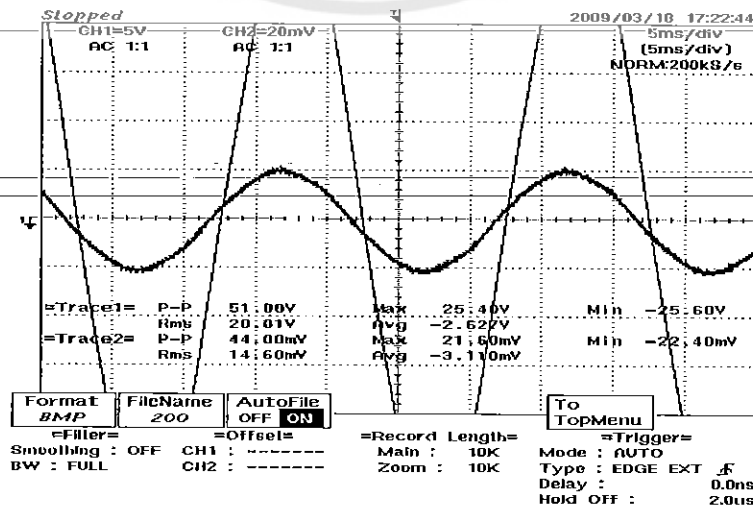


รูปที่ 4.9 ค่าแรงดันที่ออสซิลอสโคปอ่านได้ เมื่อ ปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายเป็น 210 V

แรงดันภาคแรงสูงที่ออสซิลอสโคปอ่านได้ มีค่าเท่ากับ $19.55V_{rms} \times 10 = 195.5V_{rms}$

แรงดันภาคแรงต่ำที่ออสซิลอสโคปอ่านได้ มีค่าเท่ากับ $12.82mV_{rms} \times 10 = 128.2mV_{rms}$

- เมื่อปรับแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไปที่ขนาดพิกัด 220 V จะได้ผลของแรงดันของภาคแรงต่ำจากออสซิลอสโคปดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ค่าแรงดันที่ออสซิลอสโคปอ่านได้ เมื่อ ปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายเป็น 220 V

แรงดันภาคแรงสูงที่ออสซิลอโคปอ่านได้ มีค่าเท่ากับ $20.01V_{\text{rms}} \times 10 = 200.1V_{\text{rms}}$

แรงดันภาคแรงต่ำที่ออสซิลอโคปอ่านได้ มีค่าเท่ากับ $14.60mV_{\text{rms}} \times 10 = 146.0mV_{\text{rms}}$

จากนั้นบันทึกผลของแรงดันภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำที่ได้จากการทดลองลงในตาราง

บันทึกผล

ตารางที่ 4.5 ตารางบันทึกผล

ภาคแรงสูง		ภาคแรงต่ำ	
แรงดันอ้างอิง (V)	แรงดันที่อ่านได้จาก ออสซิลอโคป (V)	แรงดันที่คำนวณได้ (mV)	แรงดันที่อ่านได้จาก ออสซิลอโคป (mV)
180	176.2	180	112.1
190	185.5	190	119.4
200	190.9	200	125.1
210	195.5	210	128.2
220	200.1	220	146.0

หาค่า % Error ของแรงดันภาคแรงต่ำที่อ่านได้จากออสซิลอโคปซึ่งหาได้จากสมการที่ 4.1
แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4.2

$$\%Error = \left(1 - \frac{U_{\text{test}}}{U_{\text{ref}}} \right) \times 100\% \quad (4.1)$$

โดยที่

U_{test} คือ แรงดันที่ได้จากการทดสอบ

U_{ref} คือ แรงดันที่ได้จากการคำนวณ

ตารางที่ 4.6 ค่า % Error ของแรงดันภาคแรงต่ำ

แรงดันภาคแรงต่ำที่ได้จากการ คำนวณ (mV)	แรงดันภาคแรงต่ำที่อ่านได้จาก ออสซิลโลสโคป (mV)	ค่า % Error
180	112.1	37.72 %
190	119.4	37.15 %
200	125.1	37.45 %
210	128.2	38.95 %
220	146.0	33.63 %

จากผลการทดสอบสามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้น เกิดจากตัวเก็บประจุที่ใช้สร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าไม่ได้มาตรฐานและอาจจะเกิดจากเครื่องมือที่ใช้วัดนั้นมีความไม่เที่ยงตรงเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้มีอายุการใช้งานนานหรืออาจจะขาดการบำรุงรักษา รวมไปถึงการขาดความชำนาญในการวัด จึงส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าในโครงการนี้ จะเห็นได้ว่าได้ทำการแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกจะทำการทดสอบกับแรงดันสูงกระแสสลับ ขนาดพิกัด 1–10 kV และอีกส่วนจะทำการทดสอบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดพิกัด 180–220 V ดังนั้น สามารถสรุปผลการทดสอบเป็นสองส่วน ดังนี้

5.1.1 การทดสอบกับแรงดันสูงกระแสสลับ ขนาดพิกัด 1 – 10 kV

จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า สามารถทดสอบแต่ความคงทนของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าและความเป็นเชิงเส้นเท่านั้น ซึ่งการทดสอบความคงทนของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้านั้นปรากฏว่าตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนั้นสามารถทนต่อแรงดันสูง ขนาดพิกัด 1–10 kV ภายใน 15 วินาที ของแต่ละช่วงแรงดัน แต่การทดสอบนี้ไม่ได้ทำยึดตามมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994) เนื่องจากว่าตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้ยังไม่ได้ทำสร้างอิเล็กโตรดหัวท้ายมาปิดและยังไม่ได้ฉนวนภายในด้วยก๊าซ SF₆ จึงส่งผลให้ไม่สามารถวัดค่าแรงดันสูง ขนาดพิกัด 11–60 kV ได้ ซึ่งถ้าหากทดสอบกับแรงดันที่สูงมากกว่านี้อาจจะทำให้ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าและอุปกรณ์ทดสอบอื่นๆ เสียหายได้ ส่วนการทดสอบความเป็นเชิงเส้นนั้นจะเห็นได้ว่าตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนั้นไม่เป็นเชิงเส้นที่ขนาดพิกัดแรงดัน 1–10 kV เนื่องจากแรงดันอัดประจุทดสอบ (U_c) มีค่าแตกต่างกับแรงดันอัดประจุที่ใช้อ้างอิง (U_{ref}) มากเกินไป เป็นผลให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มีค่ามาก จึงส่งผลให้ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าสร้างได้ไม่เป็นเชิงเส้น

5.1.2 การทดสอบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดพิกัด 180 – 220 V

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า แรงดันไฟฟ้าที่แสดงผลออกมาทางออสซิลโลสโคปนั้น เป็นกราฟรูปคลื่นไซน์สองรูปคลื่นและอินเฟสกัน โดยที่รูปคลื่นที่สูงนั้นแสดงถึงรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าภาคแรงสูง ส่วนรูปคลื่นที่ต่ำนั้นแสดงถึงรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าภาคแรงต่ำ ซึ่งเมื่อนำค่าแรงดันของภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำที่ได้จากการทดสอบมาหาอัตราส่วนแรงดัน จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้นั้นไม่ตรงตามที่ทฤษฎีกำหนด คือ อัตราส่วน 1000:1 และเมื่อนำไปหาค่า % Error แล้วจะเห็นได้ว่า เกิดความผิดพลาดสูง เนื่องจากว่า ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ใช้ในนั้น ไม่ได้มาตรฐาน และอุปกรณ์ที่ใช้วัดนั้นมีความผิดพลาดสูง เนื่องจาก อุปกรณ์ที่ใช้ในนั้นมีอายุการใช้งานนานหรืออาจจะขาดการบำรุงรักษา รวมไปถึงการขาดความชำนาญในการวัด จึงส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นคลาดเคลื่อนได้

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำปริญญานิพนธ์

- ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ใช้ยังไม่ได้มาตรฐานเนื่องจากไม่มีใบรับรองคุณภาพ จึงส่งผลให้ค่าที่ทดสอบได้นั้นมีความคลาดเคลื่อนสูง

ในการทดสอบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดพิกัด 180 – 220 V นั้นอาจจะเกิดจากอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบมีความผิดพลาดสูง เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้วัดนั้นมีอายุการใช้งานที่ยาวนานหรืออาจจะขาดการบำรุงรักษา รวมไปถึงการขาดความชำนาญในการวัด จึงทำให้ค่าที่วัดนั้นเกิดความคลาดเคลื่อนได้

- งบประมาณไม่เพียงพอ ทำให้ไม่สามารถสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบได้

- ผลการทดสอบส่วนใหญ่ไม่สามารถอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) เนื่องจากไม่สามารถทดสอบกับแรงดันที่สูงๆ ได้ เพราะว่าตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนั้นยังไม่สมบูรณ์แบบ

- ขาดทักษะและความชำนาญในการออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

- การทำงานล่าช้า เนื่องจากไม่ได้วางแผนการดำเนินงานที่รอบคอบ

- วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้านั้นหาซื้อยาก

- เครื่องมือวัดที่ใช้ทดสอบบางตัวนั้นหายาก

- ข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้ามีไม่เพียงพอ

5.3 แนวทางการแก้ไขปัญหา

- ใช้วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า มีประสิทธิภาพสูง

- ศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าเพิ่มเติม

- งบประมาณที่ใช้สร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าต้องมีให้เพียงพอ

- ใช้เครื่องมือในการทดสอบมีประสิทธิภาพสูงและเพียงพอ

- ศึกษาข้อมูลร้านขายวัสดุอุปกรณ์เพิ่มเติมก่อนจะเลือกซื้ออุปกรณ์

- ต้องมีวางแผนการทำงานก่อนลงมือปฏิบัติงาน

5.4 ข้อเสนอแนะ

- ควรจะทำการศึกษาวิธีการทดสอบเพิ่มเติม

- อุปกรณ์ควรมีราคาถูก ง่าย และมีประสิทธิภาพสูง

- ควรทำงานวางแผนการทำงานก่อนลงมือเพื่อลดระยะเวลาในการทำ

- ควรมีการศึกษาค้นคว้าโครงการในลักษณะเดียวกันเพื่อเพิ่มพัฒนาและประสิทธิภาพให้

สูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ตำราวย สังข์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- [2] ไชยพร หล่อทองคำ และคณะ, “รายงานการออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเซอร์มาตรฐานแบบตัวเก็บประจุขนาดพิกัด 300 กิโลโวลต์ สำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ”, โครงการวิจัยภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2546.
- [3] คณาพล ชีพธีารัง และคณะ, “การออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุขนาด 150 กิโลโวลต์”, ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2546.
- [4] IEC Publication 60060-2, “High-Voltage Test Techniques, Part 2: Measuring Systems”, Geneva, 1994.
- [5] ระบบการวัดแรงดันสูงด้วยโวลเตจดีไวเซอร์, http://www.eerg.eng.rmutp.ac.th/PDF_service/service_3.doc.
- [6] การวัดไฟฟ้าแรงดันสูง, <http://eestaff.kku.ac.th/~amnart/HVLectureNote/HVM.doc>.
- [7] ก๊าซ SF₆ (Gas SF₆), <http://www.geocities.com/pewkao/story.html>.
- [8] การวัดพลังงานสูญเสียเปล้าไดอิเล็กตริก, www.kmitl.ac.th/eeml/PDF/C%20tan..pdf.
- [9] คมสัน เพ็ชรรัักษ์ และคณะ, “แรงดันวาทไฟตามผิวท่อพีวีซี”, เอกสารรวมเล่มการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20, 2540.
- [10] Dielectric Materials, www.eng.mut.ac.th/upload_file/article/316.ppt.

ภาคผนวก ก
ตารางการแปลงหน่วย

ตาราง ก.1 การแปลงหน่วย

ตัวคูณ	คำอ่าน	สัญลักษณ์
10^{12}	Tera	T
10^9	Giga	G
10^6	Mega	M
10^3	Kilo	k
10^2	Hector	h
10	Deca	da
10^{-1}	Deci	d
10^{-2}	Centi	c
10^{-3}	Mili	m
10^{-6}	Micro	μ
10^{-9}	Nano	n
10^{-12}	Pico	p
10^{-15}	Famto	f
10^{-18}	Atto	a

ภาคผนวก ข

การออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ขนาดพิกัด 100 kV

การออกแบบและสร้างภาคแรงสูง

1. ความจุสเตรย์ลงดิน

ค่าความไวตามผิวกระแสสลับของฉนวนทอพีวีซีประมาณ 400 kV/m ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่สร้างมีค่าพิกัดแรงดันเท่ากับ 100 kV ดังนั้นระยะยาวไวตามฉนวนควรมีค่าน้อยต้องเท่ากับ 0.25 m ในกรณีนี้ออกแบบให้ทอพีวีซียาว 0.656 m เนื่องจากในที่นี่ระยะความยาว (l) จะขึ้นอยู่กับมิติภายในที่ทำการออกแบบ ตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นชนิด Metallized Polypropylene Flim ขนาดพิกัด $0.047 \mu F, 650 V_{ac}$ นำมาต่ออนุกรมกันจำนวน 23 ชั้น แต่ละชั้นมีตัวเก็บประจุย่อย 8 ตัวต่ออนุกรมกัน ใช้ตัวเก็บประจุย่อยทั้งหมด 184 ตัว ได้ความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ 255.435 pF เมื่อนำตัวเก็บประจุเชื่อมต่อกันจะได้ขนาดความยาวของทอพีวีซีที่ใช้เป็นฉนวนชั้นนอกเท่ากับ 0.656 m มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) เท่ากับ 0.140 m และระยะอิเล็กโทรดกลางเหนือพื้นดินของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า (s) เท่ากับ 0.2 m เมื่อแทนลงสมการจะได้เป็นดังนี้

$$C_s = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left[\frac{(2l)}{d} \sqrt{\frac{(4s+l)}{(4s+3l)}}\right]} = \frac{2\pi \times (8.854 \times 10^{-12}) \times 0.656}{\ln\left[\frac{2 \times 0.656}{0.14} \sqrt{\frac{(4 \times 0.2) + 0.656}{(4 \times 0.2) + (3 \times 0.656)}}\right]} = 29.029 \text{ pF}$$

ดังนั้นจะได้ค่าความจุสเตรย์ลงดินประมาณเท่ากับ 29.029 pF

2. โครงสร้างและการฉนวนของภาคแรงสูง

รายการคำนวณ

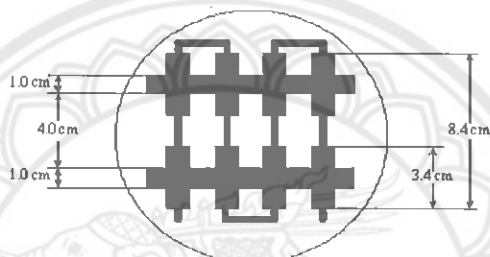
ตัวเก็บประจุย่อยที่ใช้ได้รับความอนุเคราะห์จากทางบริษัท พีรีไซซ์ อิเล็กตริก แมนู แฟคเจอริง จำกัด มีค่า $0.047 \mu F$ พิกัดแรงดัน 650 V_{ac} ออกแบบให้พิกัดแรงดันใช้งานตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุมีค่า 100 kV ออกแบบเพื่อ 120% ของพิกัดแรงดันใช้งาน จะได้ค่าแรงดันในการออกแบบเป็น 120 kV คำนวณหาจำนวนตัวเก็บประจุย่อย และค่ากะแปซิเต้นซ์ของตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกันของภาคแรงสูง ดังนี้

จำนวนตัวเก็บประจุย่อยภาคแรงสูง

$$N = \frac{120 \times 10^3 V}{650 V} = 184 \text{ ตัว}$$

Capacitance ภาคแรงสูง

$$C_1 = \frac{0.047 \times 10^{-6} F}{184} = 255.435 \text{ pF}$$



รูปที่ ข.1 การจัดวางตัวเก็บประจุภาคแรงสูง



รูปที่ ข.2 การต่อองค์ประกอบภาคแรงสูง

เมื่อคำนึงถึงผลของแรงดันตกคร่อมองค์ประกอบตัวเก็บประจุย่อย และระยะการฉนวนภายใน รวมทั้งมิติการจัดวางที่เหมาะสมจะได้ลักษณะการจัดวางองค์ประกอบตัวเก็บประจุย่อยและระยะมิติต่างๆ องค์ประกอบตัวเก็บประจุย่อยของภาคแรงสูงทั้งหมดบรรจุไว้ภายในท่อฉนวน หน้าแปลนอิเล็กทรอนิกส์ทำจากอะลูมิเนียมกลึงพิเศษ โดยออกแบบให้สามารถถอดประกอบได้สะดวก

3. การออกแบบภาคแรงต่ำ

จากอัตราส่วนแรงดันที่กำหนด 1000:1 ดังนั้นจะได้แรงดันขาออกด้านแรงต่ำที่พิกัดเป็น 100 โวลต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสามารถใช้กับเครื่องมือวัดด้านแรงต่ำทั่วไปได้ การเลือกใช้อัตราส่วน 1000:1 เพื่อความสะดวกของผู้ใช้ในการอ่านค่าและแปลงกลับเป็นค่าจริงได้ง่าย ดังนั้นจึงกำหนดหาค่าตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำเป็นดังการคำนวณต่อไปนี้

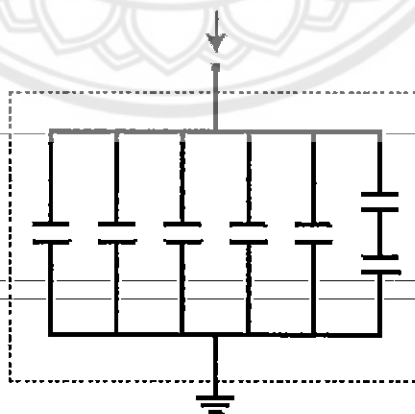
รายการคำนวณ

พิกัด Capacitance ภาคแรงต่ำ

$$C_1 = \left(\frac{U}{U_2} \times C_1 \right) - C_1$$

$$C_{2design} = (1000 \times 255.435 \text{ pF}) - 255.435 = 255.18 \text{ nF}$$

ในที่นี้ใช้ตัวเก็บประจุย่อยขนาด $0.047 \mu\text{F}$, 650 Vac จำนวน 7 ตัวต่อขนานกัน ลักษณะการจัดวางองค์ประกอบตัวเก็บประจุย่อยและระยะมิติต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3



ก) วงจรสมมูล

รูปที่ ข.3 วงจรการออกแบบตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

4. การทดสอบและประเมินผลตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าขนาด 100 kV

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบ AC withstand voltage test

การทดสอบครั้งที่	Applied Voltage (kV _{rms})	Test Duration (s)	Test Results
1	100	120	Withstand
2	100	120	Withstand
3	100	120	Withstand

ตารางที่ ข.2 การตรวจสอบหาค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

องค์ประกอบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า	ค่าที่ออกแบบ	ค่าที่วัดจริง	%Error
ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	255.435 pF	256.100 pF	0.26034
ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ	258.500 nF	259.200 nF	0.27079

จะได้ค่า Scale Factor เท่ากับ 1013:1

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบวัดปรับเทียบคุณสมบัติตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า

แรงดันทดสอบ (kV)	ระบบวัดอ้างอิง V _{REF} (kV)	ระบบวัดสอบเทียบ V _{CALI} (kV)	V _{REF} /V _{CALI}
25	24.700	24.500	1.0081
50	50.000	49.637	1.0073
75	75.700	75.164	1.0071
	ค่าเฉลี่ย		1.0075
	ค่า SD		0.000529

ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดประมาณ $\pm 1\%$

สรุปผลงาน

ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงที่ประดิษฐ์ขึ้นเป็นแบบตัวเก็บประจุ ภาคนแรงสูงเป็นตัวเก็บประจุย้อยต่ออันดับ ใช้ตัวเก็บประจุย้อยชนิด Metallized Polypropylene Flim ขนาดพิกัด $0.047 \mu\text{F}$ $650 \text{ V}_{\text{ac}}$ ออกแบบให้ใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ 100 kV โดยมีอัตราส่วนแรงดันประมาณ $1000:1$ และให้มีคุณสมบัติได้ตามที่มาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994) กำหนด

ผลของการออกแบบสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าได้ข้อมูลทางเทคนิคดังต่อไปนี้

- ค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง = 255.435 pF
- สามารถทนต่อแรงดันทดสอบได้ AC $50\text{-}60 \text{ Hz}$ 2 นาที = 100 kV
- มีคุณสมบัติของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าตามที่มาตรฐาน IEC 60060
- แรงดันที่กำหนดภาคแรงต่ำ = 100 V
- ค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำ = 258.500 nF
- อัตราส่วนแรงดัน = $1013:1$
- วัดพิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้สูงสุด 141.42 kVp

ผลการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทำให้ทราบว่าตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ได้ ออกแบบสร้างขึ้นมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานกำหนดทุกประการ

ภาคผนวก ค

การทดสอบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ

ขนาดพิกัด 150 kV

ระบบวัดอ้างอิง

ใช้ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดเก็บประจุไฟฟ้า ขนาดพิกัด 150 kV วัดแรงดันสูงกระแสสลับ,
อัตราส่วนแรงดัน 296:1, 50-60 Hz, พิกัดค่าความจุไฟฟ้า 300 pF, ปี 1996

Transformer

พิกัด 15 kVA, 380/125 kV, 50 Hz, ปี 1996,
พิกัดกระแสด้านปฐมภูมิ = 39.5, พิกัดกระแสด้านทุติยภูมิ = 0.12 A

ตารางที่ ค.1 การทดสอบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า ขนาด 150 kV (02/03/2004)

แรงดันทดสอบ (kV)	U_{ref} (kV)	U_c (kV)	U_{ref}/U_c
10	10.04	10.06	0.998
20	20.00	20.10	0.995
30	29.95	30.15	0.993
40	40.28	40.14	1.003
50	50.20	50.03	1.003
60	60.29	60.46	0.997
70	70.15	70.46	0.995
80	80.33	80.44	0.998
90	90.51	90.63	0.998
100	100.55	100.5	1.000
ค่าเฉลี่ย			0.998
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.00329

ภาคผนวก ง

มาตรฐาน IEC60060-2 IEC:1994

ในมาตรฐาน IEC 60060 - 2 (1994) นั้นจะมีทั้งการทดสอบทั้งแรงดันสูงกระแสตรง แรงดันสูงกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ แต่ในการทดสอบตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าในโครงการนี้ได้ใช้เกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60060 - 2 (1994) เฉพาะบางส่วนเท่านั้น ซึ่งมาตรฐานที่ต้องใช้วัดในโครงการนี้ส่วนใหญ่จะใช้ทดสอบกับแรงดันสูงกระแสสลับ ตามหัวข้อ 5.1, 5.2, 5.3, 5.9, 6.2 และ 8.1 ดังนี้

5. Acceptance Tests on Components for an Approved Measuring System

5.1 Applicability

The test described in this clause are required for components of Measuring Systems. However these tests are not required for transmission systems which consist only of cables nor for instrument which meet the requirement of the relevant standard referenced in cases 2. Some of these tests cannot be performed (see 5.6 and 5.9) : for these cases 4.4.2. For some of the tests described in this clause it is necessary to include the component in an appropriate Measuring System (whose other component have been show to be linear), for example, the linearity test of 5.3.

5.2 Determination of the Scale Factor

The determination of the scale factor of a component may be made by one of the following methods:

- simultaneous measurement of its input and output quantities,
- a bridge method,
- calculation-base-on-measurement-impedances.

The scale factor of a current-measuring shunt shall be measured by direct current methods.

5.3 Linearity Test

Values of the scale factor of the Measuring System shall be measured at the minimum and maximum voltages (or currents) of the operating and at three approximately equally spaced

voltage or current between these extremes. These five values shall not differ by more than $\pm 1\%$ from their mean value.

The reference method is by comparison with a Reference Measuring System according to 6.2 a).

Alternative methods are: either comparison with an Approved Measuring System, the linearity of which has been Established by the reference method 60-2 IEC:1994 or one of the additional described in the relevant clauses of this standard.

~~There additional methods are provided to allow users alternative tests which may be economic. However, failure to meet the requirements of these tests does not necessarily show that a Measuring System is non-linear.~~

In such a case either the reference method or the method of comparison with an Approved Measuring System shall be used.

5.9 Withstand Tests

A converting device shall pass a dry withstand test performed with a voltage or current of the required frequency or shape at a level of 110% of the Rated Measuring Voltage or Rated Measuring current. For the procedures of withstand tests see IEC 60-1. Wet tests and pollution tests, when specified, are performed as type tests. The withstand tests shall be performed at the polarity or polarities at which the system is to be used.

Note – Design and construction of component of an Approved Measuring System should be such that it can withstand a disruptive discharge at the test object without any change in its characteristics.

6. Performance Tests on Measuring Systems

6.2 Determination of the Assigned Scale Factor

a) Reference method: comparison with a Reference Measuring System A Reference Measuring System shall be connected in parallel (voltage) or in series (current) with the Measuring System to be calibrated Simultaneous readings shall be taken on both systems; the value of the input quantity obtained for each measurement by the Reference Measuring System is divided by the corresponding reading of the instrument in the system under test to obtain a value F_i of its scale factor. The procedure is repeated to obtain n independent readings ($n \geq 10$) and the mean vale F_m is take as the Assigned Scale Factor of the system under test, provided that the experimental standard deviation s as calculated from:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(F_i - F_m)^2}{n-1}}$$

is less than 1% of F_m

Notes

1. A rounded value F_i may taken as the Assigned Scale Factor if, introduced in place of F_m .
2. For measurement of direct and alternating voltages, independent readings may be obtained either by applying the test voltage taking n readings or by applying the test voltage n times and taking a reading each time. For impulses, n impulses are applied.

8. Measurement of Alternating Voltage

8.1 Requirements for an Approved Measuring System

The general requirement is to measure the peak or the r.m.s. value of a test voltage at its rated frequency with an overall uncertainty within $\pm 3\%$.

8.1.1 Stability of the converting device and the transmission system shall not vary by more than $\pm 1\%$ for the ranges of the ambient temperature and clearances given in the Record of Performance. Measuring instruments shall comply with the requirements of class 0.5 of IEC 51 or shall be tested according to this standard if a peak voltmeter is used, its uncertainty shall be within $\pm 1\%$.

ภาคผนวก จ
สถานที่จัดซื้ออุปกรณ์

ตาราง จ.1 สถานที่จัดซื้ออุปกรณ์

รายการอุปกรณ์	สถานที่ติดต่อ	เบอร์โทรศัพท์
ตัวเก็บประจุชนิด Metallized Polyester	บริษัท ดี ซี คอน จำกัด 360 ม.2 ถ.ตำหรุบางพลี ต.แพรกษาใหม่ อ.เมือง จ.สมุทรปราการ 10280	02-3232317 Fax: 02-7036098
แผ่นใสอะคริลิก	อาร์ตปริ้นท์ 834/245-246 ถ.มิตรภาพ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000	055-211022
ท่อเก็บที่วทองแดง, กัตเตอร์ ตัดท่อ, ท่อทองแดง, ตัวหนีบ สายไฟ, ดอกสว่าน	ร้านชุมพลอิเล็กทรอนิกส์ 266/5 ถ.พิชัยสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000	055-211624
ท่อ PVC, สายไฟ	ชัยวัฒน์ อิเล็กทรอนิกส์ 126/2 ม.8 ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000	055-261557

ภาคผนวก ฉ
สถานที่ทดสอบ

ตาราง ฉ.1 สถานที่ทดสอบ

สถานที่	ที่อยู่	เบอร์โทรศัพท์
ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยนเรศวร	มหาวิทยาลัยนเรศวร 99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000	0-5596-1000
ตึก High Volt สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง 3 หมู่ 2 ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520	02-7373000



ประวัติผู้เขียนโครงการ



ชื่อ นายกิตติศักดิ์ เต็มสิริมงคล
 ภูมิลำเนา 86 ม. 7 ต.ร่มเย็น อ.เชียงคำ จ.พะเยา 56110
 ประวัติการศึกษา
 - จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนเชียงคำวิทยาคม
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยนเรศวร
 E-mail : jengboy_ee48@hotmail.com



ชื่อ นางสาวพนิดา อ่อนละมุล
 ภูมิลำเนา 252 ม.12 ต.นิคมฯ อ.เมือง จ.กำแพงเพชร 62000
 ประวัติการศึกษา
 - จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนกำแพงเพชรพิทยาคม
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยนเรศวร
 E-mail : oop_net@hotmail.com



ชื่อ นายวิชาญ อ้ายฟอย
 ภูมิลำเนา 35 ม.5 ต.แม่ตาว อ.แม่สอด จ.ตาก 63110
 ประวัติการศึกษา
 - จบระดับ ปวช. จาก วิทยาลัยเทคนิคพิษณุโลก
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยนเรศวร
 E-mail : kang_liver@hotmail.com