



การพัฒนาโวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าพิกัด 100 กิโลโวลต์  
แบบใช้ก๊าซเป็นฉนวน

DEVELOPMENT OF A 100 kV AC CAPACITIVE VOLTAGE DIVIDER  
USING GAS INSULATION



นายมนตรี เชื้อเมืองพาน รหัส 48380154  
นายปราโมทย์ ปั่นเจริญ รหัส 48380351

ห้องทดลองวิศวกรรมศาสตร์  
ชั้นปีที่..... 2555  
เลขที่..... 1๕๕๙๐๐๙  
คณะวิศวกรรมศาสตร์..... จ.ส.  
..... ๒๕๕๑


ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ปีการศึกษา 2551




## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ	การพัฒนาโวลเตจดีไวเซอร์ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าพิกัด 100 กิโลโวลต์ แบบใช้ก๊าซเป็นฉนวน		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายมนตรี	เชื้อเมืองพาน	รหัส 48380154
	นายปราโมทย์	ปั้นเจริญ	รหัส 48380351
ที่ปรึกษา	ดร. แคทรียา สุวรรณศรี		
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2551		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบรจรัม อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

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

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

  
.....กรรมการ  
(ดร. สุภวรรณ พลพิทักษ์ชัย)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การพัฒนาโวลเตจดีไวเคอร์ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าพิกัด 100 กิโลโวลต์แบบใช้ก๊าซเป็นฉนวน		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายมนตรี เชื้อเมืองพาน	รหัส	48380154
	นายปราโมทย์ ปั่นเจริญ	รหัส	48380351
ที่ปรึกษาโครงการงาน	ดร. แคทรียา สุวรรณศรี		
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2551		

### บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโวลเตจดีไวเคอร์แบบตัวเก็บประจุพิกัด 100 kV ซึ่งโวลเตจดีไวเคอร์แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ ภาคแรงสูงสร้างจากตัวเก็บประจุย่อยต่อแบบอนุกรมเพื่อให้ได้ค่าความเก็บประจุ 114.285 pF ภาคแรงต่ำสร้างจากตัวเก็บประจุย่อยชนิดเดียวกันต่อแบบขนานเพื่อให้ได้ค่าความเก็บประจุ 0.12  $\mu$ F โวลเตจดีไวเคอร์แบบตัวเก็บประจุที่ทำการทดสอบจะใช้ก๊าซ 3 ชนิดเป็นฉนวนคือ อากาศ, N<sub>2</sub> และ SF<sub>6</sub> โดยแยกการทดสอบก๊าซเพื่อหาก๊าซที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นฉนวน ในการทดสอบได้อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC-60060- 2 (1994) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโวลเตจดีไวเคอร์แบบตัวเก็บประจุที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

<b>Project title</b>	Development of a 100 kV AC Capacitive Voltage Divider using Gas Insulation		
<b>Name</b>	Mr. Montree Chuamuangphan	ID. 48380154	
	Mr. Pramote Punjareem	ID. 48380351	
<b>Project advisor</b>	Mrs. Cattareeya Suwanasri, D.Eng.		
<b>Major</b>	Electrical-Engineering		
<b>Department</b>	Electrical and Computer Engineering		
<b>Academic year</b>	2008		

### Abstract

This project aims to develop a 100 kV capacitive voltage divider. The divider was separated into high voltage and low voltage parts. The high voltage part was constructed from capacitors connected in series in order to obtain the capacitance as of 114.285 pF. The low voltage part was constructed from capacitors connected in parallel to obtain the capacitance as of 0.12  $\mu$ F. This capacitive voltage divider was filled with three gas insulation as air, N<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub> for each test in order to select the suitable gas insulation. The test procedures were followed the standard IEC 60060 - 2 (1994). The test records showed that the performance of the developed capacitive divider is within the designed standard.

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน คณะผู้จัดทำโครงการขอแสดงความขอบคุณ ดร. แคทรียา สุวรรณศรี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้คำแนะนำในการดำเนินโครงการและได้กรุณาตรวจแก้ไขรูปแบบปฏิญญาพันธันสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี และขอขอบคุณอาจารย์ณัฐพันธุ์ บุญเสนอ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางการแก้ปัญหาและข้อเสนอแนะต่างๆ ในโครงการนี้ตั้งแต่จัดหาอุปกรณ์ การจัดสร้าง และทำให้โครงการนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. ธนพงศ์ สุวรรณศรี อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงเป็นสถานที่ในการทดสอบ และขอขอบคุณ คุณสาธิต เรือนก้อน วิศวกรประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ช่วยเหลือเรื่องห้องพักและความช่วยเหลือในด้านอื่นๆ และพร้อมกันนี้ใคร่ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบโครงการทั้งสองท่านที่ประเมินผลโครงการให้ผ่านไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกๆ ท่านที่ช่วยให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นายมนตรี เชื้อเมืองพาน  
นายปราโมทย์ ปันเจริญ

# สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาบัตร..... ก	ก
บทคัดย่อภาษาไทย..... ข	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ค	ค
กิตติกรรมประกาศ..... ง	ง
สารบัญ..... จ	จ
สารบัญตาราง..... ฉ	ฉ
สารบัญรูป..... ญ	ญ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์..... 1	1
1.3 ขอบเขตการดำเนินโครงการ..... 1	1
1.4 แผนการดำเนินโครงการ..... 2	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3	3
1.6 งบประมาณที่ใช้ดำเนินโครงการ..... 3	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี..... 4	4
2.1 การวัดแรงดันสูงกระแสตรงและแรงดันสูงกระแสสลับ..... 4	4
2.1.1 การวัดไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออันดับ..... 4	4
2.1.2 การวัดแรงดันสูงด้วยความต้านทานต่ออันดับ..... 5	5
2.1.3 หลักการของโวลเตจดีไวเดอร์..... 6	6
2.1.3.1 โวลเตจดีไวเดอร์แบบอิมพีแดนซ์..... 6	6
2.1.3.2 โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน..... 7	7
2.1.3.3 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสสลับ..... 8	8
2.1.3.4 ตัวเก็บประจุย่อต่ออันดับ..... 9	9
2.2 การฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยก๊าซ..... 11	11
2.2.1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF <sub>6</sub> ..... 12	12
2.2.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF <sub>6</sub> ..... 13	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ N <sub>2</sub> .....	15
2.3 เบรกดาวน์ในก๊าซ.....	16
2.3.1 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ (Breakdown mechanisms).....	16
2.3.2 เบรกดาวน์ในก๊าซไฟฟ้าลบ (Breakdown in electronegative gas).....	20
2.3.3 การคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวน์ในก๊าซ.....	22
2.4 การทดสอบเปรียบเทียบมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994).....	25
2.4.1 การวัดความจุไฟฟ้า.....	25
2.4.2 การทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์.....	26
2.4.3 การทดสอบความคงทนของโวลเตจดีไวเดอร์ (AC withstand voltage test).....	27
2.4.4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity test).....	28
2.4.5 การทดสอบความมีเสถียรภาพ (Stability test).....	29
<b>บทที่ 3 การออกแบบและสร้าง โวลเตจดีไวเดอร์</b> .....	<b>30</b>
3.1 คุณลักษณะสมบัติที่กำหนด.....	30
3.2 การออกแบบ โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุขนาดพิกัด 100 kV.....	31
3.2.1 ค่าวาทไฟตามพิกัด.....	31
3.2.2 ค่าความจุสแตย์ลงดิน.....	31
3.2.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV.....	33
3.2.4 ค่าของตัวเก็บประจุแต่ละชั้น.....	36
3.2.5 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุด.....	36
3.3 การออกแบบภาคแรงต่ำ.....	38
3.3.1 การเลือกแรงดันไฟฟ้าขาออก.....	38
3.3.2 การออกแบบภาคแรงต่ำแบบตัวเก็บประจุ.....	39
3.4 โครงสร้างภายนอกของ โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุพิกัด 100 kV.....	41
3.4.1 การออกแบบท่อ.....	41
3.4.2 การออกแบบแผ่นเหล็กปิดหัวและปิดท้ายของอิลีกโทรด.....	42
3.4.3 การออกแบบฐานและล้อ.....	45
3.4.4 การจับยึดชิ้นส่วน.....	46

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบและการประเมินผล.....	47
4.1 ส่วนประกอบของวงจรทดสอบ โวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV.....	48
4.2 การทดสอบวัดค่าทางไฟฟ้าและการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994).....	50
4.2.1 วัดค่าทางไฟฟ้า.....	50
4.2.2 การทดสอบการทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์ของไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ.....	51
4.2.3 การทดสอบความคงทนของไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับของ โวลเตจดีไวเดอร์.....	52
4.2.4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันสูงกระแสสลับ.....	53
4.2.5 การทดสอบความมีเสถียรภาพของแรงดันสูงกระแสสลับ.....	53
4.3 ผลการทดสอบ โวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV ใช้ฉนวนอากาศ, N <sub>2</sub> และ SF <sub>6</sub> ที่ 2 บาร์...55	55
4.3.1 ผลการทดสอบ โวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV ใช้ฉนวนอากาศ ที่ 2 บาร์.....	55
4.3.2 ผลการทดสอบ โวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV ใช้ฉนวนก๊าซ N <sub>2</sub> ที่ 2 บาร์.....	61
4.3.3 ผลการทดสอบ โวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV ใช้ฉนวนก๊าซ SF <sub>6</sub> ที่ 2 บาร์.....	67
บทที่ 5 สรุปผล.....	73
5.1 สรุปการออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ทดสอบแรงดัน ไฟฟ้าพิกัด 100 kV.....	73
5.2 สรุปการทดสอบ โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด 100 kV ใช้ฉนวน อากาศ, N <sub>2</sub> และ SF <sub>6</sub> ที่ 2 บาร์.....	73
5.2.1 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ทดสอบแรงดัน ไฟฟ้าพิกัด 100 kV ใช้ฉนวนอากาศ ที่ 2 บาร์.....	73
5.2.2 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ทดสอบแรงดัน ไฟฟ้าพิกัด 100 kV ใช้ฉนวน N <sub>2</sub> ที่ 2 บาร์.....	74
5.2.3 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ทดสอบแรงดัน ไฟฟ้าพิกัด 100 kV ใช้ฉนวน SF <sub>6</sub> ที่ 2 บาร์.....	74
5.3 การเปรียบเทียบผลของการทดสอบความฉนวนของ โวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้ฉนวน อากาศ, N <sub>2</sub> และ SF <sub>6</sub> ที่ 2 บาร์.....	75
5.4 สรุปผลการทดสอบ.....	75



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5 สาเหตุของค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV..... 76

5.6 ข้อเสนอแนะ..... 76

เอกสารอ้างอิง..... 77

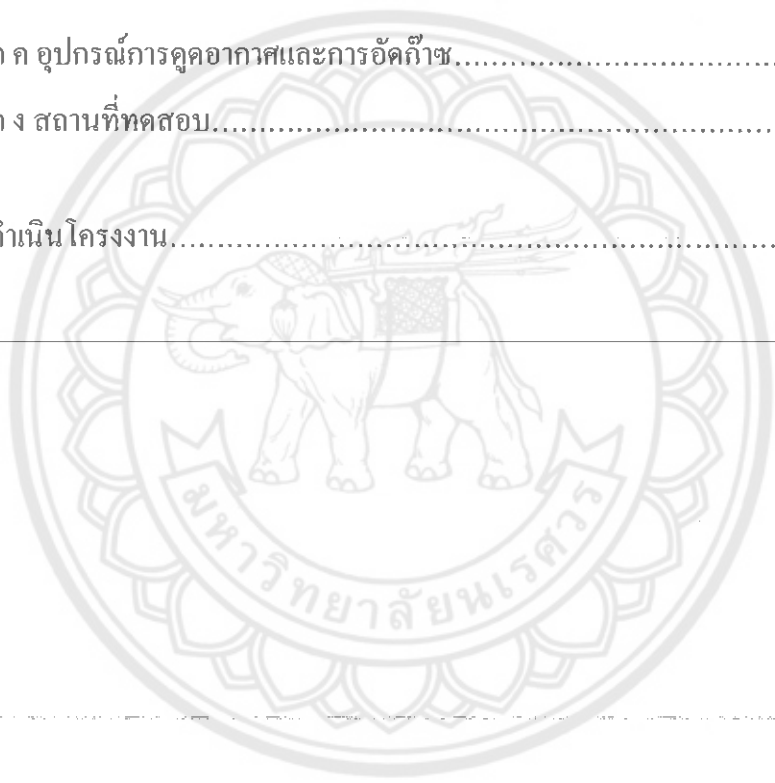
ภาคผนวก ก มาตรฐาน IEC60060 - 2 IEC : 1994..... 78

ภาคผนวก ข ส่วนประกอบของวงจรทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV..... 82

ภาคผนวก ค อุปกรณ์การดูดอากาศและการอัดก๊าซ..... 89

ภาคผนวก ง สถานที่ทดสอบ..... 93

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ..... 95



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF <sub>6</sub> .....	12
2.2 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ N <sub>2</sub> .....	15
2.3 ค่า (p-d) min และ Ubmin ของก๊าซชนิดต่างๆ.....	18
2.4 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกความถี่ของอากาศ.....	19
2.5 พลังงานเกาะของอิเล็กตรอนบนอะตอมต่างๆ.....	20
3.1 คุณสมบัติสำหรับการออกแบบโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุพิกัด 100 kV.....	30
4.1 ค่าทางไฟฟ้า ในกรณีใช้อากาศ ที่ 2 บาร์.....	55
4.2 ผลการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวนอากาศ ที่ 2 บาร์.....	56
4.3 ผลการทดสอบคงทนแรงดันไฟฟ้าของแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวนอากาศ ที่ 2 บาร์.....	57
4.4 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวนอากาศ ที่ 2 บาร์.....	58
4.5 ผลการทดสอบความมีเสถียรภาพที่ระดับแรงดัน 30 kV ของแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวนอากาศ ที่ 2 บาร์.....	60
4.6 ค่าทางไฟฟ้า ในกรณีใช้ N <sub>2</sub> ที่ 2 บาร์.....	51
4.7 ผลการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวน N <sub>2</sub> ที่ 2 บาร์.....	62
4.8 ผลการทดสอบคงทนแรงดันไฟฟ้าของแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวน N <sub>2</sub> ที่ 2 บาร์.....	63
4.9 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวน N <sub>2</sub> ที่ 2 บาร์.....	64
4.10 ผลการทดสอบความมีเสถียรภาพที่ระดับแรงดัน 90 kV ของแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวน N <sub>2</sub> ที่ 2 บาร์.....	66
4.11 ค่าทางไฟฟ้า ในกรณีใช้ฉนวน SF <sub>6</sub> ที่ 2 บาร์.....	67
4.12 ผลการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวน SF <sub>6</sub> ที่ 2 บาร์.....	68
4.13 ผลการทดสอบคงทนแรงดันไฟฟ้าของแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวน SF <sub>6</sub> ที่ 2 บาร์.....	69
4.14 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวน SF <sub>6</sub> ที่ 2 บาร์.....	70
4.15 ผลการทดสอบความมีเสถียรภาพที่ระดับแรงดัน 100 kV ของแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวน SF <sub>6</sub> ที่ 2 บาร์.....	72
5.1 คุณสมบัติของโวลเตจดีไวเซอร์.....	73

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การวัดแรงดันสูงด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออันดับ..... 4
2.2	การวัดแรงดันสูงด้วยความต้านทานต่ออันดับ..... 5
2.3	โวลเตจดีไวเดอร์..... 6
2.4	โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน..... 7
2.5	โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ..... 9
2.6	วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุย่อต่ออันดับ..... 10
2.7	โมเลกุลของก๊าซ SF <sub>6</sub> ..... 12
2.8	แรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF <sub>6</sub> ..... 13
2.9	สภาพนำความร้อนของก๊าซ SF <sub>6</sub> และ ในพจน์ของอุณหภูมิ N <sub>2</sub> ..... 14
2.10	สภาพนำความร้อนของก๊าซ SF <sub>6</sub> และ N <sub>2</sub> ..... 14
2.11	อิเล็กทรอนิกส์แผ่นระนาบวางขนานกันในอากาศ ลักษณะกราฟกระแส-แรงดัน..... 17
2.12	ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอของอากาศ..... 20
2.13	วงจรแสดงการวัดค่าความจุไฟฟ้า..... 25
2.14	วงจรเพื่อใช้ในการหาค่าสเกลแฟกเตอร์..... 26
2.15	วงจรการทดสอบความคงทนของ โวลเตจดีไวเดอร์..... 28
2.16	วงจรแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้น..... 28
3.1	วงจรสมมูลของ โวลเตจดีไวเดอร์..... 31
3.2	ภาพจำลองท่อทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบ..... 32
3.3	ตัวเก็บประจุชนิด โพลีโพรพิลีนฟิล์ม ขนาดความจุ 0.01 μF พิกัด 1600 V <sub>DC</sub> / 650 V <sub>AC</sub> ..... 33
3.4	ตัวเก็บประจุของโวลเตจดีไวเดอร์ภาคแรงสูง ชั้นละ 14 ตัว..... 34
3.5	การวางตัวเก็บประจุของโวลเตจดีไวเดอร์ภาคแรงสูง ชั้นละ 14 ตัว 25 ชั้น..... 34
3.6	เก็บประจุภาคแรงสูงประกอบแผ่นอะคลีลิก ส่วนบน..... 35
3.7	ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงประกอบแผ่นอะคลีลิก ส่วนกลาง..... 35
3.8	ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงประกอบแผ่นอะคลีลิก ส่วนท้าย..... 36
3.9	วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า..... 37
3.10	ตัวเก็บประจุขนาด 0.01 μF พิกัด 1600 V <sub>DC</sub> / 650 V <sub>AC</sub> ..... 39
3.11	วงจรสมมูลภาคแรงต่ำ..... 40
3.12	การวางตัวเก็บประจุ ภาคแรงต่ำ..... 40
3.13	ภาคแรงต่ำ..... 41

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ท่ออะคลีลิก.....	42
3.15 ฝาปิดบน.....	43
3.16 ฝาปิดบนพร้อมที่ล็อกฝา.....	43
3.17 ฝาปิดบน.....	44
3.18 ฝาปิดล่างพร้อมที่ล็อกฝา.....	44
3.19 แบบฐานและล้อ.....	45
3.20 ฐานและล้อ.....	46
3.21 โครงสร้างโวลเตจดีไวเดอร์.....	46
4.1 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์.....	47
4.2 วงจรสมมูลวัดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสลับ 100 kV <sub>rms</sub> .....	49
4.3 วงจรทดสอบแรงดันสูงกระแสลับ 100 kV <sub>rms</sub> .....	49
4.4 วงจรแสดงการวัดค่าความจุไฟฟ้า.....	50
4.5 มัลติมิเตอร์.....	51
4.6 RLC มิเตอร์ วัดค่าความต้านทาน (R) ค่าความเหนี่ยวนำ (L) ค่าเก็บประจุ (C).....	51
4.7 วงจรเพื่อใช้ในการหาค่าสเกลเฟกเตอร์.....	52
4.8 วงจรการทดสอบความคงทนไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์.....	52
4.9 วงจรแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้น.....	53
4.10 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของการวัดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวนอากาศ ที่ 2 บาร์.....	59
4.11 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของการวัดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวน N <sub>2</sub> ที่ 2 บาร์.....	65
4.12 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของการวัดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวน SF <sub>6</sub> ที่ 2 บาร์.....	71

## 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

โวลเตจดีไวเดอร์ (Voltage divider) ถูกใช้อย่างกว้างขวางทั้งในการศึกษาและการวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงในภาคอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูง ซึ่งต้องใช้โวลเตจดีไวเดอร์เพื่อวัดไฟฟ้าแรงดันสูงในการทดสอบคุณภาพอุปกรณ์ที่ผลิตขึ้นตามที่มาตรฐานกำหนด จากเดิมจำเป็นต้องนำเข้าโวลเตจดีไวเดอร์จากต่างประเทศด้วยราคาที่สูง โวลเตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์วัดไฟฟ้าแรงดันสูงที่สำคัญทุกห้องทดสอบทางวิศวกรรมไฟฟ้า โวลเตจดีไวเดอร์ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันไฟฟ้าสูงๆ ออกเป็นส่วนแรงดันพอที่จะใช้โวลต์มิเตอร์ออสซิลโลสโคปหรือเครื่องวัดไฟฟ้าแรงดันต่ำๆ วัดได้โดยใช้อิมพีแดนซ์แรงสูงต่อเข้ากับไฟฟ้าแรงดันสูงที่จะวัด แล้วแบ่งเอาแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แรงต่ำเพียงส่วนน้อยออกมาวัด

ในการทำโครงการครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์เพื่อทดสอบการใช้อากาศ ก๊าซ SF<sub>6</sub> และก๊าซ N<sub>2</sub> ที่ 2 บาร์ เป็นฉนวนเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของก๊าซที่นำมาฉนวน เพื่อนำไปใช้งานและให้นักศึกษารุ่นหลังได้ศึกษาและพัฒนาต่อไป โดยใช้ทุนในการสร้างค่าโดยใช้วัสดุที่หาได้ภายในประเทศเพื่อเป็นการลดการนำเข้าสินค้าจากต่างประเทศ

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุพิกัด 100 kV สำหรับวัดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับตามมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994) เพื่อทดสอบความเป็นฉนวนของอากาศ ก๊าซ SF<sub>6</sub> และก๊าซ N<sub>2</sub> ที่ 2 บาร์

## 1.3 ขอบเขตการดำเนินโครงการ

1. ศึกษาโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ และศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของโวลเตจดีไวเดอร์

2. ศึกษาการออกแบบและการสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุพิกัด 100 kV

3. ศึกษาคุณเกณฑ์มาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994)

4. ออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุพิกัด 100 kV

5. ทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุพิกัด 100 kV ที่สร้างขึ้นมาโดยทำการทดสอบไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ โดยการใช้อากาศ ก๊าซ SF<sub>6</sub> และก๊าซ N<sub>2</sub> ที่ 2 บาร์ เป็นฉนวน



### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถออกแบบและสร้าง โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุพิกัด 100 kV กระแสสลับ โดยใช้ก๊าซเป็นฉนวน

### 1.6 งบประมาณที่ใช้ดำเนินโครงการ

ค่าวัสดุ	40,000 บาท
ค่าถ่ายเอกสาร	1,000 บาท
ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	500 บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (สี่หมื่นหนึ่งพันห้าร้อยบาทถ้วน)	<u>41,500 บาท</u>

๗ หมายเหตุ: ถัวเฉลี่ยทุกรายการ



## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

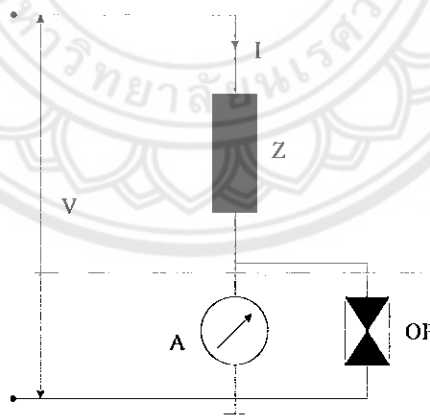
การวัดไฟฟ้าแรงดันสูงขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันไฟฟ้าแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้าแบบอิมพัลส์ ซึ่งการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนั้น จะมีการวัดทั้งภายในห้องปฏิบัติการและในระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ส่วนการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันไฟฟ้าแบบอิมพัลส์ ส่วนใหญ่จะหมายถึงการวัดแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการทดลอง

#### 2.1 การวัดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงและไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ

การวัดไฟฟ้าแรงดันสูงในห้องปฏิบัติการสามารถวัดได้ด้วยอุปกรณ์ต่างๆ เช่น แกปทรงกลม (Sphere gap) อิมพีแดนซ์ต่ออันดับ (Series impedance) และ โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ (Capacitive voltage divider) หรือ โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน (Resistive voltage divider)

##### 2.1.1 การวัดไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออันดับ

การวัดด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออันดับอาศัยกฎของโอห์ม คือ  $V = IZ$  ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การวัดไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออันดับ [2]

- |            |     |   |
|------------|-----|---|
| โดยที่ $V$ | คือ | ไฟฟ้าแรงดันสูงที่ต้องการวัด ( $V$ )   |
| $I$        | คือ | กระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) ซึ่งวัดด้วยแอมมิเตอร์ ( $A$ )   |
| $Z$        | คือ | อิมพีแดนซ์ที่ทราบค่าและมีค่าสูงมากพอเพื่อจำกัดกระแสไม่ให้น่าเกินไป ซึ่งอาจจะเป็นความต้านทาน ( $\Omega$ ) หรือค่าเก็บประจุ ( $F$ ) ก็ได้ |
| $OP$       | คือ | อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน เช่น ไดโอดสปาร์กแกป  |

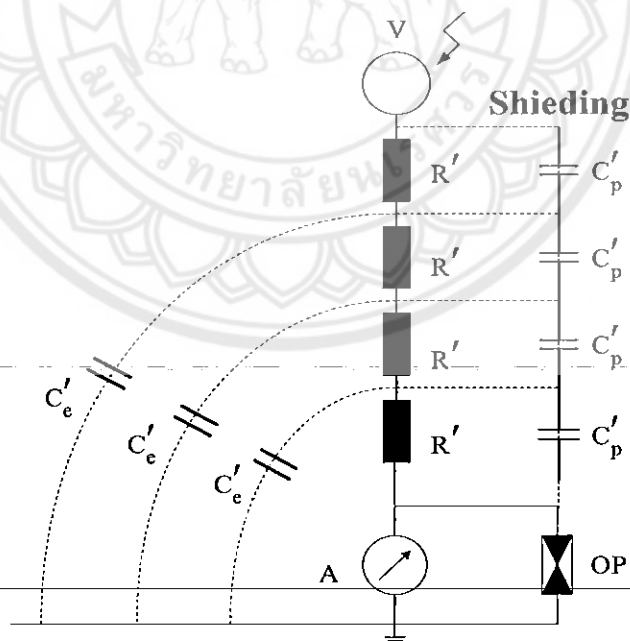


ความถูกต้องขึ้นอยู่กับแอมมิเตอร์ และความคงตัวของอิมพีแดนซ์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ไม่มีโคโรนา และกระแสรั่วตามผิวของฉนวนรองรับต้องน้อยที่สุด

### 2.1.2 การวัดแรงดันสูงด้วยความต้านทานต่ออันดับ

ความต้านทานต่ออันดับจะใช้ความต้านทานย่อยมาต่ออนุกรม ทำให้มีค่าความต้านทานสูงมากเพื่อจำกัดกระแส  $I$  ในทางปฏิบัติอาจใช้ความต้านทานย่อยที่ทำจากคาร์บอนหรือฟิล์มโลหะมาต่ออันดับกัน หรือใช้หลอดความต้านทานความร้อนสูง เช่น เส้นลวด Ni - Cr มาพันแบบไร้ความเหนียวนำยึดอยู่บนฉนวนจุ่มน้ำมันหม้อแปลงเพื่อช่วยระบายความร้อนและเพิ่มการฉนวนตามผิวของฉนวนยึด หรือความต้านทานย่อยแต่ละตัวให้มีความคงทนของฉนวนมากขึ้น มิฉะนั้นจะทำให้เกิดการวางไฟตามผิวได้

การออกแบบแรงดันตกคร่อมต้องไม่เกิน  $2 \text{ kV/cm}$  ในอากาศ และ  $15 \text{ kV/cm}$  ในน้ำมัน แต่ค่าประจุนี้อาจทำให้เกิดความผิดพลาดของมุมและขนาดของแรงดันที่วัด การวัดแรงดันกระแสสลับที่มีลักษณะเป็นแบบ R ผสม C มีใช้กันน้อย ผลกระทบจะลดลงเมื่อความต้านทานน้อยลง ถ้า  $C_p$  มากกว่า  $C_c$  มากๆ จะทำให้ความผิดพลาดของมุมลดน้อยลง ซึ่งทำได้โดยใช้ซีลด์อิเล็กทรอนิกส์ หรือ ซีลด์ความต้านทาน ดังรูปวงจรที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การวัดแรงดันสูงด้วยความต้านทานต่ออันดับ [2]

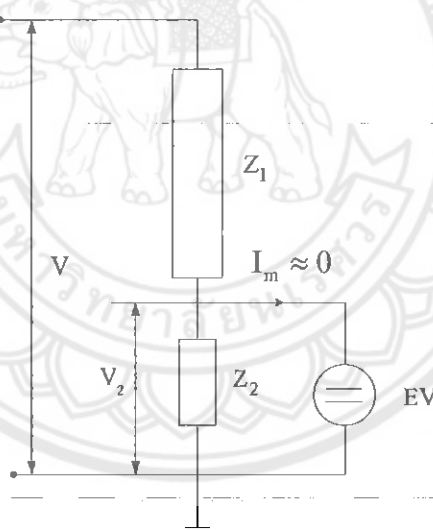
### 2.1.3 หลักการของโวลเตจดีไวเดอร์

โวลเตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์วัดแรงดัน โดยแบ่งทอนแรงดันสูงๆ ออกเป็นส่วนแรงดันต่ำ เพื่อที่จะใช้โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำได้

#### 2.1.3.1 โวลเตจดีไวเดอร์แบบอิมพีแดนซ์

โวลเตจดีไวเดอร์แบบอิมพีแดนซ์นี้ ใช้อิมพีแดนซ์แรงสูง  $Z_1$  ต่อเข้ากับแรงดันที่จะวัดแล้ว แบ่งเอาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แต่มีเพียงส่วนน้อยออกมาวัด ดังนั้น โวลเตจดีไวเดอร์จึงแบ่งเป็นภาคแรงสูง  $Z_1$  และภาคแรงต่ำ  $Z_2$  ปลายข้างหนึ่งของภาคแรงสูงจะต่อกับสายแรงสูงที่จะวัด ส่วนอีกข้างหนึ่งจะต่อกับปลายข้างหนึ่งของภาคแรงต่ำ และอีกข้างหนึ่งของภาคแรงต่ำจะต่อลงดิน

จุดรอยต่อระหว่างภาคแรงสูงกับภาคแรงต่ำนี้เองจะเป็นจุดที่ต่อออกมาเข้าเครื่องวัดแรงต่ำ โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงต่ำที่จะต่อเข้ากับโวลเตจดีไวเดอร์นี้ ต้องเป็นเครื่องวัดที่ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยที่สุด คือจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเข้าสูงมากๆ เช่น โวลต์มิเตอร์แบบไฟฟ้าสถิต EV เพราะว่ามีอิมพีแดนซ์ของเครื่องวัดจะต้องไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โวลเตจดีไวเดอร์ [2]

โดยที่	$Z_1$	คืออิมพีแดนซ์ ภาคแรงสูง ( $\Omega$ )
	$Z_2$	คืออิมพีแดนซ์ ภาคแรงต่ำ ( $\Omega$ )
	$V$	คือแรงดันที่ต้องการวัด (V)
	$V_2$	คือแรงดันที่แบ่งออกมาวัดเป็นแรงดันภาคแรงต่ำเป็นแรงดันตกคร่อมที่ $Z_2$ (V)
	EV	คือออสซิลโลสโคป

เมื่อทราบค่า  $V_2$  จากโวลต์มิเตอร์ จึงสามารถคำนวณค่า  $V$  ด้านแรงสูงที่วัดได้จากสมการ  
ที่ (2.1)

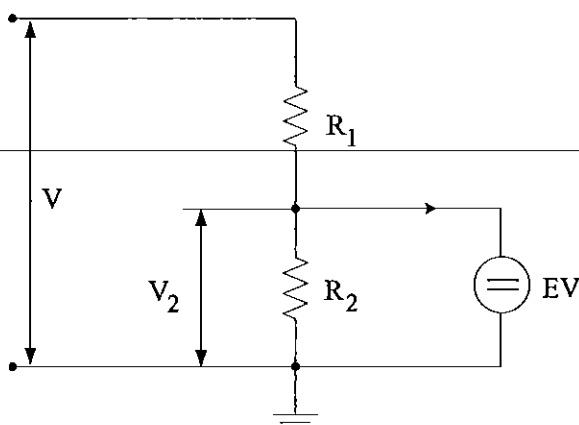
$$V = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} V_2 \quad (2.1)$$

$Z_1, Z_2$  ควรเป็นอิมพีแดนซ์ที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน (ตัวต้านทานหรือตัวเก็บประจุ) เพื่อลดการเปลี่ยนของอิมพีแดนซ์ เนื่องจากอุณหภูมิ

การวัดแรงดันสูงด้วยโวลต์เตจดิไวเดอร์ความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์เนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะหมดไป เมื่ออิมพีแดนซ์  $Z_1$  และ  $Z_2$  เป็นวัตถุหรือสารประเภทเดียวกัน ความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความถี่เปลี่ยน ปัญหาที่ทำให้เกิดผลการวัดที่ผิดพลาดอีกประการหนึ่งคือ องค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้น เช่น ผลกระทบจากความร้อน อิมพีแดนซ์ที่ใช้ทำโวลต์เตจดิไวเดอร์อาจเป็นตัวต้านทานหรือตัวเก็บประจุก็ได้ แบบตัวต้านทานมักใช้วัดแรงดันสูงกระแสตรง การวัดแรงดันสูงกระแสสลับจะวัดด้วยโวลต์เตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

### 2.1.3.2 โวลต์เตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน

โวลต์เตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานประกอบด้วยความต้านทานภาคแรงสูง  $R_1$  และความต้านทานภาคแรงต่ำ  $R_2$  ดังในรูปที่ 2.4 ความต้านทานที่ใช้จะต้องคำนึงถึงขีดจำกัดของกระแสที่ไหลผ่าน  $R_1, R_2$  ( $I \leq 1 \text{ mA}$ ) ค่าเก็บประจุสเตรย์ และการฉนวนเป็นต้น สารที่ใช้ทำความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ควรเป็นสารชนิดเดียวกัน ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเนื่องจากอุณหภูมิ ค่าแรงดันที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความต้านทานทั้งสอง



รูปที่ 2.4 โวลต์เตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน [2]

แรงดันที่วัดได้  $V$  มีค่าดังสมการที่ (2.2)

$$V = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_2 \quad (2.2)$$

ความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับค่าของความต้านทาน และความเที่ยงตรงของเครื่องวัด แรงดันคร่อมความต้านทานภาคแรงต่ำ  $R_2$  ซึ่งจะต้องเป็น โวลต์มิเตอร์ หรือเครื่องวัดที่มีอิมพีแดนซ์ทางเข้าสูงเช่น โวลต์มิเตอร์แบบไฟฟ้าสถิต EV หรือโวลต์มิเตอร์ชนิดอิเล็กทรอนิกส์ ปัญหาสำคัญที่มีคือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวเนื่องจากแรงสูง ดังนั้นฉนวนที่หุ้มความต้านทานจะต้องทนต่อแรงดันสูงได้ ในขณะเดียวกันกระแสรั่วที่ไหลตามผิวอาจทำให้วัดผิดพลาดได้ หากความต้านทานที่ใช้วัดนั้นสูงเกินไป ดังนั้นค่าต้านทานจึงมีขีดจำกัด คือค่าตัวต้านทานจะต้องไม่สูงมากเกินไป กระแสที่วัดจะต้องไม่ต่ำมากเกินไป ( $0.1 \text{ mA} \leq I \leq 1 \text{ mA} \therefore R \leq 10 \text{ M}\Omega / \text{kV}$ ) ดังนั้นการเลือกฉนวนที่นำมาใช้ความต้านทานหรือบรรจุความต้านทานต้องเลือกให้เหมาะสมจะช่วยแก้ปัญหานี้ได้ โดยออกแบบการจัดวางความต้านทานและการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในบริเวณล้อมรอบความต้านทาน ซึ่งอาจใช้ความต้านทานย่อยมาต่ออันดับบนแท่งฉนวนในลักษณะเป็นกรวยสว่านจุ่มในน้ำมัน หรือใช้ก๊าซอัดความดัน เช่น  $\text{SF}_6$  เป็นต้น

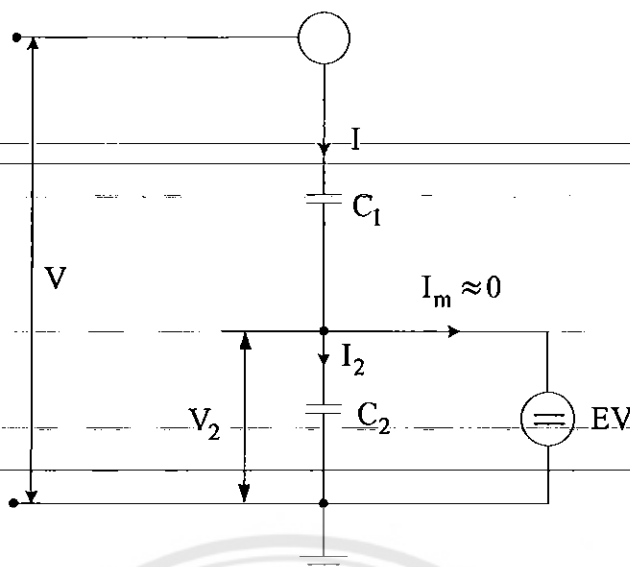
### 2.1.3.3 โวลต์เจคทีวเคอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสลับ

โดยหลักการ กระแสที่เข้าเครื่องวัด  $I_m \approx 0$  นั่นคือกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำจะต้องเท่ากันคือ  $I \approx I_2$  เมื่อ  $C_1$  คือตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและ  $C_2$  คือตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำจะได้ ดังรูปที่ 2.5

$$V = \frac{C_1 + C_2}{C_2} V_2 \quad (2.3)$$

เมื่อ  $C_1 \gg C_2$

$$V \approx \frac{C_1}{C_2} V_2 \quad (2.4)$$

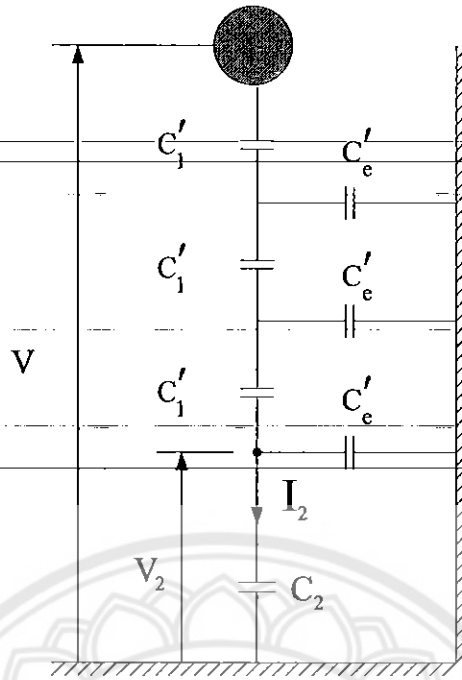


รูปที่ 2.5 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ [2]

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง  $C_1$  เป็นตัวเก็บประจุแรงสูงที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไปมีใช้อยู่ 2 ชนิด คือตัวเก็บประจุก้ำ้อัดความดันและตัวเก็บประจួយ่อยๆ มาต่ออันดับกัน

#### 2.1.3.4 ตัวเก็บประจួយ่อยต่ออันดับ

ตัวเก็บประจูนชนิดนี้ได้จากการนำเอาตัวเก็บประจួយ่อยประเภทเซรามิกส์หรือตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม โพลีเอสเตอร์ หรือตัวเก็บประจุกระดาษชุบน้ำมันฉนวนจำนวนมากมาต่ออันดับกัน การต่อในลักษณะนี้ย่อมมีสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดของตัวเก็บประจួយ่อยแต่ละตัวกับสิ่งที่ห้อมล้อม โดยเฉพาะกับส่วนที่ต้องต่อลงดินจึงมีค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ดังรูปที่ 2.6 แสดงถึงวงจรสมมูลประกอบด้วยตัวเก็บประจุแรงสูงย่อยๆ  $C'_1$  กับค่าเก็บประจุสเตรย์  $C'_2$  ลงดินย่อยตามแนวความยาวของโวลเตจดีไวเดอร์



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของ โวลเตจคิไวเคอร์แบบตัวเก็บประจุข้อยต่ออันดับ [5]

โดยที่	$C_1$	คือ ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูงรวม (F)
	$C'_1$	คือ ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าข้อยภาคแรงสูงรวม (F)
	$C_2$	คือ ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำ (F)
	$C_e$	คือ ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าลงดินรวม (F)
	$C'_e$	คือ ค่าความจุสเตรย์ข้อยลงดิน (F)

ค่าความเก็บประจุแรงสูงรวมไม่สามารถคำนวณจาก  $C$  แต่จะคำนวณจากกระแส  $I_2$  ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุแรงต่ำ  $C_2$  ที่มีแรงดันคร่อม  $V_2$  หากค่าความจุรวมหาได้จากสมการที่ (2.5)

$$\text{ความจุไฟฟ้ารวมหาได้จาก } I_2 = \omega C_{\text{ires}} V \quad (2.5)$$

ดังนั้น อัตราส่วนแรงดันต่ำต่อแรงดันสูงหาได้จากสมการที่ (2.19)

$$\frac{V_2}{V} = \frac{n}{N} \left[ 1 - \frac{C_e}{6C_1} \right] = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left[ 1 - \frac{C_e}{6C_1} \right] \quad (2.6)$$

โดยที่	$n$	คือจำนวนตัวเก็บประจุข้อย
	$N$	คือจำนวนตัวเก็บประจุข้อยแรงสูงต่ออนุกรมกัน

$$C_1 = C'_1/N \quad (2.7)$$

$$C_e = nC'_e \quad (2.8)$$

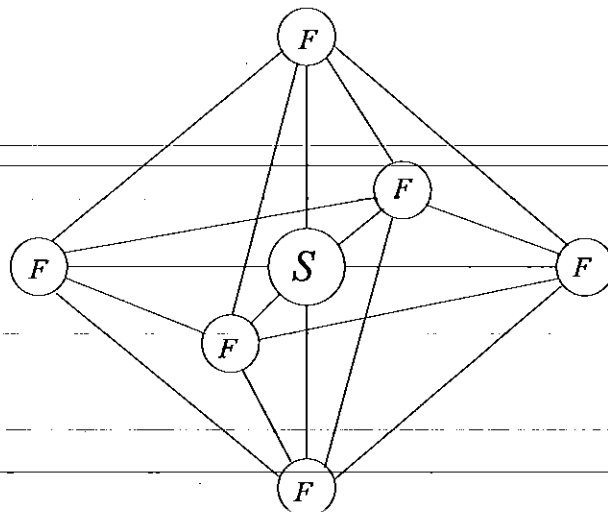
ค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ลงดินรวมทั้งหมด  $C_e$  จะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของ โวลเตจดีไวเซอร์และสภาพแวดล้อมผ่านัง อุปกรณ์อื่นๆ การลดความผิดพลาดให้น้อยลงทำได้โดย ให้ค่า  $C_e/C_1$  มีค่าน้อยลง คือทำให้ค่าความจุไฟฟ้า  $C_1$  มีค่าสูงขึ้น ให้  $C_e/6C_1$  น้อยกว่าหรือเท่ากับ 5% ปกติค่า  $C_e$  มีค่าประมาณ 10 ถึง 15 pF/m ของความสูง ดังนั้น  $C_1$  ควรจะมีค่าประมาณ 30 - 50 pF/m ของความสูง

ค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง  $C_1$  ควรจะมีค่ามากพอ เพื่อขจัดปัญหาผลกระทบจากความจุไฟฟ้า สเตรย์  $C_e$  แต่อย่างไรก็ตาม  $C_1$  ไม่ควรมีค่ามากเกินไปเพราะจะกลายเป็น โหลดแก่แหล่งจ่ายหรือต้น กำเนิดไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นค่า  $C_1$  ควรจะมีค่าอยู่ในช่วง 100 pF ถึง 1000 pF ในทางปฏิบัติ  $C_1$  จะมี ค่าประมาณ 200 - 500 pF

## 2.2 การฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยก๊าซ

อากาศเป็นฉนวนก๊าซชนิดหนึ่ง ซึ่งมีค่า  $E_b = 30 \text{ kV/cm}$ ,  $76 \text{ cm Hg}$ ,  $0.1 \text{ Mpa}$ ,  $1 \text{ bar}$  ที่ อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  แต่ไม่นิยมใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าแรงสูงเนื่องจากไม่สามารถทนต่อแรงดันสูงๆ ได้ ส่วนใหญ่ใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบกับก๊าซชนิดอื่น ส่วนก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) มีความ คงทนต่อสนามไฟฟ้าเท่ากับของอากาศ โดยมีข้อดีกว่าคือเป็นก๊าซที่ไม่มีออกซิเจนซึ่งจะไม่ทำให้เกิดผลกระทบหน้าสัมผัสต่างๆ จากการเกิดออกซิไดซ์ (กลายเป็นออกไซด์, การเผาไหม้)

แต่ในปัจจุบันก๊าซ  $\text{SF}_6$  (Sulfur hexafluoride) ได้รับความสนใจและมีบทบาทสำคัญต่อ เทคโนโลยีการฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเพราะก๊าซ  $\text{SF}_6$  มีคุณสมบัติการฉนวนทางไฟฟ้า ครบถ้วนทุกประการมีความคงทนต่อแรงดัน ไฟฟ้าสูงที่ความดันค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการฉนวน ด้วยก๊าซชนิดอื่นๆ มีเสถียรภาพมั่นคงต่อความร้อนและปฏิกิริยาทางเคมี ก๊าซ  $\text{SF}_6$  ถูกนำมาใช้เป็น ก๊าซฉนวนแล้วจะไม่เสื่อมสภาพจากความเป็นฉนวน แต่ถ้าทิ้งไว้นานๆ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของมันจะลดลงได้ เนื่องจากมีการสูญเสียความหนาแน่นของก๊าซ  $\text{SF}_6$  ซึ่งเป็นสารประกอบของ โปลิอะตอมมิกโมเลกุลของกำมะถันและฟลูออรีน ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โมเลกุลของก๊าซ SF<sub>6</sub> [4]

2.2.1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF<sub>6</sub>

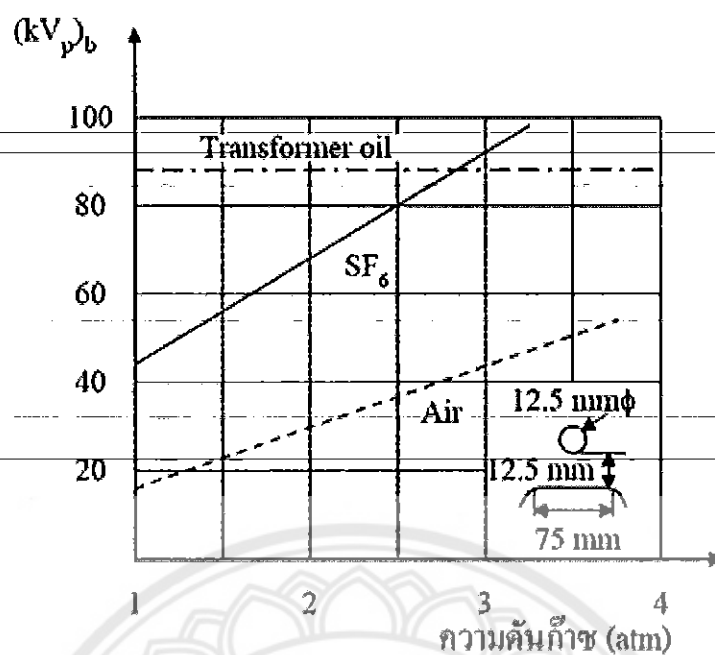
SF<sub>6</sub> เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และไม่ช่วยให้ไฟติด เป็นก๊าซที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่นและจะคงสภาพเดิมแม้ว่าจะถูกทำให้ร้อนถึง 500°C ก๊าซ SF<sub>6</sub> มีค่าเปอร์มิตติวิตีใกล้เคียงกับอากาศ คือ ประมาณ 1 ดังคุณสมบัติที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

SF<sub>6</sub> จะอยู่ในสถานะก๊าซหรือไอเหลวนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน ในทางปฏิบัติจะใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 0°C และความดันอยู่ในช่วง 2 ถึง 7 ซึ่งจะอยู่ในสถานะของก๊าซ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF<sub>6</sub> [4]

น้ำหนักโมเลกุล	146.06
จุดหลอม	-50.8°C
อุณหภูมิวิกฤต	-54°C
ความดันวิกฤต	36.75 atm
ความหนาแน่นวิกฤต	0.73 kg/L
ความหนาแน่นไอ	6.16 g/L
ความหนาแน่นของเหลว	1.56 kg/L
ความดันไอที่ 20°C	20.74 atm
สภาพนำความร้อน	$7.1 \times 10^{-15}$ cal/cm <sup>2</sup> /°C/s
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก	1.00191

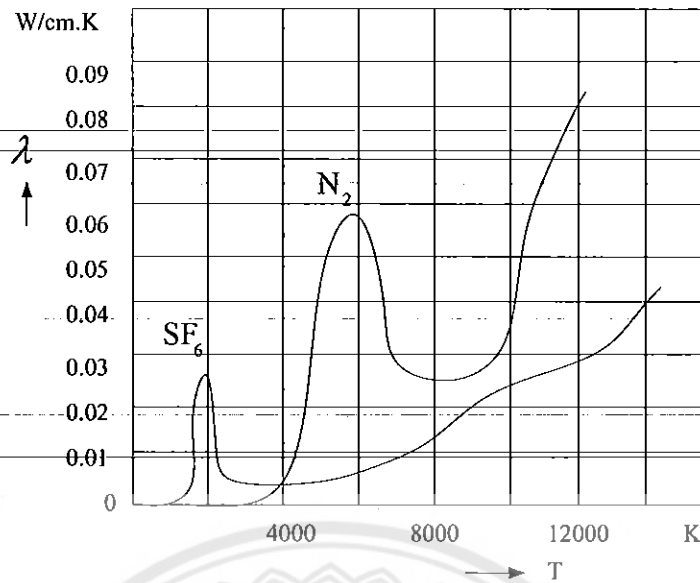




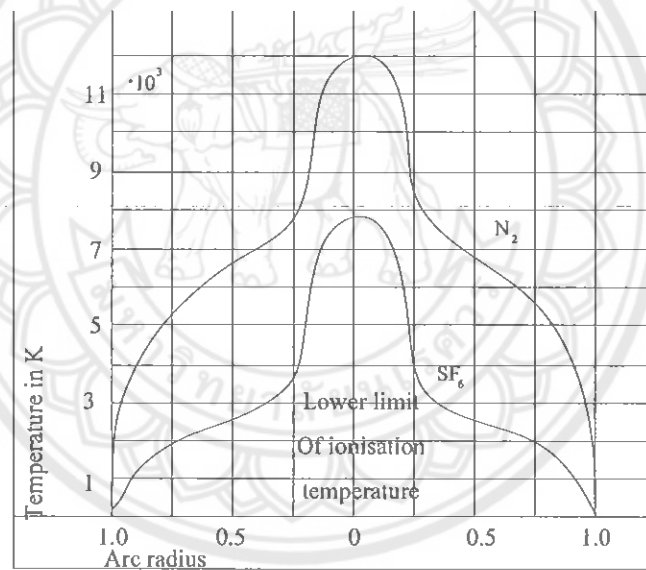
รูปที่ 2.8 แรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF<sub>6</sub> [4]

#### 2.2.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF<sub>6</sub>

ก๊าซ SF<sub>6</sub> มีความหนาแน่นหนักประมาณ 5 เท่าของอากาศ ซึ่งเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักมากที่สุด ในปัจจุบัน ทำให้ SF<sub>6</sub> มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซอื่นๆ ที่ใช้เป็นฉนวน เช่น และ N<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> นอกจากนั้นก๊าซ SF<sub>6</sub> จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความดันบรรยากาศประมาณ 2.5 เท่าของอากาศ และจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับน้ำมันหม้อแปลงเมื่อ SF<sub>6</sub> มีความดันอัดประมาณ 3 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ก๊าซ SF<sub>6</sub> มีสัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันต่ำมาก เมื่อเทียบกับอากาศ ทำให้แรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF<sub>6</sub> มีค่าสูงและมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเป็นสัดส่วนกับความดันอัดซึ่งจะเพิ่มสูงขึ้นเร็วกว่าอากาศ และดับอาร์กได้รวดเร็ว



รูปที่ 2.9 สภาพนำความร้อนของก๊าซ  $SF_6$  และ ในพจน์ของอุณหภูมิ  $N_2$  [4]



รูปที่ 2.10 สภาพนำความร้อนของก๊าซ  $SF_6$  และ  $N_2$  [4]

ก๊าซ  $SF_6$  นอกจากเป็นก๊าซฉนวนที่ดีแล้ว ยังมีคุณสมบัติในการดับอาร์กได้รวดเร็วด้วย จึงเหมาะกับการดับอาร์กเมื่อมีการเปิดหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง ก๊าซ  $SF_6$  จะแตกตัวที่อุณหภูมิ 2000 K มีสภาพนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี ดังกราฟแสดงเปรียบเทียบการนำความร้อนกับไนโตรเจนในรูปที่ 2.9 จึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมอาร์กต่ำ พลังงานที่เปลี่ยนเป็นความร้อนจึงต่ำ ถ้าอาร์กที่อุณหภูมิสูงเกิดแตกตัวนี้มีค่าแอมแปร์เมื่อเทียบกับไนโตรเจน ดังรูปที่แสดงในรูปที่ 2.10 ถ้าอาร์กล้อมรอบด้วยก๊าซอุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 2000 K) ซึ่งมีสภาพการเป็นฉนวนสูงแต่ยังมีสภาพการนำความร้อนได้ดี ฉะนั้นปริมาณความร้อนจากถ้าอาร์กจะถูกถ่ายเทออกไปได้เร็ว ทำให้สภาพ

ของลำอาร์กกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนได้เร็วหลังจากกระแสตกลงผ่านศูนย์กลางครั้งแรกหลังจากหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แยกจากกัน จึงเท่ากับเป็นการป้องกันการเกิดเบรกควาน์แบบเทอร์มัลไม่ให้เกิดขึ้น เวลาคงตัวของก๊าซ  $SF_6$  ในการดับอาร์กเป็น  $\mu s$  ซึ่งเร็วกว่าอากาศประมาณ 100 เท่า อิเล็กตรอนจะกลับไปจับไอออนทำให้อะตอมกลับสภาพเป็นกลาง ซัลเฟอร์และฟลูออรีนรวมตัวเป็น  $SF_6$  และมีสภาพการเป็นฉนวนตามเดิม

### 2.2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ $N_2$ [6]

ไนโตรเจน (Nitrogen) เป็นธาตุเคมีในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ N และเลขอะตอม 7 เป็นอโลหะที่มีสถานะเป็นก๊าซที่มีอยู่ทั่วไป โดยปกติไม่มีสี กลิ่น หรือรส แต่ละโมเลกุลมี 2 อะตอม ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ  $N_2$  [6]

คุณสมบัติทั่วไป	
ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	ไนโตรเจน, N, 7
อนุกรมเคมี	อโลหะ
หมู่, คาบ, บล็อก	15, 2, p
ลักษณะ	ไม่มีสี
มวลอะตอม	14.0067 g/mol
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	$1s^2 2s^2 2p^3$
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 5
คุณสมบัติทางกายภาพ	
สถานะ	ก๊าซ
ความหนาแน่น	(0°C, 101.325 kPa) 1.251 g/L
จุดหลอมเหลว	63.15 K (-210.00°C)
จุดเดือด	77.36 K (-195.79°C)
ความร้อนของการหลอมเหลว	( $N_2$ ) 0.720 kJ/mol
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	( $N_2$ ) 5.57 kJ/mol
ความร้อนจำเพาะ	(25°C) ( $N_2$ ) 29.124 J/(mol·K)

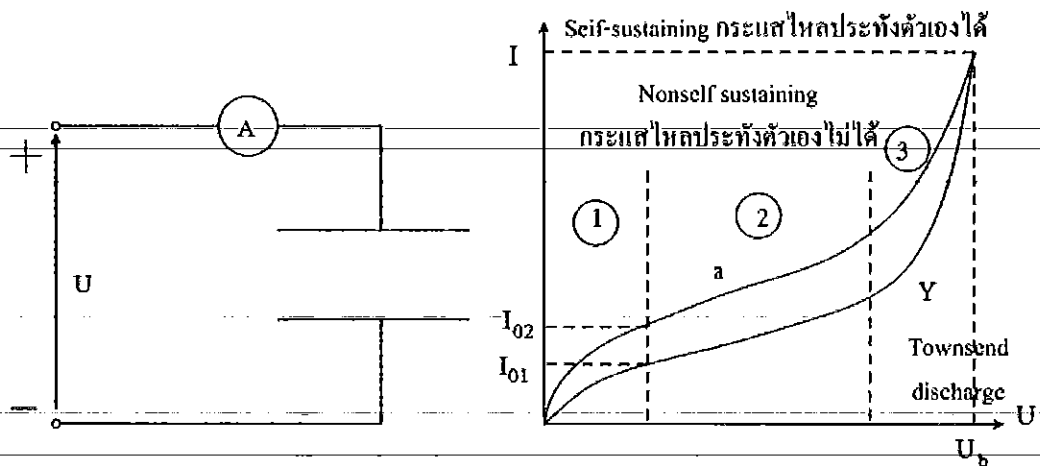
## 2.3 เบรกดาวน์ในก๊าซ [2]

ก๊าซเป็นชนวนชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญในด้านเทคนิคการฉนวนไฟฟ้าแรงสูงใช้เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึม และระบายความร้อน เป็นฉนวนภายนอกที่ราคาถูกที่สุดก็คือ อากาศที่ใช้เป็นฉนวนของสายส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง เป็นฉนวนภายในที่อัดด้วยความดัน (Pressured) ได้ในภาชนะปิดหุ้มเพื่อให้มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูงขึ้น เช่น ก๊าซ SF<sub>6</sub> ใช้แทนน้ำมันในหม้อแปลง ใช้เป็นฉนวนในระบบ GIS และ โดยที่ก๊าซ SF<sub>6</sub> มีคุณสมบัติดับอาร์กได้ดี จึงใช้เป็นฉนวนในเซอร์กิตเบรกเกอร์

อย่างไรก็ตามสภาพการเป็นฉนวนของก๊าซก็สามารถเสียได้เช่นกัน เมื่อมีดิสชาร์จในก๊าซเกิดขึ้น คำว่าดิสชาร์จในก๊าซเป็นการอธิบายปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุ คือ อิเล็กตรอนและไอออนที่เกิดเพิ่มทวีคูณจากกระบวนการไอออไนเซชันด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ไอออไนเซชันจะเกิดขึ้นได้จะต้องมีสนามไฟฟ้า เป็นปัจจัยให้อนุภาคมีพลัง และเคลื่อนที่ไปสู่อิเล็กโทรดได้ และนั่นก็คือกระแสไหลในก๊าซ แต่ก่อนที่จะกล่าวถึงการเกิดดิสชาร์จหรือสปาร์กเบรกดาวน์ในก๊าซเกิดขึ้นได้อย่างไร ควรที่จะทราบถึงคุณลักษณะธรรมชาติของก๊าซเป็นพื้นฐานก่อน เพราะการเกิดดิสชาร์จหรือเบรกดาวน์ในก๊าซจะเกี่ยวข้องกับ โมเลกุล ความดันก๊าซ อุณหภูมิ การเคลื่อนที่ การชนของโมเลกุล และการถ่ายเทพลังงาน เป็นต้น

### 2.3.1 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ (Breakdown mechanisms)

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ หมายถึง การเปลี่ยนสภาพการฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า คือ เป็นช่วงต่อ (Transition) ระหว่างสถานะภาพที่กระแสไหลประทั้งตัวเองไม่ได้ (Nonself-sustained) ไปสู่สถานะภาพที่กระแสไหลประทั้งตัวเองได้ (Self-sustained) ช่วงต่อดังกล่าว จะเกิดขึ้นได้เมื่อแก๊ปมีจำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนในอะวาลานซ์มากพอจนทำให้แก๊ปมีสภาพนำไฟฟ้าสูง และโดยทฤษฎีแล้วกระแสไหลเป็นค่าอนันต์ คือ กระแสจะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรภายนอกเท่านั้น และกระแสที่ไหลในแก๊ปนี้จะไหลต่อไปได้ถึงแม้ว่าจะตัดต้นกำเนิดรังสีสองคาโทดออก (เช่น รังสีอัลตราไวโอเลต) เพื่อสร้าง N<sub>0</sub> และ I<sub>0</sub> หรือ กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์คงเดิมไม่ว่า N<sub>0</sub> หรือ I<sub>0</sub> จะต่างกันก็ตาม ดังในรูปที่ 2.11 ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์ของกระแสไหลในแก๊ปกับแรงดันที่ป้อนช่วง I จะเห็นได้ว่าระดับกระแสอิมิตัว I<sub>01</sub>, I<sub>02</sub> มีระดับต่างกัน ขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีสองคาโทด ที่ระดับกระแสอิมิตัว I<sub>0</sub> ค่าหนึ่ง ขนาดแรงดันที่ป้อนไม่มีผลต่อค่ากระแสที่ไหลในแก๊ป จนถึงค่าแรงดันหนึ่งกระแสจะเพิ่มขึ้นเป็น เอกซโพเนนเชียล เมื่อแรงดันเพิ่มถึงค่าหนึ่งจะเกิดเบรกดาวน์ขึ้นที่แรงดันเดียวกันไม่ว่า I<sub>0</sub> จะเป็นเท่าใด และกระแสไหลในแก๊ปประทั้งตัวเองได้



รูปที่ 2.11 อิเล็กโทรดแผ่นระนาบวางขนานกันในอากาศ ลักษณะกราฟกระแส-แรงดัน [2]

จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นทำให้กระแสไหลประทั่งตัวเองอยู่ได้นั้น เกิดจากกระบวนการต่างๆ ที่กล่าวแล้วข้างต้น ซึ่งมีกระบวนการที่สำคัญ ได้แก่

1. อิเล็กตรอนขั้นที่สอง เป็นอิเล็กตรอนปล่อยจากคาโทดโดยการวิ่งชนของ ไอออนบวก
2. ไอออนไนเซชันในก๊าซเนื่องจากพลังโฟตอน
3. ปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคาโทดโดยโฟตอนไฟฟ้า (Photoelectric emission)

ในรูปที่ 2.11 ที่แรงดันต่ำๆ ความเครียดสนามไฟฟ้า E มีค่าต่ำ จะพบว่ามีเพียงบางส่วนที่เกิดอิเล็กตรอนอิสระตามธรรมชาติ อิเล็กตรอนวิ่งเข้าหาแอนอด และ ไอออนบวกวิ่งเข้าหาคาโทด การเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุเช่นนี้ จึงมีกระแสไหลตามกฎของโอห์ม  $J = \sigma E$  คือ กระแสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดสนามไฟฟ้าอยู่ในย่าน 1

ในย่าน 2 อนุภาคประจุอิสระมีอยู่ที่ผิวคาโทดหรือออกจากคาโทดจะวิ่งไปหาแอนอดหมด แม้จะเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น แต่กระแสจะไม่เพิ่มตาม เพราะอิเล็กตรอนถูกดึงไปหมดแล้ว

ที่ความดันบรรยากาศ จะพบว่า ความหนาแน่นของกระแสเริ่มคงตัว มีค่าประมาณ  $10^{-9} \text{ A/cm}^2$  ที่ความเครียดสนามไฟฟ้า  $10 \text{ V/cm}$  ถ้าเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นไปอีก กระแสจะไม่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งแรงดันเพิ่มขึ้น ให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มถึง  $20 \text{ kV/cm}$  กระแสจะเพิ่มขึ้นอีกอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เพราะมีอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจากการชนแตกตัว หรือ ไอออนไนเซชัน นั่นคือ อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชน โมเลกุลเป็นกลางเกิดอิเล็กตรอนอิสระ และ ไอออนบวกเพิ่มขึ้นมากเป็นสภาพที่อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ได้เอง เกิดเป็นอะวาลานซ์ (Avalanche) ในย่าน 3

กระแสที่เพิ่มขึ้นหมายถึงจำนวนอนุภาคประจุ คือ อิเล็กตรอนและไอออนมีจำนวนมากขึ้น จนถึงค่าวิกฤตที่ทำให้เบรกดาวน ซึ่งในปัจจุบันมีทฤษฎีที่ใช้อธิบายกระบวนการเพิ่มจำนวนอนุภาคประจุถึงค่าวิกฤต หรือกลไกการเกิดเบรกดาวนมีอยู่สองทฤษฎี คือ ทฤษฎีกลไกเบรกดาวนของ ทาวนเซนด์และทฤษฎีกลไกเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์

ในการคำนวณค่า  $U_b$  จำเป็นต้องทราบค่า  $\Gamma$  ซึ่งมีค่าระหว่าง  $10^2$  กับ  $10^3$  และจะมีผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ค่า  $p \cdot d$  ต่ำๆ ที่ค่า  $p \cdot d$  สูงๆ การเปลี่ยนแปลงค่า  $p \cdot d$  มีผลต่อค่าในส่วนน้อย ค่า  $U_b$  จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $p \cdot d$  ที่  $p \cdot d$  ต่ำมากๆ ค่าในส่วนนี้จะเข้าใกล้ ค่า  $U_b$  จะเพิ่มขึ้นอีก แสดงว่ามีค่าแรงดันต่ำสุด  $U_{bmin}$  ค่า  $U_{bmin}$  นี้สามารถหาได้โดยการหาอนุพันธ์ เทียบกับ  $p \cdot d$  แล้วให้เท่ากับศูนย์จะได้

$$\frac{dU_b}{d(p \cdot d)} = \frac{B}{\ln \frac{A \cdot p \cdot d}{\ln \left( \frac{1}{\Gamma} + 1 \right)}} - \frac{B}{\left[ \frac{\ln \frac{A \cdot p \cdot d}{\ln \left( \frac{1}{\Gamma} + 1 \right)}}{\ln \left( \frac{1}{\Gamma} + 1 \right)} \right]^2} = 0 \quad (2.9)$$

นั่นคือ 
$$\ln \frac{A \cdot p \cdot d}{\ln \left( \frac{1}{\Gamma} + 1 \right)} = 1 \quad (2.10)$$

ฉะนั้น 
$$(p \cdot d)_{min} = \frac{e}{A} \cdot \ln \left( \frac{1}{\Gamma} + 1 \right) \quad (2.11)$$

แทนค่า  $(p \cdot d)_{min}$  จะได้ 
$$(U_b)_{min} = 2.718 \cdot \frac{B}{A} \cdot \ln \left( \frac{1}{\Gamma} + 1 \right) \quad (2.12)$$

จากการที่ทราบว่าทั้งค่า  $(p \cdot d)$  และ  $U_{bmin}$  มีค่าต่ำ จึงนำผลนี้ไปใช้ประโยชน์ในเรื่องการทำหลอดเรืองแสง หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดไฟโซเดียม หลอดก๊าซดีสชาร์จ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่า  $(p \cdot d)_{min}$  และ  $U_{bmin}$  ของก๊าซชนิดต่างๆ [2]

รายการ	Air	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	SF <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>	He	Ne	Na
$(p \cdot d)_{min}$ Torr.cm	0.55	0.65	1.05	0.7	0.26	0.51	4.0	4.0	0.05
$U_{bmin}$ volt	352	240	230	450	507	420	155	245	320

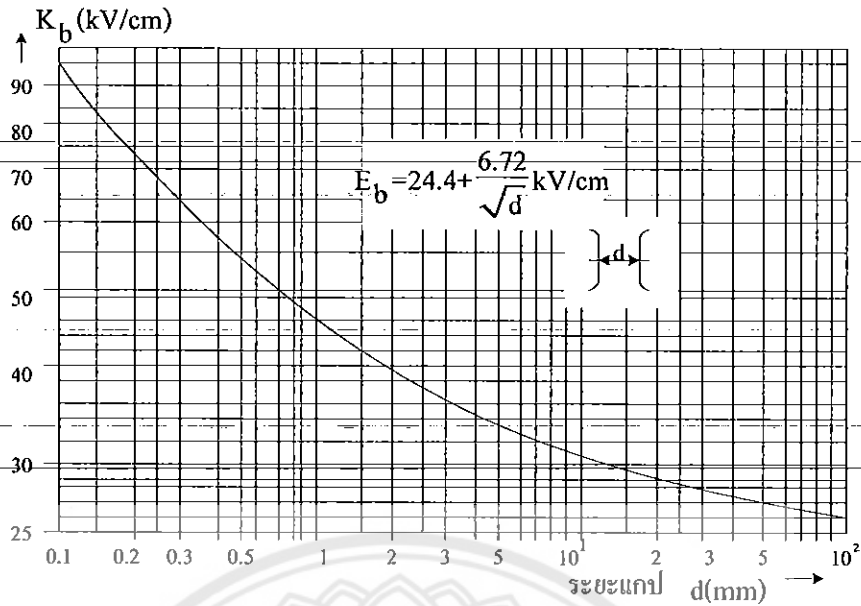
จากตารางที่ 2.3 จะเห็นว่าที่ค่าแรงดันต่ำกว่า  $U_{bmin}$  ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอไม่สามารถทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ ไม่ว่าจะทำให้แก๊บแคบหรือความดันต่ำลงเพียงใด

การใช้กฎของทาวน์เซนดมีขีดจำกัด มีหลายกรณีที่ปรากฏการณ์ไม่เป็นไปตามกฎนี้ เช่นที่  $p \cdot d$  มีค่าสูงมากหรือต่ำมาก ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะไม่เท่ากัน แต่จะแปรไปตาม  $p$  เมื่อให้  $p \cdot d$  คงตัว

ในช่องแปกกว้าง การเบรคความถี่จะเป็นแบบสตรีมเมอร์ ที่ความดันต่ำมากๆ เบรคความถี่มักเริ่มต้นจากอิเล็กโทรด เช่น เบรคความถี่ในสุญญากาศ เป็นต้น ยิ่งกว่านั้นกฎของทาวน์เซนดใช้กับก๊าซผสมไม่ได้

ตารางที่ 2.4 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคความถี่ของอากาศ [2]

d (mm)	$E_b$ (kV/cm)	d (mm)	$E_b$ (kV/cm)
0.1	96.0	8.0	32.1
0.2	73.3	9.0	31.7
0.3	64.1	10.0	31.4
0.4	58.8	15.0	30.0
0.5	55.2	20.0	29.4
0.6	52.2	25.0	28.9
0.7	49.9	30.0	28.6
0.8	48.1	35.0	28.3
0.9	46.5	40.0	28.0
1.0	45.4	45.0	27.8
2.0	39.5	50.0	27.7
3.0	36.7	55.0	27.5
4.0	35.0	60.0	27.3
5.0	34.0	65.0	27.2
6.0	33.2	80.0	26.9
7.0	32.6	90.0	26.7



รูปที่ 2.12 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคควาน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอของอากาศ [2]

### 2.3.2 เบรคควาน์ในก๊าซไฟฟ้าลบ (Breakdown in electronegative gas)

ก๊าซไฟฟ้าลบ หมายถึง ก๊าซชนิดที่โมเลกุลมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนอิสระ และทำให้เป็นไอออนลบ ก๊าซประเภทนี้ได้แก่ ก๊าซที่มีองค์ประกอบ F, Cl, Br, I, O และ S เช่น อากาศ  $\text{CO}_2$  และ  $\text{SF}_6$  เป็นต้น พลังงานเกาะตัว หรือทำให้อิเล็กตรอนที่เกาะออกมาได้ มีค่าอยู่ในย่าน 0.75 eV ถึง 3.8 eV ดังในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 พลังงานเกาะของอิเล็กตรอนบนอะตอมต่างๆ [2]

อะตอม	พลังงานเกาะตัว $W_a$ (eV)
H	0.75
F	2.0
Cl	3.8
O	1.465
S	2.07

### เงื่อนไขการเกิดเบรคควาน์ของก๊าซไฟฟ้าลบ

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าในก๊าซอาจเกิดไอออนลบขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนที่แยกตัวเป็นอิสระจากโมเลกุลด้วยการไอออไนเซชัน และมีพลังงานที่พอเหมาะจะไปเกาะติดกับ โมเลกุลเป็นกลางของก๊าซ กลายเป็นอนุภาคที่มีประจุลบในรูปแบบต่างๆ กัน ก๊าซที่มีคุณสมบัติที่โมเลกุลจับอิเล็กตรอนได้



เรียกว่า ก๊าซฟลูออโรไฮโดรคาร์บอน ในก๊าซอื่นหากมีก๊าซฟลูออโรไฮโดรคาร์บอนแม้เพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซนั้นเปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัด

โดยเหตุที่โมเลกุลของก๊าซประเภทนี้สามารถจับอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากไอออไนเซชัน และจะเป็นตัวเริ่มต้นสร้างอะวาลานซ์ได้ จึงเท่ากับเป็นการหน่วงหรือระงับการสร้างอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน และนั่นก็หมายถึงการระงับการเกิดเบรกดาวน์ไม่ให้เกิดขึ้น จะเกิดเบรกดาวน์ได้ก็ต้องมีสนามไฟฟ้าสูงกว่าปกติ เพื่อที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่เกาะอยู่นั้นให้หลุดออกมา สร้างอะวาลานซ์ไปตามกระบวนการเกิดเบรกดาวน์ นั่นคือ ก๊าซฟลูออโรไฮโดรคาร์บอนจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซธรรมดาที่โมเลกุลไม่สามารถจับอิเล็กตรอนได้ ในทางเทคนิควิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง จึงใช้ลักษณะสมบัติเด่นนี้ ไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในด้านการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ก๊าซฟลูออโรไฮโดรคาร์บอนได้แก่  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $SF_6$ ,  $CCl_2F_2$  (Arcton - 12) และอากาศซึ่งมี  $O_2$  รวมอยู่ด้วย ก๊าซฟลูออโรไฮโดรคาร์บอนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ได้แก่ ก๊าซ  $SF_6$  เพราะมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนครบถ้วนทุกประการ

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซฟลูออโรไฮโดรคาร์บอนเป็นไปตามกลไกการเบรกดาวน์ ฉะนั้น อาศัยทฤษฎีของทาวน์เซนต์ อาจเขียนสมการของกระแสในแก๊สที่เกิดจากไอออไนเซชันและเกิดอิเล็กตรอนเกาะโมเลกุลในเวลาเดียวกัน ดังสมการที่ (2.13)

$$I = I_0 \frac{\frac{\alpha}{\alpha - \eta} \left[ e^{(\alpha - \eta)d} - \frac{\eta}{\alpha - \eta} \right]}{1 - \gamma \frac{\alpha}{\alpha - \eta} \left[ e^{(\alpha - \eta)d} - 1 \right]} \quad (2.13)$$

โดยที่  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชันที่หนึ่งของทาวน์เซนต์  
 $\gamma$  คือ สัมประสิทธิ์การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคาโทดโดยการชนของไอออนบวก  
 $\eta$  คือ สัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอนบนโมเลกุล

ค่าของ  $m/p$  จะอยู่ในฟังก์ชันของ  $E/p$  เช่นกัน เงื่อนไขการเกิดกระแสไหลประทุทั้งตัวอยู่ได้ โดยไม่ขึ้นอยู่กับกระแสเริ่มต้น  $I_0$  เมื่อเทอมในส่วนของสมการที่ (2.14) เป็นศูนย์ นั่นคือ

$$\gamma \frac{\alpha}{\alpha - \eta} \left[ e^{(\alpha - \eta)d} - 1 \right] = 1 \quad (2.14)$$

เบรกดาวน์จะเกิดขึ้นได้เมื่อ  $\alpha \geq \eta$

ในการทำงานเดียวกัน การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซไฟฟ้าลบบ อาจอธิบายด้วยทฤษฎีสตรีมเมอร์ได้เช่นกัน ซึ่งจะกล่าวละเอียดในเรื่องเบรกดาวน์ในก๊าซ SF<sub>6</sub>

### 2.3.3 การคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวน์ในก๊าซ

ดังที่ได้กล่าวแล้ว การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซมี 2 แบบคือ เบรกดาวน์โดยตรง ซึ่งเป็นลักษณะการเกิดเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และอีกแบบหนึ่งคือเบรกดาวน์แบบโคโรนา คือ จะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเกิดเบรกดาวน์ เป็นลักษณะเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งค่าแรงดันเบรกดาวน์คำนวณไม่ได้ แต่คำนวณค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้

ในแก๊ปที่มีแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า  $\eta = E_{av}/E_{max}$  มากกว่า 20% ขึ้นไป การเกิดเบรกดาวน์ในอากาศจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับที่เกิดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอสูง แต่ถ้าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าต่ำกว่านี้  $\eta < 20\%$  เรียกว่าสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง จะมีปรากฏการณ์แตกต่างไปจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอคือ จะมีโคโรนาเกิดขึ้นในบริเวณที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูง และเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวน์ โคโรนานี้อาจคงสภาพอยู่ได้ในบางจุดโดยไม่เกิดเบรกดาวน์ ลักษณะเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ความดัน  $\geq 0.5$  บาร์ จะพบว่าในสนามไฟฟ้าทุกรูปแบบทุกความดันที่มีแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่า 30% ( $\eta \geq 30\%$ ) จะเกิดเบรกดาวน์โดยตรง

ในสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่มี  $\eta$  ยิ่งต่ำความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) ยิ่งมีค่าสูงที่ผิวอิเล็กโทรดที่มีเล็ก และความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ระยะห่างออกไปจากจุด  $E_{max}$  ฉะนั้น ไอออนในเซชันจะเกิดขึ้นได้เฉพาะบริเวณผิวอิเล็กโทรด ที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเท่านั้น ที่ระยะห่างออกไปความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำเกินไป ที่จะเกิด ไอออนในเซชัน จึงไม่อาจเกิดเบรกดาวน์ได้จึงมีโคโรนาเกิดขึ้นที่บริเวณผิวอิเล็กโทรดที่มีรัศมีเล็กก่อนที่จะเกิดเบรกดาวน์ และจัดเป็นเบรกดาวน์แบบโคโรนา (Corona breakdown)

เมื่อมีโคโรนาเกิดขึ้น สนามไฟฟ้าในแก๊ปจะบิดเบือนไปจากสนามไฟฟ้าที่เป็นแบบไฟฟ้าสถิตหรือสนามไฟฟ้าที่คำนวณจากมิติเรขาคณิตของแก๊ป การคำนวณแรงดันเบรกดาวน์แบบโคโรนาจะยุ่งยาก ประมาณได้เพียงในเชิงสัมพันธ์เปรียบเทียบกับๆ ไป อย่างไรก็ตามแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ถ้าทราบรูปลักษณะของสนามไฟฟ้าในแก๊ป ในที่นี้จะได้แสดงวิธีการคำนวณแรงดันเบรกดาวน์โดยตรง หรือแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดในอากาศและก๊าซ SF<sub>6</sub> ให้ดูเป็นตัวอย่าง ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมีความสัมพันธ์ของแรงดันเบรกดาวน์กับผลคูณ p.d ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ความสัมพันธ์ในลักษณะนี้จะเป็น  $U_0 = f(p.d)$  ซึ่งจะเรียกว่ากฎแห่งความคล้ายคลึงกัน และจะชี้ให้เห็นว่าในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ นั้น แรงดันเริ่มต้นขึ้นอยู่กับชั่วแรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

### 2.3.3.1 ผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ต่อการเบรกดาวน

#### 1. ผลกระทบของชั่วแรงแรงดันต่อค่าแรงดันเริ่มต้น ( $U_i$ และ $U_b$ )

แรงดันเริ่มต้น (Inception voltage) หมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในแก๊ป ถ้าอิเล็กโทรด์เป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยแรงดันเริ่มต้นก็คือ แรงดันเบรกดาวนโดยตรงกล่าวคือ เมื่อในแก๊ปได้เงื่อนไขเบรกดาวนก็จะเกิดเบรกดาวนทันที ในกรณีของแก๊ปที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ในย่านเบรกดาวนแบบโคโรนาความดันก๊าซต่ำกว่าความดันวิกฤต ( $p_c$ ) แรงดันเริ่มต้นก็คือ แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอและแบบไม่สมมาตร แรงดันเริ่มต้นชั่วลบนอิเล็กโทรด์ที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) จะมีค่าต่ำกว่าชั่วบวก ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่า การจะเกิดเบรกดาวนได้นั้น จะต้องมียอิเล็กตรอนเริ่มต้นเป็นตัวสร้างอะวาลานซ์ ตามกระบวนการต่างๆ ที่กล่าวแล้วข้างต้น ตัวอย่างเช่น แก๊ปของอิเล็กโทรด์เท่ากับแผ่นระนาบ ถ้าที่แก๊ปเป็นชั่วลบ อิเล็กตรอนเริ่มต้นจะเริ่มที่ผิวของปลายแก๊ป ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง มีโอกาสเกิดไอออไนเซชันจากการชนได้มาก จึงสามารถสร้างอะวาลานซ์วิกฤตของอิเล็กตรอนได้ง่าย ค่าแรงดันเบรกดาวนจึงต่ำ แต่ถ้าแก๊ปเป็นชั่วบวก อิเล็กตรอนเริ่มต้นจะต้องเริ่มในแก๊ปที่ระยะห่างจากผิวอิเล็กโทรด์แก๊ปไปตามแนวที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง อย่างน้อยที่สุดเท่ากับระยะวิกฤต  $X_c$  เพื่อให้อิเล็กตรอนมีโอกาสร้างอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มทวีคูณถึงจำนวนวิกฤต ( $N_c = 10^6$ ) ได้ ซึ่งความยาวของอะวาลานซ์วิกฤตอย่างน้อยจะต้องเท่ากับ  $X_c$  ตามเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของทฤษฎีสตรีเมอร์ แต่ที่ระยะ  $X_c$  จากปลายแก๊ปเป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้ามีความเครียดต่ำ โอกาสที่จะเกิดไอออไนเซชันเพื่อสร้างอะวาลานซ์จึงเป็นไปได้ยาก หรือเป็นไปได้ ถ้าจะให้เกิดไอออไนเซชันที่ระยะ  $X_c$  ได้ บริเวณนั้นจะต้องมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น นั่นก็คือจะเกิดเบรกดาวนได้ต้องป้อนแรงดันสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เองแรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของชั่วลบจึงต่ำกว่าของชั่วบวก ดังสมการที่ (2.15)

$$U_i^- < U_i^+ \quad (2.15)$$

ถ้าเป็นแบบเบรกดาวนโดยตรงซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือไม่สม่ำเสมอสูงที่ก๊าซมีความดัน  $p > p_c$  จะได้  $U_b = U_i$  ในย่านนี้ค่าแรงดันเบรกดาวนโดยตรงชั่วลบต่ำกว่าชั่วบวก ดังสมการที่ (2.16)

$$U_b^- < U_b^+ \quad (2.16)$$

แต่ถ้าเบรกคาวน์เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้า ไม่สม่ำเสมอสูง และ  $p > p_c$  จะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเกิดเบรกคาวน์ ผลของโคโรนาทำให้เกิดประกูค้าง ค่าแรงดันเบรกคาวน์ชั่วขณะสูงกว่าชั่วบวก ซึ่งเป็นผลของประกูค้าง

2. ผลของสภาวะบรรยากาศ เช่น อุณหภูมิ ความดัน และความชื้น

ผลของความหนาแน่นอากาศ

ดังที่ได้กล่าวแล้ว ระยะอิสระ  $\lambda$  จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์  $T$  และเป็นสัดส่วนกลับกับความดัน  $p$  ( $\lambda \sim T/p$ ) ในทางปฏิบัติความหนาแน่นของอากาศมีความสำคัญต่อการฉนวนกลางแจ้ง (สายส่งไฟฟ้ากำลัง สวิตช์เกียร์ในสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย) บรรยากาศเปลี่ยนแปลงไม่มากนักจึงถือได้ว่าแรงดันเบรกคาวน์ หรือวาทไฟเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า  $P/T$  ซึ่งแสดงถึงความหนาแน่นของก๊าซ ให้ความหนาแน่นของอากาศ  $\delta = 1$  เมื่อความดันบรรยากาศ  $p = 760$  Torr อุณหภูมิ  $t = 20^\circ\text{C}$  (ซึ่งเท่ากับ  $T = 273 + 20 = 293$  K) เป็นสภาวะมาตรฐาน IEC ดังสมการที่ (2.17)

$$U_b(\delta) = \delta U_{bn} \quad (2.17)$$

โดยที่  $U_b$  คือ ค่าแรงดันเบรกคาวน์ที่มีความหนาแน่นอากาศ  $= \delta$   
 $U_{bn}$  คือ ค่าแรงดันเบรกคาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน

ค่าความหนาแน่นอากาศคำนวณได้จากสมการที่ (2.18)

$$\delta = \frac{P}{760} \cdot \frac{293}{273+t} = 0.386 \frac{P}{273+t} \quad (2.18)$$

โดยที่  $p$  คือ ความดันอากาศเป็น Torr (1 Torr = 1 mmHg  $^\circ\text{C}$ ; 760 Torr = 1 atm)

$t$  คือ อุณหภูมิ เป็น  $^\circ\text{C}$

ผลของความชื้นในอากาศ

โมเลกุลของน้ำ ในอากาศลักษณะเป็นก๊าซไฟฟ้าลอบอ่อนๆ เพราะมีอะตอมของออกซิเจนประกอบอยู่ ทำให้อากาศที่มีความชื้นมีความคงทนต่อแรงดันสูงขึ้น ทรายเท่าที่ความชื้นนี้ยังไม่กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ หรือยังไม่ถึงจุดน้ำค้าง ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ไม่มีดีสชาร์จก่อน หรือในแถบของทรงกลม ( $d < D/2$ ) ผลของความชื้นที่มีต่อแรงดันเบรกคาวน์น้อยมากละเลยได้ แต่ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่เกิดดีสชาร์จก่อน ความชื้นมีผลต่อค่าแรงดันเบรกคาวน์ และมีผลมากที่สุดสำหรับ

แรงดันกระแสตรง ถ้าแรงดันมีช่วงเวลาน้อย เช่น แรงดันอิมพัลส์ความถี่ขึ้นมีผลต่อแรงดันเบรกคาวาน์น้อย

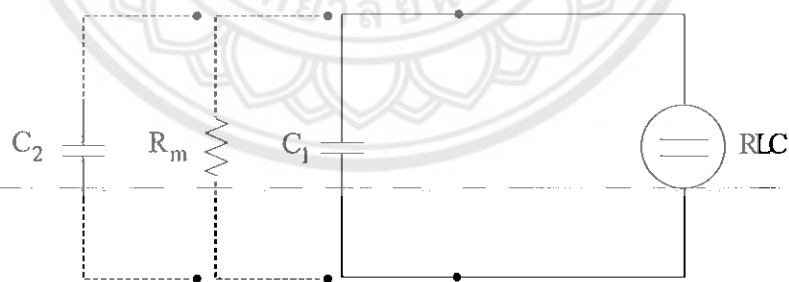
ค่าแรงดันเบรกคาวาน์เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความชื้นสัมบูรณ์ในอากาศ ฉะนั้นในการวัดแรงดันเบรกคาวาน์หรือวาวไฟตามผิว ที่สภาพมิใช่ความชื้นมาตรฐาน ถ้าต้องการเทียบค่าแรงดันเบรกคาวาน์  $U_b$  นี้กับค่ามาตรฐานกำหนด จะต้องแก้ค่าที่วัดได้ไปสู่ค่าที่สภาวะมาตรฐาน ( $U_{bn}$ ) ด้วยตัวประกอบแปลงผันความชื้นในอากาศ ( $k_h$ ) ซึ่งเป็นสัดส่วนกลับกับค่าความชื้นดังที่มาตรฐานกำหนดไว้เป็นเส้นกราฟของตัวประกอบแปลงผันความชื้นในอากาศของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น มาตรฐาน ANSI ที่กำหนดความชื้นสัมบูรณ์ไว้  $15 \text{ g/m}^3$  ที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  ความดัน  $760 \text{ Torr}$  ค่า  $k_h$  ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมบูรณ์ในอากาศ ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดัน (AC DC หรือ อิมพัลส์ ขั้วบวกหรือขั้วลบ) และชนิดของอุปกรณ์ที่ต้องการหาค่าแรงดันวาวไฟตามผิว

## 2.4 การทดสอบเปรียบเทียบมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994) [1]

ในการทดสอบเปรียบเทียบมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994) ได้ทำการทดสอบค่าต่างๆ เพื่อให้โวลเตจดีไวเซอร์ที่สร้างขึ้นมาเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งโครงการนี้จะมีการทดสอบ 5 ขั้นตอนดังนี้

### 2.4.1 การวัดความจุไฟฟ้า

วัดโดยใช้เครื่องมือวัด RLC มิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.13

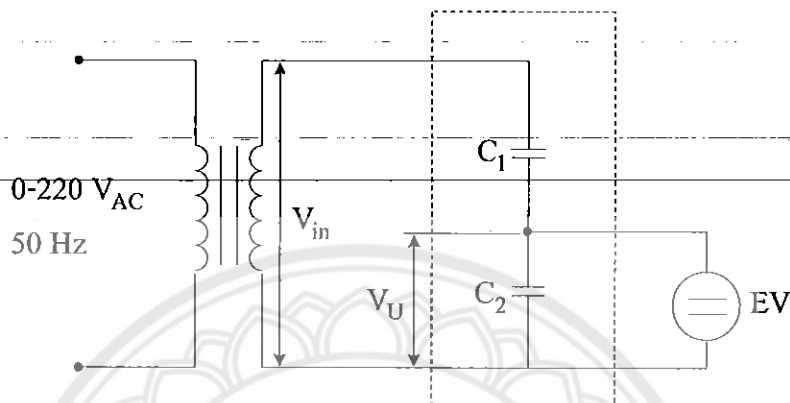


รูปที่ 2.13 วงจรแสดงการวัดค่าความจุไฟฟ้า

โดยที่	$C_1$	คือ ค่าตัวเก็บประจุภาคแรงสูง (F)
	$C_2$	คือ ค่าตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ (F)
	$R_m$	คือ ค่าความต้านเมซซิ่ง ( $\Omega$ )
	RLC	คือ RLC มิเตอร์

2.4.2 การทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์

ความหมายของสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994) ให้นิยามไว้ ดังนี้ สเกลแฟกเตอร์ หมายถึงตัวประกอบที่นำไปคูณจากค่าแรงดันที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัด แล้วนำผลของการคูณที่ได้ไปหาค่าแรงดันป้อนเข้า หาได้จากวงจรดังรูปที่ 2.14 และสมการที่ (2.19)



รูปที่ 2.14 วงจรเพื่อใช้ในการหาค่าสเกลแฟกเตอร์

$$\text{สเกลแฟกเตอร์} = \frac{V_{in}}{V_u} \tag{2.19}$$

มาตรฐานได้กำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ที่สำคัญไว้ 2 ประการ คือ

1. ความไม่แน่นอน (Uncertainty) ในการวัดค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ทดสอบ จะต้องมีความไม่แน่นอนในการวัดค่าอาร์เอ็มเอส (RMS) ไม่เกิน ±3%
2. เสถียรภาพ (Stability) ในการวัดค่ายอดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเสถียรภาพของสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±1%

สเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์แบบใดๆ อาจหาด้วยวิธีต่างๆ ต่อไปดังนี้

1. การวัดค่าแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อมกัน
2. เทียบกับ โวลเตจดีไวเดอร์ที่ทราบอัตราส่วนแรงดันที่แน่นอนแล้ว
3. คำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

วิธีการคำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวประกอบวงจรที่ทราบค่าแน่นอนเหมาะสำหรับหาอัตราส่วนในทางทฤษฎีอาจแตกต่างจากการใช้งานจริงได้ ส่วนการหาสเกลแฟกเตอร์โดยเทียบกับโวลเตจดีไวเดอร์ที่ทราบอัตราส่วนแรงดันแล้ว ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน ±3% โดยทั้งสองวิธีนี้ใช้ได้สำหรับโวลเตจดีไวเดอร์ทุกแบบ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดหาได้จากสมการที่ (2.20)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของสเกลแฟกเตอร์} = \frac{\text{Scale}_{\text{test}} - \text{Scale}_{\text{cal}}}{\text{Scale}_{\text{cal}}} \times 100\% \tag{2.20}$$

การหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ได้จากการทดลองนั้น ถ้าทำการทดลองในสถานที่ต่างๆ กัน ค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันที่ได้อาจมีค่าแตกต่างกันไป เพราะค่าเก็บประจุสเตรย์ลงดินของโวลเตจดีไวเดอร์ที่เกิดขึ้นจะมีผลกับค่าอัตราส่วนแรงดัน เพราะฉะนั้นการหาค่าอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ ควรทำการทดลอง ณ ตำแหน่งที่จะติดตั้งโวลเตจดีไวเดอร์ในการใช้งานจริง

ในกรณีของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน ค่าความต้านทานของภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำสามารถวัดได้โดยใช้แรงดันต่ำกระแสตรง ซึ่งอาจเป็น Wheatstone bridge หรือ โอห์มมิเตอร์ที่มีความแม่นยำสูง สำหรับเคเบิลวัดที่มีความยาวมาก ค่าความต้านทานกระแสตรงของตัวนำ จะทำให้เกิดการแบ่งแรงดันระหว่างความต้านทานแรงดันต่ำกับแรงดันตกคร่อม ซึ่งจะทำให้แรงดันตกคร่อมลดลง

โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ค่าเก็บประจุสเตรย์จะมีผลต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ซึ่งตัวที่กำหนดสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์คือ กระแสที่ไหลไปยังภาคแรงต่ำ

สเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดจะหาได้จากค่าแรงดันที่อ่านได้จาก ระบบวัดอ้างอิงหารด้วยค่าแรงดันที่อ่านได้จากระบบที่ต้องการทดสอบ ซึ่งกำหนดให้เป็น  $F_i$  โดยที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคำนวณได้ดังสมการที่ (2.21)

$$s = \sqrt{\frac{\sum (F_i - F_m)^2}{n-1}} \quad (2.21)$$

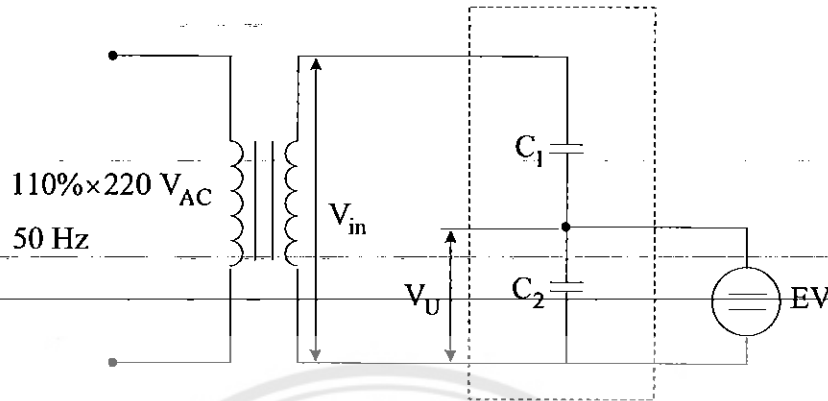
โดยที่  $s$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)  
 $F_i$  คือ ค่าแรงดันระบบวัดอ้างอิงหารด้วยค่าแรงดันที่ต้องการทดสอบ  
 $F_m$  คือ ค่าเฉลี่ยของ  $F_i$

ตามข้อกำหนดมาตรฐานได้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบไว้ คือ จะต้องทำการทดสอบไม่น้อยกว่า  $n$  ค่า ( $n \geq 10$ ) โดยมาตรฐานกำหนดว่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จะต้องมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ของค่าเฉลี่ย

#### 2.4.3 การทดสอบความคงทนของโวลเตจดีไวเดอร์ (AC withstand voltage test)

ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อดูว่าองค์ประกอบภาคแรงสูงที่ออกแบบที่สร้างสามารถทนต่อแรงดันสูงที่พิกัดกำหนดได้และไม่เป็นสาเหตุทำให้โวลเตจดีไวเดอร์เสียหายเมื่อใช้

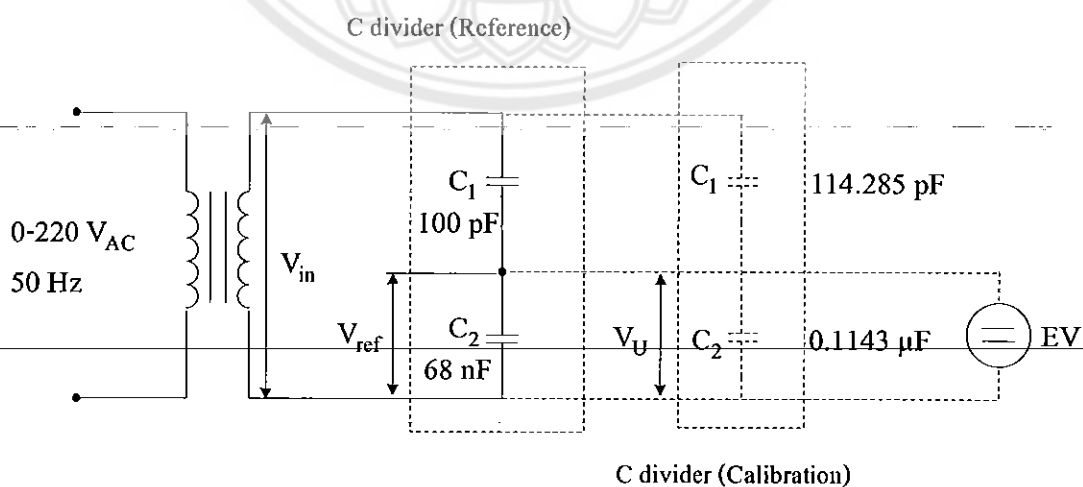
งานที่พิกัด ซึ่งในการทดสอบจะทำการทดสอบความทนทานต่อแรงดันสูงกระแสสลับความถี่ 50 Hz ที่ระดับแรงดันทดสอบ 110% นาน 1 นาที แสดงคังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 รูปวงจรการทดสอบความทนของโวลเตจลิไวเดอร์

#### 2.4.4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity test)

การทดสอบความเป็นเชิงเส้น แสดงคังรูปที่ 2.16 เป็นการวัดแรงดันเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงเพื่อคุณภาพของระบบวัดอ้างอิงเพื่อคุณภาพของระบบวัดที่ต้องการทดสอบว่าค่าแรงดันที่วัดมีความเป็นเชิงเส้นหรือไม่ ในการทดสอบจะทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 5 ค่าตลอดช่วงแรงดันใช้งาน ซึ่งในแต่ละค่าแรงดันจะทำการทดสอบ 5 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับแรงดัน ซึ่งอัตราส่วนระหว่างแรงดันของระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันของระบบวัดที่ทำการทดสอบจะต้องมีค่าไม่เกิน 1% ของค่าเฉลี่ยระบบวัดที่ทำการทดสอบจึงถือว่ามีความเป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.16 วงจรแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้น



#### 2.4.5 การทดสอบความมีเสถียรภาพ (Stability test)

การทดสอบความมีเสถียรภาพ เป็นการเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงกับ โวลเตจดีไวเดอร์ เพื่อผลลัพธ์ของระบบวัดที่ต้องการทดสอบว่ามีแรงดันผิดเพี้ยนจากระบบอ้างอิงหรือไม่ ซึ่งการทดลองความมีเสถียรภาพนั้นจะยึดถือมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994) เป็นเกณฑ์ในการอ้างอิง วิธีทดสอบจะต้องวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงโดยนำค่าที่อ่านได้จากการวัดของระบบวัดที่ออกแบบสร้างขึ้นมาขึ้นนั้นเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน หรือไม่และค่าที่ได้จากการทดสอบของเครื่องมือวัดที่ออกแบบสร้างจะต้องนำมาคูณกับสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดอ้างอิงด้วย การทดสอบนั้นจะต้องทำซ้ำกัน 10 ครั้งหรือมากกว่า โดยนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  และค่าแรงดันที่ใช้ในการวัดเปรียบเทียบจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 20% ของพิกัดแรงดันสูงสุด ซึ่งในที่นี้ได้ทำการทดสอบระบบวัดที่แรงดัน 100% ของพิกัดสูงสุดทดลองซ้ำกันเป็นจำนวน 10 ครั้ง โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของระบบวัดในแต่ละครั้งมีค่าแรงดันแตกต่างจากระบบวัดที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงไม่เกินไปกว่า  $\pm 3\%$  นั้นแสดงว่า โวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด



### บทที่ 3

## การออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเซอร์

### 3.1 คุณสมบัติที่กำหนด

คุณสมบัติที่กำหนดของโวลเตจดีไวเซอร์ที่ต้องการออกแบบและสร้างขึ้นมาเป็นโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุโดยใช้วัสดุไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ การออกแบบและการทดสอบอ้างอิงตามเกณฑ์มาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [1]

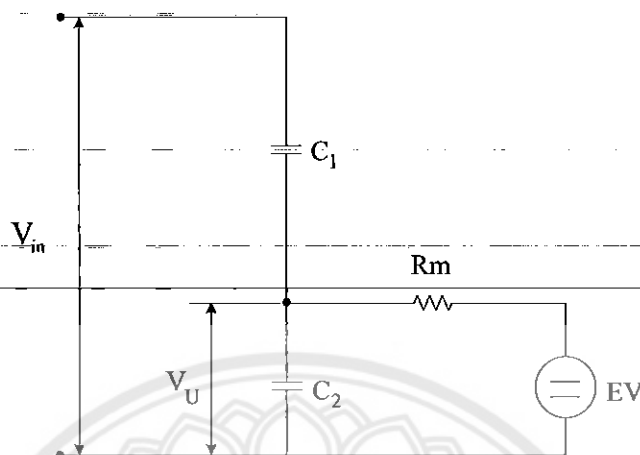
ลักษณะโครงสร้างของโวลเตจดีไวเซอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ องค์ประกอบภาคแรงสูง ( $C_1$ ) และองค์ประกอบภาคแรงต่ำ ( $C_2$ ) โดยไฟฟ้าแรงดันสูงที่ต้องการวัดจะต่อกับองค์ประกอบภาคแรงสูง ซึ่งไฟฟ้าแรงดันสูงจะถูกลดทอนให้มีขนาดแรงดันไฟฟ้าลดลงและจะถูกส่งผ่านไปยังภาคแรงต่ำ ในส่วนของภาคแรงต่ำนี้ก็จะมีการลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ส่งผ่านมาจากภาคแรงสูงให้มีขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ระดับต่ำพอที่จะใช้เครื่องมือวัดได้ เช่น ออสซิลอสโคปหรือโวลต์มิเตอร์ เป็นต้น คุณสมบัติสำหรับการออกแบบโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุพิกัด 100 kV แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติสำหรับการออกแบบโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุพิกัด 100 kV

ตัวแปร	คุณสมบัติ
พิกัดแรงดันไฟฟ้า	100 kV
แรงดันไฟฟ้าทดสอบ	110% of rated voltage (V)
ความถี่	50 Hz
สเกลแฟกเตอร์	1000 : 1
ฉนวนก๊าซ	SF <sub>6</sub> , N <sub>2</sub> , Air
ค่าความผิดพลาด	±1%

### 3.2 การออกแบบโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุพิกัด 100 kV

วงจรสมมูลของ โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุพิกัด 100 kV แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของ โวลเตจดีไวเดอร์

โดยที่	$V_{in}$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการวัด (V)
	$V_U$	คือแรงดันไฟฟ้าที่แบ่งออกมาวัดซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าภาคแรงต่ำ (V)
	$C_1$	คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง (F)
	$C_2$	คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ (F)
	$R_m$	คือ ตัวต้านทานเมกซิ่ง ( $\Omega$ )
	EV	คือ ออสซิลโลสโคป

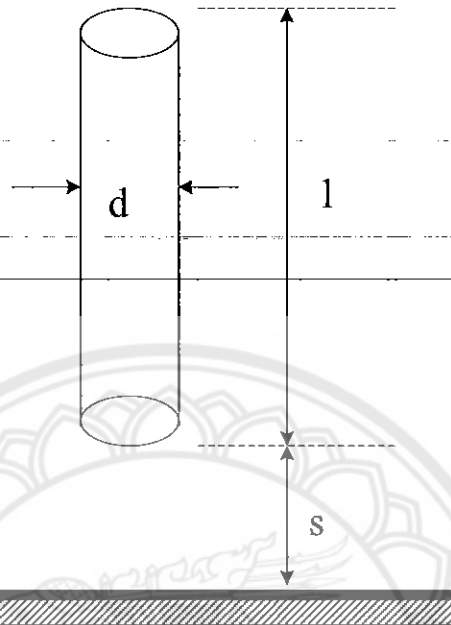
#### 3.2.1 ค่าوابไฟตามผิวฉนวน

ความยาวท่ออะคลีติกจากกรณีแรงดันอัมพัลส์แบบฟ้าผ่าใช้ระยะوابไฟตามผิวมีค่าน้อย 2.5 m/1 MV ดังนั้น โวลเตจดีไวเดอร์มีค่าแรงดันพิกัดเท่ากับ 100 kV ดังนั้นระยะوابไฟตามผิวควรมีค่าน้อย 0.25 m ซึ่งในการออกแบบนี้ได้ออกแบบท่อที่ความยาว 1 m

#### 3.2.2 ค่าความจุสแตย์ลงดิน

โวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้าง สิ่งที่ต้องพิจารณาคือผลค่าความจุสแตย์ลงดิน ( $C_e$ ) เป็นลักษณะสมบัติที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ขึ้นอยู่กับมิติโครงสร้างของโวลเตจดีไวเดอร์ สำหรับตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูงเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าข้อยเมื่อบรรจุอยู่ในท่อพีวีซีหรือท่ออะคลีติกก็สามารถถือได้ว่าเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าเดี่ยวรูปทรงระบอบอก ซึ่งค่า  $C_e$  นี้จะส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนในการวัดและเสถียรภาพของระบบวัด แต่ก็จะต้องคำนึงถึงขนาดของตัวเก็บประจุ

ไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์ที่นำมาออกแบบซึ่งต้องไม่มากเกินไปจนทำให้เกิดเป็นโหลคให้กับวงจรทดสอบมีฉะนั้นจะทำให้การวัดเกิดความคลาดเคลื่อนได้อีกเช่นกัน



รูปที่ 3.2 ภาพจำลองท่อทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบ [3]

โดยที่  $l$  คือ ความสูงของโลหะทรงกระบอก  
 $d$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอก  
 $s$  คือ ระยะห่างทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบ

ค่าความจุสเตรย์หาได้จากสมการที่ (3.1)

$$C_e = \frac{2\pi \epsilon l}{\ln \left[ \frac{(2l)}{d} \sqrt{\frac{(4s+1)}{(4s+3)}} \right]} \quad (3.1)$$

โดยที่  $C_e$  คือ ค่าความจุสเตรย์ลงดิน (F)  
 $l$  คือ ความยาวของท่อ (m)  
 $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)  
 $s$  คือ ระยะอิเล็กโทรดห่างเหนือพื้นดินของโวลเตจดีไวเดอร์ (m)  
 $\epsilon$  คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12} \text{C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$

การออกแบบ จะใช้ท่ออะคลีติกมีความยาว (l) ที่ใช้เป็นจนวนด้านนอกเท่ากับ 1 m มีเส้นผ่าศูนย์กลาง (d) เท่ากับ 20 cm มีความสูงที่วัดจากพื้น (h) เท่ากับ 20 cm นำมาแทนในสมการที่ (3.1) จะได้

$$C_e = \frac{2\pi \times (8.854 \times 10^{-12}) \times (1.0)}{\ln \left[ \frac{2 \times 1.0}{0.2} \sqrt{\frac{(4 \times 0.2) + 1.0}{(4 \times 0.2) + (3 \times 1.0)}} \right]} = \frac{5.560312 \times 10^{-11}}{1.928977892} \text{ pF}$$

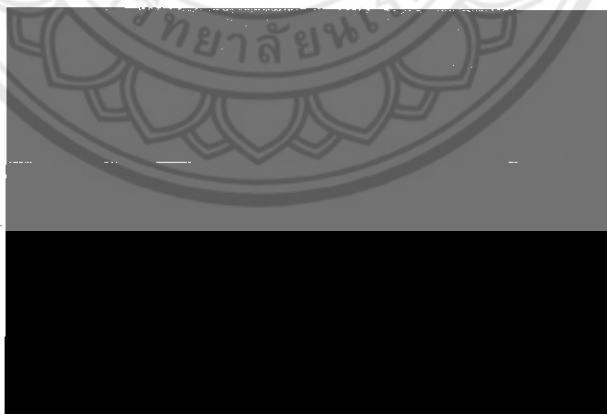
ดังนั้น จะได้ค่าความจุสเตรย์ลงดินประมาณ 28.825 pF

### 3.2.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV

ตัวเก็บประจุที่เลือกใช้ จะบอกถึงขนาดความจุพิกัด  $V_{DC}$  และพิกัด  $V_{AC}$  โดยพิกัด AC เราวัดที่ 100 kV<sub>rms</sub> จะต้องใช้ตัวเก็บประจุทั้งหมดสามารถหาได้จาก จำนวนตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับพิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการสร้างต่อพิกัดแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

เนื่องจากจำเป็นต้องทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันไฟฟ้าที่จะวัดที่ 1.1 เท่าหรือ 110% ของการทดสอบใช้ตัวเก็บประจุ จำนวนตัวเก็บประจุ = 110 kV/พิกัดของ  $V_{AC}$  ของตัวเก็บประจุ ในการออกแบบค่าของตัวเก็บประจุควรให้มีค่าไม่น้อยกว่า 3 เท่าของค่าความจุสเตรย์

ในการออกแบบเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่เลือกใช้เป็นชนิด โพลีโพรลีนฟิล์ม ขนาดความจุ 0.01  $\mu\text{F}$  พิกัด 1600  $V_{DC}$  / 650  $V_{AC}$  ดังรูปที่ 3.3 ต่อขนานกัน 2 ตัว ได้ขนาดความจุ 0.02  $\mu\text{F}$



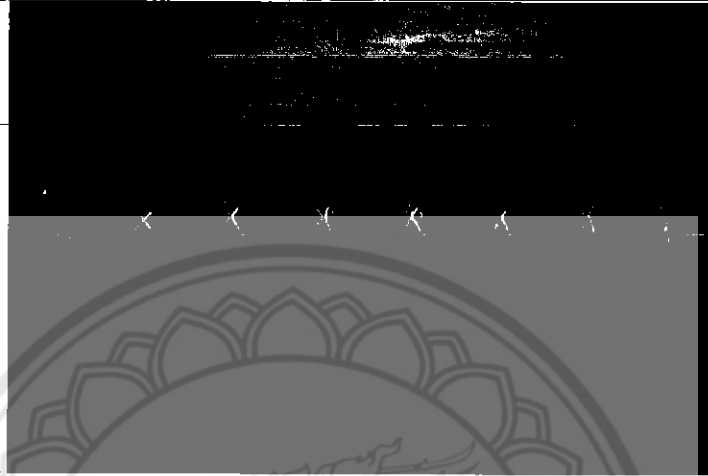
รูปที่ 3.3 ตัวเก็บประจุชนิด โพลีโพรลีนฟิล์ม ขนาดความจุ 0.01  $\mu\text{F}$

พิกัด 1600  $V_{DC}$  / 650  $V_{AC}$

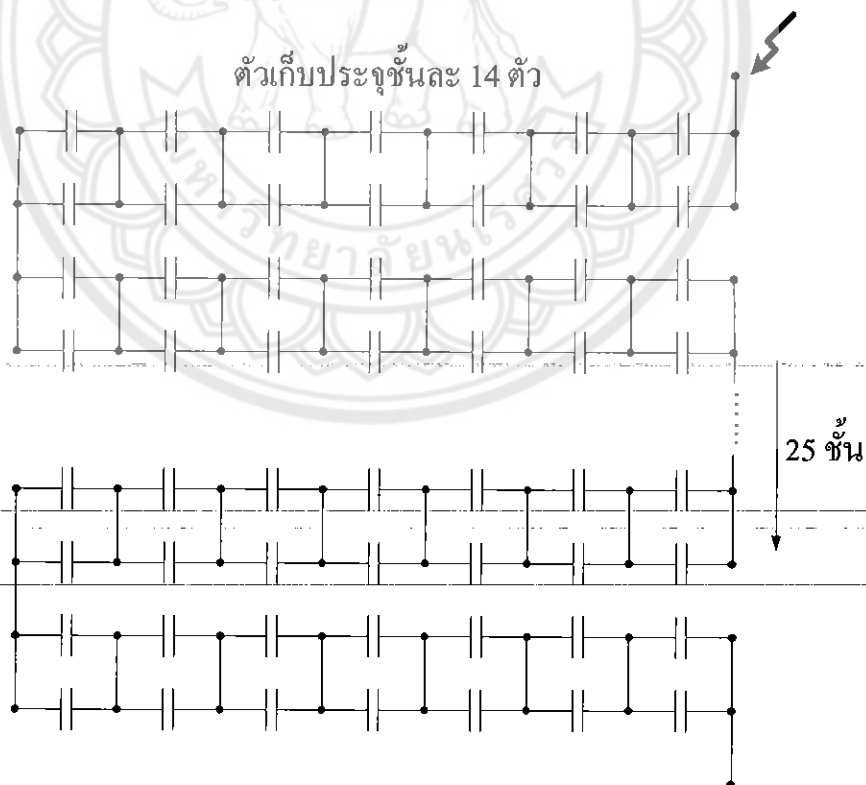
ที่ 1 เท่า หรือ 100% ของแรงดันทดสอบ ใช้ C จำนวน  $\frac{100 \text{ k}}{650} = 154$  คู่ 308 ตัว

ที่ 1.1 เท่า หรือ 110% ของแรงดันทดสอบ ใช้ C จำนวน  $\frac{110 \text{ k}}{650} = 169.2$  คู่ 340 ตัว

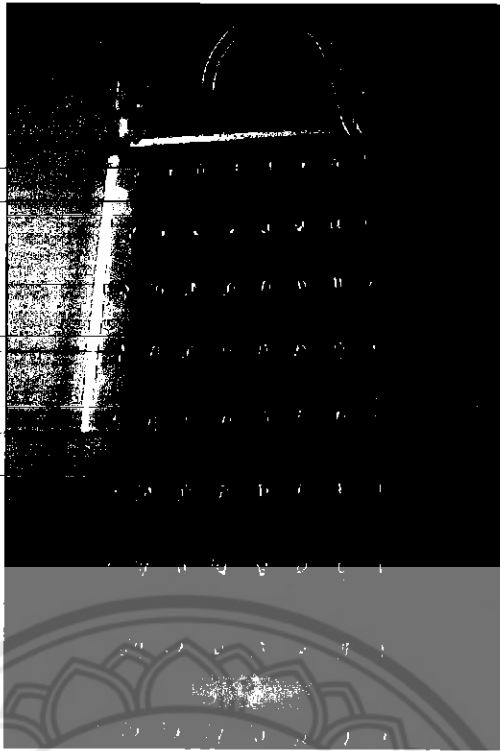
จึงเลือกใช้จำนวน 350 ตัว ชั้นละ 14 ตัวเพื่อให้ทนระดับแรงดันได้เกิน 110% ของแรงดันพิกัดของโวลเตจดีไวเดอร์ นำมาขนานกันเป็นคู่ แล้วนำมาต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 3.4 ทั้งหมดจำนวน 25 ชั้น ดังรูปที่ 3.5 ที่ความปลอดภัย 1.1 หรือ 110% จากการคำนวณค่าตัวเก็บประจุทั้งหมดเท่ากับ 114.285 pF มีค่ามากกว่าค่าความจุสเตรย์มาก ความจุสเตรย์ที่หาได้คือ 28.078 pF ค่าตัวเก็บประจุควรให้มีค่าไม่น้อยกว่า 3 เท่าของค่าความจุสเตรย์ ดังรูปที่ 3.6, 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ



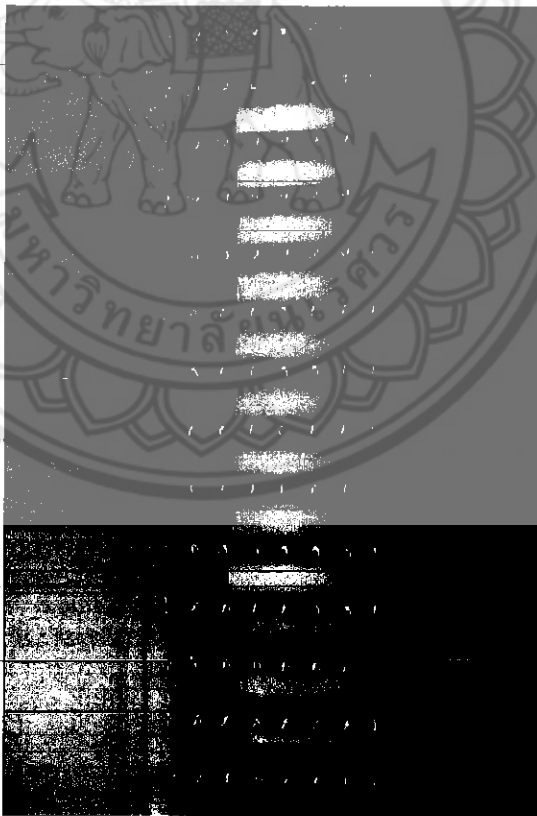
รูปที่ 3.4 ตัวเก็บประจุของโวลเตจดีไวเดอร์ภาคแรงสูง ชั้นละ 14 ตัว



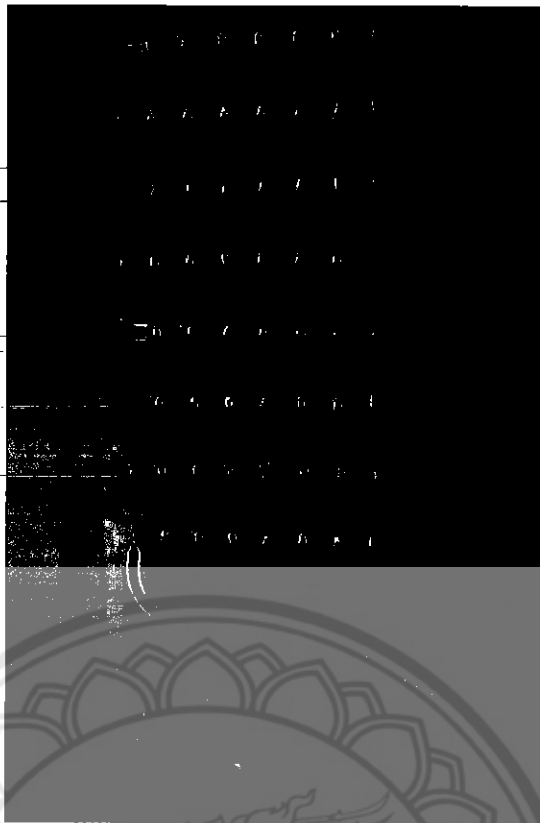
รูปที่ 3.5 การวางตัวเก็บประจุของโวลเตจดีไวเดอร์ภาคแรงสูง ชั้นละ 14 ตัว 25 ชั้น



รูปที่ 3.6 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงประกอบแผ่นอะคลีลิก ส่วนบน



รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงประกอบแผ่นอะคลีลิก ส่วนกลาง



รูปที่ 3.8 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงประกอบแผ่นอะคลีลิก ส่วนท้าย

### 3.2.4 ค่าของตัวเก็บประจุแต่ละชั้น

ใช้ตัวเก็บประจุขนาด  $0.01 \mu\text{F}$  ต่ออนุกรมกัน 7 ชุด ชุดละ 2 ตัวต่อขนานกัน ได้ค่าความจุรวมแต่ละชั้นหาได้จาก

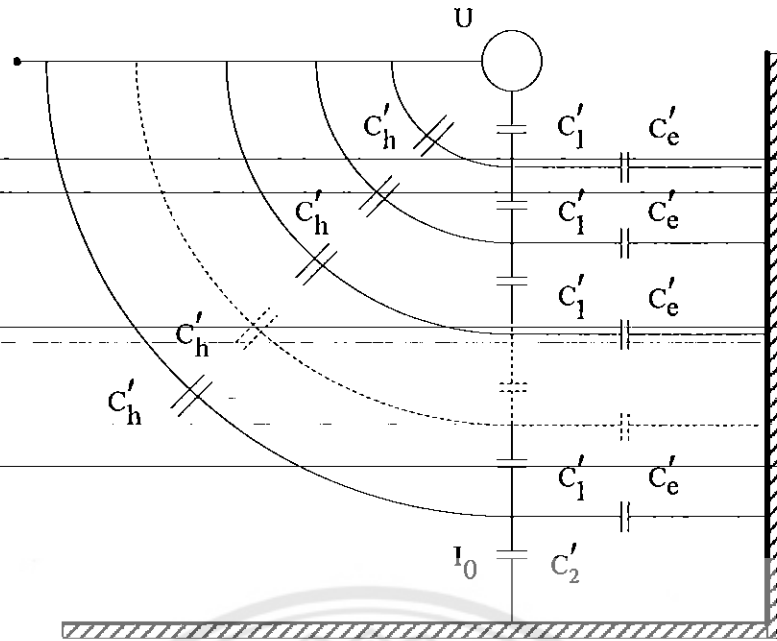
$$\text{ค่าความจุรวมแต่ละชั้น} = \frac{1}{7 \left( \frac{1}{2 \times 0.01 \mu\text{F}} \right)}$$

ค่าความจุแต่ละชั้นเท่ากับ  $2.857 \text{ nF}$

### 3.2.5 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุด

เนื่องจากแรงดันกระจายของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้าย่อยตัวบนสุดว่าสามารถทนแรงดันไฟฟ้าเมื่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูงนี้ใช้งานที่พิกัดแรงดันได้หรือไม่ โดยจะพิจารณาในกรณีเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมากที่สุด ที่ใช้ในการทดสอบที่ 110%





รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลของ โวลเตจคิไวเคอร์ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า [3]

$$U_k = \frac{U}{C'_e + C'_h} \left[ \frac{C'_e \sinh(ak/n)}{\sinh \alpha} + C'_h \left[ \frac{1 - \sin(ak/n)}{\sinh \alpha} \right] \right] \quad (3.2)$$

และ

$$\alpha = \sqrt{\frac{(C'_e + C'_h)}{C'_1}} \quad (3.3)$$

- โดยที่ U คือ แรงดันไฟฟ้าคงทนได้ 110 kV  
 $C_1$  คือ ค่าของตัวเก็บประจุย่อยแต่ละคู่ =  $0.02 \times 10^{-6}$  F  
 N คือ จำนวนตัวเก็บประจุ = 175 คู่ (ตัวเก็บประจุ 0.01  $\mu$ F 350 ตัว)  
 K คือ ชั้นที่ 1  
 $C_e$  คือ ค่าความจุสเตรย์ลงดิน = 28.078 pF  
 $C'_e$  คือ  $C_e/n = \frac{28.078 \times 10^{-12}}{175} = 1.6 \times 10^{-13}$  F  
 $C'_1$  คือ  $C_1/n = \frac{0.02 \times 10^{-6}}{175} = 1.14 \times 10^{-10}$  F (ให้  $C_1 = 0.02 \times 10^{-6}$ )  
 $C'_h$  คือ 0 (ค่าความจุสเตรย์) เนื่องจาก  $C'_h$  มีค่าน้อยกว่า  $C'_e$  มาก จึงให้ค่า  $C'_h = 0$

จากสมการที่ (3.3) จะได้ค่า  $\alpha$  เท่ากับ

$$\alpha \text{ คือ } \sqrt{\frac{(C'_e + C'_h)}{C'_l}} = \sqrt{\frac{1.6 \times 10^{-8} + 0}{1.14 \times 10^{-10}}} = 0.011846$$

แทนค่าในสมการที่ (3.2) จะได้ค่า  $U_k$  เท่ากับ

$$U_k = \frac{110 \times 10^3 \text{ V}}{1.6 \times 10^{-13} + 0} \left[ \frac{1.6 \times 10^{-13} \sinh(0.011846 (1) / 175)}{\sinh(0.011846)} + 0 \left[ \frac{1 - \sin(0.011846 (1) / 175)}{\sinh(0.011846)} \right] \right]$$

จะได้ค่า  $U_k$  ที่ 110% = 628.57 V<sub>AC</sub> ไม่เกินพิกัดของตัวเก็บประจุที่ 650 V<sub>AC</sub> โดยใช้ตัวเก็บประจุ 0.01  $\mu\text{F}$  จำนวน 350 ตัว ที่ 110%

### 3.3 การออกแบบภาคแรงต่ำ

ข้อควรคำนึงถึงข้อกำหนดต่างๆ ในการออกแบบภาคแรงต่ำ

- 1) แรงดันขาออกไม่ต่ำเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก ซึ่งเป็นผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการวัด
- 2) การจับวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำและความต้านทานแมชชีงของเคเบิลวัดต้องระวัง ไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและต้องมีความเหนียวแน่นต่ำ เพื่อให้อิมพีแดนซ์ที่ภาวะทรานเซียนต์มีค่าต่ำ

#### 3.3.1 การเลือกแรงดันไฟฟ้าขาออก

แรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุดของโวลเตจดีไวเดอร์กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสูงสุดของเครื่องวัดไฟฟ้าแรงดันต่ำซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคปหรือมัลติมิเตอร์ เมื่อทราบแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและขาออกที่กำหนดจะทำให้ทราบค่าสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์โดยสมการ

$$a = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (3.4)$$

- โดยที่
- a คือ อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์
  - $C_1$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง (F)
  - $C_2$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ (F)

ในที่นี้เลือกแรงดันไฟฟ้าขาออก  $100 V_{AC}$  จากภาคแรงต่ำซึ่งจะได้อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของโวลเตจดิไวเดอร์ มีค่า  $1000 : 1$

### 3.3.2 การออกแบบภาคแรงต่ำ แบบตัวเก็บประจุ

จากอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด  $1000 : 1$  ดังนั้นจะได้แรงดันไฟฟ้าขาออกด้านแรงต่ำที่พิกัดเป็น  $100 V_{AC}$  ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสามารถใช้กับเครื่องมือวัดด้านแรงต่ำทั่วไปได้ ซึ่งค่าตัวเก็บประจุแรงสูงทั้งหมดเท่ากับ  $114.285 \text{ pF}$  ซึ่งเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิด โพลีโพรลีนฟิล์ม ค่าเก็บประจุภาคแรงต่ำหาได้จากสมการที่ (3.5)

$$\frac{C_2}{C_1} = 1000 \quad (3.5)$$

จะได้

$$C_2 = 1000(114.285 \text{ pF}) = 0.114285$$

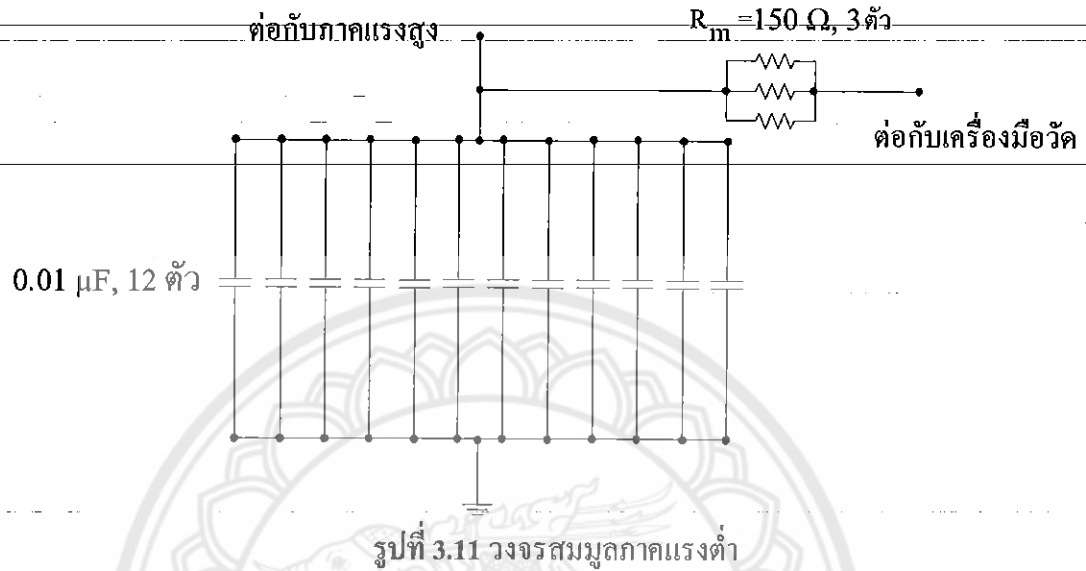
จากการคำนวณได้ค่าความเก็บประจุด้านแรงต่ำ  $0.114285 \mu\text{F}$  โดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด  $0.01 \mu\text{F}$  ดังรูปที่ 3.10 จำนวน 12 ตัวต่อขนานกันดังรูปที่ 3.11 จะได้ค่าความจุแรงต่ำรวมเท่ากับ  $0.12 \mu\text{F}$

$$\text{อัตราส่วนแรงดัน} = \frac{114.285 \text{ pF} + 0.114285 \mu\text{F}}{114.285 \text{ pF}}$$

ซึ่งจะได้ค่าสเกลแฟกเตอร์ =  $1001 : 1$

รูปที่ 3.10 ตัวเก็บประจุขนาด  $0.01 \mu\text{F}$  พิกัด  $1600 V_{DC} / 650 V_{AC}$

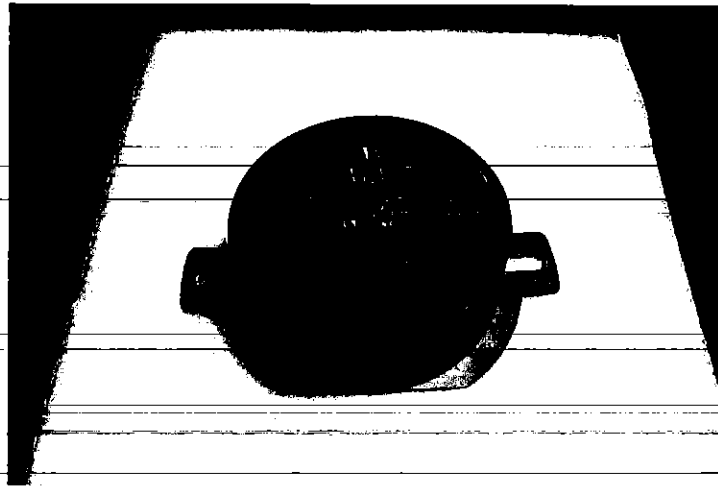
เพื่อป้องกันการแกว่งและการสะท้อนของสัญญาณที่ต้องการวัด จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานแมชชิง ( $R_m$ ) ต่ออนุกรมกับเคเบิลวัด ดังรูปที่ 3.11 โดยความต้านทานแมชชิงใช้แบบเมเทิลฟิล์ม ขนาด 3 W 150  $\Omega$  5% จำนวน 3 ตัว ได้ค่าความต้านทาน  $R_m = 50 \Omega$  ซึ่งมีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด ดังรูปที่ 3.12, 3.13 ตามลำดับ



ตัวต้านทาน  $R_m$  3 ตัว



รูปที่ 3.12 การวางตัวเก็บประจุ ภาคแรงต่ำ



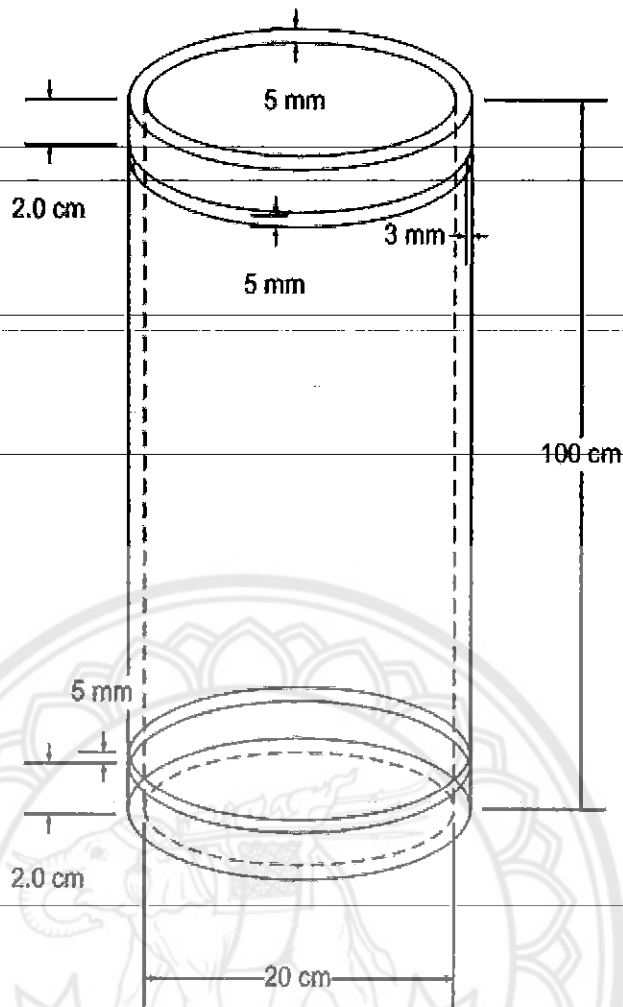
รูปที่ 3.13 กล้องและหัวต่อสายของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

### 3.4 โครงสร้างภายนอกของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุพิกัด 100 kV

โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญคือท่ออะคลีติก ส่วนหัวและท้ายของอิเล็กโทรด ส่วนฐานและดัด

#### 3.4.1 การออกแบบท่อ

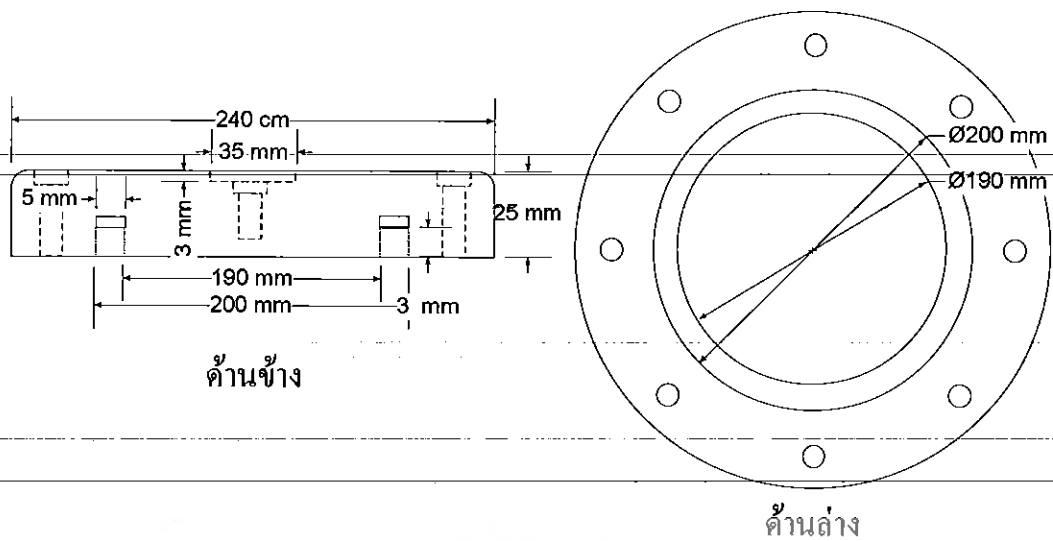
ในการออกแบบท่ออะคลีติกนั้น จะใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20 cm และยาวเท่ากับ 100 cm เพื่อสามารถบรรจุโครงสร้างภายในของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ได้สร้างไว้ แล้วทำการเจาะร่องทางปลายของท่ออะคลีติกทั้งสองด้าน โดยขนาดความกว้างแต่ละด้านเท่ากับ 0.5 cm เพื่อเป็นที่ยึดของอิเล็กโทรด ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ท่ออะคลีลิก

### 3.4.2 การออกแบบแผ่นเหล็กปิดหัวและปิดท้ายของอิเล็กโทรด

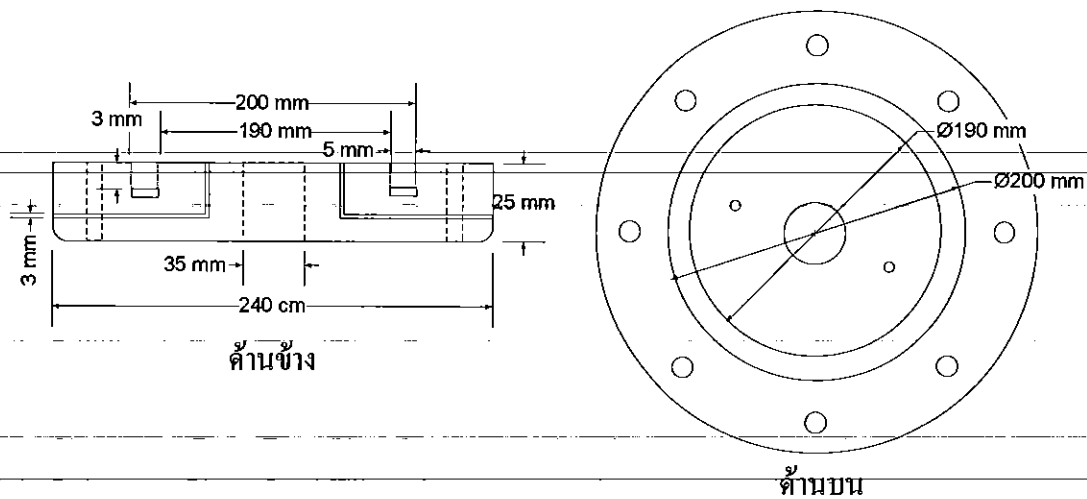
ในการออกแบบหัวและท้ายของอิเล็กโทรดนั้น ควรออกแบบให้สามารถถอดประกอบได้สะดวก การออกแบบอิเล็กโทรดที่ดีจะไม่มีขอบคม เพราะจะทำให้จุดๆนั้น เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ส่งผลต่อการเกิดโคโรนาขณะจ่ายแรงดันใช้งาน อีกทั้งมีความแข็งแรงทางกล เมื่อประกอบเข้ากับท่ออะคลีลิก มีความสะดวกในการต่อเข้ากับไฟฟ้าแรงสูง หรือ อุปกรณ์แรงสูงอื่นๆ วัสดุที่ใช้ควรป้องกันการรั่วซึม ของก๊าซที่บรรจุภายในได้โดยสามารถอ้างอิงจากการคำนวณรัศมีของหัวและท้ายของอิเล็กโทรด ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดรัศมีที่ใช้ต้องมีขนาดอย่างน้อยเท่ากับ 4.714 cm รูปฝาปิดบนและล่างแสดงดังรูปที่ 4.15, 4.16, 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ



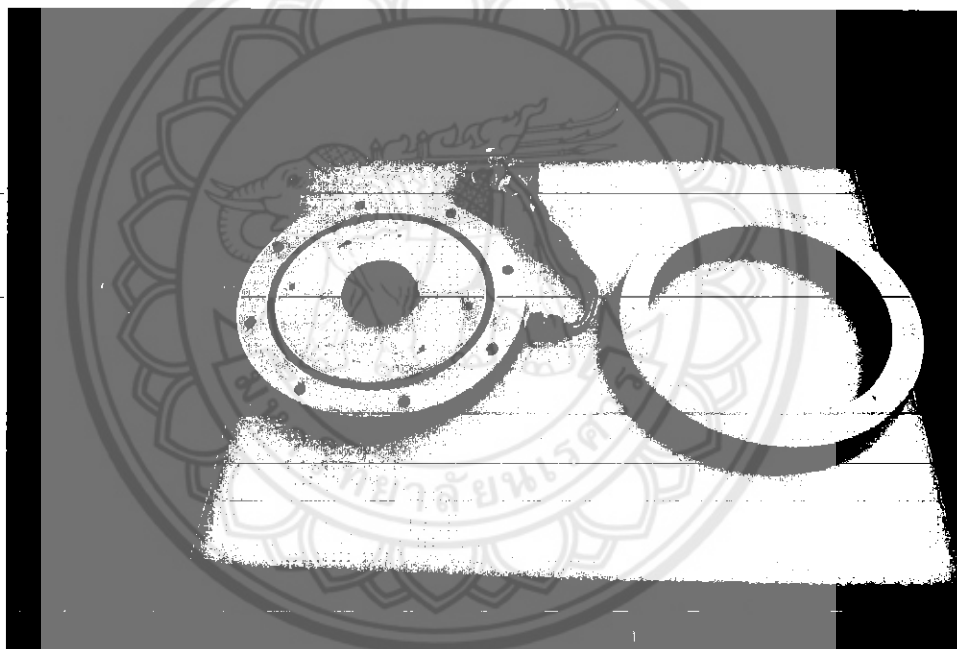
รูปที่ 3.15 แบบฝาปิดบน



รูปที่ 3.16 ฝาปิดบนพร้อมที่ล็อกฝา



รูปที่ 3.17 แบบฝาปิดล่าง

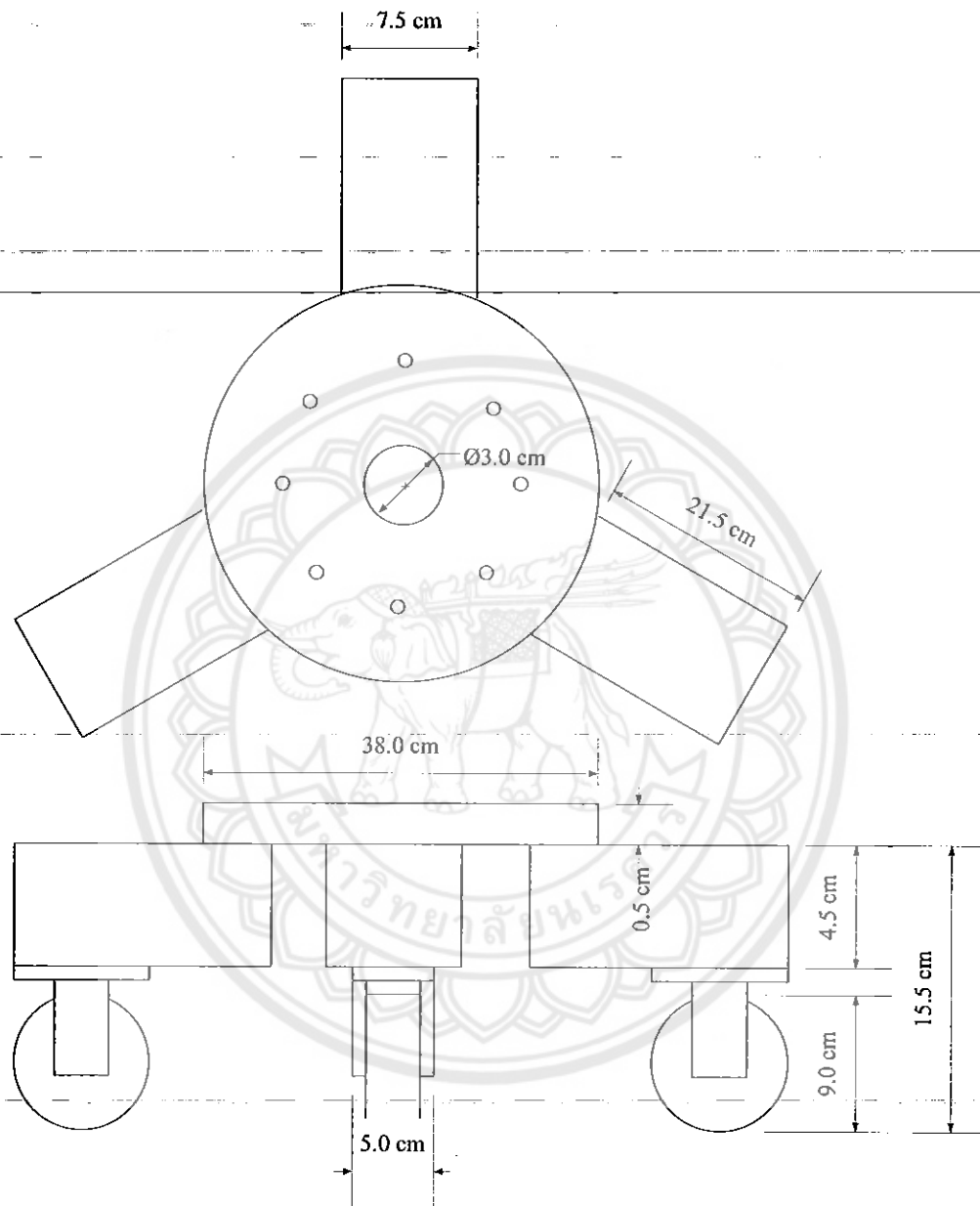


รูปที่ 3.18 ฝาปิดล่างพร้อมที่ล็อกฝา

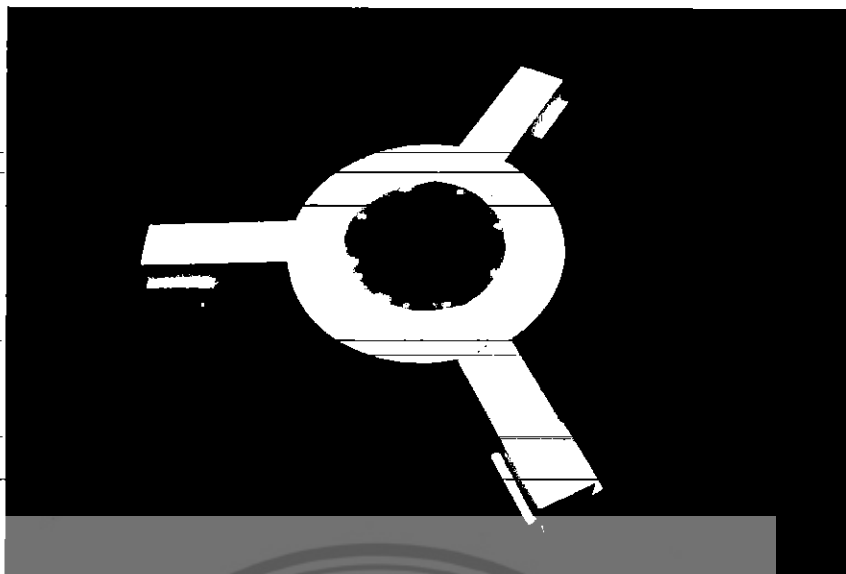


### 3.4.3 การออกแบบฐานและล้อ

การออกแบบฐานและล้อ แสดงดังรูปที่ 3.19 และ 3.20



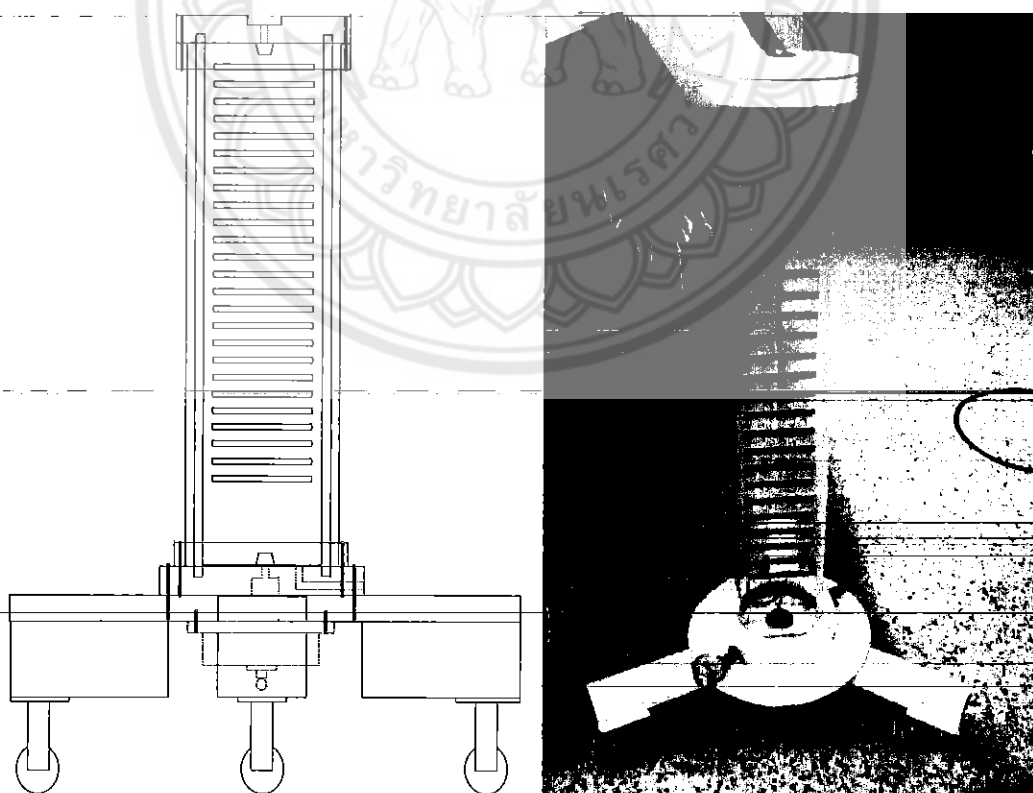
รูปที่ 3.19 แบบฐานและล้อ



รูปที่ 3.20 ฐานและล้อ

#### 3.4.4 การจับยึดชิ้นส่วน

การจับยึดชิ้นส่วนต่างๆของโวลเตจดีไวเซอร์จะใช้น็อตแบบเกลียวขนาดต่างๆตามชิ้นงาน  
สีแดงในรูปที่ 3.21 แสดงน็อตแบบเกลียว

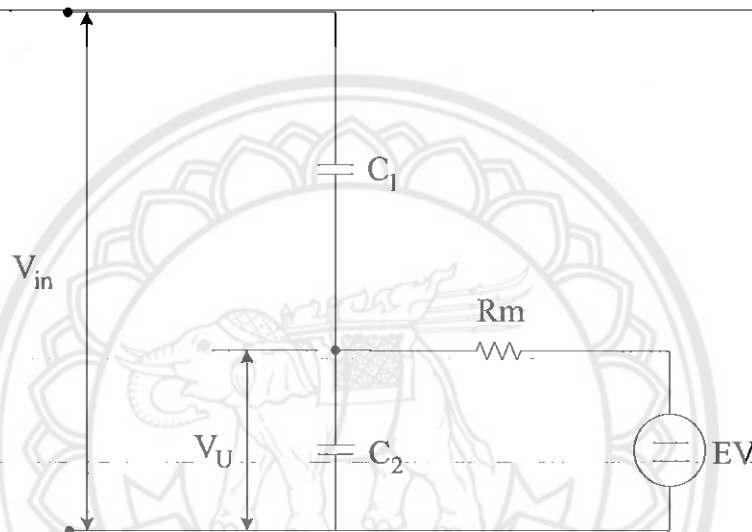


รูปที่ 3.21 โครงสร้างโวลเตจดีไวเซอร์

## บทที่ 4

### การทดสอบและประเมินผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV ที่ได้ทำการออกแบบสร้างเปรียบเทียบมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994) [1] และทดสอบการใช้ก๊าซ 3 ชนิดที่ความดัน 2 บาร์ คือ อากาศ, ก๊าซ  $N_2$  และก๊าซ  $SF_6$  เป็นฉนวนเพื่อทดสอบค่าต่างๆ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์

โดยที่	$C_1$	คือ ค่าตัวเก็บประจุภาคแรงสูง (F)
	$C_2$	คือ ค่าตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ (F)
	$R_m$	คือ ค่าความต้านแมชซิ่ง ( $\Omega$ )
	EV	คือ ออสซิลโลสโคป
	$V_{in}$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิด ( $V_{rms}$ )
	$V_U$	คือ แรงดันไฟฟ้าภาคแรงต่ำ จากโวลเตจดีไวเดอร์ที่ทำการทดสอบ ( $V_{rms}$ )

ซึ่งโครงงานนี้จะมีการทดสอบ 6 ขั้นตอนดังนี้

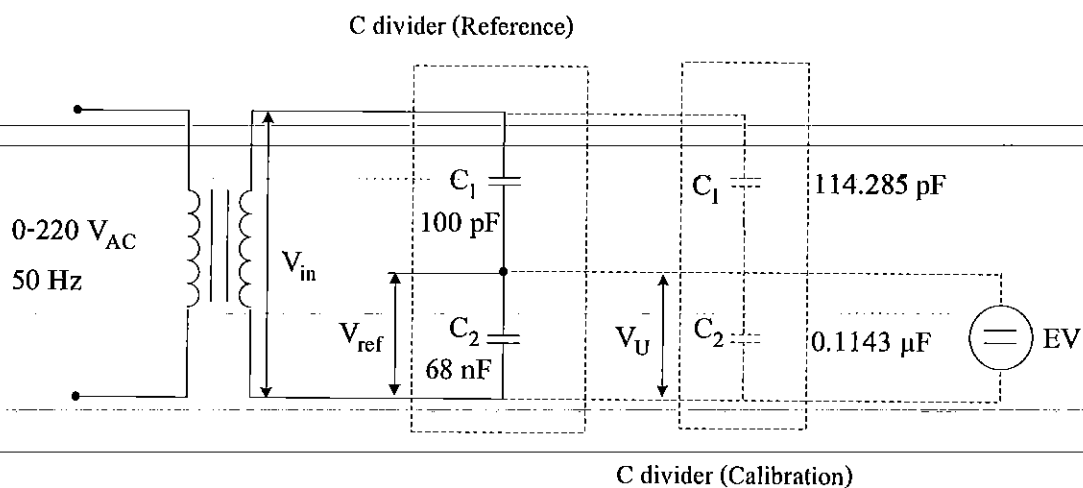
1. การวัดความจุไฟฟ้า วัดโดยใช้ RLC มิเตอร์ วัดค่าความต้านทาน (R) ค่าความเหนี่ยวนำ (L) ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C)

2. การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ เพื่อหาค่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าระหว่างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเซอร์ ตลอดช่วงแรงดันไฟฟ้า 0 - 100 kV เพื่อความสะดวกในการแปลงกลับเป็นค่าจริงได้ง่าย
3. การทดสอบความคงทนแรงดันไฟฟ้า เพื่อทำการทดสอบ โวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุที่ออกแบบสร้างสามารถทนต่อ ไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสลับที่ 110% ของพิกัดแรงดันโวลเตจดีไวเซอร์ที่ออกแบบสร้างขึ้นมา
4. กำหนดได้เมื่อใช้งานที่พิกัด โดยทำการทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสลับความถี่ 50 Hz ที่ระดับแรงดันทดสอบ 110% ของพิกัด เป็นเวลา 1 นาที
5. การทดสอบความเป็นเชิงเส้น เพื่อพิจารณาผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ ว่าค่าแรงดันที่วัดมีความเป็นเชิงเส้นหรือไม่ โดยอัตราส่วนระหว่างแรงดันของระบบวัดจะอ้างอิงกับแรงดันของระบบวัดที่ทำการทดสอบจะต้องมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ของค่าเฉลี่ย และระบบวัดที่ทำการทดสอบถือได้ว่ามีความเป็นเชิงเส้น
6. การทดสอบความมีเสถียรภาพ เพื่อเปรียบเทียบผลของระบบวัดแรงดันที่ต้องการทดสอบ ว่ามีแรงดันผิดเพี้ยนหรือคลาดเคลื่อนจากระบบวัดอ้างอิงหรือไม่ โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ค่าแรงดันที่ใช้ในการวัดเปรียบเทียบต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 20% ของพิกัดแรงดันสูงสุด

#### 4.1 ส่วนประกอบของวงจรทดสอบโวลเตจดีไวเซอร์พิกัด 100 kV

วงจรวัดทดสอบโวลเตจดีไวเซอร์ พิกัด 100 kV ใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสลับ  $100 \text{ kV}_{\text{rms}}$  ดังรูปที่ 4.2 โวลเตจดีไวเซอร์อ้างอิงมีอัตราส่วน  $\frac{C_1}{C_2} = \frac{100 \text{ pF}}{68 \text{ nF}} = 1470 : 1$  ไม่เท่ากับอัตราส่วนของ

โวลเตจดีไวเซอร์ที่ทำการออกแบบสร้างที่อัตราส่วน 1000 : 1 แต่ที่ส่วนควบคุมระดับแรงดันในการทดสอบได้มีการแปลงผลที่ได้จากโวลเตจดีไวเซอร์อ้างอิงให้ได้ค่าแรงดันที่เราต้องการ สามารถนำค่ามาอ้างอิงกับโวลเตจดีไวเซอร์ที่ออกแบบสร้างได้



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลวัดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสลับ 100 kV<sub>rms</sub>



รูปที่ 4.3 วงจรทดสอบแรงดันสูงกระแสลับ 100 kV<sub>rms</sub>

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

1. Single phase AC voltage test transformer (PZT 100-0.1) ผลิต โดยบริษัท HAEFELY

Rated voltage                      220/100 kV

Rated power                        5 kVA, continuous 10 kVA, 1 hour

2. Measuring capacitor, CM ( $C_1$ )

Capacitance                        100 pF

Max AC voltage                    100 kV

3. Secondary part for CM (AC), SEK AC ( $C_2$ )

$$(C_2) = 68 \text{ nF}$$

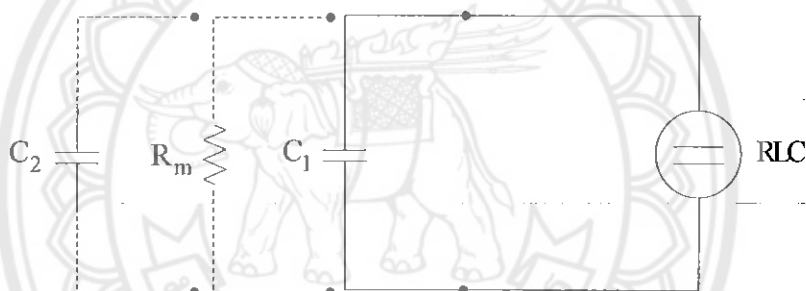
## 4. โวลเตจดีไวเดอร์ที่กีด 100 kV ที่ออกแบบและสร้าง

## 4.2 การทดสอบวัดค่าทางไฟฟ้าและการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994)

ในการทดสอบเปรียบเทียบมาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994) [1] และทดสอบการใช้ก๊าซ 3 ชนิดที่ความดัน 2 บาร์ คือ อากาศ, ก๊าซ  $N_2$  และก๊าซ  $SF_6$  เป็นฉนวนเพื่อทดสอบค่าต่างๆ ดังนี้

## 4.2.1 วัดค่าทางไฟฟ้า

ในการวัดตัวเก็บประจุย่อยแต่ละตัวดังรูปที่ 4.4 ใช้เครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ดังรูปที่ 4.5 หลังจากประกอบเสร็จแล้ววัดโดยใช้เครื่องมือวัด RLC มิเตอร์ที่สามารถวัดตัวเก็บประจุที่มีค่าน้อยหรือค่ามากก็ได้ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.4 วงจรแสดงการวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวต้านทาน

โดยที่  $C_1$  คือ ค่าตัวเก็บประจุภาคแรงสูง (F)

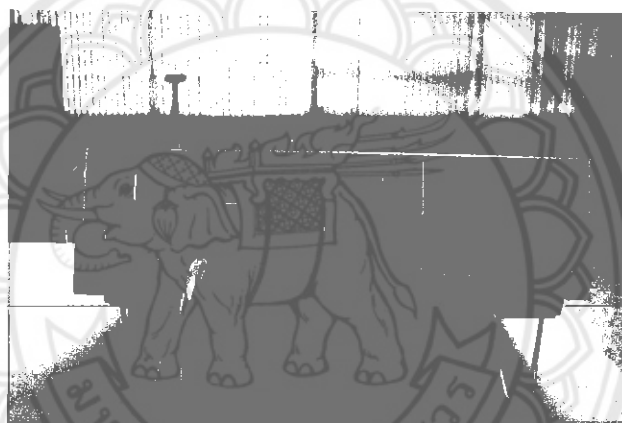
$C_2$  คือ ค่าตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ (F)

$R_m$  คือ ค่าความต้านเมซซิ่ง ( $\Omega$ )

RLC คือ RLC มิเตอร์



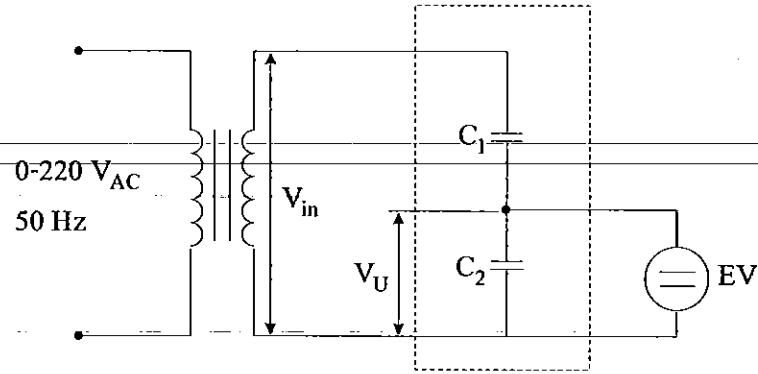
รูปที่ 4.5 มัลติมิเตอร์



รูปที่ 4.6 RLC มิเตอร์ วัดค่าความต้านทาน (R) ค่าความเหนี่ยวนำ (L) ค่าเก็บประจุ (C)

#### 4.2.2 การทดสอบการทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์ของไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ

การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ เพื่อหาค่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าระหว่างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำของ โวลเตจดีไวเดอร์ที่พิกัด 50 kV และ 100 kV เพื่อความสะดวกในการแปลงกลับเป็นค่าจริงได้ง่าย โดยทำการทดสอบพิกัดแรงดันละ 10 ครั้ง แสดงตามรูปที่ 4.7 สามารถหาค่าสเกลแฟกเตอร์หาได้ดังสมการที่ (4.1)



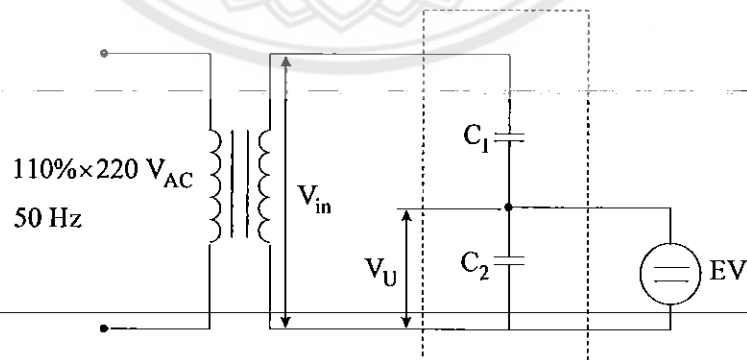
รูปที่ 4.7 วงจรเพื่อใช้ในการหาค่าสเกลแฟกเตอร์

$$\text{สเกลแฟกเตอร์} = \frac{V_{in}}{V_U} \quad (4.1)$$

- โดยที่  $C_1$  คือ ค่าตัวเก็บประจุภาคแรงสูง (F)  
 $C_2$  คือ ค่าตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ (F)  
 $V_{in}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิด ( $V_{rms}$ )  
 $V_U$  คือ แรงดันไฟฟ้าภาคแรงต่ำ จากโวลต์จดีไวเซอร์ที่ทำการทดสอบ ( $V_{rms}$ )

#### 4.2.3 การทดสอบความคงทนของไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับของโวลต์จดีไวเซอร์

การทดสอบความคงทนแรงดันไฟฟ้า เพื่อทำการทดสอบโวลต์จดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุที่ออกแบบสร้างสามารถทนต่อแรงดันสูงที่ 110% ของแรงดันพิกัดนาน 60 วินาที โดยทำการทดสอบ 3 ครั้ง แสดงตามรูปที่ 4.8



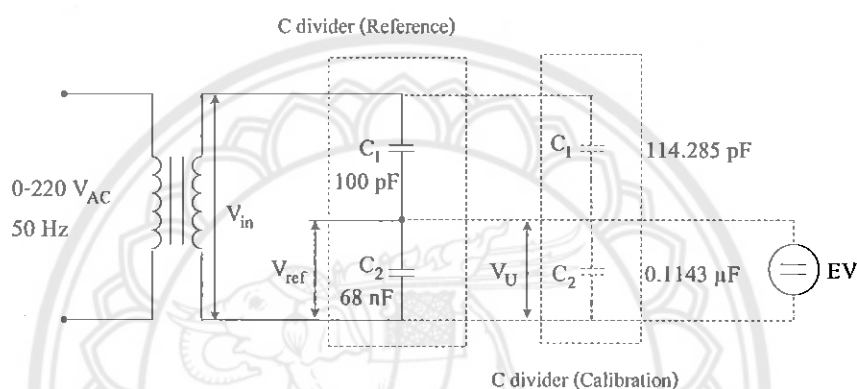
รูปที่ 4.8 วงจรการทดสอบความคงทนไฟฟ้าของโวลต์จดีไวเซอร์



#### 4.2.4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันสูงกระแสลับ

การทดสอบความเป็นเชิงเส้น เพื่อพิจารณาผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ ว่าค่าแรงดันที่วัดมีความเป็นเชิงเส้นหรือไม่ แสดงตามรูปที่ 4.9 โดยอัตราส่วนระหว่างแรงดันของระบบวัดจะอ้างอิงกับแรงดันของระบบวัดคังสมการที่ (4.2) ที่ทำการทดสอบจะต้องมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ของค่าเฉลี่ย ระบบวัดที่ทำการทดสอบจึงจะถือได้ว่ามีความเป็นเชิงเส้น

$$\text{ความเป็นเชิงเส้น} = \frac{V_U}{V_{ref}} (V_{AC}) \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.9 วงจรแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้น

#### 4.2.5 การทดสอบความมีเสถียรภาพของแรงดันสูงกระแสลับ

การทดสอบความมีเสถียรภาพ เพื่อเปรียบเทียบผลของระบบวัดแรงดันที่ต้องการทดสอบว่ามีแรงดันผิดเพี้ยนหรือคลาดเคลื่อนจากระบบวัดอ้างอิงหรือไม่ ที่ 100 kV แสดงตามรูปที่ 4.2 และสมการที่ (4.3) โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$

$$\text{แรงดันผิดเพี้ยน} = \frac{V_U - V_{ref}}{V_{ref}} \times 100\% \quad (4.3)$$

ค่าแรงดันที่ใช้ในการวัดเปรียบเทียบต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 20% ของพิกัดแรงดันสูงสุด ดังสมการที่ (4.4)

$$\text{แรงดันเปรียบเทียบ} = \frac{V_U}{V_{ref}} \quad (4.4)$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคำนวณได้ดังสมการที่ (4.5)

$$s = \sqrt{\frac{\sum (F_i - F_m)^2}{n-1}} \quad (4.5)$$

เมื่อ  $s$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
 $F_i$  คือ ค่าแรงดันระบบวัดอ้างอิงหารด้วยค่าแรงดันที่ต้องการทดสอบ  
 $F_m$  คือ ค่าเฉลี่ยของ  $F_i$



### 4.3 ผลการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV ใช้ฉนวนอากาศ, N<sub>2</sub> และ SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์

ขณะทำการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV ต้องมีการบันทึกค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นในอากาศด้วยเพราะมีผลกับการทดสอบ

- อุณหภูมิในห้อง 31.4°C
- ความชื้น 45 %

#### 4.3.1 ผลการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV ใช้ฉนวนอากาศ ที่ 2 บาร์

วงจรวัดทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV ใช้แรงดันสูงกระแสสลับ 100 kV<sub>rms</sub> ดังรูป

ที่ 4.2

##### 4.3.1.1 การทดสอบวัดค่าทางไฟฟ้า ในกรณีใช้ฉนวนอากาศ ที่ 2 บาร์

วัดโดยใช้เครื่องมือวัด RLC มิเตอร์ ค่าที่วัดนี้สามารถนำมาใช้กับแรงดันสูงกระแสตรงแรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ ดังรูปที่ 4.4 ได้ผลตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าทางไฟฟ้า ในกรณีใช้อากาศ ที่ 2 บาร์

ค่าทางไฟฟ้า	ค่าจากการคำนวณ	ค่าจากการวัดค่าโดยใช้เครื่องมือวัด	% ความผิดพลาด
C <sub>1</sub>	114.285 pF	113.00 pF	- 1.12%
C <sub>2</sub>	0.12 μF	0.122 μF	1.67%
R <sub>m</sub>	50 Ω	49.93 Ω	- 0.14%

เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> และ R<sub>m</sub> หาได้จากสมการที่ (4.6), (4.7) และ (4.8) ตามลำดับ

$$\% \text{ error, } C_1 = \left[ \frac{C_{1, \text{test}} - C_{1, \text{cal}}}{C_{1, \text{cal}}} \right] \times 100\% \quad (4.6)$$

$$\% \text{ error, } C_2 = \left[ \frac{C_{2, \text{test}} - C_{2, \text{cal}}}{C_{2, \text{cal}}} \right] \times 100\% \quad (4.7)$$

$$\% \text{ error, } R_m = \left[ \frac{R_{m, \text{test}} - R_{m, \text{cal}}}{R_{m, \text{cal}}} \right] \times 100\% \quad (4.8)$$

โดยที่ C<sub>1, test</sub>, C<sub>2, test</sub>, R<sub>m, test</sub> ได้จากการวัดค่าทดสอบ  
C<sub>1, cal</sub>, C<sub>2, cal</sub>, R<sub>m, cal</sub> ได้จากการออกแบบ

### 4.3.1.2 การทดสอบการทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันสูงกระแสสลับ

การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ เพื่อหาค่าอัตราส่วนแรงดันระหว่างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ที่พิกัด 50 kV และ 100 kV เพื่อความสะดวกในการแปลงกลับเป็นค่าจริงได้ง่าย โดยทำการทดสอบพิกัดละ 10 ครั้ง แสดงตามรูป ที่ 4.7 ผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันสูงกระแสสลับใช้นวนอากาศที่ 2 บาร์

ครั้งที่	แรงดันที่ใช้ทดสอบ					
	20 kV			30 kV		
	$V_{in}$ (kV <sub>AC</sub> )	$V_{ref}$ (V <sub>AC</sub> )	$V_U$ (V <sub>AC</sub> )	$V_{in}$ (kV <sub>AC</sub> )	$V_{ref}$ (V <sub>AC</sub> )	$V_U$ (V <sub>AC</sub> )
1	20.19	20.19	20.2	30.05	30.05	30.5
2	20.12	20.12	20.1	30.00	30.00	30.3
3	20.13	20.13	20.1	30.11	30.11	30.4
4	20.12	20.12	20.1	30.13	30.13	30.4
5	20.14	20.14	20.1	30.07	30.07	30.3
6	20.14	20.14	20.1	30.11	30.11	30.3
7	20.13	20.13	20.1	30.16	30.16	30.3
8	20.08	20.08	20.0	30.18	30.18	30.4
9	20.10	20.10	19.9	30.06	30.06	30.2
10	20.03	20.03	20.0	30.04	30.04	30.2
ค่าเฉลี่ย	20.11	20.11	20.07	30.09	30.09	30.33
ค่าสเกลแฟกเตอร์	1001.9 : 1			992.0 : 1		
% ความผิดพลาด	0.19%			-0.8%		

หมายเหตุ เนื่องจากเริ่มเกิดโคโรนาที่ 30 kV จึงทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ 20 kV และ 30 kV เท่านั้น

เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของสเกลแพกเตอร์ จากสมการที่ (2.19) ที่แรงดัน 20 kV มีค่า 0.19% และที่แรงดัน 30 kV มีค่า -0.8% ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 3\%$  จึงเป็นค่าที่ยอมรับได้

#### 4.3.1.3 การทดสอบความคงทนของแรงดันสูงกระแสสลับของโวลเตจดีไวเดอร์

การทดสอบความคงทนแรงดันไฟฟ้า เพื่อทำการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่ออกแบบสร้างสามารถทนต่อแรงดันสูงที่ 110% ของแรงดันพิกัดนาน 60 วินาที โดยทำการทดสอบ 3 ครั้ง แสดงตามรูปที่ 4.8 เลือกพิกัดแรงดันทดสอบที่ 30 kV ผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคงทนแรงดันไฟฟ้าของแรงดันสูงกระแสสลับ ใช้ฉนวนอากาศ ที่ 2 บาร์

ครั้งที่	พิกัดแรงดันทดสอบ (kV <sub>AC</sub> )	แรงดันทดสอบ (kV <sub>AC</sub> )	เวลา (s)	ผลการทดสอบ
1	30	30.18	60	ผ่าน
2	30	30.06	60	ผ่าน
3	30	30.04	60	ผ่าน

หมายเหตุ เนื่องจากเริ่มเกิดโคโรนาที่ 30 kV จึงทดสอบความคงทนที่ 30 kV

#### 4.3.1.4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันสูงกระแสลับ

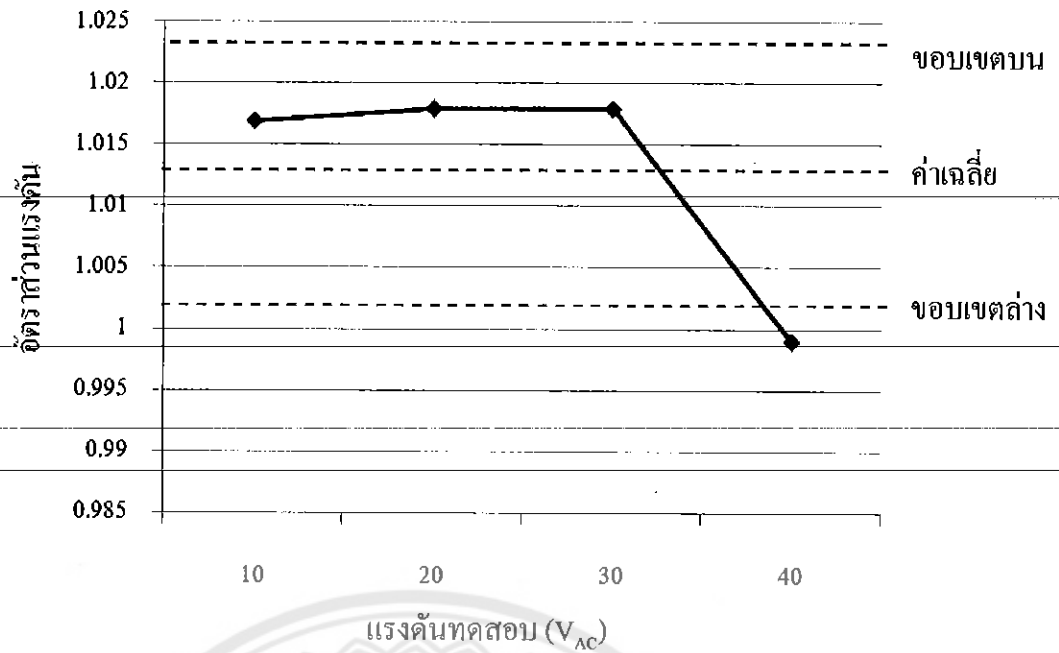
การทดสอบความเป็นเชิงเส้น เพื่อพิจารณาผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ ว่าค่าแรงดันที่วัดมีความเป็นเชิงเส้นหรือไม่ แสดงตามรูปที่ 4.9 โดยอัตราส่วนระหว่างแรงดันของระบบวัดจะอ้างอิงกับแรงดันของระบบวัดที่ทำการทดสอบจะต้องมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ของค่าเฉลี่ย และระบบวัดที่ทำการทดสอบถือได้ว่าเป็นเชิงเส้น ผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันสูงกระแสลับ ใช้ฉนวนอากาศ ที่ 2 บาร์

แรงดันทดสอบ	แรงดันเข้า	แรงดันอ้างอิง	ผลทดสอบ	ความเป็นเชิงเส้น	% ความผิดพลาด
$V_{in}$ (kV <sub>AC</sub> )	$V_{in}$ (kV <sub>AC</sub> )	$V_{ref}$ (V <sub>AC</sub> )	$V_U$ (V <sub>AC</sub> )	$\frac{V_U}{V_{ref}}$ (V <sub>AC</sub> )	
10	10.12	10.12	10.3	1.017	1.778%
20	20.03	20.03	20.4	1.018	1.847%
*30	30.03	30.03	30.6	1.018	1.898%
40	40.04	40.04	40.0	0.999	-0.099%
50	เพิ่มระดับแรงดันไม่ได้เนื่องจากโคโรนา			-	-
60	เพิ่มระดับแรงดันไม่ได้เนื่องจากโคโรนา			-	-
70	เพิ่มระดับแรงดันไม่ได้เนื่องจากโคโรนา			-	-
80	เพิ่มระดับแรงดันไม่ได้เนื่องจากโคโรนา			-	-
90	เพิ่มระดับแรงดันไม่ได้เนื่องจากโคโรนา			-	-
100	เพิ่มระดับแรงดันไม่ได้เนื่องจากโคโรนา			-	-
110	เพิ่มระดับแรงดันไม่ได้เนื่องจากเกินพิกัดของเครื่องกำเนิด			-	-
ค่าเฉลี่ย				1.013	
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.009345	

หมายเหตุ \* เริ่มเกิดโคโรนา

เนื่องจากค่าเฉลี่ยของแรงดันทดสอบต่อแรงดันอ้างอิง ( $\frac{V_U}{V_{ref}}$ ) มีค่าเท่ากับ 1.013 และขอบเขตของการยอมรับได้ตามมาตรฐาน IEC คือไม่เกิน  $\pm 1\%$  ดังนั้นขอบเขตบนของอัตราส่วนแรงดัน คือ  $(1+0.01) \times 1.013 = 1.023$  และขอบเขตล่างของอัตราส่วนคือ  $(1-0.01) \times 1.013 = 1.002$  เมื่อนำค่าอัตราส่วน ค่าเฉลี่ย ขอบเขตบนและขอบเขตล่างของอัตราส่วนแรงดันมาเขียนกราฟ จะได้ดังรูปที่ 4.10



**รูปที่ 4.10** กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของการวัดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ ใช้ฉนวนอากาศ  
ที่ 2 บาร

จากรูปที่ 4.10 มีอัตราส่วนแรงดันเท่ากับ 0.999 เพียงค่าเดียวที่ระดับแรงดัน 40 kV ที่ผลการ  
ทดสอบมีค่าต่ำกว่าขอบเขตล่าง

#### 4.3.1.5 การทดสอบความมีเสถียรภาพของไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ

การทดสอบความมีเสถียรภาพ เพื่อเปรียบเทียบผลของระบบวัดแรงดันที่ต้องการทดสอบ ว่ามีแรงดันผิดเพี้ยนหรือคลาดเคลื่อนจากระบบวัดอ้างอิงหรือไม่ ที่ 100 kV แสดงตามรูปที่ 4.2 โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ค่าแรงดันที่ใช้ในการวัดเปรียบเทียบต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 20% ของพิกัดแรงดันสูงสุด ผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความมีเสถียรภาพที่ระดับแรงดัน 30 kV ของแรงดันสูงกระแสสลับ  
ใช้ฉนวนอากาศ ที่ 2 บาร์

ครั้งที่	แรงดันเข้า $V_{in}$ (kV <sub>AC</sub> )	แรงดันอ้างอิง $V_{ref}$ (V <sub>AC</sub> )	ผลทดสอบ $V_U$ (V <sub>AC</sub> )	แรงดันผิดเพี้ยน $\frac{V_U - V_{ref}}{V_{ref}} \times 100\%$
1	30.05	30.05	30.5	1.497%
2	30.00	30.00	30.3	1.000%
3	30.11	30.11	30.4	0.963%
4	30.13	30.13	30.4	0.896%
5	30.07	30.07	30.3	0.764%
6	30.11	30.11	30.3	0.631%
7	30.16	30.16	30.3	0.464%
8	30.18	30.18	30.4	0.728%
9	30.06	30.06	30.2	0.465%
10	30.04	30.04	30.2	0.532%
ค่าเฉลี่ย	30.09	30.09	30.33	0.794%

หมายเหตุ เนื่องจากเริ่มเกิดโคโรนาที่ 30 kV จึงทดสอบความมีเสถียรภาพที่ 30 kV

ความมีเสถียรภาพของโวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นเครื่องมือวัดจะต้องมีแรงดันผิดเพี้ยนไม่เกิน  $\pm 3\%$  จากผลการทดสอบตามตารางที่ 4.5 ไม่มีค่าใดที่เกิน  $\pm 3\%$  แสดงให้เห็นว่าโวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นมามีเสถียรภาพในการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ



#### 4.3.2 ผลการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV ใช้ฉนวนก๊าซ $N_2$ ที่ 2 บาร์

วงจรวัดทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV ใช้แรงดันสูงกระแสลับ 100 kV<sub>rms</sub> ดังรูปที่ 4.2

##### 4.3.2.1 การทดสอบวัดค่าทางไฟฟ้า ในกรณีใช้ $N_2$ ที่ 2 บาร์

วัดโดยใช้เครื่องมือวัด RLC มิเตอร์ ค่าที่วัดนี้สามารถนำมาใช้กับแรงดันสูงกระแสตรง แรงดันสูงกระแสลับ และแรงดันอิมพัลส์ ดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.6 ค่าทางไฟฟ้า ในกรณีใช้  $N_2$  ที่ 2 บาร์

ค่าทางไฟฟ้า	ค่าจากการคำนวณ	ค่าจากการวัดค่าโดยใช้เครื่องมือวัด	% ความผิดพลาด
$C_1$	114.285 pF	113.00 pF	- 1.12%
$C_2$	0.12 $\mu$ F	0.122 $\mu$ F	1.67%
$R_m$	50 $\Omega$	49.93 $\Omega$	- 0.14%

#### 4.3.2.2 การทดสอบการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันสูงกระแสสลับ

การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ เพื่อหาค่าอัตราส่วนแรงดันระหว่างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ที่พิกัด 50 kV และ 100 kV เพื่อความสะดวกในการแปลงกลับเป็นค่าจริงได้ง่าย โดยทำการทดสอบพิกัดละ 10 ครั้ง แสดงตามรูป ที่ 4.7 ผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันสูงกระแสสลับ ใช้ฉนวน  $N_2$  ที่ 2 บาร์

ครั้งที่	แรงดันที่ใช้ทดสอบ					
	60 kV			90 kV		
	$V_{in}$ (kV <sub>AC</sub> )	$V_{ref}$ (V <sub>AC</sub> )	$V_U$ (V <sub>AC</sub> )	$V_{in}$ (kV <sub>AC</sub> )	$V_{ref}$ (V <sub>AC</sub> )	$V_U$ (V <sub>AC</sub> )
1	60.05	60.05	60.5	90.04	90.04	90.4
2	60.13	60.13	60.6	90.07	90.07	90.4
3	60.09	60.09	60.6	90.17	90.17	90.6
4	60.17	60.17	60.7	90.05	90.05	90.4
5	60.05	60.05	60.6	90.10	90.10	90.4
6	60.01	60.01	60.5	90.08	90.08	90.5
7	60.01	60.01	60.4	90.02	90.02	90.3
8	60.05	60.05	60.5	90.14	90.14	90.5
9	60.04	60.04	60.5	90.15	90.15	90.5
10	60.16	60.16	60.7	90.08	90.08	90.4
ค่าเฉลี่ย	60.07	60.07	60.56	90.09	90.09	90.44
ค่าสเกลแฟกเตอร์	991.9 : 1			996.1 : 1		
% ความผิดพลาด	-0.81%			-0.39%		

หมายเหตุ เนื่องจากเริ่มเกิดโคโรนาที่ 90 kV จึงทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ 60 kV และ 90 kV เท่านั้น

เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของสเกลแพกเตอร์ จากสมการที่ (2.19) ที่แรงดัน 60 kV มีค่า -0.81% ที่แรงดัน 90 kV มีค่า -0.39% มีความคลาดเคลื่อน  $\pm 3\%$  เป็นค่าที่ยอมรับได้

#### 4.3.2.3 การทดสอบความคงทนของแรงดันสูงกระแสสลับ ของโวลเตจดีไวเดอร์

การทดสอบความคงทนแรงดัน ไฟฟ้า เพื่อทำการทดสอบ โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่ออกแบบสร้างสามารถทนต่อแรงดันสูงที่ 110% ของแรงดันพิกัดนาน 60 วินาที โดยทำการทดสอบ 3 ครั้ง แสดงตามรูปที่ 4.8 เลือกพิกัดแรงดันทดสอบที่ 90 kV ผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบคงทนแรงดันไฟฟ้าของแรงดันสูงกระแสสลับ ใช้ฉนวน  $N_2$  ที่ 2 บาร์

ครั้งที่	พิกัดแรงดัน (kV <sub>AC</sub> )	แรงดันทดสอบ (kV <sub>AC</sub> )	เวลา (s)	ผลการทดสอบ
1	90	90.21	60	ผ่าน
2	90	90.14	60	ผ่าน
3	90	90.23	60	ผ่าน

หมายเหตุ เนื่องจากเริ่มเกิดโคโรนาที่ 90 kV จึงทดสอบความคงทนที่ 90 kV

#### 4.3.2.4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันสูงกระแสสลับ

การทดสอบความเป็นเชิงเส้น เพื่อพิจารณาผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ ว่าค่าแรงดันที่วัดมีความเป็นเชิงเส้นหรือไม่ แสดงตามรูปที่ 4.9 โดยอัตราส่วนระหว่างแรงดันของระบบวัดจะอ้างอิงกับแรงดันของระบบวัดที่ทำการทดสอบจะต้องมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ของค่าเฉลี่ย และระบบวัดที่ทำการทดสอบถือได้ว่าเป็นเชิงเส้น ผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 4.9

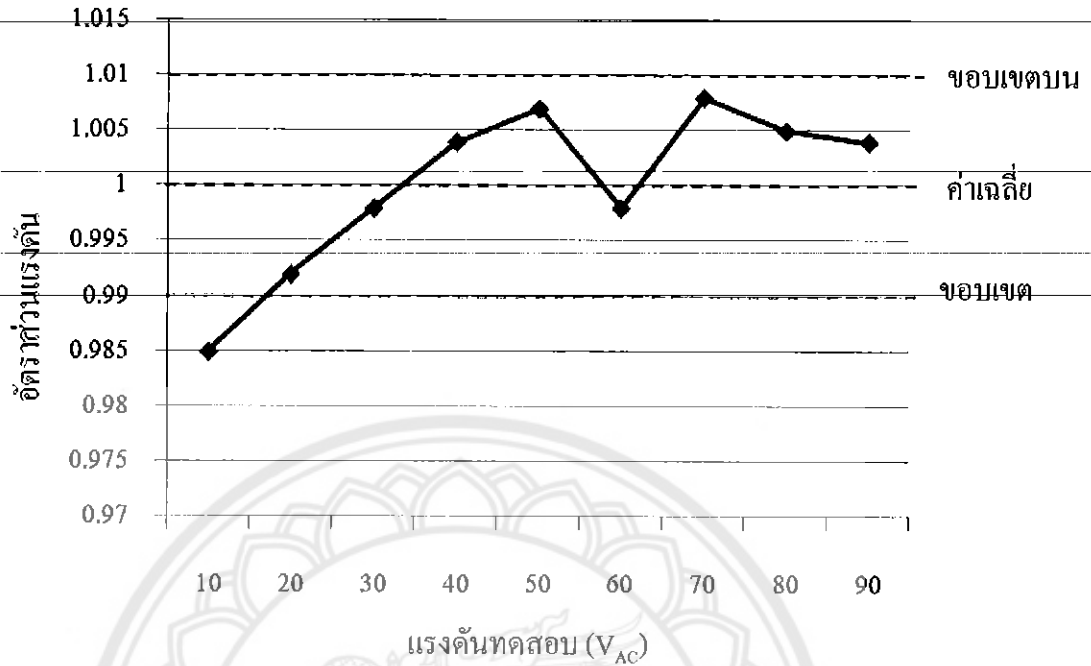
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันสูงกระแสสลับ ใช้จำนวน  $N_2$  ที่ 2 บาร์

แรงดันทดสอบ	แรงดันเข้า	แรงดันอ้างอิง	ผลทดสอบ	ความเป็นเชิงเส้น	% ความ
$V_{in}$ (kV <sub>AC</sub> )	$V_{in}$ (kV <sub>AC</sub> )	$V_{ref}$ (V <sub>AC</sub> )	$V_U$ (V <sub>AC</sub> )	$\frac{V_U}{V_{ref}}$ (V <sub>AC</sub> )	ผิดพลาด
10	10.05	10.05	9.9	0.985	-1.492%
20	20.06	20.06	19.9	0.992	-0.797%
30	30.06	30.06	30.0	0.998	-0.199%
40	40.13	40.13	40.3	1.004	0.423%
50	50.14	50.14	50.5	1.007	0.717%
60	60.17	60.17	60.7	0.998	0.880%
70	70.11	70.11	70.7	1.008	0.841%
*80	80.14	80.14	80.6	1.005	0.573%
90	90.01	90.01	90.4	1.004	0.333%
100	เพิ่มระดับแรงดันไม่ได้เนื่องจากโคโรนา			-	-
110	เพิ่มระดับแรงดันไม่ได้เนื่องจากเกินพิกัดของ เครื่องกำเนิด			-	-
ค่าเฉลี่ย				1.000	-
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.007639	

หมายเหตุ \* เริ่มเกิดโคโรนา

เนื่องจากค่าเฉลี่ยของแรงดันทดสอบต่อแรงดันอ้างอิง ( $\frac{V_U}{V_{ref}}$ ) มีค่าเท่ากับ 1.000 และขอบเขตของการยอมรับได้ตามมาตรฐาน IEC คือไม่เกิน  $\pm 1\%$  ดังนั้นขอบเขตบนของอัตราส่วนแรงดัน คือ  $(1+0.01) \times 1.000 = 1.010$  และขอบเขตล่างของอัตราส่วนคือ  $(1-0.01) \times 1.000 = 0.990$  เมื่อ

นำค่าอัตราส่วน, ค่าเฉลี่ย, ขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ของอัตราส่วนแรงดันมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ ใช้นวนวน  $N_2$  ที่ 2 บาร์

จากรูปที่ 4.11 มีอัตราส่วนแรงดันเท่ากับ 0.985 เพียงค่าเดียวที่ระดับแรงดัน 10 kV ที่ผลการทดสอบมีค่าเกินต่ำกว่าขอบเขตล่าง จากผลการทดสอบมีอัตราส่วนแรงดันไม่เกิน 5 ค่า ที่อยู่นอกขอบเขตไม่เกิน  $\pm 1\%$  จึงเป็นผลการทดสอบที่ยอมรับได้

#### 4.3.2.5 การทดสอบความมีเสถียรภาพของแรงดันสูงกระแสสลับ

การทดสอบความมีเสถียรภาพ เพื่อเปรียบเทียบผลของระบบวัดแรงดันที่ต้องการทดสอบ ว่ามีแรงดันผิดเพี้ยนหรือคลาดเคลื่อนจากระบบวัดอ้างอิงหรือไม่ ที่ 100 kV แสดงตามรูปที่ 4.2 โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ค่าแรงดันที่ใช้ในการวัดเปรียบเทียบต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 20% ของพิกัดแรงดันสูงสุด ผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความมีเสถียรภาพที่ระดับแรงดัน 90 kV ของแรงดันสูงกระแสสลับ

ใช้ฉนวน  $N_2$  ที่ 2 บาร์

ครั้งที่	แรงดันเข้า $V_{in}$ (kV <sub>AC</sub> )	แรงดันอ้างอิง $V_{ref}$ (V <sub>AC</sub> )	ผลทดสอบ $V_U$ (V <sub>AC</sub> )	แรงดันผิดเพี้ยน $\frac{V_U - V_{ref}}{V_{ref}} \times 100\%$
1	90.04	90.04	90.4	0.399%
2	90.07	90.07	90.4	0.366%
3	90.17	90.17	90.6	0.476%
4	90.05	90.05	90.4	0.388%
5	90.10	90.10	90.4	0.332%
6	90.08	90.08	90.5	0.466%
7	90.02	90.02	90.3	0.311%
8	90.14	90.14	90.5	0.399%
9	90.15	90.15	90.5	0.388%
10	90.08	90.08	90.4	0.352%
ค่าเฉลี่ย	90.09	90.09	90.44	0.387%

หมายเหตุ เนื่องจากเริ่มเกิดโคโรนาที่ 90 kV จึงทดสอบความมีเสถียรภาพที่ 90 kV

ความมีเสถียรภาพของโวลเตจดีไวเซอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นเครื่องมือวัดจะต้องมีแรงดันผิดเพี้ยนไม่เกิน  $\pm 3\%$  จากผลการทดสอบตามตารางที่ 4.10 ไม่มีค่าใดที่เกิน  $\pm 3\%$  แสดงให้เห็นว่าโวลเตจดีไวเซอร์ที่สร้างขึ้นมามีเสถียรภาพในการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ

#### 4.3.3 ผลการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV ใช้ฉนวนก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์

วงจรวัดทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV ใช้แรงดันสูงกระแสสลับ 100 kV<sub>rms</sub> ดังรูปที่ 4.2

##### 4.3.3.1 การทดสอบวัดค่าทางไฟฟ้า ในกรณีใช้ฉนวน SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์

วัดโดยใช้เครื่องมือวัด RLC มิเตอร์ ค่าที่วัดนี้สามารถนำมาใช้กับแรงดันสูงกระแสตรง แรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ ดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.11 ค่าทางไฟฟ้า ในกรณีใช้ฉนวน SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์

ค่าทางไฟฟ้า	ค่าจากการคำนวณ	ค่าจากการวัดค่าโดยใช้เครื่องมือวัด	% ความผิดพลาด
C <sub>1</sub>	114.285 pF	113.00 pF	- 1.12%
C <sub>2</sub>	0.12 μF	0.122 μF	1.67%
R <sub>m</sub>	50 Ω	49.93 Ω	- 0.14%

#### 4.3.3.2 การทดสอบการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันสูงกระแสสลับ

การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ เพื่อหาค่าอัตราส่วนแรงดันระหว่างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเซอร์ที่พิกัด 50 kV และ 100 kV เพื่อความสะดวกในการแปลงกลับเป็นค่าจริงได้ง่าย โดยทำการทดสอบพิกัดละ 10 ครั้ง แสดงตามรูป ที่ 4.7 ผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันสูงกระแสสลับ ใช้ฉนวน SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์

ครั้งที่	แรงดันที่ใช้ทดสอบ					
	50 kV			100 kV		
	V <sub>in</sub> (kV <sub>AC</sub> )	V <sub>ref</sub> (V <sub>AC</sub> )	V <sub>U</sub> (V <sub>AC</sub> )	V <sub>in</sub> (kV <sub>AC</sub> )	V <sub>ref</sub> (V <sub>AC</sub> )	V <sub>U</sub> (V <sub>AC</sub> )
1	50.15	50.15	50.1	100.2	100.2	101.5
2	50.15	50.15	50.1	100.1	100.1	101.4
3	50.02	50.02	49.9	100.2	100.2	101.5
4	50.05	50.05	50.0	100.0	100.0	100.9
5	50.10	50.10	50.0	100.1	100.1	101.2
6	50.12	50.12	50.1	100.0	100.0	100.7
7	50.12	50.12	50.0	100.0	100.0	100.8
8	50.01	50.01	49.9	100.1	100.1	101.0
9	50.01	50.01	50.0	100.1	100.1	101.9
10	50.08	50.08	50.0	100.2	100.2	101.0
ค่าเฉลี่ย	50.08	50.08	50.01	100.10	100.10	101.19
ค่าสเกลแฟกเตอร์	1001.3 : 1			989.2 : 1		
% ความผิดพลาด	1.3%			-1.08%		

เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของสเกลแฟกเตอร์ จากสมการที่ (2.19) ที่แรงดัน 50 kV มีค่า 1.3% ที่แรงดัน 100 kV มีค่า -1.08% มีความคลาดเคลื่อน  $\pm 3\%$  เป็นค่าที่ยอมรับได้

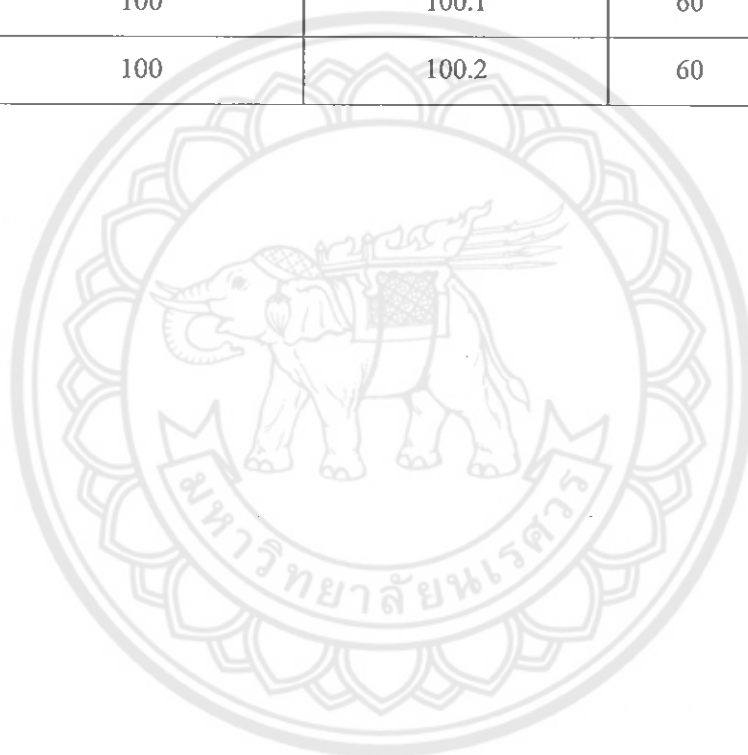


### 4.3.3.3 การทดสอบความคงทนของแรงดันสูงกระแสสลับของโวลเตจดีไวเดอร์

การทดสอบความคงทนแรงดันไฟฟ้า เพื่อทำการทดสอบ โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่ออกแบบสร้างสามารถทนต่อแรงดันสูงที่ 110% ของแรงดันพิกัดนาน 60 วินาที โดยทำการทดสอบ 3 ครั้ง แสดงตามรูปที่ 4.8 ผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบคงทนแรงดันไฟฟ้าของแรงดันสูงกระแสสลับ ใช้ฉนวน SF<sub>6</sub> ที่ 2-บาร์

ครั้งที่	พิกัดแรงดัน (kV <sub>AC</sub> )	แรงดันทดสอบ (kV <sub>AC</sub> )	เวลา (s)	ผลการทดสอบ
1	100	100.1	60	ผ่าน
2	100	100.1	60	ผ่าน
3	100	100.2	60	ผ่าน



#### 4.3.3.4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันสูงกระแสสลับ

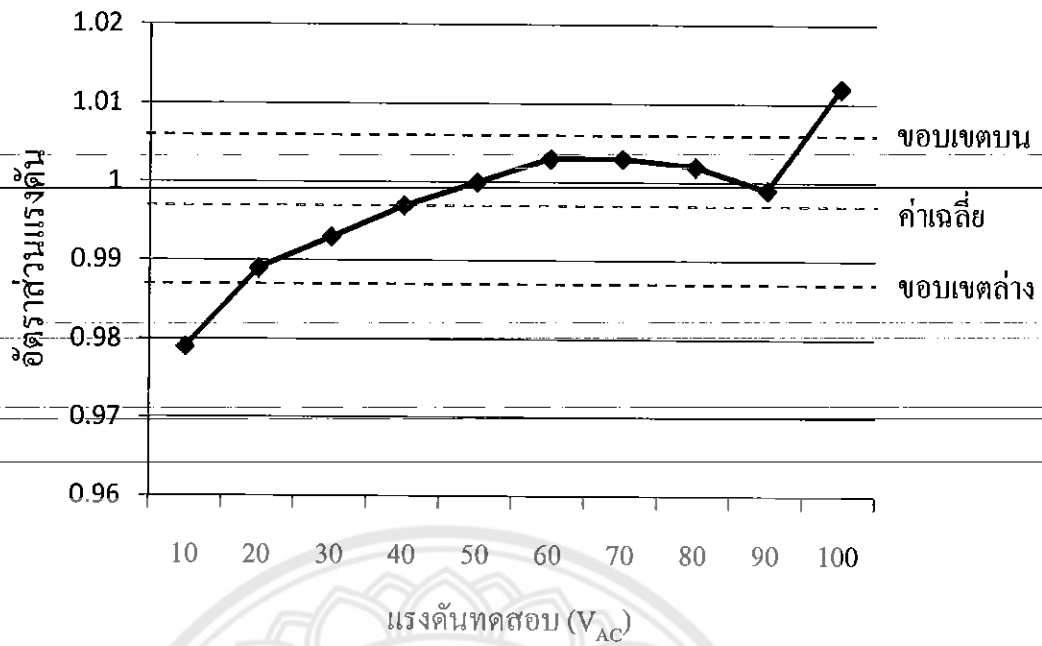
การทดสอบความเป็นเชิงเส้น เพื่อพิจารณาผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ ว่าค่าแรงดันที่วัดมีความเป็นเชิงเส้นหรือไม่ แสดงตามรูปที่ 4.9 โดยอัตราส่วนระหว่างแรงดันของระบบวัดจะอ้างอิงกับแรงดันของระบบวัดที่ทำการทดสอบจะต้องมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ของค่าเฉลี่ย และระบบวัดที่ทำการทดสอบถือได้ว่าเป็นเชิงเส้น ผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันสูงกระแสสลับ ใช้ฉนวน SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์

แรงดันทดสอบ	แรงดันเข้า	แรงดันอ้างอิง	ผลทดสอบ	ความเป็นเชิงเส้น	% ความผิดพลาด
V <sub>in</sub> (kV <sub>AC</sub> )	V <sub>in</sub> (kV <sub>AC</sub> )	V <sub>ref</sub> (V <sub>AC</sub> )	V <sub>U</sub> (V <sub>AC</sub> )	$\frac{V_U}{V_{ref}}$ (V <sub>AC</sub> )	
10	10.11	10.11	9.9	0.979	-2.077%
20	20.02	20.02	19.8	0.989	-1.098%
30	30.11	30.11	29.9	0.993	-0.697%
40	40.11	40.11	40.0	0.997	-0.274%
50	50.05	50.05	50.1	1.000	0.099%
60	60.07	60.07	60.3	1.003	0.383%
70	70.03	70.03	70.3	1.003	0.385%
*80	80.09	80.09	80.3	1.002	0.262%
90	90.09	90.09	90.0	0.999	-0.099%
100	100.1	100.1	101.4	1.012	1.298%
110	เพิ่มระดับแรงดันไม่ได้เนื่องจากเกินพิกัดของเครื่องกำเนิด				
ค่าเฉลี่ย				0.997	-
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.009031	

เนื่องจากค่าเฉลี่ยของแรงดันทดสอบต่อแรงดันอ้างอิง ( $\frac{V_U}{V_{ref}}$ ) มีค่าเท่ากับ 0.997 และ

ขอบเขตของการยอมรับได้ตามมาตรฐาน IEC คือ  $\pm 1\%$  ดังนั้นขอบเขตบนของอัตราส่วนแรงดัน คือ  $(1+0.01) \times 0.997 = 1.006$  และขอบเขตล่างของอัตราส่วนคือ  $(1-0.01) \times 0.997 = 0.987$  เมื่อนำค่าอัตราส่วน, ค่าเฉลี่ย, ขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ของอัตราส่วนแรงดันมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ ใช้ฉนวน SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์

จากรูปที่ 4.12 มีอัตราส่วนแรงดันเท่ากับ 0.979 ที่ระดับแรงดัน 10 kV ที่ผลการทดสอบมีค่าเกินต่ำกว่าขอบเขตล่างและอัตราส่วนแรงดันเท่ากับและ 1.012 ที่ระดับแรงดัน 100 kV ที่ผลการทดสอบมีค่าสูงเกินกว่าขอบเขตบน จากผลการทดสอบมีอัตราส่วนแรงดันไม่เกิน 5 ค่า ที่อยู่นอกขอบเขตไม่เกิน  $\pm 1\%$  จึงเป็นผลการทดสอบที่ยอมรับได้

#### 4.3.3.5 การทดสอบความมีเสถียรภาพของไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ

การทดสอบความมีเสถียรภาพ เพื่อเปรียบเทียบผลของระบบวัดแรงดันที่ต้องการทดสอบ ว่ามีแรงดันผิดเพี้ยนหรือคลาดเคลื่อนจากระบบวัดอ้างอิงหรือไม่ ที่ 100 kV แสดงตามรูปที่ 4.2 โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ค่าแรงดันที่ใช้ในการวัดเปรียบเทียบต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 20% ของพิกัดแรงดันสูงสุด ผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบความมีเสถียรภาพที่ระดับแรงดัน 100 kV ของแรงดันสูงกระแสสลับ

ใช้ฉนวน SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์

ครั้งที่	แรงดันเข้า V <sub>in</sub> (kV <sub>AC</sub> )	แรงดันอ้างอิง V <sub>ref</sub> (V <sub>AC</sub> )	ผลทดสอบ V <sub>U</sub> (V <sub>AC</sub> )	แรงดันผิดเพี้ยน $\frac{V_U - V_{ref}}{V_{ref}} \times 100\%$
1	100.2	100.2	101.5	1.297%
2	100.1	100.1	101.4	1.298%
3	100.2	100.2	101.5	1.297%
4	100.0	100.0	100.9	0.900%
5	100.1	100.1	101.2	0.599%
6	100.0	100.0	100.7	0.700%
7	100.0	100.0	100.8	0.800%
8	100.1	100.1	101.0	0.899%
9	100.1	100.1	101.9	1.798%
10	100.2	100.2	101.0	0.798%
ค่าเฉลี่ย	100.10	100.10	101.19	1.038%

ความมีเสถียรภาพของโวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นเครื่องมือวัดจะต้องมีแรงดันผิดเพี้ยนไม่เกิน  $\pm 3\%$  จากผลการทดสอบตามตารางที่ 4.15 ไม่มีค่าใดที่เกิน  $\pm 3\%$  แสดงให้เห็นว่าโวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นมามีเสถียรภาพในการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ

## บทที่ 5 สรุปผล

### 5.1 สรุปการออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ทดสอบแรงดันไฟฟ้าพิกัด 100 kV

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของโวลเตจดีไวเดอร์

ตัวแปร	คุณสมบัติที่ออกแบบ	คุณสมบัติที่วัดได้	%ความผิดพลาด
ฉนวน	SF <sub>6</sub>	SF <sub>6</sub>	-
พิกัดแรงดันไฟฟ้า	100 kV	100 kV	-
ความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง (C <sub>1</sub> )	114.285 pF	113.00 pF	- 1.12%
ความจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำ (C <sub>2</sub> )	0.12 μF	0.122 μF	- 1.67%
ความถี่	50 Hz	50 Hz	-
สเกลแฟกเตอร์ ที่ 100 kV	1000 : 1	989.2 : 1	- 1.08%
ค่าความผิดพลาด	±1%	±1%	-

ผลการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะเห็นได้ว่าโวลเตจดีไวเดอร์มีคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐาน IEC 60060 – 2 (1994) ได้กำหนดไว้

### 5.2 สรุปการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด 100 kV ใช้ฉนวน อากาศ, N<sub>2</sub> และ SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์

#### 5.2.1 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ทดสอบแรงดันไฟฟ้าพิกัด-100-kV-ใช้ฉนวนอากาศที่ 2 บาร์

1. ทดสอบสเกลแฟกเตอร์ โดยใช้ค่าความจุของภาคแรงสูง (C<sub>1</sub>) และภาคแรงต่ำ (C<sub>2</sub>) ที่วัดได้จริงจะมีสเกลแฟกเตอร์ไม่ตรงกับที่คำนวณเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของค่าความเก็บประจุย่อยที่นำมาประกอบกันเป็นภาคแรงสูง และแรงต่ำ ของโวลเตจดีไวเดอร์

2. ทดสอบความคงทนไฟฟ้าของฉนวน ในการทดสอบได้ทำการทดสอบความคงทนไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์ใช้ฉนวนอากาศที่ 2 บาร์ เนื่องจากเริ่มเกิดโคโรนาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 30 kV จึงทำการทดสอบความคงทนไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 30 kV โดยไม่สามารถทดสอบกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่า 30 kV ได้ ถ้าทดสอบกับแรงดันไฟฟ้าที่สูงเกินระดับแรงดันไฟฟ้า 30 kV อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์ภายในโวลเตจดีไวเดอร์ และอาจทำให้โวลเตจดีไวเดอร์เกิดความเสียหาย

3. ทดสอบความเป็นเชิงเส้น ผลที่ได้จากการทดสอบความเป็นเชิงเส้น ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.009345 ซึ่งมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ของค่าเฉลี่ย สรุปได้ว่าการนำอากาศ ที่ 2 บาร์ มาใช้เป็นฉนวนเพื่อใช้กับ โวลเตจดีไวเดอร์มีความเป็นเชิงเส้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 30 kV

4. ทดสอบความมีเสถียรภาพ จากการทดสอบความมีเสถียรภาพที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 30 kV ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากโวลเตจดีไวเดอร์ที่จัดสร้างขึ้นเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้อ้างอิงมีแตกต่างไม่เกิน  $\pm 3\%$  ของค่าเฉลี่ย ถือว่าโวลเตจดีไวเดอร์มีเสถียรภาพ

#### 5.2.2 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ทดสอบแรงดันไฟฟ้าพิกัด 100 kV ใช้ฉนวน $N_2$ ที่ 2 บาร์

1. ทดสอบสเกลแฟกเตอร์ โดยใช้ค่าความจุของภาคแรงสูง ( $C_1$ ) และภาพแรงต่ำ ( $C_2$ ) ที่วัดได้จริงจะมีสเกลแฟกเตอร์ไม่ตรงกับที่คำนวณเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของค่าความเก็บประจุย่อยที่นำมาประกอบกันเป็นภาคแรงสูง และแรงต่ำ ของ โวลเตจดีไวเดอร์

2. ทดสอบความคงทนไฟฟ้าของฉนวน ได้ทำการทดสอบความคงทนแรงดันไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้ฉนวน  $N_2$  ที่ 2 บาร์ จากการทดสอบเริ่มเกิดโคโรนาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 80 kV จึงทำการทดสอบความคงทนที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 90 kV โดยไม่สามารถทดสอบกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่า 90 kV ได้ ถ้าทดสอบกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงเกิน 90 kV อาจทำให้เกิดเบรกควาน์ และอาจทำให้โวลเตจดีไวเดอร์เกิดความเสียหายได้

3. ทดสอบความเป็นเชิงเส้น ผลที่ได้จากการทดสอบความเป็นเชิงเส้น ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.007639 ซึ่งมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ของค่าเฉลี่ย สรุปได้ว่าการนำ  $N_2$  ที่ 2 บาร์ มาใช้เป็นฉนวนเพื่อใช้กับ โวลเตจดีไวเดอร์มีความเป็นเชิงเส้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 90 kV

4. ทดสอบความมีเสถียรภาพ จากการทดสอบความมีเสถียรภาพที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ 90 kV ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากโวลเตจดีไวเดอร์ที่จัดสร้างขึ้นเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้อ้างอิงมีแตกต่างไม่เกิน  $\pm 3\%$  ของค่าเฉลี่ย ถือว่าโวลเตจดีไวเดอร์มีเสถียรภาพ

#### 5.2.3 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ทดสอบแรงดันไฟฟ้าพิกัด 100 kV ใช้ฉนวน $SF_6$ ที่ 2 บาร์

1. ทดสอบสเกลแฟกเตอร์ โดยใช้ค่าความจุของภาคแรงสูง ( $C_1$ ) และภาพแรงต่ำ ( $C_2$ ) ที่วัดได้จริงจะมีสเกลแฟกเตอร์ไม่ตรงกับที่คำนวณเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของค่าความเก็บประจุย่อยที่นำมาประกอบกันเป็นภาคแรงสูง และแรงต่ำ ของ โวลเตจดีไวเดอร์

2. ทดสอบความคงทนแรงดันไฟฟ้าของฉนวน ได้ทำการทดสอบความคงทนแรงไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์ ใช้ฉนวน  $SF_6$  ที่ 2 บาร์ ทำการทดสอบความคงทนที่ระดับแรงดันไฟฟ้า

100 kV แต่ไม่สามารถทดสอบกับระดับแรงดันที่แรงดันไฟฟ้า 110% ได้ เนื่องจากเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ามีพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 100 kV

3. ทดสอบความเป็นเชิงเส้น ผลที่ได้จากการทดสอบความเป็นเชิงเส้น ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.009031 ซึ่งมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ของค่าเฉลี่ย สรุปได้ว่าความเป็นฉนวนของ SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์ ที่ใช้กับโวลเตจดีไวเดอร์ มีความเป็นเชิงเส้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 100 kV

4. ทดสอบความมีเสถียรภาพ จากการทดสอบความมีเสถียรภาพที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 100 kV ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากโวลเตจดีไวเดอร์ที่จัดสร้างขึ้นเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้อ้างอิงมีแตกต่างไม่เกิน  $\pm 3\%$  ของค่าเฉลี่ย ถือว่าโวลเตจดีไวเดอร์มีเสถียรภาพ

### 5.3 การเปรียบเทียบผลของการทดสอบความฉนวนของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้ฉนวนอากาศ, N<sub>2</sub> และ SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์

จากการทดสอบฉนวนอากาศที่ 2 บาร์ สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ 30 kV แต่ไม่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าตามพิกัดของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบมาให้ทนแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 100 kV ได้ เนื่องจากเริ่มเกิดโคโรนาขึ้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 30 kV สังเกตได้จากเสียงที่ดังมาจากโวลเตจดีไวเดอร์ เมื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเสียงโคโรนาจะยิ่งดังขึ้น เมื่อเปรียบเทียบโวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้ก๊าซ ที่ 2 บาร์ เป็นฉนวนมีสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้น้อยกว่าก๊าซ N<sub>2</sub> ที่ 2 บาร์ และก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์ เมื่อนำมาใช้เป็นฉนวน

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถทนแรงดันไฟฟ้าระหว่างที่ใช้ก๊าซ N<sub>2</sub> ที่ 2 บาร์ เป็นฉนวนกับที่ใช้ก๊าซ ที่ 2 บาร์ เป็นฉนวน จากการทดสอบก๊าซ N<sub>2</sub> ที่ 2 บาร์ มีค่าความคงทนต่อระดับแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าอากาศ เนื่องจากก๊าซ N<sub>2</sub> ไม่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบจึงไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อหน้าสัมผัสต่างๆ หรือจุดเชื่อมต่อต่างๆ ที่อยู่ในโวลเตจดีไวเดอร์

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถทนแรงดันไฟฟ้าระหว่างก๊าซ N<sub>2</sub> ที่ 2 บาร์ กับก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์ จะสรุปได้ว่าก๊าซ N<sub>2</sub> ที่ 2 บาร์ เริ่มเกิดโคโรนาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 80 kV และสามารถขึ้นระดับแรงดันไฟฟ้าได้ถึง 90 kV แต่ยังไม่ถึงพิกัดแรงดันไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบมาให้ทนแรงดันไฟฟ้าได้ 100 kV เมื่อเทียบกับก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์ สามารถทนระดับแรงดันไฟฟ้าได้ถึง 100 kV ตามพิกัดของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบมา

### 5.4 สรุปผลการทดสอบ

การเปรียบเทียบความเป็นฉนวนของฉนวนก๊าซที่นำมาใช้กับโวลเตจดีไวเดอร์คืออากาศ ก๊าซ N<sub>2</sub> และก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์ สรุปได้ว่าความเป็นฉนวนโวลเตจดีไวเดอร์ที่ก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ 2 บาร์ มีความเป็นฉนวนดีที่สุด สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่มีแรงดันสูงและที่แรงดันต่ำได้ เมื่อเทียบกับ

โวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้ก๊าซ  $N_2$  และอากาศเป็นฉนวน และมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าครบถ้วนทุกประการ มีเสถียรภาพมั่นคงต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมี เราจึงเลือกนำก๊าซ  $SF_6$  มาเป็นฉนวน โวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV

### 5.5 สาเหตุของค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV

ค่าความผิดพลาดของตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นตัวเก็บประจุย่อยทั้งภาคแรงสูง ( $C_1$ ) และภาคแรงต่ำ ( $C_2$ ) มีค่าความคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง ทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมในภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่คำนวณ

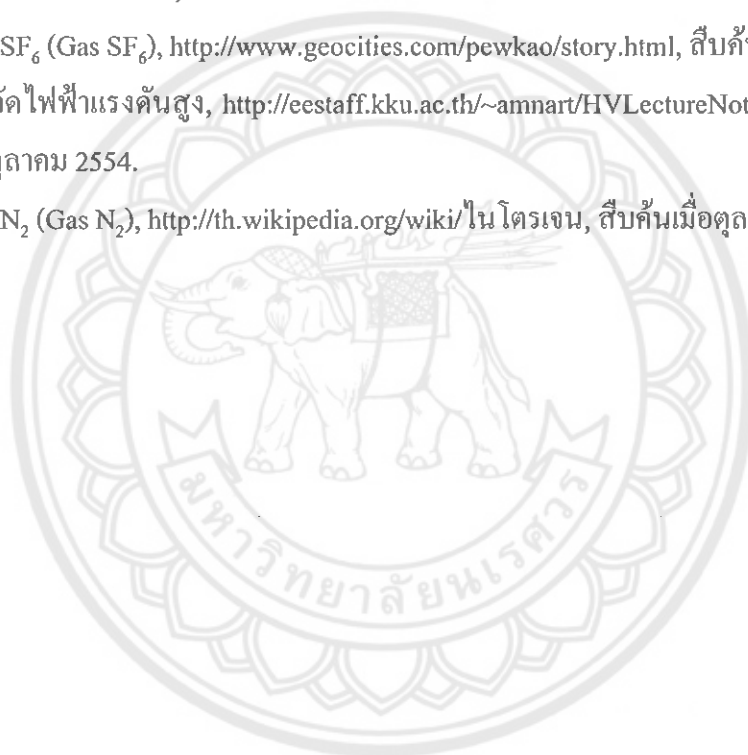
### 5.6 ข้อเสนอแนะ

1. การเลือกตัวเก็บประจุที่จะนำมาใช้ควรเป็นตัวเก็บประจุที่ทนต่อแรงดันสูงและมีค่าความผิดพลาดต่ำ
2. การต่อตัวเก็บประจุย่อยจะต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างชั้น และการเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุต้องพยายามไม่ให้มีส่วนแหลมคมเพราะจะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงตรงจุดที่มีความแหลมคมซึ่งอาจทำให้เกิดโคโรนา



## เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC Publication-60060-2, "High-voltage Test Techniques, Part-2 : Measuring Systems", Geneva, 1994.
- [2] สำรวย สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [3] กิตติศักดิ์ เต็มสิริมงคล, พนิดา อ่อนละมุล, วิชาญ อ้ายฝอย, "ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด 50 กิโลโวลต์", วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2551.
- [4] ก๊าซ SF<sub>6</sub> (Gas SF<sub>6</sub>), <http://www.geocities.com/pewkao/story.html>, สืบค้นเมื่อ ตุลาคม 2554.
- [5] การวัดไฟฟ้าแรงดันสูง, <http://eestaff.kku.ac.th/~amnart/HVlectureNote/HVM.doc>, สืบค้นเมื่อ ตุลาคม 2554.
- [6] ก๊าซ N<sub>2</sub> (Gas N<sub>2</sub>), <http://th.wikipedia.org/wiki/ไนโตรเจน>, สืบค้นเมื่อ ตุลาคม 2554.





## มาตรฐาน IEC 60060 - 2 IEC : 1994

ในมาตรฐาน IEC 60060 - 2 (1994) นั้นจะมีทั้งการทดสอบทั้งแรงดันสูงกระแสตรง แรงดันสูงกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ แต่ในการทดสอบโวลเตจดีไวเซอร์ในโครงการนี้ได้ใช้เกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐาน 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  $\pm 1\%$



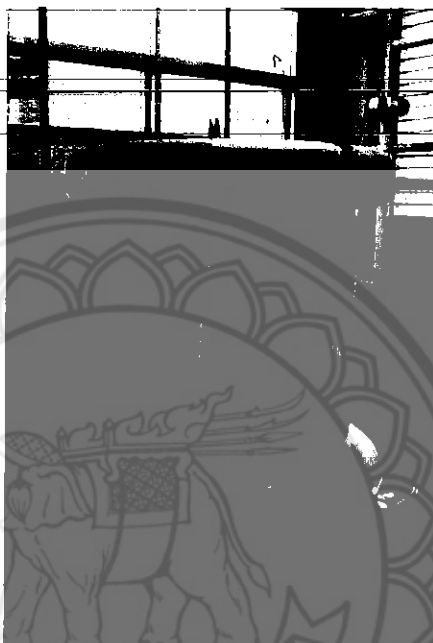
ภาคผนวก ข  
ส่วนประกอบของวงจรทดสอบโวลเตจดีไวเซอร์  
พิกัด 100 kV

## ส่วนประกอบของวงจรทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

เป็นเครื่องกำเนิดที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 V ให้มีขนาดแรงดันสูงกระแสสลับ

220 V – 100 kV เพื่อใช้ในการทดลองและทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ 220 V – 100 kV

Single phase AC voltage test transformer (PZT 100-0.1) ผลิตโดยบริษัท HAEFELY

Rated voltage 220/100 kV

Rated power 5 kVA, continuous 10 kVA, 1 hour

## โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงแบบตัวเก็บประจุ

ส่วนประกอบของโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงแบบตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ ข.2 และ ข.3

ตามลำดับ



รูปที่ ข.2 เครื่องมือวัดอ้างอิงแบบตัวเก็บประจุ ภาคแรงสูง

Measuring capacitor, CM ( $C_1$ )

Capacitance 100 pF

Max AC voltage 100 kV



รูปที่ ข.3 เครื่องมือวัดอ้างอิงแบบตัวเก็บประจุ ภาคแรงต่ำ

Secondary part for CM (AC), SEK AC ( $C_2$ )

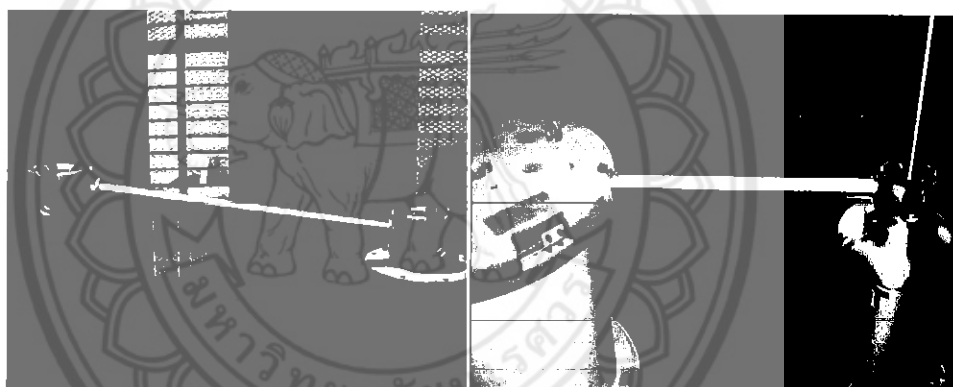
( $C_2$ ) = 68 nF



### สายตัวนำแรงสูง

เนื่องจากโวลเตจดีไวเคอร์ต้องอยู่ห่างจากวัสดุทดสอบหรือแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่ต้องการวัด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีสายตัวนำแรงสูง ดังรูปที่ ข.4 ซึ่งควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. ความยาวของสายตัวนำแรงสูงจึงต้องมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับความสูงของโวลเตจดีไวเคอร์ เพื่อลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและค่าเก็บประจุสเตรย์ลงคิน่าให้มีค่าน้อยลง
2. ควรให้สายตัวนำที่มีลักษณะเป็นซิลิค์
3. มีความต้านทานหน่วงต่ออันดับไว้ภายในสายตัวนำเพื่อลดปัญหาคลื่นจรบนสายตัวนำ
4. ขนาดของท่อหรือสายตัวนำควรจะต้องมีขนาด โคพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรนา ซึ่งจะเป็นคลื่นรบกวนต่อวงจรวัดแรงดันได้



รูปที่ ข.4 ตัวนำแรงสูง

### สายเคเบิลแรงต่ำ

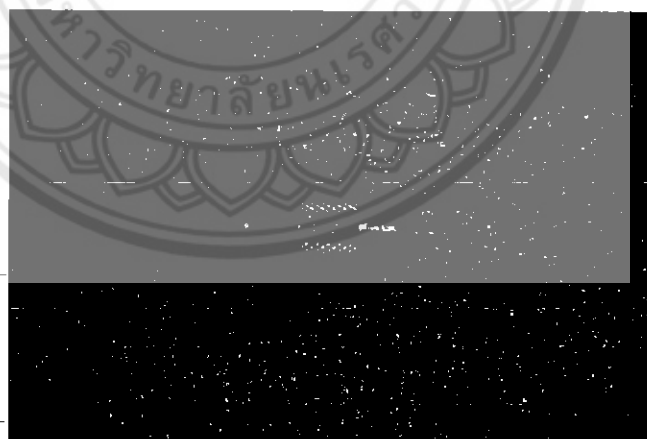
ถึงแม้ว่าจะใช้ออสซิลอสโคปที่มีค่าแรงดันป้อนเข้าที่กำหนดสูงก็ตาม เวลาใช้งานจริงๆ ไม่สามารถจะนำไปต่อเข้าโดยตรงกับภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเคอร์ได้ เพราะจะไม่ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติ และเพื่อลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้น้อยลง จำเป็นต้องตั้งออสซิลอสโคปกับเครื่องมือวัด ให้อยู่ห่างจากโวลเตจดีไวเคอร์พอสมควร ฉะนั้นการส่งสัญญาณแรงดันจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเคอร์มายังออสซิลอสโคป จึงต้องใช้สายเคเบิลวัดโดยทั่วไปเป็นแบบแกนร่วม เคเบิลแกนร่วมควรจะมีซิลิค์สองชั้น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในซิลิค์ อันเป็นส่วนหนึ่งของวงจรวัดแรงดันอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นรบกวนไปบนสัญญาณวัด ดังรูปที่ ข.5



รูปที่ ข.5 รูปสายเคเบิลแรงต่ำ

#### หัวต่อสายเคเบิล

ชนิดของสายเคเบิลที่เลือกใช้ตามข้อแนะนำของมาตรฐาน โดยแนะนำให้ใช้โคแอกเซียลชนิด RG8A/U ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 50  $\Omega$  โดยมีความยาวที่เหมาะสมไม่เกิน 15 m (50 ft) โดยใช้สายที่มีการลดทอนของสัญญาณน้อยและสามารถทนแรงดันสูงมีความถี่ใช้งานกว้าง ดังรูปที่ ข.6

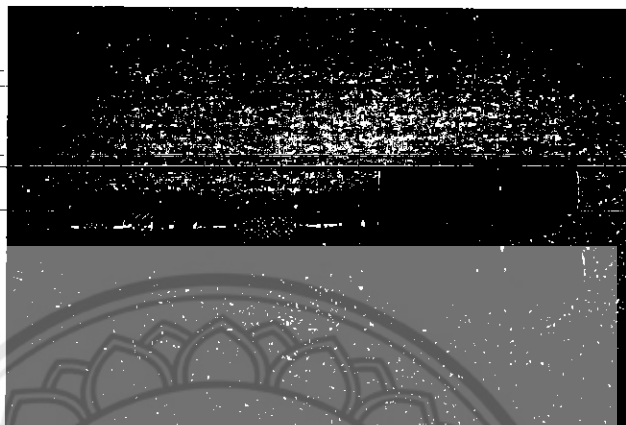


รูปที่ ข.6 หัวต่อสายเคเบิล

#### หัวต่อเข้าเครื่องมือวัดแรงต่ำ

การเลือกหัวต่อโดยใช้ชนิด N (Neill) ซึ่งเป็นตัวต่อแบบสกรู โดยใช้ค่าที่อิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมคือ 50  $\Omega$  และ 75  $\Omega$  ซึ่งมีแรงดันใช้งาน 1000  $V_{rms}$  ที่ระดับน้ำทะเลและแรงดัน

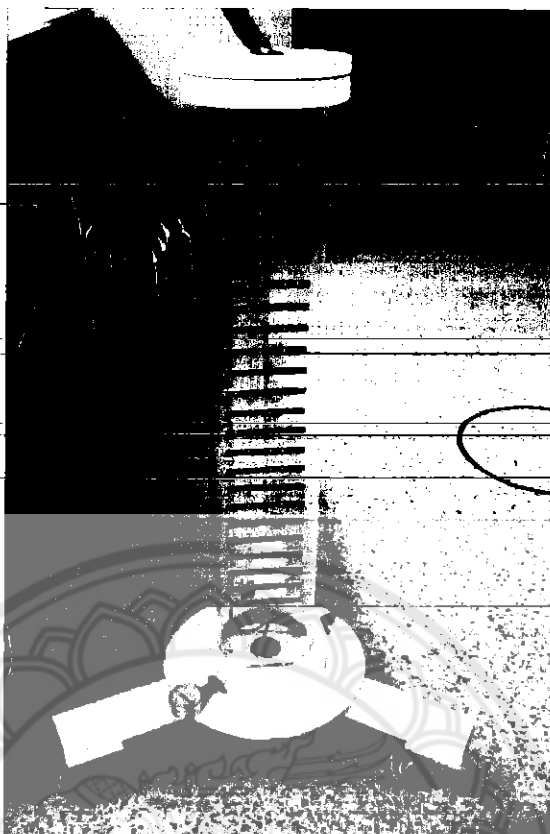
Withstanding dielectric ที่ระดับน้ำทะเลโดยใช้ที่ย่านความถี่ 0 - 1.5 GHz มีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ 75  $\Omega$  และย่านความถี่ 0 - 11 GHz มีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ 50  $\Omega$  ส่วนย่านอุณหภูมิล้อมรอบอยู่ระหว่าง  $-65^{\circ}\text{C}$  ถึง  $-165^{\circ}\text{C}$  ดังรูปที่ ข.7



รูปที่ ข.7 หัวต่อเข้าเครื่องวัดแรงต่ำ

#### โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า นั้นส่วนใหญ่จะนำไปใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้านั้นจะประกอบด้วย ตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงดันต่ำกับภาคแรงดันสูงต่ออันดับกัน ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้านั้นจะมีประมาณเท่าๆ กันกับของภาคแรงสูง ซึ่งค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูงนั้นจะต้องมีค่าไม่มากนัก เพื่อป้องกันไม่ให้เป็นโหลดแก่เครื่องกำเนิดแรงดัน ส่วนตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำนั้นจะมีค่าเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อลดทอนแรงดันสูงลงมาให้ต่ำพอที่จะใช้โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดภาคแรงต่ำมาวัดได้ ดังรูปที่ ข.8



รูปที่ ข.8 โวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุ ขนาด 100 kV

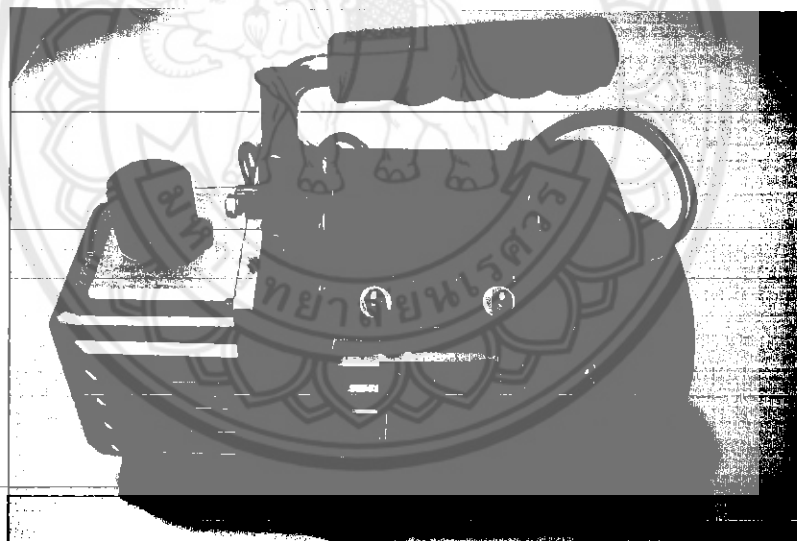




## อุปกรณ์การดูอากาศและการอัดก๊าซ



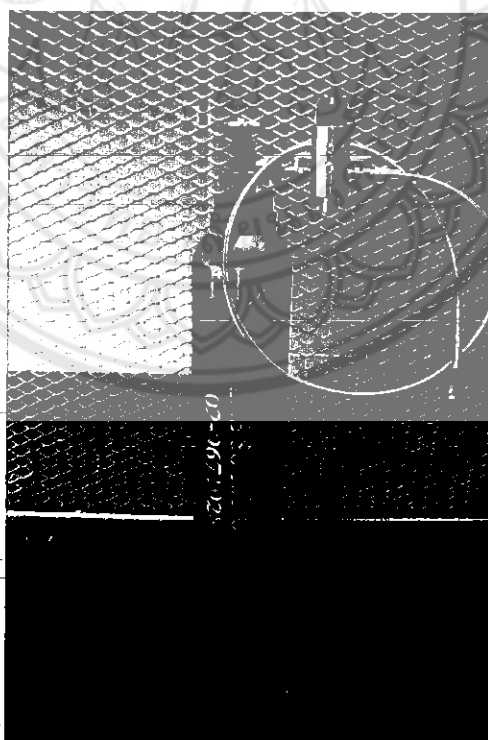
รูปที่ ค.1 ปืนอัดอากาศ



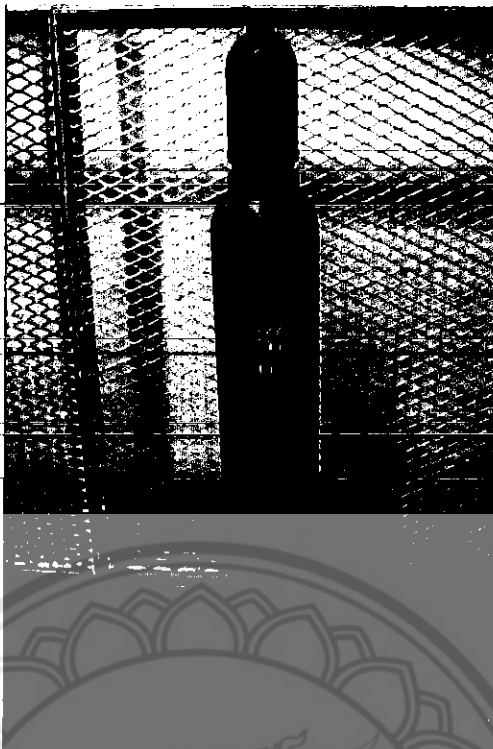
รูปที่ ค.2 แว้คัม



รูปที่ ค.3 เกจวัด



รูปที่ ค.4 ถังก๊าซ N<sub>2</sub>



รูปที่ ก.5 ถังก๊าซ SF<sub>6</sub>



รูปที่ ก.6 เกตวัดแรงดันของก๊าซภายในดีไวเซอร์





## สถานที่ทดสอบ

ตารางที่-ง.1 สถานที่ทดสอบ

สถานที่	ที่อยู่	หมายเลขโทรศัพท์
ห้องปฏิบัติการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า	
วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง	พระนครเหนือ	02-9132500
บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน	1518 ถนนพิบูลย์สงคราม แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800	
ห้องปฏิบัติการ วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง 3 หมู่ 2 ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520	02-7373000

## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายมนตรี เชื้อเมืองพาน

ภูมิลำเนา 148 หมู่ 4 ต.ป่าแวง อ.ป่าแดด จ.เชียงราย

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพานพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 7 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: [montree\\_17@hotmail.com](mailto:montree_17@hotmail.com)



ชื่อ นายปราโมทย์ ปั้นเจริญ

ภูมิลำเนา 4 หมู่ 6 ต.ลำพยนต์ อ.ตากฟ้า จ.นครสวรรค์

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนตากลีประชาสรรค์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 7 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: [mote\\_pt.enji@hotmail.com](mailto:mote_pt.enji@hotmail.com)